



VYBRANÉ PROBLÉMY ŠTÚDIA EXTRASOLÁRNYCH PLANÉT



ZOLTÁN GARAI

Astronomický ústav SAV

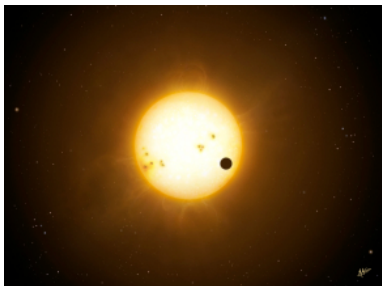
Tatranská Lomnica

OBJEKT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Objektom dizertačnej práce sú **extrasolárne planéty** (exoplanéty).

- Exoplanéta má hmotnosť nanajvýš $13 M_{\text{Jup}}$.
- Obieha okolo hviezdy (nie okolo Slnka).
- Voľne putujúce exoplanéty.

Exoplanetárny kandidát je potenciálna, ešte nepotvrdená exoplanéta.



PREDMET DIZERTAČNEJ PRÁCE

Dizertačná práca je zameraná na **vybrané problémy** štúdia extrasolárnych planét. Obsahuje tri problematiky:

- **Prvá problematika:** štúdium foriem interakcie medzi hviezdou a planétou – straty hmoty z exoplanéty.
- **Druhá problematika:** oblasť hľadania a štúdia mladých exoplanét.
- **Tretia problematika:** komplexnejšia analýza exoplanét pomocou spektroskopie a fotometrie.

HĽADANIE OKOLOPLANETÁRNEJ HMOTY A DLHODOBÝCH ZMIEN OBEŽNÝCH PERIÓD

Kontext

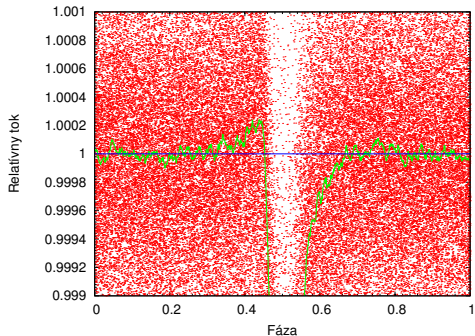
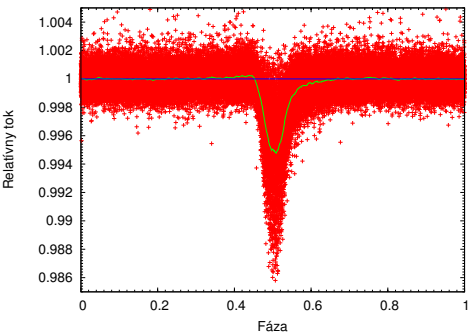
- Krátkoperiodické exoplanéty: silná interakcia hviezda – planéta.
- Ožarovanie planéty materskou hviezdou \implies

strata hmoty z exoplanéty.

- Napr. KIC 12557548 b (Rappaport et al. 2012).
 - Objekt, pravdepodobne rozmerovo podobný veľkosti Merkúra.
 - $P_{\text{orb}} \simeq 0,65356$ dňa (krátkoperiodická exoplanéta).
 - $V = 16$ mag, $T_{\text{eff}} \simeq 4400$ K \implies Spektrálny typ K.
- Nezvyčajná tranzitná svetelná krivka.

HĽADANIE OKOLOPLANETÁRNEJ HMOTY A DLHODOBÝCH ZMIEN OBEŽNÝCH PERIÓD

Kontext



- Predtranzitné zjasnenie.
- Ostrá zostupná fáza.
- Najprv ostrejšia a potom pozvoľnejšia vzostupná fáza.
- Potranzitné zjasnenie.

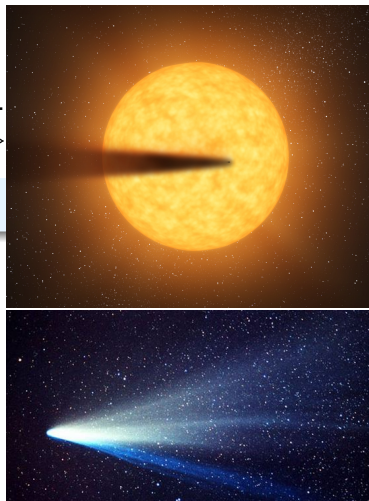
HĽADANIE OKOLOPLANETÁRNEJ HMOTY A DLHODOBÝCH ZMIEN OBEŽNÝCH PERIÓD

Kontext

- Nezvyčajný tvar svetelnej krivky \implies rozpadávanie sa planéty (Rappaport et al. 2012; Brogi et al. 2012; Budaj 2013) \implies

tzv. "Kvázikometárny chvost".

