

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



BAKALÁRSKA PRÁCA
Tranzitující exoplanety

Richard Jánov

Vedúci bakalárskej práce: RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.

2011

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce RNDr. Miloslavovi Zejdovi, Ph.D. za cenné rady, pripomienky a trpezlivosť. Veľmi ďakujem Mgr. Marekovi Skarkovi za čas a vytrvalosť, ktoré mi venoval pri pozorovaní. V neposlednom rade chcem poďakovať všetkým, ktorí si bakalársku prácu prečítali a pomohli mi so štylistickou úpravou.

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu napísal samostatne a výhradne s použitím citovaných prameňov. Súhlasím so zapožičiavaním práce a jej zverejnením.

V Brně dňa 20.5.2011

Richard Jánov

Abstrakt:

Predložená bakalárska práca sa zaoberá štúdiom extrasolárnych planét pomocou metódy tranzitnej fotometrie. Metóda spočíva v meraní poklesu jasnosti v dôsledku prechodu planéty pred diskom materskej hviezdy. Cieľom práce je vykonať vlastné pozorovania niekoľkých tranzitov exoplanét a získané dáta použiť k spresneniu parametrov exoplanét.

Kľúčové slová: exoplanéta, svetelná krivka, tranzit.

Abstract:

The aim of the presented bachelor's thesis is to study extrasolar planets via the method of transit photometry. The method is based on detection of a decrease in brightness of a star caused by a planet moving across the disk of the stellar primary. The goal of my work is to perform my own observations of a number of transits of extrasolar planets and use the acquired data to specify the parameters of extrasolar planets.

Keywords: exoplanet, light curve, transit.

Obsah

1	Úvod	6
2	Charakteristika exoplanét	7
2.1	História objavovania	7
2.2	Definícia exoplanéty	9
2.3	Súčasnosť a kozmické sondy	10
3	Tranzitná fotometrická metóda	13
3.1	Svetelná krivka	13
3.2	Pravdepodobnosť tranzitu	13
3.3	Dĺžka trvania prechodu	15
3.4	Hĺbka poklesu jasnosti a tvar svetelnej krivky	15
3.5	Okrajové stemnenie hviezdy	17
3.6	Zdroje fotometrických chýb	19
3.6.1	Hviezdne variácie	19
3.6.2	Atmosferický nepokoj	19
4	Určovanie parametrov exoplanét	21
4.1	Polomer planéty	21
4.2	Stredná vzdialenosť	21
4.3	Inklinácia	22
4.4	Exoplanet Transit Database	22
5	Vlastné pozorovanie	25
5.1	Fitovanie parametrov tranzitu	26
5.2	O-C diagram	27
5.3	TrES-3b	28
5.4	WASP-3b	29

6	Výsledky	30
6.1	TrES-3b	30
6.2	WASP-3b	32
7	Záver	34
	Literatúra	35

Kapitola 1

Úvod

Skutočnosť, že naša hviezda je len jednou zo stoviek miliárd hviezd nachádzajúcich sa v našej galaxii prirodzene vyvoláva otázku, či niektoré z nich, alebo väčšina nemôže obsahovať planetárne systémy podobné tomu nášmu. Žijeme vo veľmi pozoruhodnej dobe a sme prvou generáciou, ktorá získala kladnú odpoveď na túto otázku. Programátori vytváranú programy, aby vedci dokázali popísať fyzikálne vlastnosti planét mimo našej slnečnej sústavy. Vyvíjame zariadenia na hľadanie dvojičiek Zeme. Prvýkrát v histórii sa ľudstvo ocitlo v situácii takého štádia technologického pokroku, že je schopné odpovedať na otázky, či existujú iné obývateľné svety alebo či sme prostredníctvom vedeckých metód schopní hľadať život na iných miestach vo vesmíre. Hľadanie extrasolárnych planét má dlhú a pestrú históriu. Z dôvodu enormného svetelného kontrastu medzi planétou a materskou hviezdou je priama detekcia planét fotografovaním blízkeho okolia najbližších hviezd mimoriadne obtiažna, a preto sa k detekcii exoplanét využívajú iné metódy. Bakalárska práca sa skladá z viacerých kapitol. Druhá kapitola je venovaná histórii prehlbovania poznatkov o exoplanétach a kozmickým projektom, ktoré sú zamerané na výskum extrasolárnych planét. Tretia kapitola podrobne rozoberá metódu tranzitnej fotometrie. Nasledujúce kapitoly sú venované vlastnému pozorovaniu, analýze a vyvodu záverov bakalárskej práce.

Kapitola 2

Charakteristika exoplanét

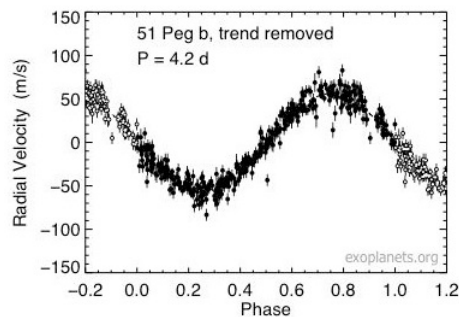
Extrasolárna planéta alebo skrátene exoplanéta je planéta nachádzajúca sa mimo našu slnečnú sústavu. Väčšina z nich sú plynné obry podobné Jupiteru. Detekcia exoplanét, ktoré majú hmotnosť len niekoľkokrát väčšiu ako Zem však naznačuje, že počet týchto exoplanét môže v blízkej budúcnosti prevýšiť počet plynných obrov. V súčasnosti vieme, že podstatná časť hviezd našej galaxie obsahuje planetárne systémy. V našej galaxii sa teda musia nachádzať miliardy exoplanét.

2.1 História objavovania

V období antického Grécka prišli s myšlienkou mnohosti a nekonečnosti svetov filozofovia Demokritos a Epikuros. Demokritos tvrdil, že vo vesmíre existuje nekonečný počet hviezd. Mliečnu cestu vysvetlil v podstate správne ako súbor obrovského počtu hviezd, ktoré vyplňajú vesmír. V 16. storočí pokračoval v rozvíjaní ich myšlienky taliansky mních Giordano Bruno, ktorý bol zástancom Koperníkovho heliocentrizmu a v porovnaní s Koperníkom navyše správne tvrdil, že ani Slnko nie je stredobodom vesmíru, ale len jednou hviezdou z nekonečného množstva hviezd, z ktorých mnohé môžu mať aj svoje planetárne systémy s obývanými svetmi. Bruno uverejnil svoje názory roku 1584, neskôr ho inkvizícia odsúdila ako kacíra a 17. marca 1600 ho upálili na Kvetnom námestí v Ríme. Isaac Newton v 18. storočí vyslovil rovnakú možnosť vo svojom diele *Principia*. Prvé hlásenia objavov objektov s hmotnosťami $10 M_j$ ¹ boli publikované počas druhej svetovej vojny, ale boli považované za kontroverzné s ohľadom na napozorované

¹ $M_j = 1898,6 \cdot 10^{24}$ kg (hmotnosť Jupitera)

výsledky a nezodpovedanú otázku, či detegované objekty môžu byť nazývané planétami [Recyl a E. Holmberg 1943, K. A. Strand 1943]. Veľa starostlivých pozorovaní v posledných dekádach viedlo k tomu, že tieto detekcie boli mylné. S výbornou myšlienkou pokúsiť sa nájsť planétu pri inej hviezde pomocou merania radiálnych rýchlostí prišiel Otto Struwe v roku 1952. Zdokonaľovanie presnosti astronomických meraní vyústilo oznámením objavu planéty na obežnej dráhe pri Barnardovej hviezde americkým astronómom Petrom van de Kampom v roku 1963. Jeho objav však bol od začiatku braný veľmi skepticky. O desať rokov jeho merania premerali Eichorn a Gatewood, avšak objav planéty sa nepotvrдил. V súčasnosti je objav van de Kampa braný ako chyba ďalekohľadu. V roku 1992



Obr. 2.1: Trend zobrazujúci zmenu radiálnych rýchlostí 51 Peg b [Zdroj: M. Mayor, D. Queloz et al. 1995]

A. Wolszczan a D. Frail objavujú prvú exoplanétu pri pulzare s označením PSR 1257+12 v súhvezdí Panny. V systéme boli nakoniec objavené hneď dve exoplanéty. Prelomovým rokom bol rok 1995 keď D. Queloz a M. Mayor objavili planétu s označením 51 Peg b². pri hviezde spektrálneho typu G2³. Planéta bola objavená metódou merania radiálnych rýchlostí ako je zobrazené na obrázku 2.1. Je prototypom pre triedu planét nazývaných horúci Jupiteri. Predstavuje asi polovicu hmotnosti planéty Jupiter, obežná doba planéty je 4,2 dňa, z čoho

²Názvy exoplanét sa skladajú z názvu materskej hviezdy a malého písmena latinskej abecedy, ktoré reprezentuje poradie exoplanéty od materskej hviezdy, čiže písmeno b predstavuje v poradí prvú planétu obiehajúcu materskú hviezdu. Ďalšie neobjavené planéty by mohli byť označované c,d,e a tak ďalej. . .

