

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDĚCKÁ FAKULTA



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

DETEKCE EXOPLANET ZÁKRYTY

ŠÁRKA DYČKOVÁ

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

BRNO 2010

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně za použití uvedené literatury a podle pokynů vedoucího bakalářské práce RNDr. Milošlava Zejdy, Ph.D. a konzultantky Mgr. Terezy Krejčové.

V Brně dne:

Podpis:

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucímu své bakalářské práce RNDr. Miloslavu Zejdovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, trpělivost a především vstřícnost při organizování jednotlivých pozorování. Své konzultantce Mgr. Tereze Krejčové děkuji za poskytnutí informací z jejich bohatých zkušeností v této oblasti.

Mé velké díky patří lidem, kteří měli obdivuhodnou vytrvalost trávit se mnou podstatnou část noci na hvězdárně během pozorování. Zvláště Mgr. Marku Chrastinovi, Mgr. Jiřímu Liškovi, Mgr. Tereze Krejčové, Mgr. Tomáši Henychovi a Barboře Mikulecké.

V neposlední řadě bych ráda poděkovala všem, kteří tuto bakalářskou práci četli a pomáhali s její stylistickou stránkou.

Anotace: Detekce exoplanet zákryty

Předložená bakalářská práce se zabývá studiem exoplanet prostřednictvím metody tranzitní fotometrie. Touto metodou můžeme pozorovat pokles jasnosti díky přechodu exoplanety přes kotouč mateřské hvězdy. Na základě naměřených dat byly ze světelných křivek určeny parametry exoplanet, periody a délka přechodů, u hvězd TrES-1, TrES-2 a WASP-10.

Klíčová slova: exoplaneta, zákryt, světelná křivka.

Annotation: Detection of exoplanets by eclipses

This Bachelor's thesis deals with a study of exoplanets by means of the method called transit photometry. With help of this method we can observe the depth of brightness caused by the crossing of an exoplanet over its maternal star. Based on the measured data, periods, parameters of exoplanets and the length of the crossing process in stars TrES-1, TrES-2 and WASP-10 were determined from the data describing light curves.

Keywords: exoplanet, transit, light curve.

Obsah

1	Úvod	7
2	Exoplanety	8
2.1	Historie objevování exoplanet	8
3	Zákrytová metoda pozorování	11
3.1	První objev (HD 209458 b)	11
3.2	Geometrie přechodů	13
4	Určování parametrů exoplanet	14
4.1	ETD - Exoplanet Transit Database	14
4.1.1	Fitovací program	14
4.1.2	O-C diagram	16
4.2	Světelná křivka	17
4.3	Poloměr planety	20
4.4	Velká poloosa	21
4.5	Inklinace	21
5	Pozorování	23
5.1	TrES-1b	24
5.2	TrES-2b	27
5.3	WASP-10b	30
6	Výsledky	31
6.1	TrES-1b	31
6.1.1	Výsledky měření	31
6.2	TrES-2b	33
6.2.1	Výsledky měření	34
6.3	WASP-10b	37
6.3.1	Výsledky měření	38
7	Závěr	40

Kapitola 1

Úvod

Hledání exoplanet je v současnosti jednou z nejvíce vzrušujících oblastí astronomie. Vidina dalekých míst s rozmanitou faunou a flórou podněcuje mysl mnoha lidí. Bohužel, prozatím jen málo šťastlivců mělo tu možnost odpoutat se od svých snů a dotknout se i jiných skutečných světů, než je ten náš. Exoplanety jsou objekty, které nemůžeme vidět na noční obloze. Světlo jejich mateřské hvězdy každou exoplanetu přezáří. Nelze je tedy pozorovat přímo, a proto nám nezbývá nic jiného, než hledat projevy jejich působení na mateřskou hvězdu nebo její záření.

Tato práce se věnuje zejména tranzitujícím exoplanetám. Mají tu zvláštnost, že díky sklonu své dráhy přecházejí přes kotouč své hvězdy. Tento přechod vyvolá zeslabení jasnosti hvězdy a my ho pak můžeme zaznamenat.

Samotná práce obsahuje několik částí. Druhá a třetí kapitola je postupně věnována historii objevování exoplanet a zákrytové metodě. Čtvrtá kapitola je zaměřená na určování parametrů extrasolárních planet. V další částech je popisován průběh pozorování a naměřená data. V kapitole šesté jsou interpretovány vypočtené hodnoty, které jsou následně shrnuty v závěru této bakalářské práce.

Kapitola 2

Exoplanety

Výraz exoplaneta pochází ze zkrácení slov extrasolární planeta. Je to tedy planeta, která obíhá svou mateřskou hvězdu mimo naši sluneční soustavu. Výzkum extrasolárních planet je velmi důležitý, nejen pro pochopení vzniku samotných exoplanet, ale také pro lepší představy o vzniku naší vlastní planety Země.

2.1 Historie objevování exoplanet

Naše odhodlání zodpovědět si zásadní otázky o životě přetrvávají celá pokolení a civilizace. Od filozofických úvah jsme se díky technologickému pokroku dostali k plnohodnotným vědeckým závěrům. A právě oblast objevování exoplanet by se nemohla rozvíjet bez technologického vývoje.

Již ve 4. století před Kristem se Epikuros přiklání k myšlence, že musí existovat nekonečné množství světů, z nichž některé musí nést i život. V 16. století na myšlenky Epikura navázal italský astronom Giordano Bruno. Tvrdil, že pokud Bůh stvořil vše, co mohl, pak vesmír bude nekonečný. Je-li však vesmír nekonečný, tak to znamená, že existují další sluneční systémy. Oba tito myslitelé měli na svou dobu velmi pokrokové názory, ale bohužel jen filozofické.

Téměř celé 20. století je v oblasti hledání exoplanet dobou chybných objevů a nedozrálých oznámení. První mylné zprávy (Recyl and E. Holmberg 1943, K. A. Strand 1943) o detekci masivní planety ($10 M_j$)¹ byly publikovány již během druhé světové války. Důležité také bylo najít vhodný způsob, jak by se hledaná tělesa dala detekovat. Proto roku 1952 přichází

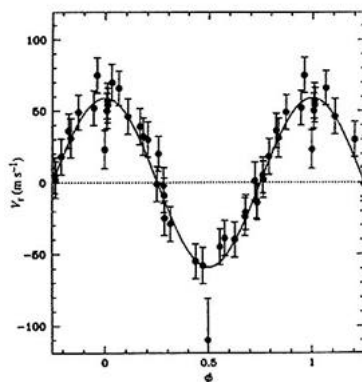
¹Hmotnost Jupiteru $M_j = 1898.6 \cdot 10^{24}$ kg (Kleczek 2002)

Otto Struve s nápadem pozorovat tyto objekty pomocí změny radiálních rychlostí.

K hlavním průkopníkům v této oblasti astronomie patří van de Kamp. Na základě svých vytrvalých pozorování oznamuje u Barnardovy hvězdy objev planety (1963). Bohužel, už od samého počátku, je na jeho práci nahlíženo skepticky. Pro ověření jeho teorie provádějí G. Gatewood a H. Eichhorn (1973) nová měření. Bohužel žádnou planetární oběžnici nenašli. V dnešní době se van de Kampova špatná měření přisuzují přístrojové chybě dalekohledu.

Roku 1992 oznamují A. Wolszczan a D. Frail objev první exoplanety u milisekundového pulzaru PSR 1257+12 v souhvězdí Panny. V systému byly nakonec odhaleny hned 2 exoplanety. Tento důležitý mezník astronomické vědy nám ukázal, že planety mohou vznikat i na místech, kde panují extrémní podmínky.

Na objev skutečné exoplanety, která by obíhala kolem hvězdy podobné našemu Slunci, jsme čekali až do roku 1995. V říjnu, na konferenci ve Florencii, M. Mayor a D. Queloz představují široké astronomické společnosti i celému světu exoplanetu 51 Peg b². Byla objevena pomocí metody změn radiálních rychlostí.



Obrázek 2.1: Křivka naznačující změnu radiálních rychlostí hvězdy 51 Peg. [Zdroj: M. Mayor, D. Queloz et al. 1995.]

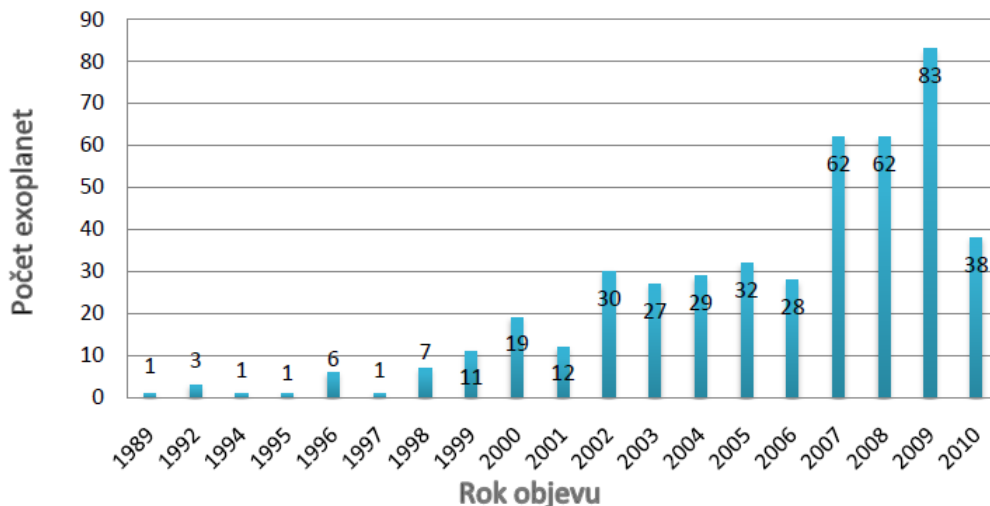
Dalším důležitým milníkem je rok 1999, kdy byl poprvé zaznamenán přechod planety přes svou hvězdu (G. W. Henry, G. Marcy). Tato tranzitující planeta dostala označení HD 209458 b. V téže roce byl u hvězdy ν Andromeda nalezen i první vícenásobný planetární systém (R. P. Butler).