- Model o katastrofickom rozpadávaní sa planetárnych telies prostredníctvom termálneho vetra (Perez-Becker & Chiang 2013).
 - Podmienky:
 - ★ $M_p < M_{\text{Mer}}$
 - ★ $T_{\text{eq}} > 2000 \text{ K}$



HĽADANIE OKOLOPLANETÁRNEJ HMOTY A DLHODOBÝCH ZMIEN OBEŽNÝCH PERIÓD

Ciele

- Hľadať podobné kvázikometárne chvosty (okoloplanetárny materiál v tomto užšom zmysle slova).
- Hľadať dlhodobé zmeny obežných períód (iná forma interakcie).

Postup

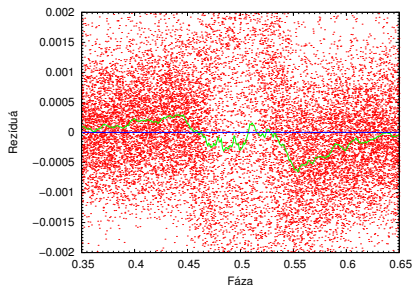
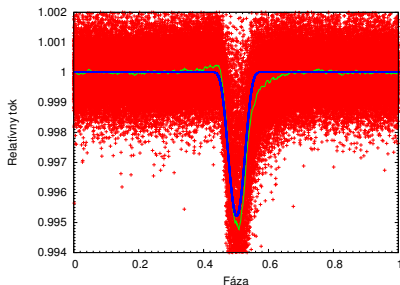
- Vzorka 20 exoplanetárnych kandidátov z misie *Kepler*.
 - $P_{\text{obj}} \sim P_{\text{KIC1255}} \implies$ krátkoperiodické objekty.
 - $T_{\text{eff}} \text{ materskej hviezdy} \sim T_{\text{eff}} \text{ KIC 12557548}$.

Hľadanie kvázikometárnych chvostov \implies preloženie sfázovanej svetelnej krivky každého objektu vzorky modelovou svetelnou krivkou – predpoklad sférickej planéty (Mandel & Agol 2002) \implies hľadanie anomálií v spriemerovaných rezíduách preloženia.

HĽADANIE OKOLOPLANETÁRNEJ HMOTY A DLHODOBÝCH ZMIEN OBEŽNÝCH PERIÓD

Postup

- Akú podobu anomálií treba hľadať? \implies preloženie svetelnej krivky KIC 12557548 b + rezíduá.

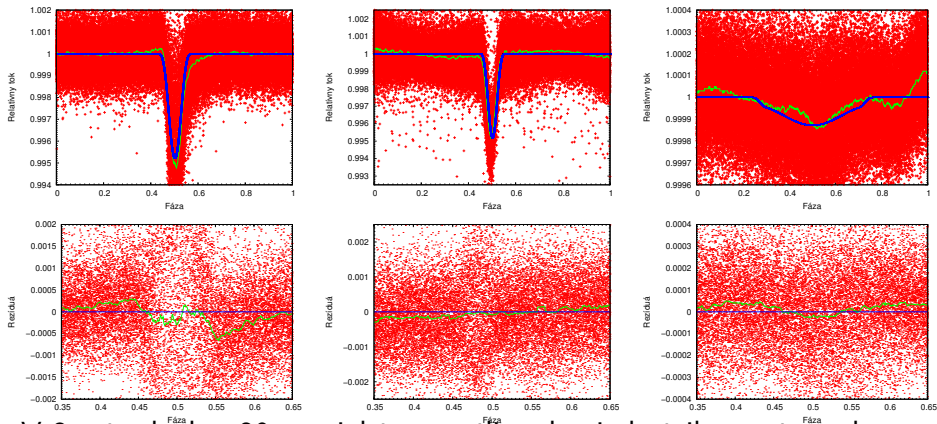


- Hľadanie dlhodobých zmien obežných períód \implies

metóda minimalizácie fázovej disperzie (Stellingwerf 1978).