³Spektrálny typ v astronómii charakterizuje objekty na základe ich spektrálnych čiar, ktoré určujú chemické zloženie objektu. Spektrálne typy hviezd sú zoraďované podľa teploty od najteplejších po najchladnejšie písmenami O, B, A, F, G, K, M.

vyplýva, že je sedemkrát bližšie k materskej hviezde ako naše Slnko. Bola objavená pomocou metódy merania radiálnych rýchlostí. Exoplanéta HD 209458 b objavená v roku 1999 získala viacero prvenstiev. Jednak bola prvou exoplanétou objavenou tranzitnou metódou, ďalej prvou planétou, ktorej detegovali odparujúcu sa vodíkovú atmosféru obsahujúcu kyslík aj uhlík. V tom istom roku bol objavený planetárny systém s tromi masívnymi planétami taktiež pomocou metódy merania radiálnych rýchlostí pri hviezde *v* Andromedae. Hmotnosti planét sa pohybujú v rozmedzí od 0,69 až 3,75 násobku hmotnosti Jupitera a vzdialenosti planét sú v rozpätí od 0,059 do 2,53 AU⁴. Prvý snímok exoplanéty pochádza z roku 2005, keď medzinárodný tím astronómov potvrdil objav planéty s hmotnosťou 5 M_J, obiehajúcej hnedého trpazlíka 2M1207. Prvý viacnásobný planetárny systém bol nasnímaný v roku 2007 ďalekohľadmi Keck a Gemini. Pri hviezde HR 8799 boli objavené tri planéty s hmotnosťami 10, 10 a 7 M_J. Ďalšia planéta GJ 758b bola pozorovaná v novembri 2009 ďalekohľadom Subaru. K 23. Aprílu 2011 bolo metódou priameho zobrazenia objavených 24 exoplanét v 21 planetárnych sústavách.

2.2 Definícia exoplanéty

Oficiálna definícia planéty, použitá Medzinárodnou astronomickou úniou IAU sa vzťahuje len na planéty našej slnečnej sústavy a tým pádom nezahŕňa exoplanéty. Jediné stanovisko týkajúce sa definície exoplanéty vydané Medzinárodnou astronomickou úniou pozostáva z nasledujúcich kritérií:

- Objekty s hmotnosťou, ktorá je pod limitnou hmotnosťou potrebnou na začatie termonukleárnych reakcií (v súčasnosti počítame s hmotnosťami 13-tich Jupiterov u objektov, ktoré majú zastúpenie prvkov podobné Slnku), ktoré obiehajú okolo hviezdy alebo hviezdneho zvyšku sú planéty (bez ohľadu na to ako vznikli). Minimálna hmotnosť alebo veľkosť, potrebná na vznik extrasolárneho objektu tak, aby bol považovaný za planétu, by mala byť rovnaká ako v slnečnej sústave.
- Substelárne objekty s vlastnými hmotnosťami nad limitnou hmotnosťou potrebnou na termonukleárnu fúziu deutéria nazývame hnedí trpazlíci. Nezáleží na tom ako a kde sa sformovali.
- Objekty, ktoré nie sú gravitačne viazané s materskou hviezdou a nachádzajú sa v mladých hviezdokopách s hmotnosťami potrebnými na termonuk-

⁴Astronomical unit=149 597 870,7 km

leární fúziu deutéria nie sú nazývané planétami, ale podtriedou hnedých trpaslíkov.

Tiež bolo hlásených niekoľko detekcií blúdiacich planét, ktoré neobiehajú žiadne materské teleso. Niektoré z nich mohli kedysi patriť k hviezdnomu planetárnemu systému predtým než boli z neho vymrštené. Treba poznamenať, že rozpracovaná definícia nie je všeobecne prijímaná. Alternatívnym návrhom je, že planéty by mohli byť od hnedých trpaslíkov odlišené na základe spôsobu formovania.

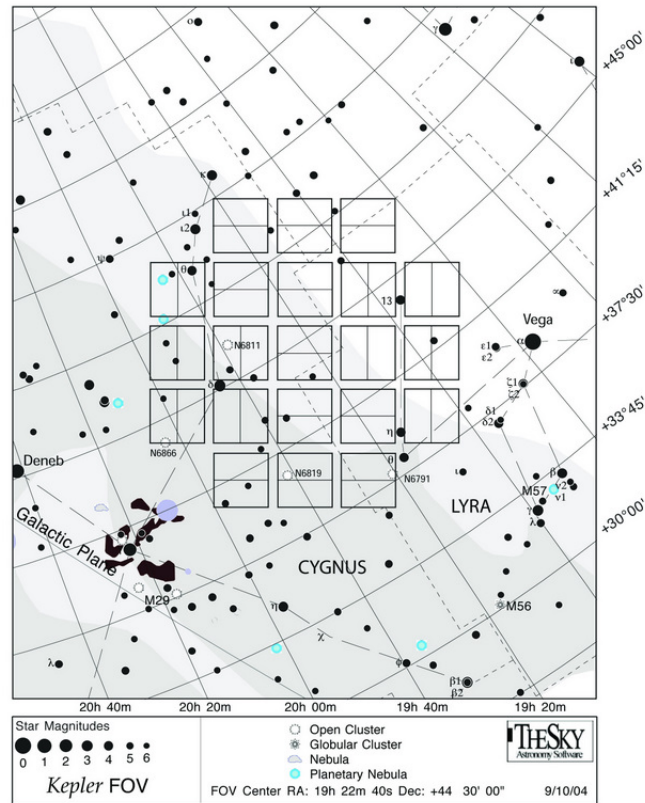
2.3 Súčasnosť a kozmické sondy

Kozmický lov na exoplanéty sa začal projektmi Spitzer, Corot a Kepler. Infračervené kozmické observatórium Spitzer pracuje na obežnej dráhe od roku 2003. Hlavné zrkadlo má priemer 0,85 metra. Spitzer zachytil priame svetlo z exoplanét HD 209458 b a TrES-1b. Významným krokom vpred bolo vypustenie sondy COROT v roku 2006 z dielne Francúzkej a Európskej vesmírnej agentúry. Význam misie spočíva predovšetkým v hľadaní exoplanét pomocou periodicky sa opakujúcich stemnení hviezdy. Tie môžu značiť prítomnosť planéty. Sonda monitoruje 120 000 hviezd. Dva hlavné ciele misie sú vyhľadávanie extrasolárnych planét s krátkou obežnou dobou, a vykonávať astroseizmologické merania oscilácií hviezdy, ktoré sú podobné osciláciám na našom Slnku. Priemer zrkadla ďalekohľadu je 0,27 m. Sonda obieha vo výške 827 km a má polárnu dráhu. V roku 2009 bol oznámený objav exoplanéty COROT-2b, s dovedy najmenším známym polomerom ($1,7R_z$ ⁵). Dlho očakávaným projektom bola mladá misia Kepler, ktorá pracuje od roku 2009 a primárne má hľadať exoplanéty podobajúce sa planétam zemského typu. Za úlohu má preskúmať 100 000 hviezd podobných Slnku v súhvezdiach Labuť a Lýra. Zatiaľ medzi najvýznamnejšie objavy Kepler-a patrí nález multiplanetárnych systémov pri hviezdach 55 Cnc, HD 10180 a Kepler-11. Hviezdu Kepler-11 obieha už šesť potvrdených planét, ktoré sú navyše všetky tranzitujúce, čiže pri nich vieme odhadnúť aj jednotlivé priemery. Hviezda sa nachádza vo vzdialenosti 2 000 svetelných rokov⁶ a je spektrálneho typu G5. Systém objavených planét je pravdepodobne kopianárnejší ako v našej slnečnej sústave a je najviac kompaktný aký zatiaľ poznáme. Obežné dráhy planét b-f by sa dali umiestniť do obežnej dráhy planéty Merkúr, pričom

⁵Polomer Zeme $R_z=6378$ km

⁶Svetelný rok (ly=light year) je vzdialenosť, ktorú svetlo prejde za jeden rok vo vákuu.
1 ly=9,46 · 10¹² km

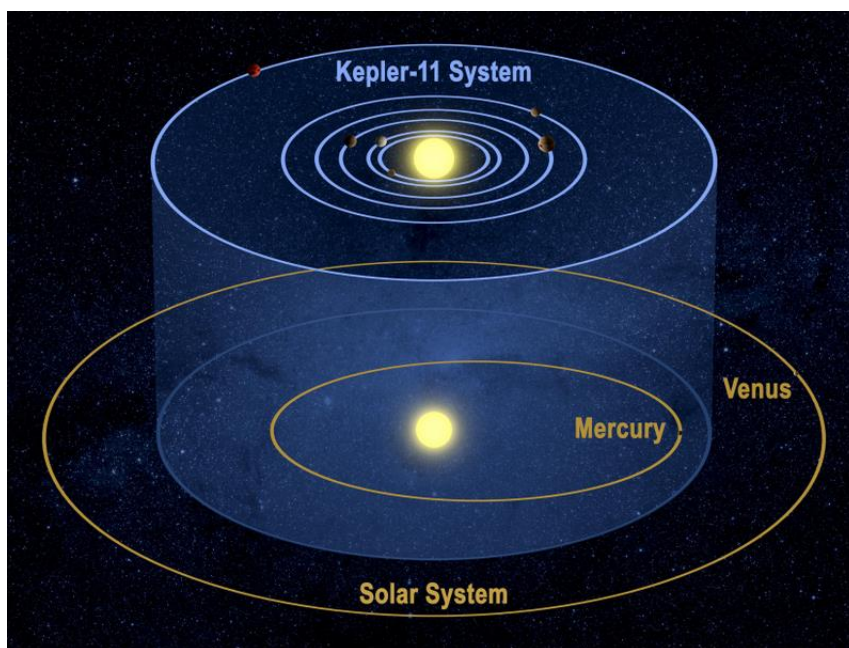
veľká poloos planéty g leží vo vzdialenosti 1,2krát väčšej ako je zobrazené na obrázku 2.3.