²Exoplaneta dostává jméno podle své mateřské hvězdy + přívlastek b. Pokud je u jedné hvězdy planet více, dostávají postupné označení podle pořadí v abecedě, tedy c, d, atd.

Pomocí vesmírného dalekohledu Spitzer jsme měli možnost poprvé zaznamenat vodní páry ve spektru planety HD 189733 b (G. Tinetti 2007). O rok později byl pořízen první snímek exoplanety (P. Kalas 2008). Jmenuje se Fomalhaut b a nachází se v souhvězdí Jižní ryba.

K poslednímu důležitému mezníku historie rozhodně patří vypuštění družice Kepler (březen 2009). Tento dlouho očekávaný projekt by měl sledovat hvězdy v souhvězdí Labutě a slibuje se od něj objev několika planet o velikosti Země. Na svém kontě má prozatím objev pěti exoplanet o velikosti $3.99R_Z$ - $16.25R_Z$ ³.

Především v posledních letech dochází k rychlému nárůstu objevů exoplanet vlivem vývoje nových technologií a zdokonalování pozorovacích metod. V současnosti se výzkum extrasolárních planet může pyšnit 453 exempláři ⁴.



Obrázek 2.2: Počet objevených exoplanet v jednotlivých letech. [Zdroj: <http://exoplanet.eu/>]

³Poloměr Země $R_Z = 6371$ km (Kleczek 2002)

⁴Hodnota uvedena k datu 6. 5. 2010.

Kapitola 3

Zákrytová metoda pozorování

3.1 První objev (HD 209458 b)

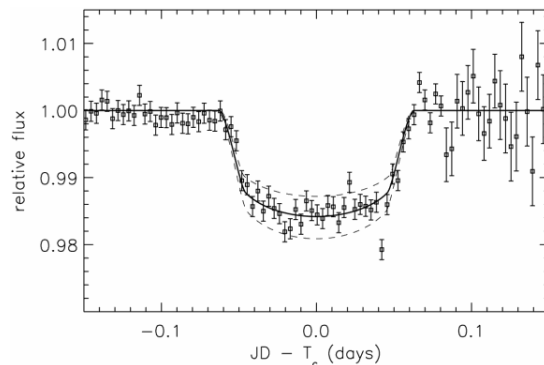
Po objevu první exoplanety 51 Peg b roku 1995 se astronomové pokoušeli o nalezení dalších extrasolárních planet pomocí jiné metody než měření radiálních rychlostí. Z pozorování byl dobře znám jev, kdy Merkur či Venuše přechází přes sluneční kotouč a dochází k tzv. tranzitu. (Ve vzdálenějším vesmíru můžeme tento úkaz pozorovat i u zákrytových proměnných hvězd).

Teprve až v listopadu 1999 oznamují Gregory W. Henry a Geoff Marcy objev exoplanety na základě periodických změn radiálních rychlostí, u které zároveň dochází i k tranzitům. Nové těleso, pozorované v souhvězdí Pegasus, bylo označeno HD 209458 b ¹ a historicky se stalo prvním, u kterého bylo možno určit jeho velikost. Svou hmotností $m = 0.685M_j$, poloměrem $R = 1.32R_j$ ² a velkou poloosou $a = 0.047AU$ ³ se zařadilo k menším představitelům třídy horkých Jupiterů. V dnešní době patří k nejprozkoumanějším exoplanetám. Díky Hubbleovu vesmírnému dalekohledu a dalekohledu Spitzer byly v atmosféře nalezeny atomy vodíku (Alfred Vidal-Madjar et al. 2003), kyslíku, uhlíku (Alfred Vidal-Madjar et al. 2004) a dokonce i molekuly vody (2009). Od objevu svého prvního zástupce zaznamenala tato metoda velké úspěchy. Především prostřednictvím projektů TrES (Transatlantic Exoplanet Surves), SuperWASP (Wide Angle Search for Planets), XO Project, Corot, Kepler. V oblibě je též u astronomů amatérů, kvůli své nenáročnosti na pozorovací zařízení (postačí malý amatérský dalekohled, jenž disponuje CCD kamerou). V České republice proběhlo první pozorování exoplanety tranzitní metodou v září 2004 (TrES-1b). Pozorovatelem byl O. Pejcha.

¹V některých článcích a na internetových stránkách se můžeme setkat s názvem *Osiris*.

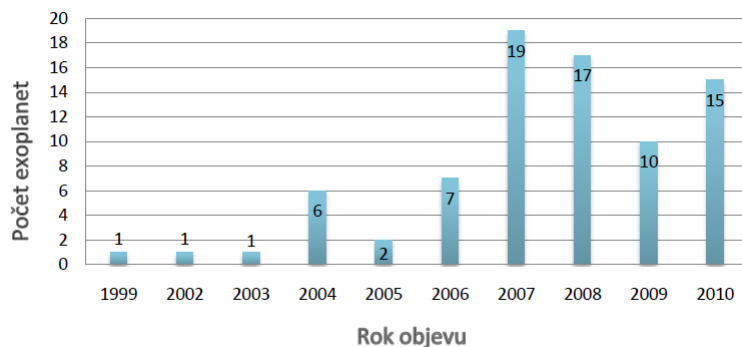
²Poloměr Jupiteru $R_j=71\,492$ km (Kleczek 2002)

³Střední vzdálenost Slunce - Země AU = 149 597 870 km (Kleczek 2002)



Obrázek 3.1: První světelná křivka exoplanetárního přechodu u hvězdy HD 209458. [Zdroj: Charbonneau et al. (2000)]

Velký počet doposud objevených zákrytových exoplanet se řadí do skupiny plyných obrů, tzv. horkých Jupiterů. Jedná se o velké planety ($10 M_z$)⁴, jež obíhají velmi blízko okolo své hvězdy (mnohem blíže než Merkur obíhá Slunce). Kvůli své velikosti a blízkosti způsobují pokles jas, který lze snadno odhalit. V současnosti⁵ počet tranzitujících exoplanet dospěl k číslu 79 a je tak druhou nejúspěšnější metodou detekce.



Obrázek 3.2: Graf znázorňující počet doposud objevených tranzitujících exoplanet. [Zdroj: <http://exoplanet.eu/>]

Velká výhoda této detekce spočívá v její všetrannosti. Z analýzy světelných křivek můžeme určit poloměr planety a sklon dráhy. Pokud určíme poloměr

⁴Hmotnost Země $M_z = 5.9736 \cdot 10^{24}$ kg (Kleczek 2002)

⁵Hodnota uvedena k datu 6. 5. 2010.

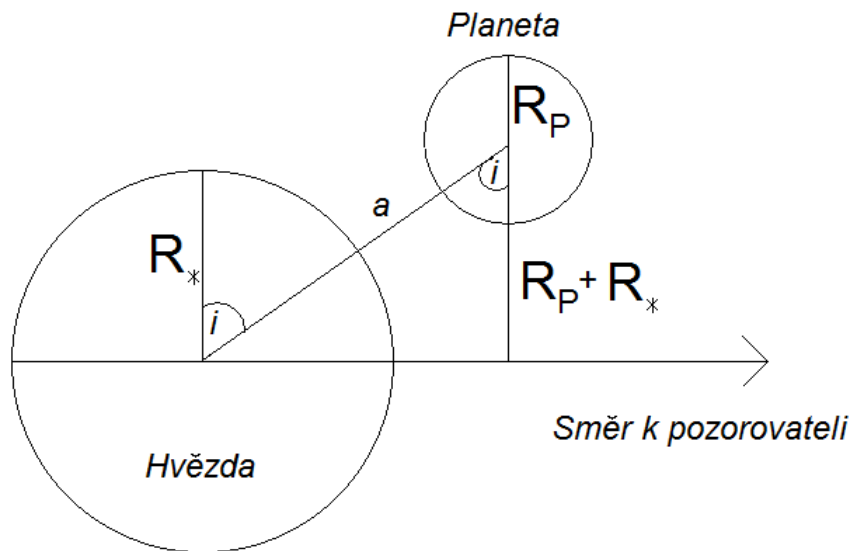
planety a použijeme metodu radiálních rychlostí, jsme schopni stanovit hustotu planety. Pomocí tranzitu můžeme zkoumat i složení atmosféry exoplanet. Do budoucna se hovoří o teoretické možnosti detekovat měsíce planet.