HĽADANIE OKOLOPLANETÁRNEJ HMOTY A DLHODOBÝCH ZMIEN OBEŽNÝCH PERIÓD

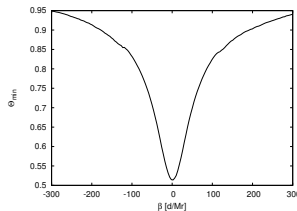
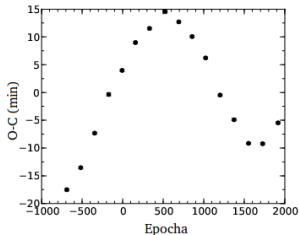
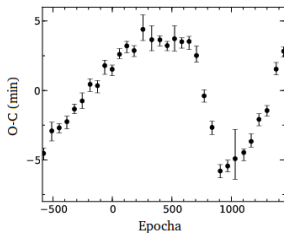
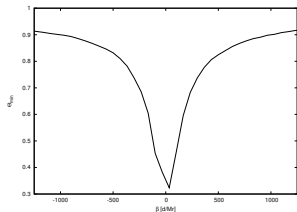
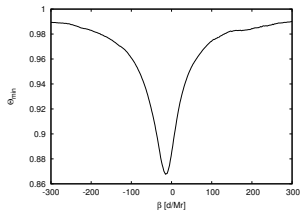
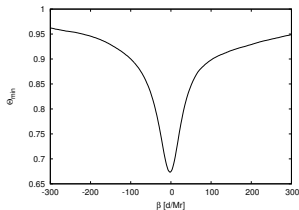
Výsledky



V 8 prípadoch z 20 – nejaká anomália, ale nie kvázikometárny chvost
⇒ súlad s Perez-Becker & Chiang (2013).

HĽADANIE OKOLOPLANETÁRNEJ HMOTY A DLHODOBÝCH ZMIEN OBEŽNÝCH PERIÓD

Výsledky



Upresnené P_{orb} , $3 \times \Delta P_{\text{orb}}$ z toho $2 \times \text{TTV}$, ΔP_{orb} ani pri KIC1255.

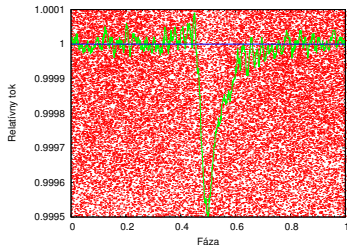
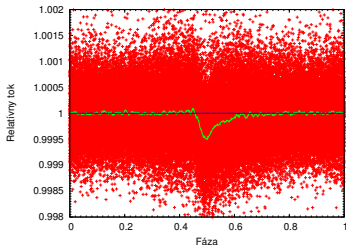
MODELOVANIE SVETELNEJ KRIVKY EXOPLANÉTY KOI 2700 B

Kontext

- KIC 8639908 b (tiež KOI 2700 b) –

2. exoplanéta s kvázikometárnym chvostom (Rappaport et al. 2014).

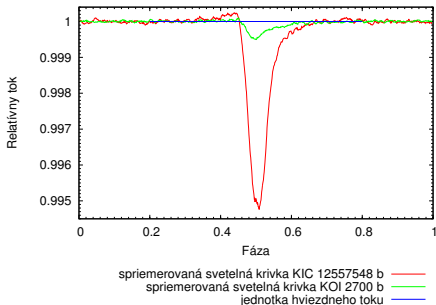
- Bola objavená tiež v databáze *Keplera*.
- Krátkoperiodická exoplanéta, $P_{\text{orb}} \simeq 0,91$ dňa.
- Tranzitná svetelná krivka pripomína KIC 12557548 b.



MODELOVANIE SVETELNEJ KRIVKY EXOPLANÉTY KOI 2700 B

Kontext

- Ďalšie podobnosti s KIC 12557548 b:
 - $V = 15,9$ mag.
 - $T_{\text{eff}} = 4435 \text{ K} \implies \text{K.}$
 - Trvanie tranzitu vo fáze.
- Hlavné rozdiely:
 - Hĺbka tranzitu je cca. $10\times$ menšia pri KOI 2700 b.
 - Potranzitné zjasnenie pri KOI 2700 b nie je badateľné.