Obr. 2.2: Keplerom skúmaná časť hviezdnej oblohy

Medzi veľmi sľubnú misiu budúcnosti patrí aj infračervený vesmírny ďalekohľad Jamesa Webba, ktorého sústava zrkadiel bude zodpovedať priemeru 6,5 metra. Ďalekohľad je pripravovaný organizáciou NASA v spolupráci s Európskou vesmírnou agentúrou a Kanadskou kozmickou agentúrou. Úlohou bude pozorovanie tých najvzdialenejších objektov vo vesmíre, takých ktoré presahujú vzdialenosti pozorovateľné pomocou Hubblovho vesmírneho ďalekohľadu alebo pozemných staníc.

Primárnou vedeckou úlohou je pochopenie vzniku hviezd a planetárnych systémov, štúdium týchto systémov a vzniku života. Veľké očakávania sa kladú na projekt Terrestrial Planet Finder. Pôjde o unikátnu dvojicu spolupracujú-



Obr. 2.3: Porovnanie planetárneho systému Kepler-11 s dráhou Merkúra a Venuše

cich prístrojov. Prvým z nich bude koronograf TPF-C, ďalekohľad pracujúci vo vizuálnom a ultrafialovom obore, ktorý dokáže zacloniť svetlo centrálnej hviezdy (aby nerušilo) a prehľadávať jej okolie. Druhým prístrojom bude výkonný interferometer TPF-I v infračervenom obore. Skladá sa zo štyroch ďalekohľadov letiacich v pevnej formácii. Základným cieľom projektu je prehľadanie okolia 150 najbližších hviezd, vyhľadávanie oblastí vhodných pre život a nájdenie planét podobných našej Zemi. Vedci dúfajú, že nájdu planéty podobné Zemi, ale zariadenie by malo spoľahlivo odhaliť aj zlúčeniny nutné pre život alebo produkované životom samotným. Pôjde o najcitlivejšie infračervené observatórium sveta a tak sa môže očakávať detailné preskúmanie chladných miest vo vesmíre. K 11. máju 2011 máme potvrdených 548 exoplanét.

Kapitola 3

Tranzitná fotometrická metóda

Ak je planetárny systém vo vesmíre orientovaný tak, že obežná rovina planéty je koplanárna so smerom k pozorovateľovi, tak planéty budú periodicky obiehať pred diskom materskej hviezdy. Fotometrické alebo spektroskopické pozorovania týchto prechodov môžu byť použité k odvodeniu dráhových a fyzikálnych parametrov.

3.1 Svetelná krivka

Svetelná krivka je graficky vyjadrená závislosť zmien jasnosti vesmírneho telesa na čase. Na zvislú os vynášame jasnosť v magnitúdach a na vodorovnej je čas udávaný v juliánskom dátume alebo jeho zlomkoch. Svetelné zmeny môžu byť periodické napríklad u exoplanét, zákrytových dvojhviezd, céfeíd alebo nepravidelné ako v prípade nov, erupčných premenných hviezd, či supernov. Skúmaním svetelných kriviek môžeme za pomoci znalosti polomeru a hmotnosti materskej hviezdy určiť parametre extrasolárnej planéty.

3.2 Pravdepodobnosť tranzitu

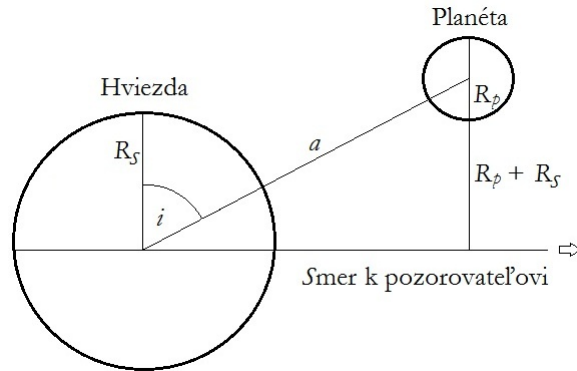
Najskôr je treba stanoviť pravdepodobnosť s akou nastávajú prechody planetárnych systémov s orientovanými obežnými rovinami. Pre jednoduchosť je nasledujúca situácia obmedzená na kruhovú dráhu. Je zrejmé, že prechody nastávajú len vtedy, ak

$$a \cdot \cos i \leq R_S + R_p, \quad (3.1)$$

kde a je polomer obežnej dráhy a i je inklinácia (uhol medzi normálou k obežnej dráhe planéty a smerom k pozorovateľovi). R_S je polomer hviezdy a R_p je polomer planéty. V systéme náhodne orientovaných dráh $\cos i$ môže nadobúdať hodnoty od 0 do 1. Pravdepodobnosť p_{trans} , že nastanú tranzity preto vyplýva priamo z rovnice:

$$p_{trans} = \frac{R_S + R_p}{a} \approx \frac{R_S}{a}. \quad (3.2)$$

Typické hodnoty sú v rozsahu od približne $5 \cdot 10^{-3}$ pre terestriálne planéty až po hodnoty rádovo 10^{-4} pre plynné obry. Okrem pravdepodobnosti danej rozmermi hviezdy, planéty a inklinácie trajektorie je limitujúca aj doba medzi dvomi po sebe nasledujúcimi prechodmi každej planéty cez disk hviezdy. Vo všeobecnosti musíme monitorovať tisíce hviezd, aby sme mohli objaviť niekoľko prechodov. Jednoduchšie je hľadanie „horúcich Jupiterov“, ktorí majú malé hodnoty a a P ,



Obr. 3.1: zobrazuje vzťahy jednotlivých parametrov exoplanéty pri tranzite: a -veľká poloos, R_S -polomer hviezdy, R_p -polomer planéty, i -inklinácia obežnej dráhy planéty.

a tým vysokú pravdepodobnosť tranzitu kvôli krátkym intervalom medzi jednotlivými zákrytmi. Jednoduchším je aj hľadanie v binárnych systémoch so známou hodnotou inklinácie binárneho systému, ktorého existencia predpokladá, že potenciálne planéty budú s najväčšou pravdepodobnosťou koplanárne s hviezd-
nym súputníkom.

3.3 Dĺžka trvania prechodu

Otázka, ktorú je potrebné riešiť, je dĺžka prechodov planét pre dané planéty. [Zdroj: Cassen et al. 2006] Dĺžka prechodu pre jednotlivé planéty je vyjadrená vzťahom:

$$t_{trans} = \frac{P}{\pi} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(R_S + R_p)^2 - a^2 \cos^2 i}}{a} \right), \quad (3.3)$$

kde P je obežná doba planéty. (Výraz pod druhou odmocninou vychádza z Pythagorovej vety a za predpokladu projekcie príslušného segmentu dráhy). Pre $a \gg R_S \gg R_p$ môže byť vzťah zjednodušený do tvaru:

$$t_{trans} = \frac{P}{\pi} \sqrt{\left(\frac{R_S}{a}\right)^2 - \cos^2 i}. \quad (3.4)$$

Maximálne hodnoty pre vzdialeného pozorovateľa v našej slnečnej sústave (zodpovedajúce hodnotám pre $i=90^\circ$) sa pohybujú v rozpätí od ôsmich hodín pre Merkúr až po dobu 71 hodín pre planétu Neptún čo je celkom priaznivé na monitorovanie.