3.2 Geometrie přechodů

Abychom mohli pozorovat přechod planety přes mateřskou hvězdu, musí být oběžná rovina v prostoru orientovaná tak, aby se planeta dostala mezi svou mateřskou hvězdu a pozorovatele na Zemi. Exoplaneta zakryje část povrchu hvězdy a dojde k poklesu jasnosti, který může být zaznamenán pomocí vhodného přístroje. K zákrytu dojde pouze za předpokladu:

$$a \sin i \leq R_{\star} + R_P, \quad (3.1)$$

písmeno a značí velkou poloosu, i je inklinace (úhel mezi rovinou oběhu planety a rovinou kolmou na úhel pohledu), R_{\star} poloměr hvězdy, R_P je poloměr planety.



Obrázek 3.3: Obrázek naznačující vztahy parametrů při tranzitu: R_{\star} poloměr hvězdy, i inklinace planety, a velká poloosa, R_P poloměr planety.

Kapitola 4

Určování parametrů exoplanet

4.1 ETD - Exoplanet Transit Database

Exoplanet Transit Database, zkráceně ETD, je databáze, která shromažďuje pozorování z celého světa. Součástí ETD jsou globální předpovědi tranzitů, procedura na fitování pozorování tranzitu a možnost vykreslovat zadaná pozorování do diagramů. Velkou výhodou je okamžité vyhodnocení dat a jejich porovnání s měřeními z celého světa. V průběhu celé práce byla tato databáze několikrát použita. Poprvé při vyhledávání vhodných kandidátů na pozorování a určení doby jejich zákrytů. Tato sekce obsahuje všeobecné informace pro jednotlivé hvězdy a jejich exoplanety v průběhu celého roku pro všechna místa na světě. Naleznete zde čas začátku, středu i konce předpovězeného tranzitu, hloubku poklesu jasnosti, hvězdnou velikost objektu na obloze, rektascenzi a deklinaci, výšku nad obzorem v jednotlivých částech zákrytu a snímek s naznačenou polohou hvězdy. Dále tato databáze byla použita při zpracování naměřených dat. A nakonec byla odtud převzata data pro vytvoření O-C diagramu. Proto v další části této kapitoly, věnující se určování parametrů exoplanet, bylo vycházeno především z teorie uvedené na stránkách ETD.

4.1.1 Fitovací program

Fitovací program tranzitů předpokládá, že se každá pozorování skládají z N podobných hvězdných velikostí m_i v závislosti na čase t_i . Potom můžeme soubor napozorovaných dat modelovat podle funkce:

$$m(t_i) = A - 2.5 \log F(z[t_i, t_o, D, b], p, c_i) + B(t_i - t_{mean}) + C(t_i - t_{mea})^2, \quad (4.1)$$

kde $F(z, p, c_i)$ je relativní tok pocházející od hvězdy, p je poloměr ze vztahu $p = R_P / R_*$, kdy planeta je menší než hvězda ($p \lesssim 0.2$). Písmeno c_i je okrajové ztemnění modelované pomocí lineárního zákona. Centrální čas přechodu je t_0 , celý čas tranzitu značí písmeno D . Proměnná A v rovnici značí nulový bod posunu hvězdné velikosti hvězdy, B a C jsou určovány systematicky z dat. Lineární a kvadratický člen je určován z hlavního času:

$$t_{mean} = \sum \frac{t_i}{N}. \quad (4.2)$$

Dráha planet se modeluje jako přímý přechod přes hvězdný disk pomocí parametru:

$$b = \frac{a \cos i}{R_*}. \quad (4.3)$$

K určování algoritmu u fitovacího programu se používá nelineární Levenbergova-Marquardtova metoda nejmenších čtverců (Press et al. 1992). Algoritmus vyžaduje počáteční hodnoty a parciální derivace jednotlivých veličin ze vztahu (4.1), kromě veličin z, p, c_i , u kterých se používá Riddersova metoda (Press et al. 1992). Pro dosažení optimálních parametrů a jejich chyb se provádí opakování fitovacího procesu. Původní fotometrické chyby jsou podhodnoceny a v závěru díky tomu dostaneme více chyb pro výstupní parametry. Prvotním cílem tohoto programu je především určit centrální čas tranzitu t_0 , délku tranzitu D a hloubku poklesu ΔF . Hodnoty t_0 a D jsou fixní a přednastavené pro každou planetu zvlášť. Hodnota ΔF je určena pomocí poloměru p , faktoru b a koeficientu okrajového ztemnění c_i . Tento koeficient je konstantní pro všechna vložená měření, kdy $c_i = 0.5$. Konečnou hodnotu ΔF tedy můžeme určit jako:

$$\Delta F = -2.5 \log[\min F(z, p, c_i)]. \quad (4.4)$$

Přesnost této metody můžete vidět na obrázku (4.1), kde se porovnávají data z databáze AXA (The Amateur Exoplanet Archive) a vypočtená data pomocí fitovacího programu databáze 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

Obrázek 4.1: Porovnání dat databáze AXA a ETD. [Zdroj: Poddaný et al. 2009.]

4.1.2 O-C diagram

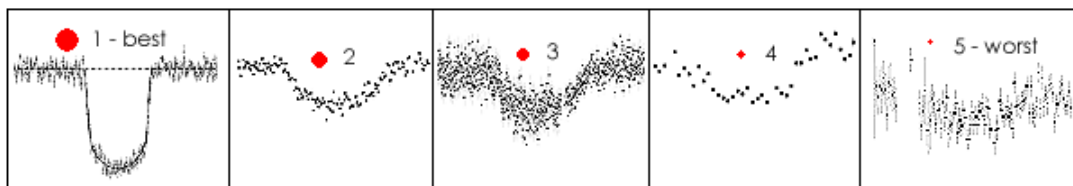
Tato sekce obsahuje grafy s centrálním časem přechodu, délkou tranzitu a hloubkou poklesu jako funkci času. Všechna data jsou uváděna i s chybami. Kvalita jednotlivých světelných křivek je rozčleněna do pěti skupin (obrázek 4.3) a kvalita je určena indexem DQ. Tento index je odvozený ze vztahu:

$$\alpha = \frac{\Delta F}{S} \sqrt{\rho}, \quad (4.5)$$

α je dočasný index kvality dat, S jsou absolutní odchylky dat z fitovacího programu, soubor dat $\rho = N/l$, kde l je počet pozorování během jedné minuty.

DQ index	1	2	3	4	5
threshold	$\alpha \geq 9.5$	$9.5 > \alpha \geq 6.0$	$6.0 > \alpha \geq 2.5$	$2.5 > \alpha \geq 1.3$	$1.3 > \alpha$

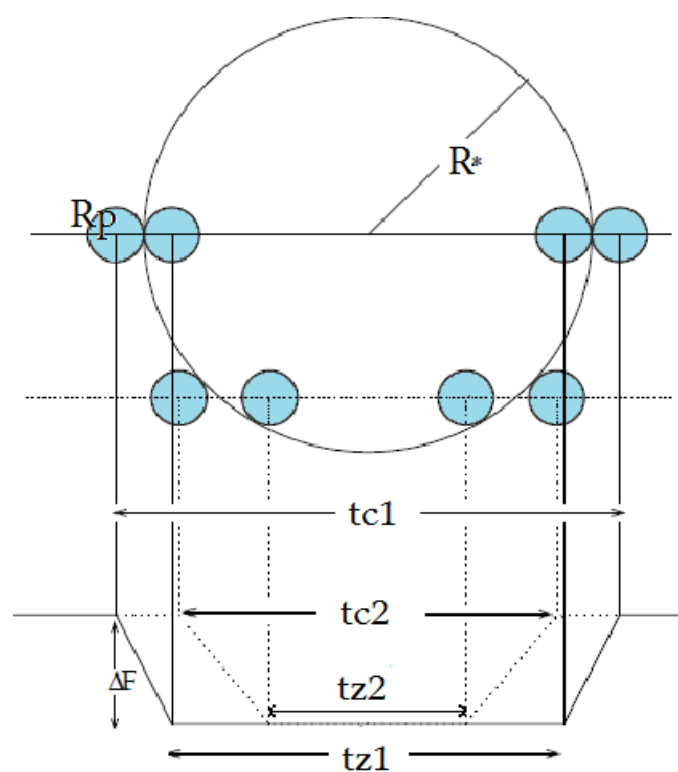
Obrázek 4.2: Závislost indexu DQ na dočasném indexu kvality dat α . [Zdroj: Poddaný et al. 2009.]