MODELOVANIE SVETELNEJ KRIVKY EXOPLANÉTY KOI 2700 B

Ciele

- Overiť predstavu o rozpadávajúcej sa exoplanéte a existencii kvázikometárneho chvosta KOI 2700 b.
- Zistiť typickú veľkosť strácaných prachových častíc.
- Hľadať dlhodobú zmenu obežnej periódy exoplanéty KOI 2700 b.

Postup

- Modelovanie svetelnej krivky \implies

program SHELLSPEC (Budaj & Richards 2004, 2010).

- Program počíta svetelné krivky/spektrá interagujúcich dvojhviezd/planetárnych systémov.
- + 3D okolohviezdny/okoloplanetárny materiál (t.j. obálka).
- Obálka („shell“): napr. škvrna, pruh, disk, prstenec, atď.

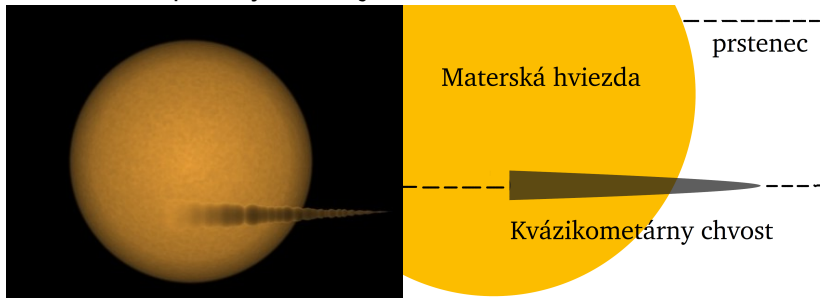
MODELOVANIE SVETELNEJ KRIVKY EXOPLANÉTY KOI 2700 B

Postup

- Model \implies

upravený prstenec okolo materskej hviezdy:

v mieste lokalizácie planetárneho telesa je užší a postupne sa smerom od planéty rozširuje.



MODELOVANIE SVETELNEJ KRIVKY EXOPLANÉTY KOI 2700 B

Postup

- Minerály: oxid hlinitý, enstatit, forsterit, olivín a pyroxén + polomery častíc prachu: 0,01; 0,1; 1,0; 10,0 a 100,0 μm .
 - Mieho absorpcia a rozptyl na sférických prachových časticiach.
 - Opacity a fázové funkcie pre rôzne veľkosti prachových častíc/rôzne minerály.
 - Konečný rozmer materskej hviezdy z pohľadu prachových častíc.
- Hľadanie dlhodobých zmien obežnej periódy KOI 2700 b \implies

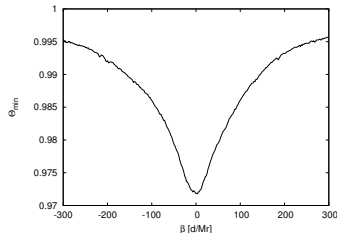
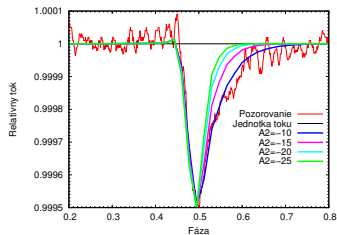
metóda minimalizácie fázovej disperzie (Stellingwerf 1978).

Výsledky

- Sklon obežnej dráhy: $i \simeq 87^\circ$.
- Exponent poklesu hustoty: $A_2 = -10$.

MODELOVANIE SVETELNEJ KRIVKY EXOPLANÉTY KOI 2700 B

Výsledky



- Svetelná krivka KOI 2700 b sa dá veľmi dobre zreprodukovať pomocou nášho modelu.