3.4 Hĺbka poklesu jasnosti a tvar svetelnej krivky

Preto, aby sme boli schopní detegovať zákryt potrebujeme pozorovania s presnosťou približne o jeden rád väčšie ako je predpokladaný pokles jasnosti. Pre matematický popis môžeme v prvej aproximácii považovať hviezdu ako disk rovnomernej jasnosti. Relatívna zmena pozorovaného svetelného toku $\Delta F/F$ je vyjadrená vzťahom:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\pi R_p^2 B_S}{\pi R_S^2 B_S + \pi R_p^2 B_p} \approx \left(\frac{R_p}{R_S}\right)^2, \quad (3.5)$$

kde B_S a B_p sú jasnosti povrchov hviezdy a planéty. Vo väčšine rozoberaných prípadov platí: $B_p \ll B_S$. Pri sekundárnom zákryte (ak sa planéta nachádza za hviezdou) musí byť čitateľ zamenený za $\pi R_p^2 B_p$. Pri sekundárnom zákryte je preto pomer B_p/B_S plytší ako pri tranzite, čiže je to oveľa náročnejšie spozorovať. Pre výpočet tvaru svetelnej krivky v priebehu vstupov a výstupov počas prechodu si zdefinujeme $x \equiv d - R_S$, kde d je predpokladaná vzdialenosť planéty

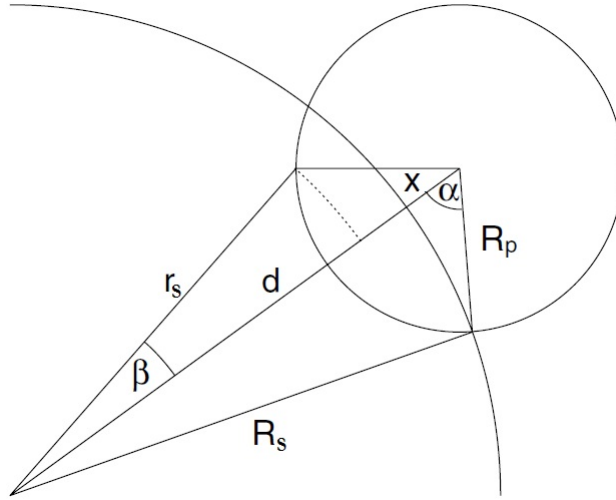
od hviezdy. Časová závislosť na d je:

$$d(t) = a\sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 i \cos^2 \omega t}, \quad (3.6)$$

kde $\omega = 2\pi/P$. Za predpokladu rovnomerného disku, je zmena jasnosti úmerná časti disku zakrytého planétou. Ak urobíme ďalší predpoklad, že $R_p \ll R_S$ potom segment časti hviezdy, cez ktorý sa pohybuje planéta môžeme považovať za priamku. Polovica zakrytej plochy je potom daná uhlom α , mínus trojuholník so stranami x a R_p ako je zobrazené na obrázku 3.2. Celková zatienená plocha je teda

$$A \approx 2 \left(\frac{1}{2} \alpha R_p^2 - \frac{1}{2} x \sqrt{R_p^2 - x^2} \right) = R_p^2 \arccos \left(\frac{x}{R_p} \right) - x \sqrt{R_p^2 - x^2}. \quad (3.7)$$

Ak položíme $x(t) = d(t) - R_S$ tak dostaneme požadovaný tvar svetelnej krivky. Ak planéta nemôže byť považovaná za malú v porovnaní s hviezdou, alebo ak musia byť zahrnuté efekty okrajového stemnenia, musíme integrovať cez zakrytú časť hviezdneho disku, ktorá je najlepšie vyjadrená v polárnych súradniciach.



Obr. 3.2: Plocha zakrytá planétou a zdefinovanie geometrických veličín použitých pri výpočte tranzitujúcich svetelných kriviek

Naším cieľom je zintegrovat' dvojnásobok dĺžky bodkovaného oblúku, ktorý je zobrazený na obrázku 3.2 od $d - R_p$ do R_S . Dĺžka tohoto oblúku je $r_s \beta$. Použitím

kosínusovej vety pre trojuholník so stranami R_p , d , r_S dostaneme vzťah

$$R_p^2 = d(t)^2 + r_S^2 - 2r_S d(t) \cos \beta . \quad (3.8)$$

Z matematického hľadiska môžeme formálne zapísať

$$A = 2 \int_{\max(0, d(t) - R_p)}^{\min(R_S, d(t) + R_p)} r_S \arccos[\Theta(t)] dr_S , \quad (3.9)$$

kde

$$\Theta(t) \equiv \begin{cases} \frac{d^2(t) + r_S^2 - R_p^2}{2r_S d(t)} & \text{pre } r_S > R_p - d(t) \\ -1 & \text{ináč.} \end{cases} \quad (3.10)$$

Tvar poklesu svetelnej krivky potom môže byť numericky vypočítaný prostredníctvom vzťahu

$$\frac{\Delta F(t)}{F} = -\frac{A(t)}{\pi R_S^2} , \quad (3.11)$$

kde máme stále zanedbané okrajové stemnenie. Po počiatočnom strmom poklese počas vstupu zostáva jasnosť konštantná, kým sa celý disk planéty nedostane pred hviezdu (za predpokladu, že platí $a \cos i \leq R_S - R_p$); V tejto fáze aplikujeme rovnicu 3.5. Jeho dĺžka trvania t_{flat} je daná vzťahom

$$t_{flat} = \frac{P}{\pi} \arccos \left(\frac{\sqrt{(R_S - R_p)^2 - a^2 \cos^2 i}}{a} \right) . \quad (3.12)$$

Toto vyjadrenie môže byť odvodené rovnakým spôsobom ako vzťah 3.3; len proste musíme presúvať planetárny disk tak, aby sa dotýkal disku hviezdy z vnútra. Nárast jasnosti počas výstupu je symetrický k poklesu zo začiatku prechodu.

3.5 Okrajové stemnenie hviezdy

V presnejších modeloch musíme zobrať do úvahy okrajové stemnenie materskej hviezdy. Jedná sa o pokles jasnosti disku hviezdy od centra k okraju. Okrajové stemnenie spôsobuje fakt, že hviezda nevyžaruje energiu ako absolútne čierne teleso. Dobrým príkladom okrajového stemnenia je pohľad na fotosféru nášho Slnka, kde môžeme jednoducho spozorovať, že okrajové časti disku hviezdy sú tmavšie ako centrálné. Najjednoduchší spôsob, ktorým môžeme opísať okrajové stemnenie je lineárny zákon okrajového stemnenia

$$I(\mu) = I(0)[1 - a(1 - \mu)] . \quad (3.13)$$

Ďalšími príkladmi môže byť napríklad odmocninový zákon okrajového stemnenia

$$I(\mu) = I(0)[1 - b_1(1 - \mu) - b_2(1 - \sqrt{\mu})] \quad (3.14)$$

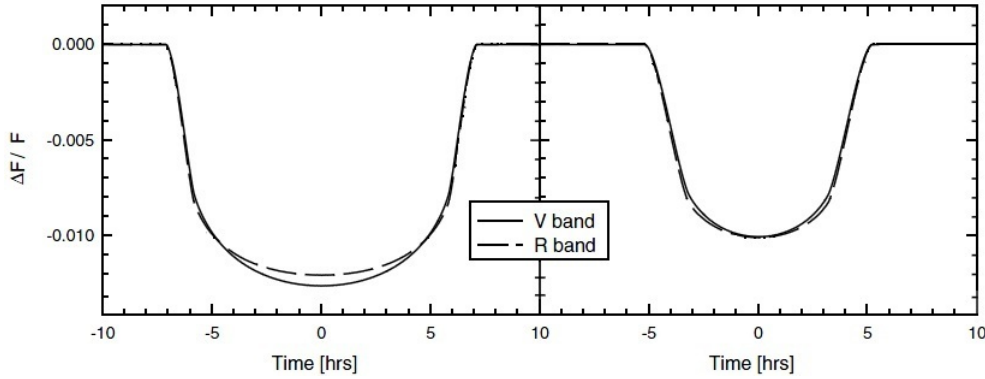
alebo zákon logaritmický

$$\mu = I(0)[1 - c_1(1 - \mu) - c_2\mu \ln \mu]. \quad (3.15)$$

Nelineárny zákon okrajového ztemnenia

$$I(\mu) = I(0)\left(1 - \sum_{k=1}^4 n_k(1 - \mu^{\frac{k}{2}})\right) \quad (3.16)$$

Vo všetkých rovniciach je $I(\mu)$ intenzita v mieste na disku danom hodnotou μ , kde $\mu = \sqrt{1 - \left(\frac{r_S}{R_S}\right)^2}$ a $I(0)$ je intenzita v centrálnej časti disku. Konštanty a , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 , n_k sú koeficienty okrajového stemnenia. Ich veľkosť závisí na vlastnostiach hviezdy, efektívnej teplote a gravitačnom zrýchlení na povrchu hviezdy. Efekt okrajového stemnenia je výraznejší pre kratšie vlnové dĺžky. Pretože hĺbka



Obr. 3.3: Svetelné krivky tranzitu planéty podobnej Jupiteru vo vzdialenosti 1 AU na obežnej dráhe okolo hviezdy podobnej Slnku. Tranzit je dlhší a hlbší pre $i=90^\circ$ (vľavo) ako pre $i=89,8^\circ$ (vpravo) [Zdroj: Cassen et al. 2006].

poklesu má vplyv na určenie polomeru planéty, bude hodnota získaná vo filtre R menšia ako vo filtri V . Svetelné krivky na obrázku 3.3 boli vypočítané s použitím koeficientov okrajového stemnenia pre logaritmický model pri efektívnej teplote $T_{eff} = 5770$ K.