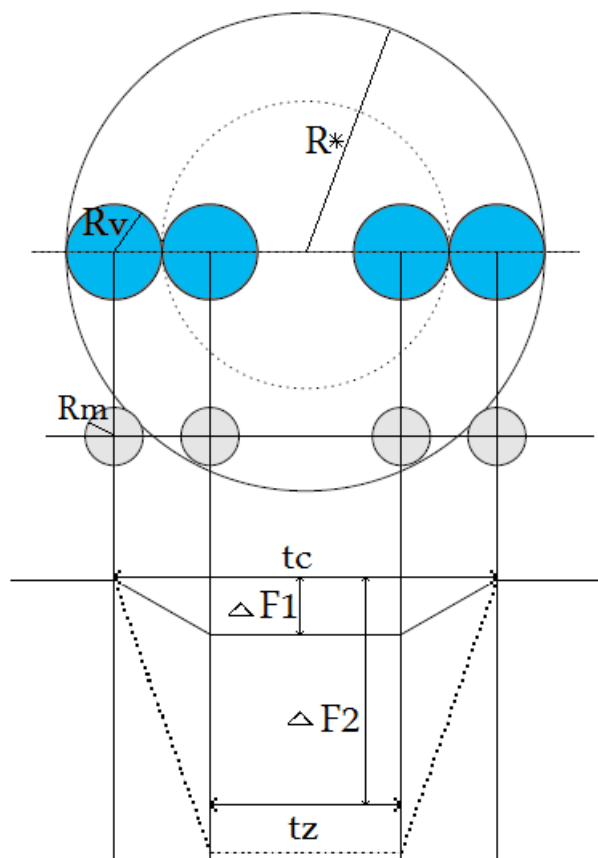
Obrázek 4.3: Hodnocení světelných křivek podle kvality. [Zdroj: <http://var2.astro.cz/>]

4.2 Světelná křivka

Světelná křivka je závislost hvězdné velikosti sledovaného objektu na čase, udávaném v juliánském datu nebo jeho zlomcích. Hvězdnou velikost nanášíme zpravidla v magnitudách nebo v milimagnitudách. Za předpokladu, že budeme znát vlastnosti mateřské hvězdy (poloměr, hmotnost), jsme schopni z napozorované světelné křivky určit parametry exoplanety. Na obrázku 4.4 můžeme vidět, jak se mění tvar světelné křivky v závislosti na inklinaci (úhel mezi rovinou oběhu planety a rovinou kolmou na úhel pohledu). Čím bude inklinace nižší, tím kratší bude délka trvání přechodu. Na výsledný tvar křivky má vliv i poloměr tranzitující exoplanety. Hloubka poklesu jasnosti poroste se zvětšujícím se poloměrem exoplanety (obrázek 4.5).

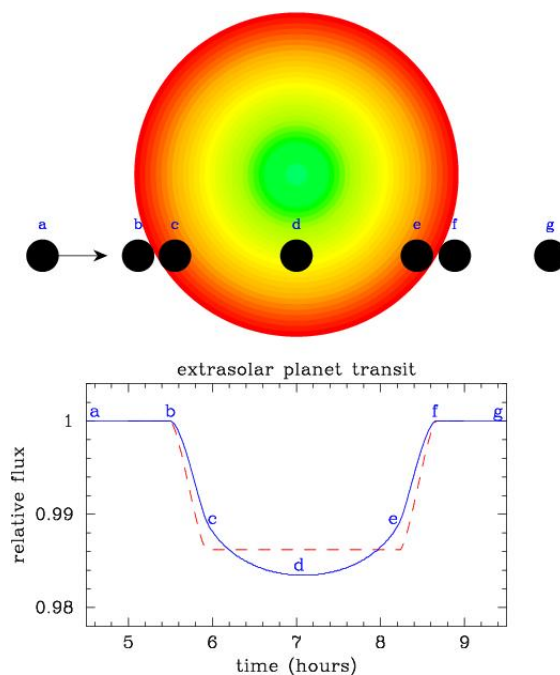


Obrázek 4.4: Obrázek světelné křivky v závislosti na poloze planety. Označení R_p je poloměr planety, R_* poloměr hvězdy, ΔF je hloubka poklesu, t_{c1} délka trvání centrální části přechodu pro inklinaci s hodnotu vyšší, t_{c2} délka trvání centrální části přechodu pro inklinaci s hodnotu nižší, t_{z1} délka trvání přechodu pro inklinaci s hodnotu vyšší, t_{z2} délka trvání přechodu pro inklinaci s hodnotu nižší.



Obrázek 4.5: Obrázek světelné křivky v závislosti na velikosti exoplanety. Označení R_v je poloměr exoplanety větší, R_m poloměr exoplanety menší, t_c délka trvání centrální části přechodu, t_z délka trvání přechodu, ΔF_1 je hloubka poklesu pro exoplanetu menší a ΔF_2 je hloubka poklesu pro exoplanetu větší.

Pokud bychom chtěli pozorovat Slunce a promítli si jeho kotouč třeba na papír, zjistíme, že na okrajích se nám jeví tmavší než ve svém centru. Je to způsobeno rozdílnou teplotou, která zde panuje. Při pohledu do centra se díváme do hlubších částí hvězdy, kde je teplota vyšší. Proto je centrum světlejší oproti okrajovým částem s menší teplotou i hloubkou. Tento jev se jmenuje okrajové ztemnění a na světelné křivce se projevuje zakulacením minima (obrázek 4.6).



Obrázek 4.6: Obrázek popisující světelnou křivku (modře vyznačená) s okrajovým ztemněním. [Zdroj: <http://www.transitofvenus.co.nz>]

4.3 Poloměr planety

Poloměr extrasolární planety je určován z hloubky tranzitu podle vztahu:

$$\Delta F = \frac{F_{\star} - F_t}{F_{\star}} = \frac{\pi I_{\star} F_{\star}^2 - \pi I_{\star} R_P^2}{\pi I_{\star} R_{\star}^2} = \left(\frac{R_P}{R_{\star}} \right)^2, \quad (4.6)$$

označení ΔF je hloubka tranzitu, F_{\star} tok záření přicházející od hvězdy, když nedochází k zárytu, F_t je tok záření z celého disku, kdy je planeta promítnuta na disk hvězdy, R_{\star} poloměr hvězdy, R_P poloměr planety, I_{\star} je intenzita hvězdy. Abychom určili poloměr planety, je nutné znát poloměr mateřské hvězdy.

4.4 Velká poloosa

K určení velké poloosy použijeme třetí Keplerův zákon:

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_\star + M_P)}, \quad (4.7)$$

kde P je perioda oběhu, a hlavní poloosa, G je gravitační konstanta, M_\star hmotnost hvězdy, M_P hmotnost planety. Exoplanety však mají vůči svým hvězdám zanedbatelnou hmotnost $M_P \ll M_\star$, proto můžeme vztah přepsat do tvaru:

$$a = \sqrt[3]{\frac{P^2 G M_\star}{4\pi^2}}. \quad (4.8)$$

4.5 Inklinace

Inklinace je úhel mezi rovinou oběhu planety a rovinou kolmou na úhel pohledu. Tuto veličinu určíme ze známé doby trvání přechodu t_z . Délka přechodu je dána vztahem:

$$t_z = \frac{P\alpha}{2\pi}. \quad (4.9)$$

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:

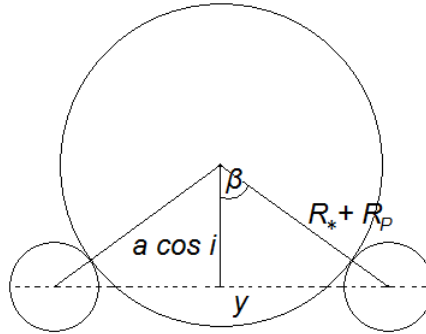
$$\sin \frac{\alpha}{2} = \sin \beta = \frac{y}{2} = \frac{\sqrt{(R_\star + R_P)^2 - a^2 \cos^2 i}}{a}. \quad (4.10)$$

Pro výsledný vztah délky trvání přechodu t_z dostaneme vzorec:

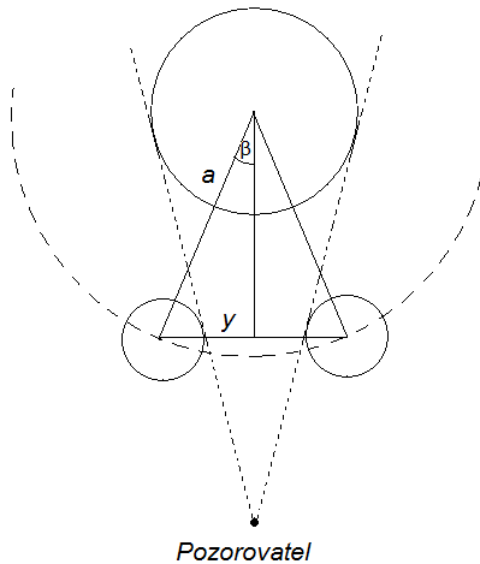
$$t_z = \frac{P}{\pi} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(R_\star + R_P)^2 - a^2 \cos^2 i}}{a} \right). \quad (4.11)$$

Pomocí matematických úprav pak můžeme určit konečný vztah pro inklinaci:

$$i = \arccos \sqrt{\frac{(R_\star + R_P)^2}{a^2} - \sin^2 \frac{t_z \pi}{P}}. \quad (4.12)$$



Obrázek 4.7: Obrázek znázorňuje vztahy mezi jednotlivými veličinami: y pomocná veličina, $a \cos i$ je průmět vzdálenosti planety od hvězdy do roviny kolmé k pozorovateli v okamžiku zdánlivě nejmenší vzdálenosti od středu, β polovina úhlu naznačující úsek dráhy planety, kdy dochází k jejímu promítání na hvězdný disk, R_* je poloměr hvězdy a R_P poloměr planety. Popis Sackett (1999).



Obrázek 4.8: Obrázek znázorňuje vztahy mezi jednotlivými veličinami: a velká poloosa, y pomocná veličina, β polovina úhlu naznačující úsek dráhy planety, v němž dochází ke jejímu promítání na hvězdný disk.