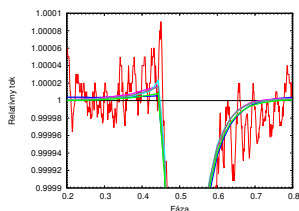
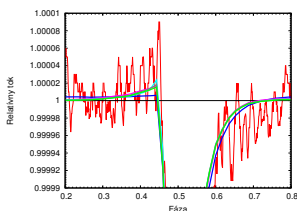
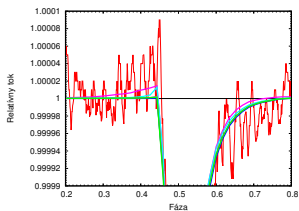
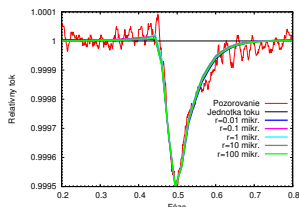
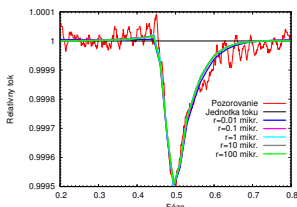
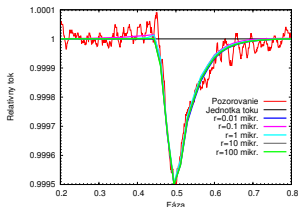
- Najpravdepodobnejšia veľkosť častíc prachu vo chvoste je častica o polomere

$r = 1\mu\text{m}$ (možno aj častice iného r) \implies podobnosť s KIC1255.

- Dlhodobú zmenu obežnej periódy exoplanéty sme nenašli.

MODELOVANIE SVETELNEJ KRIVKY EXOPLANÉTY KOI 2700 B

Výsledky



oxid hlinitý, olivín, pyroxén

enstatit

forsterit

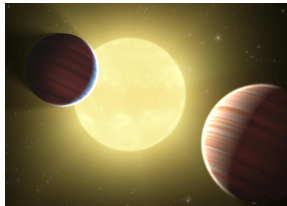
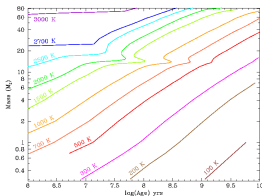
HĽADANIE TRANZITUJÚCICH KANDIDÁTOV VO HVIEZDOKOPE NGC 7243

Kontext

- Mladé tranzitujúce exoplanéty \implies dôležité z hľadiska vývojových modelov planét (popis fyzikálnych veličín planét v čase).

Problém \implies počiatkové podmienky vývoja planét sú neznáme.

- Dôvod \implies chýbajú empirické údaje z pozorovaní (neboli nájdené dostatočne mladé tranzitujúce exoplanéty).
- Riešenie \implies Objav mladých tranzitujúcich exoplanét.



HĽADANIE TRANZITUJÚCICH KANDIDÁTOV VO HVIEZDOKOPE NGC 7243

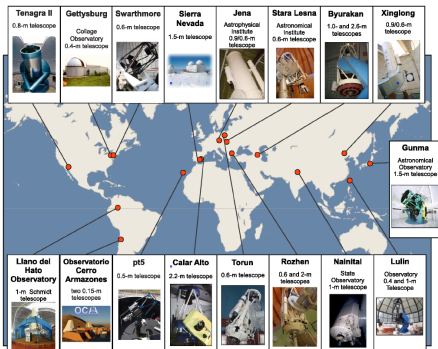
Kontext

Medzinárodný projekt YETI (Neuhaeuser et al. 2011).

- Monitorovanie relatívne mladých (do 100 miliónov rokov) a blízkyh (do 1 kpc) otvorených hviezdokôp \implies

detekcia tranzitujúcich exoplanét vo hviezdokopách.

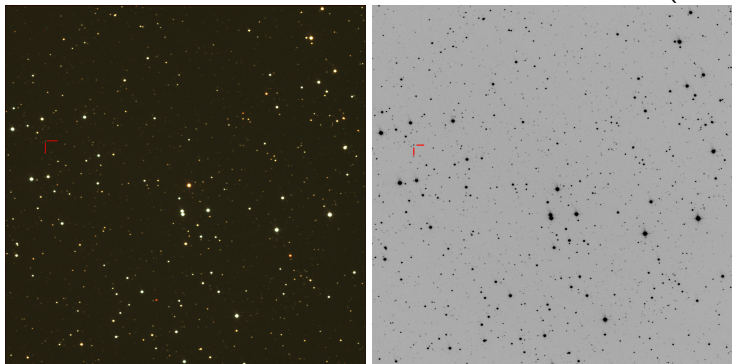
- Pozorovacia sieť \implies ďalekohľady submetrové, metrové a dvojmetrové.