3.6 Zdroje fotometrických chýb

Presnosť fotometrických pozorovaní je v konečnom dôsledku limitovaná šumom fotónov a (pre slabšie hviezdy) šumom pozadia. Tieto chyby môžu byť znížené zvýšením času expozície, pretože sa znižujú stupňom $T^{\frac{1}{2}}$. Existuje mnoho systematických vplyvov, ktoré však často bránia dosiahnutiu teoretických limitov. Najdôležitejšie zdroje chýb popíšeme v nasledujúcich sekciách.

3.6.1 Hviezdne variácie

Pri pohľade na naše Slnko môžeme identifikovať veľa rôznych mechanizmov zapríčínujúcich zmeny emitujúceho toku. Príkladom sú oscilácie, slnečné škvrny, erupcie, protuberancie a granulácia povrchu. Hviezdne aktivita je veľmi spätá so spektrálnym typom a vekom konkrétnej hviezdy. Veľa červených hviezd spektrálneho typu M sa vyznačuje zábleskami s amplitúdami až do prvej magnitúdy [Allard et al. 1997]. Mnoho typov binárnych systémov sa vyznačuje periodickými zmenami jasnosti alebo vzájomnými zákrytmi zložiek systému. Dôkladné prehliadky tranzitov, ktoré monitorujú tisíce hviezd sú teda veľmi dobré na detekciu premenných hviezd, ale musíme byť schopní odlíšiť ich od planetárnych tranzitov, ktoré hľadáme. Našťastie, tranzity majú krátku dĺžku trvania a veľmi charakteristický tvar, takže je možné hľadať tieto udalosti v svetelných krivkách, ktoré môžu byť ináč zašumené. Slnko vykazuje rozdiely žiarivého toku približne do $\sim 0,15\%$, ktoré sú badateľné na časových škálach dlhších ako niekoľko dní. Preto, aspoň okolo hviezd podobných Slnku, by malo byť možné jasne odlíšiť tranzity od premien súviciacich s hviezdou aktivitou a to aj pre planéty s polomerom Zeme.

3.6.2 Atmosferický nepokoj

Zemská atmosféra limituje presnosť, ktorá môže byť dosiahnutá pomocou pozemských fotometrických pozorovaní. Efekty, ktoré považujeme za najviac ovplyvňujúce presnosť sú scintilácia, zmena extinkcie v závislosti na čase a zenitovej vzdialenosti a seeing. Scintilácia je najväčšia pre malé aparatúry a pre krátke integračné časy. Kvantitatívne odhady [Dravins et al. 1998] zúžené na parametre, ktoré sú dôležité pre vyhľadávanie planetárnych tranzitov, naznačujú, že scintilácia nie je limitujúcim faktorom. Zmeny extinkcie vyvolané v dôsledku pohybu vzdušných mäs počas pozorovania alebo iných fotometrických podmienok

je oveľa ťažšie spracovať. CCD¹ fotometria všeobecne ponúka významné výhody oproti meraniu klasickým jednonábovým alebo dvojnábovým fotometrom. Ak je pole CCD kamery dostatočne veľké, môžeme robiť fotometriu veľa hviezd zároveň. Eliminujeme fluktuácie v extinkcii spôsobené zmenou vzdušných mäs. Ak je v poli dostatok hviezd, je možné vykonať ešte lepšiu fotometrickú kalibráciu tým, že zoberieme do úvahy farebné podmienky. Vzhľadom k tomu, že dynamický rozsah CCD čipu je obmedzený, je užitočné nastaviť rozsah medzi najjasnejšou a najslabšou hviezdou o nie viac ako ~ 4 magnitúdy. Je ironické, že CCD fotometria je preto ťažšie použiteľná pre veľmi jasné hviezdy, pretože pre ne je kontrast k potenciálnym porovnávacím hviezdám v rámci zorného poľa veľmi veľký. Zmeny v šírke a tvare obrazu bodového zdroja v dôsledku krátkodobých zmien alebo zmeny seeingu z noci na noc môžu byť seriálnym zdrojom chýb. Obrazy hviezd potom môžu byť úplne oddelené počas dobrej noci môžu byť zmiešané dohromady, keď bol seeing zlý, čo však môže zaviesť ďalšie závažné fotometrické chyby. V súčasnosti sa používajú tri fotometrické metódy: apertúrna fotometria, ktorá meria tok v rámci kruhu so špecifickým polomerom na mieste každej hviezdy [DAOPHOT, Stetson 1987], profilová fotometria, ktorá fituje model obrazu bodového zdroja s premenlivou intenzitou v pozícii každej hviezdy; a technika odčítavania obrazu, v ktorej je odčítaný referenčný obraz od každého snímku predtým ako sa fotometria vykoná [Alard and Lupton 1998]. V každej technike treba do úvahy zobrať psf².

¹Charge-coupled device (CCD) je elektronická súčiastka používaná pre snímanie obrazovej informácie. Má široké uplatnenie pri videokamerách, digitálnych fotoaparátoch, faxoch, scanneroch a pri mnohých vedeckých prístrojoch

²point spread function (psf) opisuje reakciu zobrazovacieho systému pre bodový zdroj alebo objekt

Kapitola 4

Určovanie parametrov exoplanét

Ak pozorujeme exoplanéty nepriamo, môžeme z analýzy svetelnej krivky získať veľa zaujímavých informácií. Pri určovaní parametrov exoplanetárnych systémov budeme vychádzať z nasledujúcich predpokladov:

- planéta obieha okolo materskej hviezdy po kruhovej dráhe.
- poznáme parametre materskej hviezdy, obzvlášť jej polomer a hmotnosť.

4.1 Polomer planéty

Polomer exoplanéty môžeme určiť z hĺbky tranzitu pomocou vzťahu

$$\Delta F = \frac{F_S - F_t}{F_S} = \frac{\pi R_S^2 B_S - (\pi R_S^2 B_S - \pi R_p^2 B_S)}{\pi R_S^2 B_S} = \left(\frac{R_p}{R_S}\right)^2, \quad (4.1)$$

kde ΔF je hĺbka tranzitu, F_S je tok žiarenia z celého disku prichádzajúceho od systému v okamihu, kedy nedochádza k prechodu, F_t je tok žiarenia z celého disku, keď je planéta celá premietnutá na disk hviezdy, R_p je polomer planéty a B_S intenzita hviezdy. K zisteniu polomeru planéty však potrebujeme poznať polomer hviezdy, okolo ktorej planéta obieha.

4.2 Stredná vzdialenosť

Pre výpočet veľkej poloosy môžeme použiť tretí Keplerov zákon v tvare

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

kde P je perióda obehu, a je hlavná poloos, G je Newtonova gravitačná konštanta, M_S je hmotnosť hviezdy a M_p hmotnosť planéty. Keďže platí vzťah $M_p \ll M_S$, môžeme vzťah pre strednú vzdialenosť prepísať do tvaru

$$a = \sqrt{\frac{P^2 G M_S}{4\pi^2}}. \quad (4.3)$$

4.3 Inklinácia

V našom prípade rozumieme pod inklináciou uhol medzi normálou k obežnej dráhe planéty a smerom k pozorovateľovi. Túto veličinu môžeme jednoducho určiť zo známej doby trvania prechodu t_{trans} . Dĺžka trvania prechodu planéty je všeobecne daná vzťahom

$$t_{trans} = \frac{P}{2\pi} \alpha, \quad (4.4)$$

kde α je uhol určujúci úsek na dráhe planéty okolo hviezdy, kedy sa planéta premieta na hviezdny disk. Pre sínus polovice tohto uhla, ktorý označíme β platí vzťah

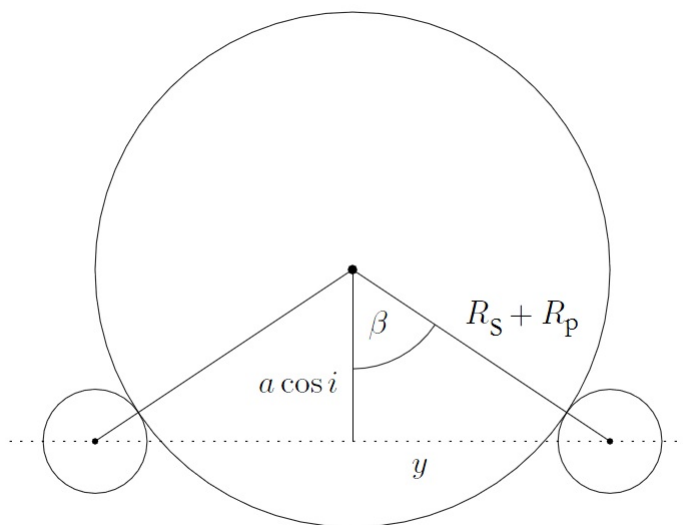
$$\sin \frac{\alpha}{2} = \sin \beta = \frac{y}{a} = \frac{\sqrt{(R_S + R_p)^2 - a^2 \cos^2 i}}{a}. \quad (4.5)$$