Kapitola 5

Pozorování

Pozorování tranzitů extrasolárních planet má hned několik úskalí. V první řadě je to relativně malý pokles jasnosti spojený s přechodem planety. Při pozorování hvězd podobných Slunci je pokles jasnosti při tranzitu obří planety o velikosti Jupiteru či Saturnu asi 1 procento. U planet o velikosti Uranu či Neptunu je to už jen asi 0,1 procenta a detekovat planetu zemského typu znamená rozlišit pokles jasnosti o 0,01 procenta. Dalšími komplikacemi jsou střídání dne a noci, zhoršení počasí během pozorovací noci nebo skutečnost, že hvězda nemusí být z daného místa pozorovatelná po celý rok.

Pozorování byla prováděna na observatoři Masarykovy univerzity prostřednictvím 62cm zrcadlového dalekohledu a CCD kamery SBIG ST8. Pro určení parametrů exoplanet byly naměřeny přechody u 3 extrasolárních planet v průběhu 5 nocí. Pozorovány byly exoplanety TrES-1b, TrES-2b, Wasp-10b.

Pořízená data byla upravována v několika programech. V programu Maxim DL (verze 4.11) byly vyrovnány nerovnoměrnosti pozadí. Analýza a oprava snímků o dark frame, flat field a clonku byla provedena v programu CMunipack (verze 1.1.26). Dark frame (temný snímek) se snaží podchytit vliv tepelného šumu na jednotlivé pixely. Kromě dopadajícího záření vzniká signál v detektoru i tepelným šumem, který je způsobený zahřátím kamery. Proto se pořizují snímky bez světla (např. zakrytím dalekohledu) o stejné expoziční době jako snímky, jež chceme opravovat. Samotná korekce je pak odečtení dark frame od vědeckého snímku. Flat field opravují vliv různých citlivostí pixelů CCD detektoru. Jak název napovídá, jde o obraz rovnoměrně světlé plochy. Ta se jeví našemu přístroji jako obraz, u kterého jsou tmavší části ve stejných místech jako na vědeckém snímku. Pořízený flat field se opraví o dark frame a udělá se jeho průměrná hodnota [Zdroj: Hroch 2009.]. O tuto hodnotu pak opravujeme napozorované snímky. Opravená data byla vložena do fitovacího programu databáze ETD, který byl podrobněji popsán v kapitole 4. A nakonec byla převzatá data O-C diagramu vykreslena v programu

OriginPro 8 SRO.

Zem. délka	Zem. šířka	Nadm. výška [m n.m.]
16° 35' 1.8''	49° 12' 14.9''	305

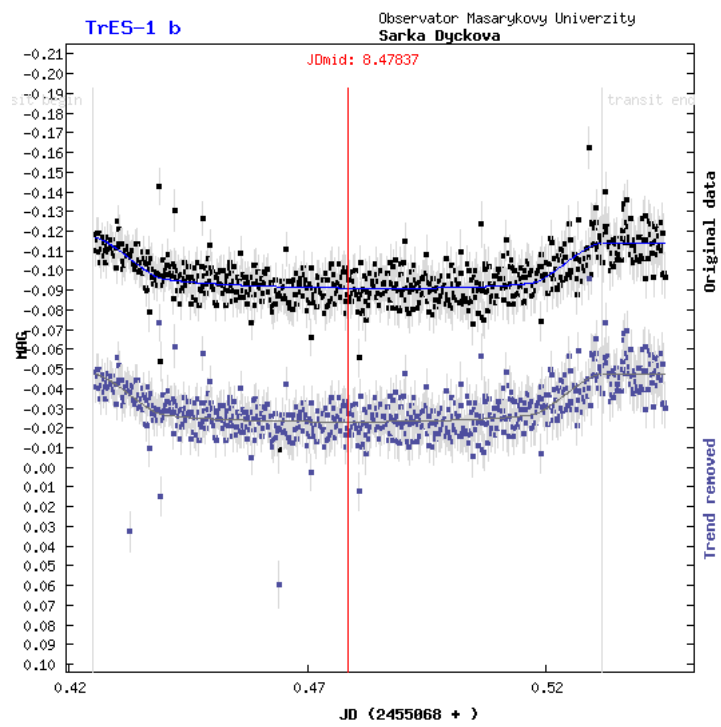
Tabulka 5.1: Tabulka s informacemi o poloze a nadmořské výšce observatoře Masarykovy univerzity.

5.1 TrES-1b

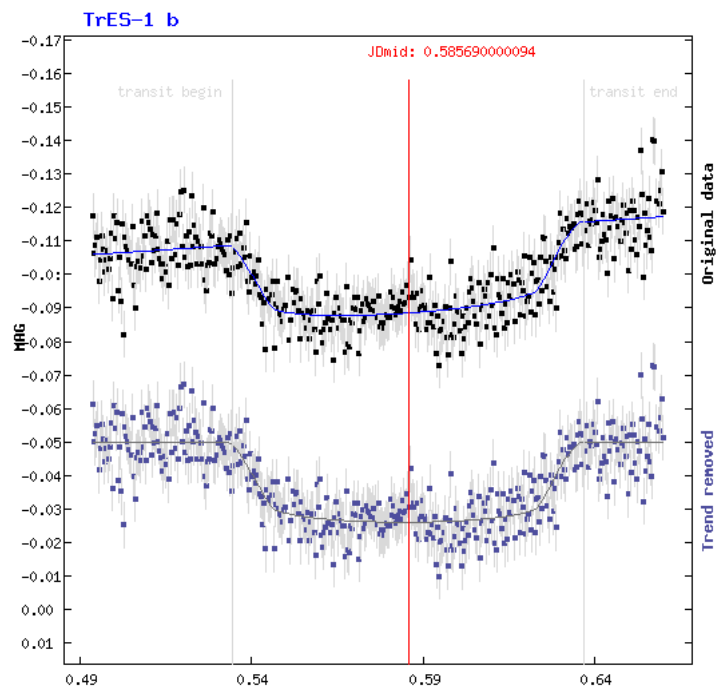
U této exoplanety byla prováděna celkově dvě měření. Poprvé v létě 24. 8. 2009 a pak o sedm měsíců později 24. 3. 2010. Na prvním obrázku 5.1 můžeme vidět malá křídla světelné křivky. Toto pozorování bylo první z celé série pěti měření, a i když byly k dispozici informace z databáze ETD, nepodařilo se odhadnout správnou dobu začátku, aby byly naměřeny vhodně dlouhá křídla křivky. Proto každá další měření byla spouštěna hodinu před začátkem samotného přechodu. Druhá pozorovací noc věnovaná této exoplanetě byla 24. 3. 2010. Na začátku pozorování je viditelný rozptyl dat, který je nejspíše způsobený faktem, že těleso mělo zpočátku malou výšku nad obzorem. I přes nepříznivé podmínky byla udělena v databázi ETD těmto měřením známka dvě.

Datum	Filtr	Délka expozice [s]	Počet snímků	Pozorovatelé
24. 8. 2009	R	10	689	TH, TeK, BM, SD
24. 3. 2010	R	30	411	ChM, SD

Tabulka 5.2: Informace o pozorování exoplanety TrES-1b. Pozorovatelé: BM = Barbora Mikulecká, ChM = Marek Chrastina, TeK = Tereza Krejčová, TH = Tomáš Henych, SD = Šárka Dyčková.



Obrázek 5.1: Světelná křivka exoplanety Tres-1b. V noci z 24./25.8 2009.



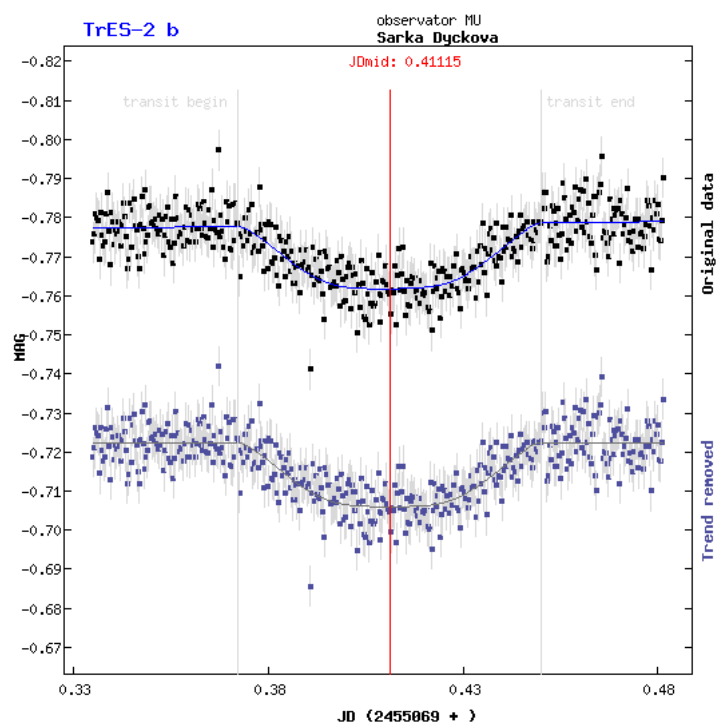
Obrázek 5.2: Světelná křivka exoplanety Tres-1b. V noci z 24./25.3 2010.