HĽADANIE TRANZITUJÚCICH KANDIDÁTOV VO HVIEZDOKOPE NGC 7243

Kontext

2013 – 2015: projekt YETI na otvorenú hviezdokopu NGC 7243
(súhvezdie Jašterica; $\alpha = 22^{\text{h}}15^{\text{m}}08^{\text{s}}$ a $\delta = +49^{\circ}53'51''$ (J2000.0))



RGB/R

HĽADANIE TRANZITUJÚCICH KANDIDÁTOV VO HVIEZDOKOPE NGC 7243

Ciele

- Hľadať tranzitujúcich exoplanetárnych kandidátov vo hviezdokope NGC 7243.

Postup

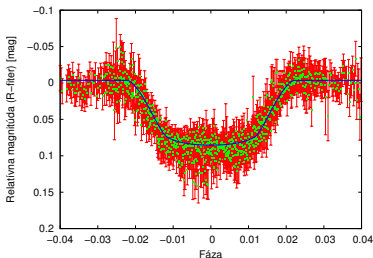
- Fotometria oblasti hviezdokopy:
 - V roku 2013 – 47 pozorovacích nocí.
 - V roku 2014 – 26 pozorovacích nocí.

Krátke a dlhé expozičné doby \implies zvýšenie počtu monitorovaných hviezd; filter R (Bessell 1990); IRAF + umelá porovnávacia hviezda (Broeg et al. 2005) \implies selekcia hviezd (tranzity, premenné hv.).

HĽADANIE TRANZITUJÚCICH KANDIDÁTOV VO HVIEZDOKOPE NGC 7243

Výsledky

- Fotometrický signál podobný tranzitu exoplanéty pri J221550.6+495611 ($V = 15,03$ mag), detekcia $5 \times$ (3 úplné).
- $P_{\text{orb}} \simeq 4,380$ dní; hĺbka tranzitu $\Delta R \simeq 0,08$ mag.
- Tvar „U“, ale hodnoty $\Delta R \simeq 0,08$ mag a $R_p/R_s \sim 0,26$ sú nezvyčajne veľké.



Parameter preloženia	Najlepšia hodnota z programu JKTEBOP
P_{orb} [dni]	4,380383(12)
i [°]	87,7(4)
$(R_p + R_s)/a$	0,144(3)
R_p/R_s	0,262(2)
T_c [HJD]	2456511,4145(7)
c_1	0,2689
c_2	0,3225
L_{sf} [mag]	-0,0036(9)

HĽADANIE TRANZITUJÚCICH KANDIDÁTOV VO HVIEZDOKOPE NGC 7243

Výsledky

- Fotometrické pozorovanie (28.01.2015 v G2) vo filtroch B a V
 $\implies T_{\text{eff}} \simeq 6500 \text{ K} \implies$ Spektrálna trieda F.

Na základe týchto zistení \implies alternatívne vysvetlenia:

Tento objekt môže byť planétou alebo hnedým trpaslíkom na dráhe okolo mladej hviezdy spektrálneho typu F.

Tento objekt môže byť zákrytovou dvojhviezdou s dominantnou hviezdou, resp. dvojhviezdou v apertúre.

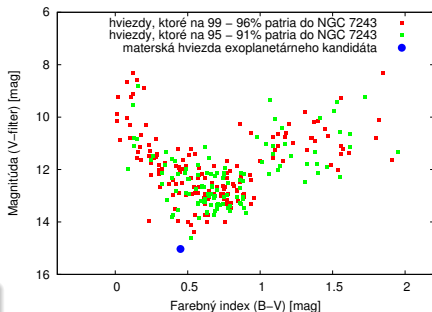
Potrebné spektroskopické sledovanie objektu, prípadne viacfarebná vysokopresná fotometria (aj na zistenie príslušnosti hviezdy J221550.6+495611 k NGC 7243).

HĽADANIE TRANZITUJÚCICH KANDIDÁTOV VO HVIEZDOKOPE NGC 7243

Výsledky

- Poloha J221550.6+495611 voči polohám členských hviezd NGC 7243 na CMD \implies členstvo vo hviezdokope.
- Katalóg Jilinski et al. (2003) \implies CMD členských hviezd.
- J221550.6+495611 na CMD \implies

nepodarilo sa jednoznačne zistiť príslušnosť J221550.6+495611 k NGC 7243.