Význam uhla β je známy z obrázku 4.1 a ostatných spomínaných veličín, ktoré sú zobrazené na obrázkoch 4.1 a 4.2. Pomocou týchto obrázkov sa dostávame k výslednému vzťahu 3.3 pre dĺžku trvania prechodu, z ktorého jednoduchými algebraickými úpravami dostaneme

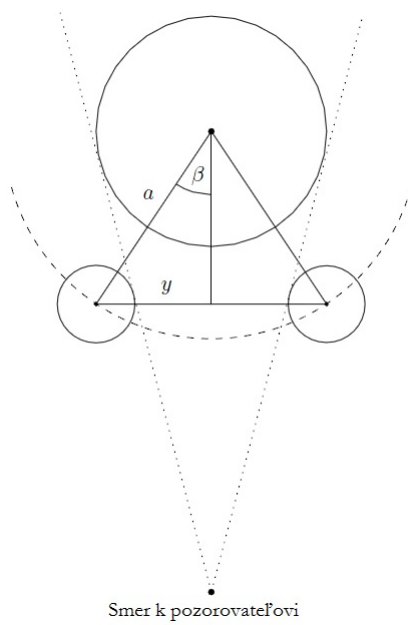
$$i = \arccos \sqrt{\frac{(R_S + R_p)^2}{a^2} - \sin^2 \frac{\pi t_{trans}}{P}}. \quad (4.6)$$

4.4 Exoplanet Transit Database

Exoplanet Transit Database (*ďalej* ETD) je databáza zhromažďujúca pozorovania tranzitov exoplanét z celého sveta. Hlavnými súčasťami ETD je celosvetová predpoveď tranzitov, procedúra na fitovanie pozorovania tranzitov a možnosť vykreslovať zadané pozorovania do diagramov. Veľkou výhodou je okamžité vyhodnotenie dát a porovnanie s meraniami z celého sveta. ETD je neodmysliteľnou súčasťou tejto bakalárskej práce, pretože pri jej písaní bola použitá pri vyhľadávaní vhodných kandidátov a určení doby prechodov. Zadaním zemepisnej dĺžky



Obr. 4.1: Význam uhla $\beta = \alpha/2$



Obr. 4.2: Geometria prechodu

a šírky môžeme určiť začiatok, stred a koniec prechodu. Taktiež zistíme uhlovú výšku, akú bude mať hviezda pri začatí, strede a konci samotného tranzitu. Dôležitým údajom je hĺbka poklesu, ktorá musí byť dostatočne veľká na to, aby bola v dosahu nášho pozorovacieho vybavenia. Databáza bola použitá pri spracovaní nameraných dát a vytvorenie O-C diagramu. Popri ETD existujú na svete ešte ďalšie databázy, napr. Amateur Exoplanet Archive (AXA), vedená Bruceom Garym, bývalým dlholetým spolupracovníkom americkej NASA. AXA prijíma svetelné krivky len od amatérskych pozorovateľov, a to len tých pozorovaní, ktoré boli urobené pri jasných hviezdach. Nanešťastie veľké množstvo z dát obsiahnutých v tejto databáze má nízku kvalitu. A napriek tomu majú všetky rovnakú váhu. Okrem vlastných dát ETD kombinuje aj dáta zo spomenutých zdrojov. Získané svetelné krivky môžu byť do databázy nahraté priamo cez webové rozhranie.

Kapitola 5

Vlastné pozorovanie

Pozorovanie tranzitov exoplanét, takisto ako pozorovanie objektov, ktoré majú nízky pokles jasnosti je veľmi závislé od dobrých pozorovacích podmienok. Pokles jasnosti je závislý hlavne na veľkosti planéty obiehajúcej okolo materskej hviezdy a vzdialenosti od nej. Ak pozorujeme hviezdy porovnateľné s veľkosťou Slnka, tak pokles jasnosti spôsobený prechodom planéty veľkosti Jupitera alebo Saturnu vyvolá pokles o zhruba 1 %. Ak by šlo o planéty Urán alebo Neptún vyvolaný pokles by bol asi 0,1 %. Pri Venuši alebo Zemi by bol tento pokles dokonca 0,01 %.

Pozorovania prebiehali na observatóriu Masarykovej univerzity prostredníctvom 62cm zrkadlového ďalekohľadu a CCD kamery SBIG ST8. Pre určenie parametrov boli namerané dva prechody extrasolárnych planét v priebehu dvoch nocí. Napozorované boli prechody exoplanét TrES-3b, WASP-3b. Analýza a oprava snímok o dark frame, flat field bola prevedená v programe CMunipack (verzia 1.1.26). Dark frame sa snaží zachytiť vplyv tepelného šumu na jednotlivé pixely. Okrem dopadajúceho žiarenia vniká signál v detektore aj tepelným šumom, ktorý je spôsobený zahriatím kamery. Preto sa robia snímky bez svetla o rovnakej expozičnej dobe ako snímky, ktoré chceme opravovať. Samotná korekcia je potom odčítanie dark frame od vedeckého snímku. Flat field opravujú vplyv rôznych citlivostí pixelov CCD detektoru. Ide o snímok rovnomerne svetlej plochy. Pripraveným master flatom potom opravíme všetky svetlé (vedecké) snímky. Urobený flat field sa opraví o dark frame a urobí sa jeho priemerná hodnota. Takto opravené dáta vložíme do fitovacieho programu databáze ETD. V tabuľke 5.1 sú zemepisné súradnice observatória Masarykovej univerzity.

Zemepisná šírka	Zemepisná dĺžka	Nadmorská výška [m]
49°12'15"	16°2'35"	305

Tabuľka 5.1: Zemepisná poloha observatória Masarykovej univerzity

5.1 Fitovanie parametrov tranzitu

Predpokladajme, že pozorovanie pozostáva z N tranzitov relatívnych jasností m_i zaznamenaných v časoch t_i a fotometrický program poskytuje odchýlku merania σ_i odvodenú z Poissonovej štatistiky. Súbor modelovaných údajov potom môžeme modelovať podľa funkcie:

$$m(t_i) = A - 2,5 \log F(z[t_i, t_0, t_{trans}, b], p, c_i) + B(t_i - t_{mean}) + C(t_i - t_{mean})^2, \quad (5.1)$$

kde $F(z, p, c_i)$ je relatívny tok pochádzajúci od hviezdy, p je polomer zo vzťahu $p = R_p/R_S$, kedy je planéta menšia než hviezda ($p < 0,2$). Písmeno c_i je okrajové stemnenie modelované pomocou lineárneho zákona. Centrálny čas prechodu je t_0 , celý čas prechodu značí písmeno t_{trans} . Premenná A v rovnici označuje nulový bod posunu hviezdnej veľkosti hviezdy, B a C sú určované systematicky z časových údajov. Lineárny a kvadratický člen je určovaný z času:

$$t_{mean} = \sum \frac{t_i}{N}, \quad (5.2)$$

kde N je celkový počet meraní. Dráha planét sa modeluje ako priamy prechod cez hviezdny disk cez parameter:

$$b = \frac{a \cos i}{R_S}. \quad (5.3)$$

Jedna sa o fitovacia procedúru, ktorá je súčasťou ETD. K určení sa používa metóda najmenších štvorcov s Levenbergovým-Morquardtovým minimalizačným algoritmom. Cieľom programu je určiť centrálny čas tranzitu t_0 , dĺžku tranzitu t_{trans} a hĺbku poklesu ΔF . Hodnota ΔF je určená pomocou pomeru p , faktoru b a koeficientu okrajového stemnenia c_i . Tento koeficient je konštantný pre všetky vložené merania, kedy $c_i = 0,5$. Konečnú hodnotu ΔF môžeme určiť zo vzťahu

$$\Delta F = -2,5 \log[F_{min}(z, p, c_i)]. \quad (5.4)$$

Presnosť tejto metódy môžeme vidieť na obrázku 5.1, kde sa porovnávajú dáta z databáze AXA a vypočítané dáta pomocou fitovacieho programu ETD.

HD189733b	ETD	AXA
central time [HJD]	2454705.40228 (41)	2454705.4023 (5)
duration [min.]	102.09 ± 1.60	98.4 ± 1.8
depth [mag.]	0.0287 ± 0.0006	0.02895 ± 0.00080

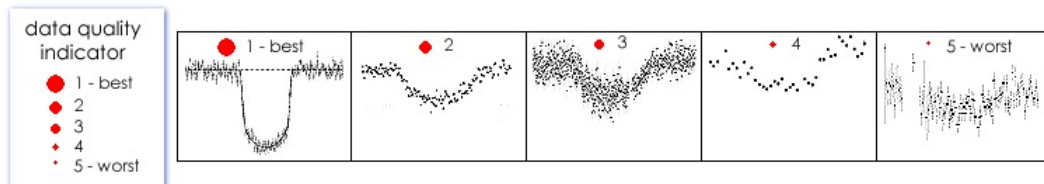
Obr. 5.1: Porovnanie presnosti databáze ETD a AXA [Zdroj: Poddaný et al. 2009].