5.2 TrES-2b

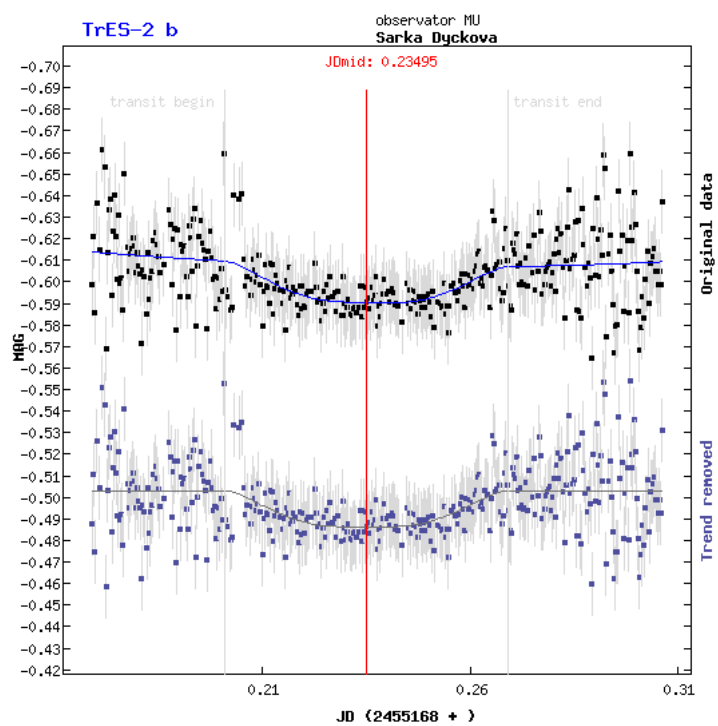
Tato exoplaneta byla pozorována na konci srpna 25. 8. 2009 a začátkem prosince 2. 12. 2009. První pozorování (obrázek 5.3) bylo prováděno za výborných pozorovacích podmínek. Bohužel u druhého měření (obrázek 5.4) má především na začátek a konec křivky vliv špatné počasí a klesání objektu k horizontu. Za svou kvalitu byla tato měření v databázi ETD ohodnocena číslem dvě.

Datum	Filtr	Délka expozice [s]	Počet snímků	Pozorovatelé
25. 8. 2009	R	25	437	ChM, TeK, SD
2. 12. 2009	R	25	410	JL, SD

Tabulka 5.3: Informace o pozorování exoplanety TrES-2b. Pozorovatelé: ChM = Marek Chrastina, JL = Jiří Liška, TeK = Tereza Krejčová, SD = Šárka Dyčková.



Obrázek 5.3: Světelná křivka exoplanety TrES-2b. V noci z 25./26.8 2009.



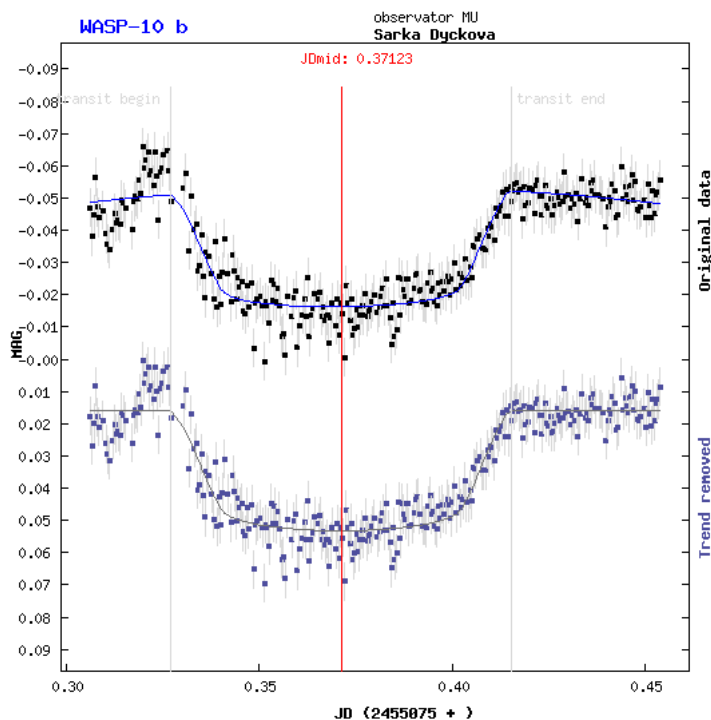
Obrázek 5.4: Světelná křivka exoplanety TrES-2b. V noci z 2./3.12 2009.

5.3 WASP-10b

Tento planetární systém byl vybrán především kvůli své velké hloubce poklesu jasnosti. Měření probíhalo v noci 31. 8. 2009, zpočátku za zhoršeného počasí (obrázek 5.5). V databázi kvality ETD mu patří hodnocení číslo dvě.

Datum	Filtr	Délka expozice [s]	Počet snímků	Pozorovatelé
31. 8. 2009	R	35	321	ChM, SD

Tabulka 5.4: Informace o pozorování exoplanety WASP-10b. Pozorovatelé: ChM = Marek Chrastina, SD = Šárka Dyčková.



Obrázek 5.5: Světelná křivka exoplanety Wasp-10b naměřená 31. 8./1. 9. 2009.

Kapitola 6

Výsledky

6.1 TrES-1b

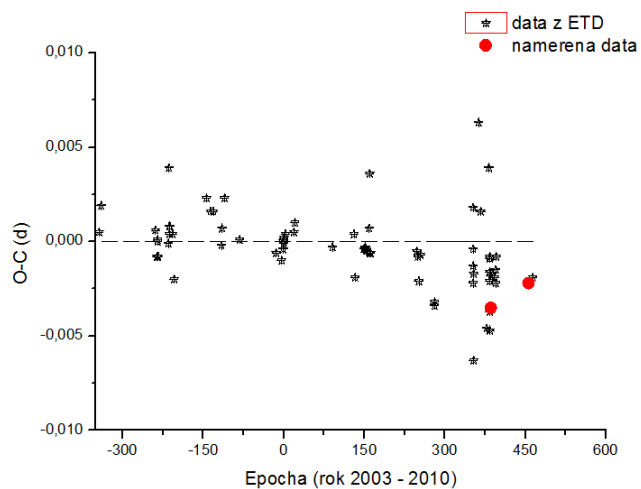
Exoplaneta s hmotností $0.61 M_j$ se nachází u hvězdy spektrálního typu K0V a pozorované hvězdné velikosti $V = 11.7$ mag. Byla nalezena v roce 2004 ve vzdálenosti 147 pc ¹ od Slunce v souhvězdí Lyry.

6.1.1 Výsledky měření

Parametry	Data z katalogu	24. 8. 2009	24. 3. 2010
$\Delta F[mag]$	0.021	0.0244 ± 0.0015	0.0237 ± 0.0008
$t_z[min]$	149.8	153.5 ± 2.3	147 ± 2
$R_P[R_j]$	1.081 ± 0.029	1.195 ± 0.036	1.176 ± 0.019
$R_\star[R_{SUN}]$	0.82 ± 0.02		
$A[AU]$	0.0393 ± 0.0007		
$P[den]$	3.0300737		
$i[^\circ]$	88.4 ± 0.3	88.99 ± 0.58	88.03 ± 0.03

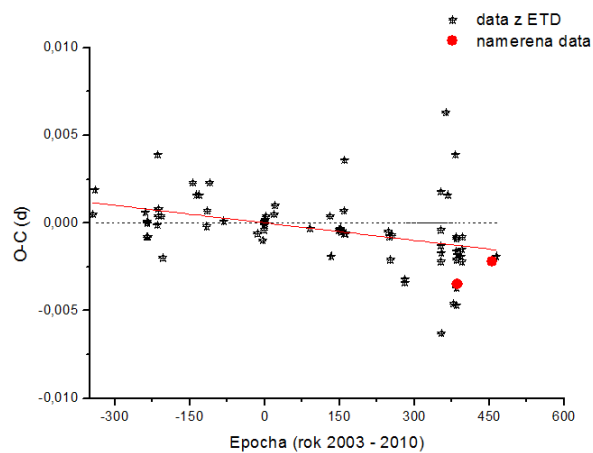
Tabulka 6.1: Tabulka výsledků pro exoplanetu TrES-1b.

¹Parsek $\text{pc} = 3.0856776 \cdot 10^{16} \text{ m}$ [Zdroj: Mikulášek, Z., Krtička, J. 2005.]



Obrázek 6.1: Graf O-C TrES-1b. V noci z 24./25.3. 2010 a z 24./25.8. 2009. Červené body jsou naměřené hodnoty, hvězdičky značí data z databáze ETD.

Na základě O-C grafu byla určena perioda exoplanety TrES-1b.

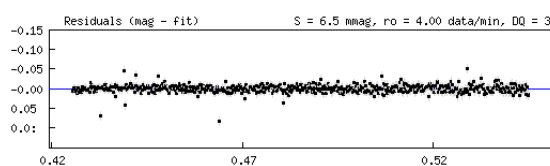


Obrázek 6.2: Graf se směrnicí přímky určující periodu exoplanety TrES-1b.

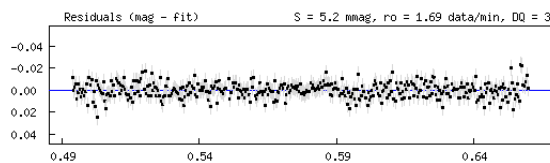
Po proložení grafu přímkou jsme určili hodnotu periody (obrázek 6.2).

Původní perioda [d]	Nová perioda [d]
3.03007	3.03008 ± 0.00023

Tabulka 6.2: Perioda exoplanety TrES-1b.



Obrázek 6.3: Graf reziduí světelné křivky exoplanety Tres-1b, v noci 24./25.8. 2009.



Obrázek 6.4: Graf reziduí světelné křivky exoplanety Tres-1b, v noci 24./25.3. 2010.

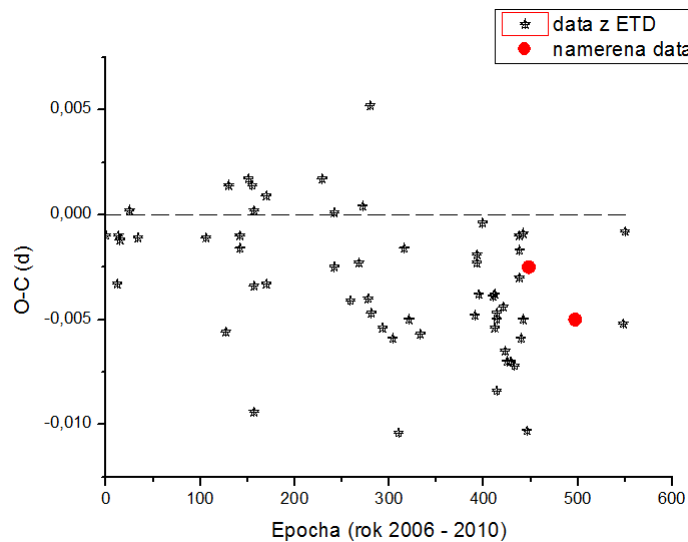
6.2 TrES-2b

Zkoumaná exoplaneta byla objevena roku 2006. Má hmotnost $1.199 M_j$ a kolem své hvězdy typu G0V s efektivní teplotou $T_{ef} = 5800$ K a hvězdnou velikostí $V = 11.41$ mag se pohybuje ve vzdálenosti 0.037 AU. Nachází se v souhvězdí Draka ve vzdálenosti 220 pc od Slunce a její hvězdná velikost je $V = 11.41$ mag.

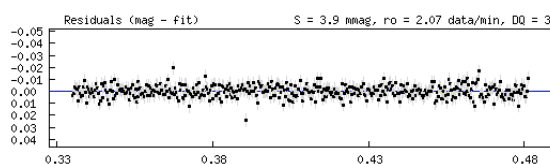
6.2.1 Výsledky měření

Parametry	Data z katalogu	25. 8. 2009	2. 12. 2009
$\Delta F[mag]$	0.018	0.0164 ± 0.0006	0.017 ± 0.003
$t_z[min]$	90	111.9 ± 3.2	97.7 ± 9.7
$R_P[R_j]$	1.272 ± 0.041	1.195 ± 0.022	1.217 ± 0.115
$R_\star[R_{SUN}]$	1.00 ± 0.04		
$A[AU]$	0.03556 ± 0.00075		
$P[den]$	2.470621		
$i[^\circ]$	83.62 ± 0.01	83.74 ± 0.17	83.14 ± 0.51

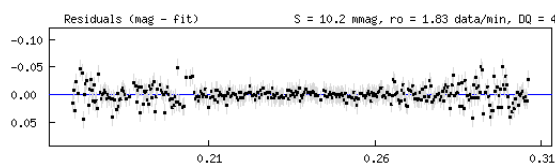
Tabulka 6.3: Tabulka výsledků pro exoplanetu TrES-2b.



Obrázek 6.5: Graf O-C Tres-2b. V noci z 25./26.8. 2010 a z 2./3.12. 2010. Červené body jsou naměřené hodnoty, hvězdičky značí data z databáze ETD.



Obrázek 6.6: Graf reziduí světelné křivky exoplanety TrES-1b, v noci 25./26.8.2010.



Obrázek 6.7: Graf reziduí světelné křivky exoplanety TrES-1b, v noci 2./3.12.2010.

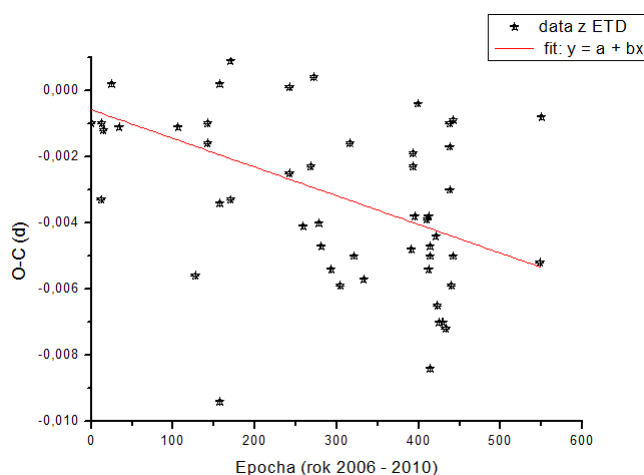
Tato exoplaneta se díky změnám svého chování stala velmi poutavým objektem ke zkoumání. Tým německých astronomů odhalil změny ve sklonu dráhy a době oběhu planety TrES - 2b. Změny byly připisovány další možné planetě obíhající okolo mateřské hvězdy. Planeta s největší pravděpodobností z našeho pohledu nepřechází před svou hvězdou. Bohužel také další metody detekce exoplanet nelze použít a potvrdit tak existenci dalšího tělesa. [Zdroj: Mislis et al. 2009.]. Pokud se podíváme na obrázek 6.4 O-C diagramu, můžeme si všimnout, že data mají klesající tendenci. Proto byla u těchto měření na základě O-C diagramu a uvedeného článku provedena oprava periody.

Oprava periody exoplanety TrES-2b

Sledujeme-li minimum světelné křivky exoplanety po delší dobu, je vhodné si zkonstruovat O-C graf, což je časová závislost rozdílu okamžiku pozorovaného minima O a vypočteného okamžiku C. Na vodorovnou osu pak nanášíme čas udávaný v epoše. Epoque je zvolený časový okamžik, na který se vztahují polohy těles nebo jiné astronomické veličiny (hloubka poklesu, čas přechodu). Interpretace pozorovaného grafu O-C je jednou z nejúčinnějších možností, jak lze sledovat chování objektů. V případě, že grafem O-C je šikmá přímka procházející bodem $E = O$, $O-C = 0$, jako v našem měření, ukazuje se, že okamžik minima je určen správně, ale periodu je nutno opravit o směrnici přímky proložené závislostí O-C.

P tedy vypočteme jako:

$$\delta P = \frac{d(O - C)}{dE}. \quad (6.1)$$



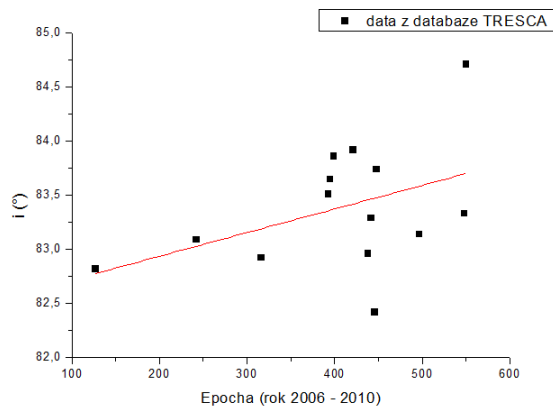
Obrázek 6.8: Graf se směrnici přímky opravující periodu exoplanety TrES-2b.

Po proložení grafu přímkou jsme získali novou hodnotu periody (obrázek 6.8).

Původní perioda [d]	Nová perioda [d]
2.4706	2.4712 ± 0.0008

Tabulka 6.4: Oprava periody u exoplanety TrES-2b.

Větší rozptyl dat v O-C diagramu byl připisován přítomnosti dalšího tělesa v soustavě. Proložení přímkou řešilo jen opravu o dlouhodobý trend, ale nakonec v březnu 2010 přišli vědci z University v Arizoně s novým měřením a daty z vesmírného dalekohledu Kepler, která definitivně zavrhl myšlenku dalšího tělesa. Kepler určil sklon dráhy na hodnotu $i = 83^\circ.91 \pm 0.03$, podle které je změna $\Delta i = -0^\circ.08 \pm 0.07$ (bráno oproti původní hodnotě O'Donovan et al. 2006) v průběhu 3 let zanedbatelná. [Zdroj: Scuderi et al. 2010.]. Proto byl vykreslen graf závislosti inklinace na epoše (obrázek 6.9).



Obrázek 6.9: Graf znázorňující sklon dráhy exoplanety TrES-2b v závislosti na čase.

Hodnoty byly získány z databáze TRESKA a proloženy přímkou, abychom zjistili hodnotu inklinace (obrázek 6.9).

Inklinace (Kepler) [°]	Naměřená inklinace [°]
83.91 ± 0.03	83.4 ± 0.2

Tabulka 6.5: Oprava inklinace u exoplanety TrES-2b.