5.2 O-C diagram

O-C diagram je konštruovaný pre zákrytové premenné hviezdy alebo pre tranzitujúce exoplanéty. Na vodorovnej ose je čas, na zvislú osu sa vynášajú pre každú udalosť (tranzit, zákryt) rozdiel skutočného času pozorovania (O-observed) a predpovedaného času udalosti z modelu (C-computed). V našom prípade obsahuje táto sekcia grafy s centrálnym časom prechodu, dĺžkou tranzitu a hĺbkou poklesu ako funkciu času. Kvalita svetelných kriviek je rozdelená do piatich skupín ako je vidieť na obrázku 5.2. Tento index je odvodený zo vzťahu:

$$\alpha = \frac{\Delta F}{S} \sqrt{\tau}, \quad (5.5)$$

kde α je dočasný index kvality, S sú absolútne odchýlky dát z fitovacieho programu, súbor napozorovaných dát $\tau = N/n$, kde n je počet pozorovaní za jednu minútu a N je celkový počet pozorovaní.



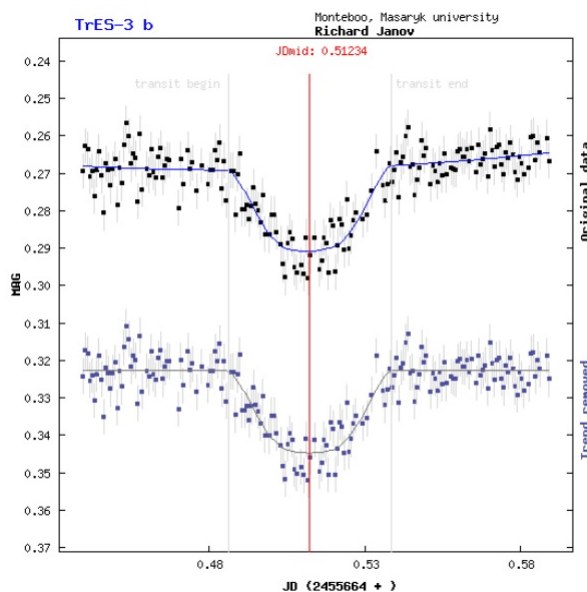
Obr. 5.2: Kvalita svetelných kriviek v databáze ETD

5.3 TrES-3b

TrES-3b je exoplanéta obiehajúca hviezdu GSC 03089-00929. Obežná doba je len 31 hodín a v dôsledku slapových javov sa zmenšuje. Hmotnosť planéty sa rovná približne dvojnásobku hmotnosti planéty Jupiter. Je treťou exoplanétou objavenou prehliadkovým programom Trans-Atlantic Exoplanet Survey (TrES). Exoplanéta sa nachádza v súhvezdí Herkules. Objavená bola pomocou tranzitnej fotometrickej metódy. Hmotnosť planéty bola overená pomocou metódy merania radiálnych rýchlostí.

Dátum	Filter	Expozičný čas [s]	Počet snímkov	Pozorovatelia
12.4.2011	R	60	213	RJ, MS

Tabuľka 5.2: Detailné informácie o pozorovaní exoplanéty TrES-3b. Pozorovatelia: RJ=Richard Jánov, MS=Marek Skarka



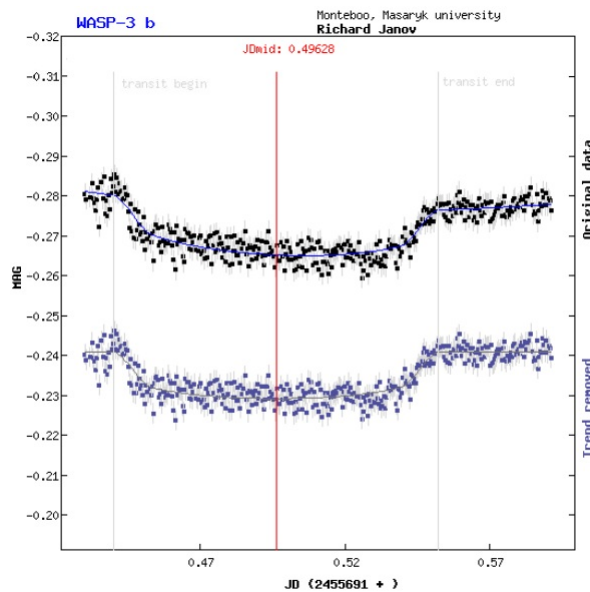
Obr. 5.3: Svetelná krivka exoplanéty TrES-3b pozorovaná v noci z 12./13.4.2011

5.4 WASP-3b

Exoplanéta obieha hviezdou s označením GSC 02636-00195 nachádzajúcu sa vo vzdialenosti 727 svetelných rokov v súhvezdí Lýra. Bola objavená tranzitnou fotometrickou metódou medzinárodnou akademickou organizáciou Wide Angle Search for Planets (SuperWASP), ktorá vykonáva veľmi rozsiahle pátranie po tranzitujúcich exoplanétach s cieľom prehľadať celú oblohu do 15. magnitúdy. Nasledujúce meranie radiálnej rýchlosti hviezdy potvrdilo, že WASP-3b je planéta. Planéta patrí do skupiny horúcich Jupiterov s teplotou atmosféry okolo 1983 K.

Dátum	Filter	Expozičný čas [s]	Počet snímkov	Pozorovatelia
9.5.2011	R	30	398	RJ, MS

Tabuľka 5.3: Detailné informácie o pozorovaní exoplanéty TrES-3b. Pozorovatelia: RJ=Richard Jánov, MS=Marek Skarka



Obr. 5.4: Svetelná krivka exoplanéty WASP-3b pozorovaná v noci z 9./10.5.2011

Kapitola 6

Výsledky

6.1 TrES-3b

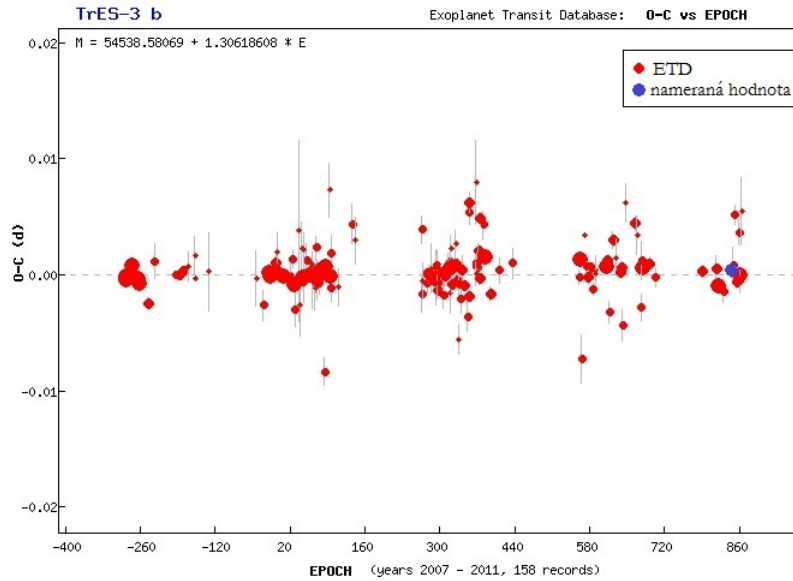
Exoplanéta bola vybraná z dôvodu veľkého poklesu jasnosti hviezdy, ktorý by mal byť pri vhodných svetelných podmienkach dobre pozorovateľný. Pozorovateľná hviezdna veľkosť hviezdy je 12.4 magnitúdy (V). Kvalita svetelnej krivky bola ohodnotená číslom 3. Pozorovanie exoplanéty prebehlo v noci 12./13.4.2011. Pokles jasnosti hviezdy uvedený v tabuľke sa nezhoduje s katalógovou hodnotou

Parametre	Katalógové hodnoty	12.4.2011
ΔF [mag]	0,0291	$0,022 \pm 0,0013$
t_{trans} [min]	$77,4 \pm 2$	$75,7 \pm 3,2$
R_p [R_j]	$1,305 \pm 0,09$	$1,124 \pm 0,032$
R_S [R_\odot]	$0,813 \pm 0,027$	
A [AU]	$0,0226 \pm 0,0013$	
P [deň]	$1,30618608 \pm 0,0013$	
i [°]	$82,15 \pm 0,21$	$81,73 \pm 0,31$

Tabuľka 6.1: Výsledky získané z pozorovania v noci z 12./13.4.2011

z dôvodu nepriaznivých svetelných podmienok počas pozorovania. Doba trvania prechodu exoplanéty t_{trans} sa pohybuje v rozsahu chyby vypočítaného katalógého údaje. Polomer planéty R_p sa nepodarilo odmerať s dostatočnou presnosťou. Inklináciu planéty sme napozorovali v rozsahu chyby. Ak sa pozrieme na obrázok 6.1 kde je zobrazený O-C diagram, môžeme si všimnúť, že dáta sa neodchyľujú

od osi x, a preto nie je nutné vykonať opravu periódy planéty. Spracovaním viacerých pozorovaní a ich vložení do ETD by bolo možné získať veľmi bohatý materiál a s jeho využitím spresniť v práci uvedené parametre. To, ale nebolo z časových dôvodov možné.