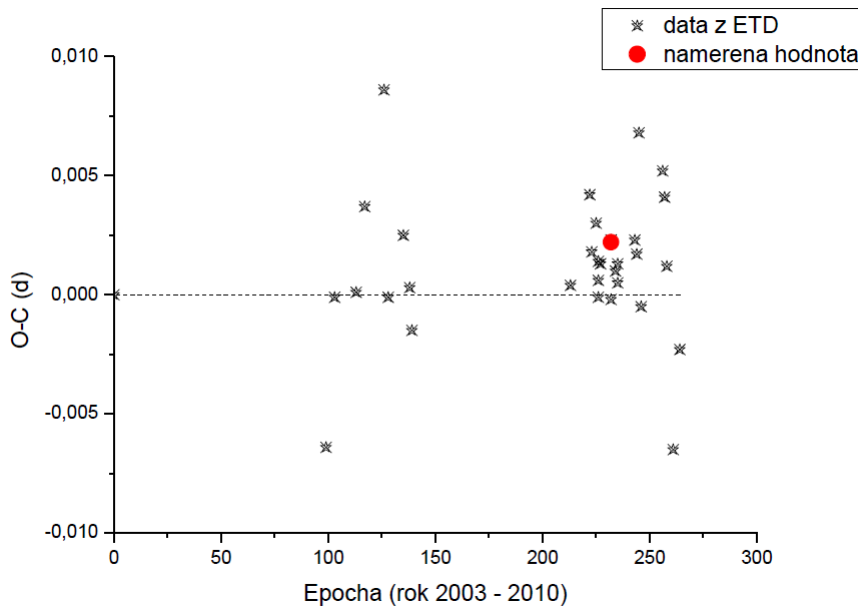
6.3 WASP-10b

Tato exoplaneta byla objevena v souhvězdí Pegase roku 2008. Mateřská hvězda je typu K5 s efektivní teplotou $T_{ef} = 4675$ K o hvězdné velikosti $V = 12.7$ mag. Nachází se ve vzdálenosti 90 pc od Slunce. Exoplaneta má hmotnost $3.06 M_j$ a kolem hvězdy se pohybuje ve vzdálenosti 0.0371 AU.

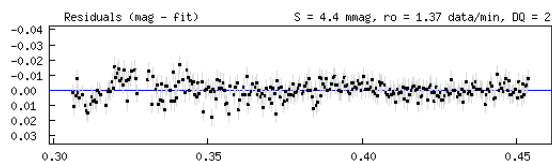
6.3.1 Výsledky měření

Parametry	Data z katalogu	31. 8. 2009
$\Delta F[mag]$	0.039	0.0371 ± 0.0016
$t_z[min]$	127.8	127.2 ± 1.4
$R_P[R_j]$	1.08 ± 0.02	1.249 ± 0.026
$R_\star[R_{SUN}]$	0.698 ± 0.043	
$A[AU]$	0.0037 ± 0.0014	
$P[den]$	3,09272	
$i[^\circ]$	86.8 ± 0.6	87.1 ± 0.14

Tabulka 6.6: Tabulka výsledků pro exoplanetu WASP-10b.

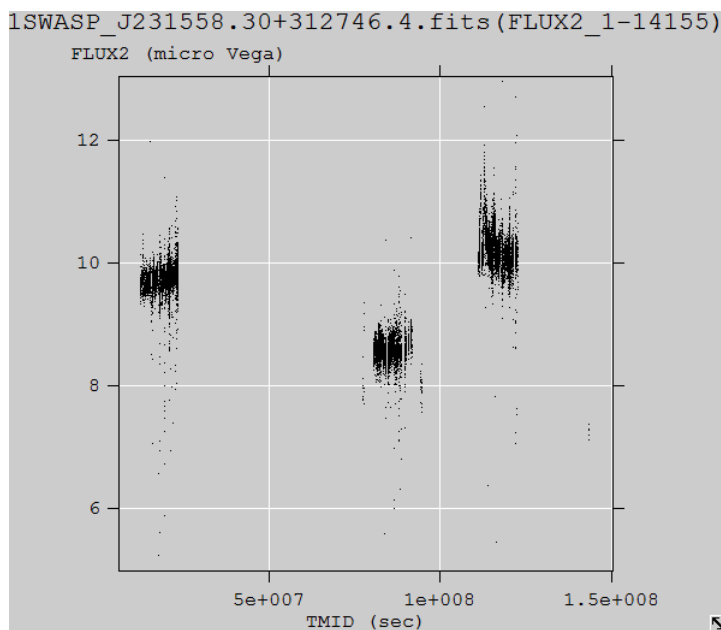


Obrázek 6.10: Graf O-C WASP-10b. V noci z 31.8/1.9 2010. Červený bod jsou naměřené data. Hvězdičkou jsou označena převzatá data z ETD.



Obrázek 6.11: Graf reziduí světelné křivky pro exoplanetu WASP-10b v noci 31.8./1.9. 2010.

Projekt SuperWASP (Wide Angle Search for Planets), díky kterému byla objevena tato exoplaneta, zveřejnil nedávno svůj archiv (23. 4. 2010). Data obsahují všechny obrázky a světelné křivky naměřené během let 2004-2008 ze severní i jižní oblohy. K vyhledávání i stahování dat je tu k dispozici 17 970 999 světelných křivek, 3 631 972 CCD snímků a 26 exoplanet.



Obrázek 6.12: Graf obsahující data z veřejného archivu SuperWASP pro exoplanetu WASP-10b. Data byla upravována v programu Fv.

Zpracováním těchto pozorování a jejich vložení do ETD by bylo možné získat velmi bohatý, stejnorodý materiál a jeho využitím zpřesnit v práci uvedené parametry. To ale nebylo z časových důvodů možné.

Kapitola 7

Závěr

V této práci jsem se zabývala detekcí exoplanet zákryty a určováním jejich parametrů. Jednotlivá měření probíhala v průběhu pěti nocí, kdy se mi podařilo napozorovat dva zákryty u exoplanety TrES-1b, TrES-2b a jeden přechod u exoplanety WASP-10b. Světelné křivky těchto měření můžete vidět na obrázcích 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5. Všechna pozorování byla měřena na observatoři Masarykovy univerzity. Na tvaru světelných křivek a rozptylu napozorovaných dat můžeme vidět špatný vliv počasí, klesání objektu níže k horizontu, či světelné znečištění Brna.

Při určování parametrů exoplanet jsem používala fitovací program databáze ETD, který je popsán v kapitole 4. Získané výsledné hodnoty mého měření jsou vyneseny v následující tabulce.

TrES-1b		
Datum	Poloměr $R_P[R_j]$	Inklinace $i[^\circ]$
24. 8. 2009	1.195 ± 0.036	88.99 ± 0.58
24. 3. 2009	1.176 ± 0.019	88.03 ± 0.03
TrES-2b		
Datum	Poloměr $R_P[R_j]$	Inklinace $i[^\circ]$
25. 8. 2009	1.195 ± 0.022	83.74 ± 0.17
2. 12. 2009	1.217 ± 0.115	83.14 ± 0.51
WASP-10b		
Datum	Poloměr $R_P[R_j]$	Inklinace $i[^\circ]$
31. 8. 2009	1.249 ± 0.026	87.1 ± 0.1

Tabulka 7.1: Tabulka dosažených výsledků.

Vypočtené parametry se vcelku shodují s údaji uvedenými v databázi ETD. U prvního měření exoplanety TrES-1b byla chyba způsobena především nedostačující velikostí křídel světelné křivky. U všech tří exoplanet jsem určila jejich poloměr a inklinaci. U exoplanety TrES-1b jsem ověřila hodnotu periody $P = (3,03008 \pm 0.00023)$ d. Dále jsem na základě pozorování a aktuálních odborných článků o exoplanetě TrES-2b provedla opravu její periody $P = (2.4712 \pm 0.0008)$ d a určila i novou hodnotu inklinace $i = (83.4 \pm 0.2)^\circ$.

Kapitola 8

Literatura

- Mayor, M., Frei, P. 2007, *Nové světy ve vesmíru*, Paseka, Praha
- Mayor, M., Q., Queloz, D. 1995, *Nat*, 378, 355
- Pokorný, Z. 2007, *Exoplanety*, Academia, Praha
- Mikulášek, Z., Krtička, J. 2005, *Základy fyziky hvězd*
- Sackett, P.D. 1999, in *NATO ASIC Proc. 532: Planets Outside the Solar System: Theory and Observations*, ed. J.-M. Mariottu D. Alloin, 189
- Poddaný, S., Brát, L., Pejcha, O. 2005, *NewA* 15, 297P
- Mislis, D., Schmitt, J.H.M.M. 2009, *AA* 500L, 45M
- Mikulášek, Z. 2002, *Proměnné hvězdy*, Brno
- Henry, G.W., Marcy, W.G., Butler, R.P. 2000, *ApJ*, 529L, 41H
- Alonso, R., Brown, M.T., Torres, G. 2004, *ApJ*, 613L, 153A
- Charbonneau, D. 2000, *ApJ*, 529L, 45C
- Butler, R.P., Brown, M.T. 1999, *ApJ*, 526, 916B
- Quirrenbach, A., *Detection and Characterization of Extrasolar Planets*
- Krejčová, T. 2008, *CCD fotometrie exoplanet*, Brno
- Hroch, F. 2009, *Astronomické praktikum*, Brno
- Scuderi, L., Dittmann, 2010, *ApJ*, 714, 462S
- Charbonneau, D. 1999, *IAUC*, 7315, 1L

Elektronické zdroje

<http://www.universetoday.com>

<http://exoplanet.eu>

<http://var2.astro.cz>

<http://superwasp.org>

<http://www.wasp.le.ac.uk/public/index.php> <http://kepler.nasa.gov>

<http://arxiv.org/PS_{cache}/arxiv/pdf/0912/0912.4428v2.pdf>