Obr. 6.1: O-C diagram TrES-3b

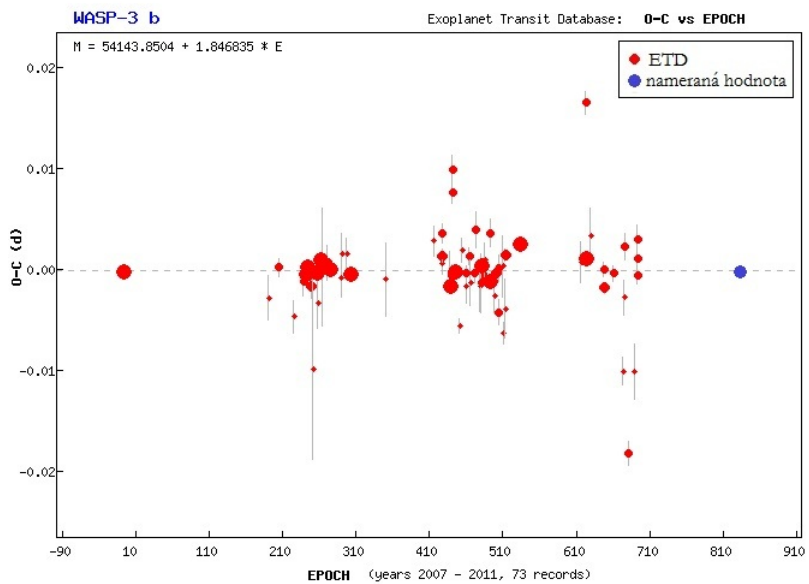
6.2 WASP-3b

Pozorovateľná jasnosť hviezdy je 10,4 magnitúdy (V). Exoplanéta bola vybraná kvôli vysokému poklesu jasnosti hviezdy, ktorý je v dosahu nášho prístroja. Pozorovanie prebiehalo v noci 9./10.5.2011. Získaná hodnota polomeru planéty leží

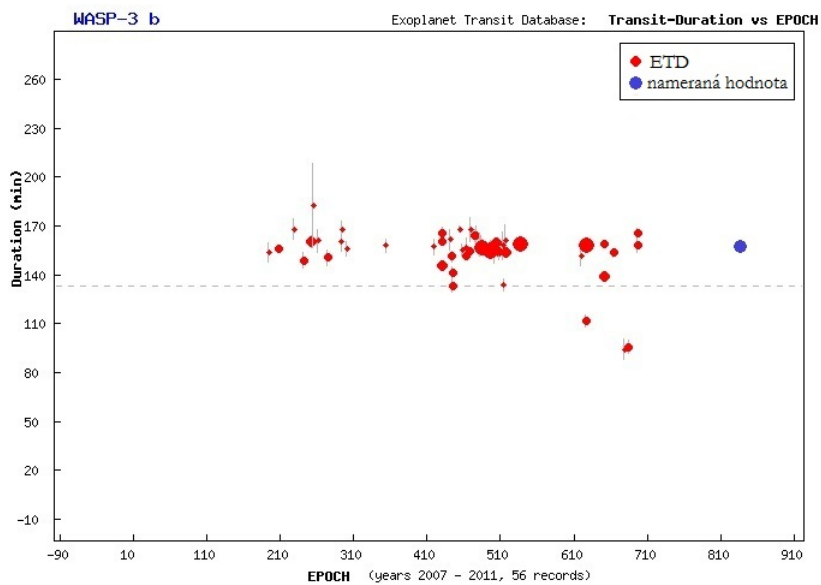
Parametre	Katalógové hodnoty	9.5.2011
ΔF [mag]	0.0123	0.0117 ± 0.0007
t_{trans} [min]	137	161.4 ± 1.7
R_p [R_j]	$1,31 \pm 0,12$	$1,324 \pm 0,039$
R_S [R_\odot]	$1,31 \pm 0,12$	
A [AU]	$0,0317 \pm 0,001$	
P [deň]	$1,846835 \pm 0,0013$	
i [°]	$85,06 \pm 0,16$	$84,49 \pm 0,29$

Tabuľka 6.2: Výsledky získané z pozorovania v noci z 9./10.5.2011.

v intervale chyby, ktorá je uvedená v katalógovom údaji z ETD. Vďaka dobrým pozorovacím podmienkam bola svetelná krivka na obrázku 5.4 ohodnotená číslom 2 podľa databáze ETD. Na obrázku 6.2 je vidieť, že pozorovanie súhlasí s databázou ETD a korekciu periódy obežnej dráhy nie je potrebné vykonať. Na obrázku 6.2 je odchýlka v dĺžke trvania tranzitu, ktorá môže byť spôsobená existenciou ďalšej planéty. V roku 2010 boli dĺžky trvania tranzitov planéty WASP-3b použité na odvodenie prítomnosti druhej planéty WASP-3c. Na potvrdenie existencie druhej planéty však treba ďalšie pozorovania [Maciejewski et al. 2010]. Inklináciu obežnej dráhy planéty sa nám nepodarilo určiť s dostatočnou presnosťou čo môže byť spôsobené prípadnou existenciou druhej planéty.



Obr. 6.2: O-C diagram WASP-3b



Obr. 6.3: Rozdiel medzi napozorovanou a vypočítanou dĺžkou trvania tranzitu exoplanéty WASP-3b.

Kapitola 7

Záver

V bakalárskej práci som sa zaoberal tranzitmi exoplanét a určovaním parametrov exoplanét. Pozorovania prebiehali počas dvoch nocí kedy som napozoroval tranzity exoplanét TrES-3b a WASP-3b. Svetelné krivky sú zobrazené na obrázkoch 5.3 a 5.4. Na tvare svetelných kriviek je možné vidieť jemný rozptyl dát, ktoré sú spôsobené nepriaznivými svetelnými podmienkami a vplyvom počasia. Všetky pozorovania prebiehali na observatóriu Masarykovej univerzity. Pri pozorovaní bola využitá databáza ETD a fitovací program, ktorý poskytuje. Získané hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.1, korešponujú s tabuľkovými hodnotami a boli diskutované v kapitole 6. Pri exoplanéte WASP-3b bola pri pozorovaní zazna-

Dátum	Exoplanéta	Polomer [R_j]	Inklinácia [°]
12.4.2011	Tres-3b	$1,124 \pm 0,032$	$81,73 \pm 0,31$
9.5.2011	WASP-3b	$1,324 \pm 0,039$	$84,49 \pm 0,29$

Tabuľka 7.1: Získané výsledky

menaná dlhšia doba tranzitu ako je hodnota vypočítaná. Je to spôsobené tým, že v planetárnom systéme okolo hviezdy WASP-3 sa pravdepodobne nachádza ďalšia exoplanéta.

Literatúra

- [1] Mayor, M. Queloz, D. *Nature*, 378: 355-359, 1995
- [2] Cassen, P. Guillot, T. Quirrenbach, A.: *Extrasolar planets*, 2006.
- [3] Allard, F. Hauschildt, PH. Alexander, DR. Starrfield, S.: *Model atmospheres of very low mass stars and brown dwarfs*, ARAA 35: 137-77, 1997
- [4] Dravins, D. Lindegren, L. Mezey, E. Young AT.: *Atmospheric intensity scintillation of stars. III. Effects for Different Telescope Apertures*, PASP 110: 610-33, 1998
- [5] Stetson, PB. DAOPHOT.: *A computer program for crowded-field stellar photometry*, PASP 99: 191-222, 1987
- [6] Alard, C. and Lupton, C.: *A method for optimal image subtraction*, ApJ 503: 325-31, 1998
- [7] Maciejewski, G. Dimitrov, D. Neuhaeuser, R. Niedzielski, A. St.Raetz, Ginski, Ch. Adam, Ch. Marka, C. Moualla, M. Mugrauer M.: *Transit timing variation in exoplanet WASP-3b*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 407, Issue 4, 2625-2631, 2010
- [8] Kleczek, J.: *Velká encyklopedie vesmíru*, Academia, Praha, 2002.
- [9] Pokorný, Z.: *Exoplanéty*, Academia, Praha, 2007.
- [10] Mikulášek, Z., Krtička, J.: *Základy fyziky hvězd*, Brno, 2005.
- [11] Krejcová, T.: *CCD fotometrie exoplanet*, Brno, 2008.
- [12] Dyčková, Š.: *Detekce exoplanet zákryty*, Brno, 2010.
- [13] Hroch, F.: *Astronomické praktikum*, Brno, 2009.

- [14] <http://var2.astro.cz/ETD/>
- [15] <http://en.wikipedia.org/>
- [16] <http://www.aldebaran.cz/>
- [17] <http://exoplanets.eu/>
- [18] <http://www.exoplanety.cz/>