SPEKTROSKOPIA A FOTOMETRIA SYSTÉMOV HAT-P-2, WASP-14 A XO-3

Kontext

- Metóda merania radiálnych rýchlostí \implies do nedávna nedostupná pre malé observatória (drahé technické elementy, vysoká cena stabilných spektrografov, požiadavky týkajúce sa veľkosti ďalekohľadov, atď.).

Nedávne technické inovácie \implies aplikácia metódy aj v prípade submetrových ďalekohľadov.

- Ešletové spektrografy nainštalované na submetrové a metrové ďalekohľady, napr.:
 - Mt Abu (India) /1,2m/;
 - Piszkestető a Szombathely (Maďarsko) /1m a 0,5m/;
 - Großschwabhausen (Nemecko) /0,6/0,9m/;
 - Stará Lesná (Slovensko) /0,6m/.

SPEKTROSKOPIA A FOTOMETRIA SYSTÉMOV HAT-P-2, WASP-14 A XO-3

Kontext

0,6-metrový ďalekohľad Observatória Stará Lesná (G1) + ešeletový spektrograf „eShel“ od spoločnosti „Shelyak“ (od roku 2013).



Hlavná časť



3.) Komplexnejšia analýza exoplanét

SPEKTROSKOPIA A FOTOMETRIA SYSTÉMOV HAT-P-2, WASP-14 A XO-3

Kontext

- Prvé merania (2013/2014) v rámci testov: τ Bootis, HAT-P-2 a WASP-14 \implies zistenie najlepšej presnosti spektrografu (Pribulla et al. 2015).
- Komplexnejšie analýzy exoplanét na báze dát získaných týmto prístrojom neboli doteraz vykonané.

Ciele

- Vykonať komplexnejšiu analýzu HAT-P-2b, WASP-14b a XO-3b (RV z G1 + fotometria z rôznych observatórií).
- Porovnať presnosť RV z G1 s presnosťou RV z iných observatórií (submetrové, metrové a dvojmetrové ďalekohľady).
- Zistiť aplikovateľnosť RV z G1 na účely modelovania parametrov dráh exoplanét.

SPEKTROSKOPIA A FOTOMETRIA SYSTÉMOV HAT-P-2, WASP-14 A XO-3

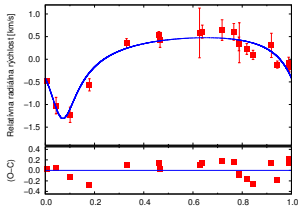
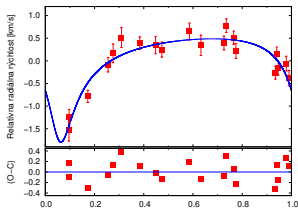
Postup

- Spektroskopický materiál:
 - 20 RV/objekt z G1; každé spektrum exponované 900 sekúnd; tri po sebe nasledujúce snímky sčítané, aby sa zvýšil SNR.
 - Prevzaté RV: HAT-P-2 (GAO/PO – 0,5/1,0m); WASP-14 (NOT/OHP – 2,5/1,93m); XO-3 (OHP – 1,93m).
- Fotometrický materiál:
 - Tranzity HAT-P-2b (1,2m FLWO, filter z); WASP-14b (0,6/0,9m GSH, filter R); XO-3b (1,0m Teide, filter V).

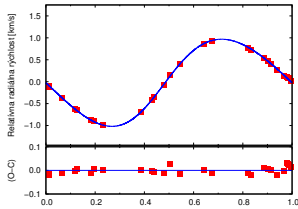
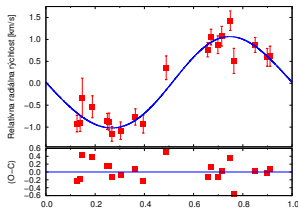
Simultánne preloženie RV a fotometrie/objekt (JKTEBOP): RV z G1 + fotometria \implies komplexnejšia analýza; prevzaté RV + fotometria \implies aplikovateľnosť RV z G1 (cez porovnanie parametrov preloženia: G1 a prevzaté RV); + porovnanie presností RV: G1 a prevzaté RV.

SPEKTROSKOPIA A FOTOMETRIA SYSTÉMOV HAT-P-2, WASP-14 A XO-3

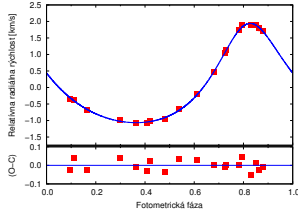
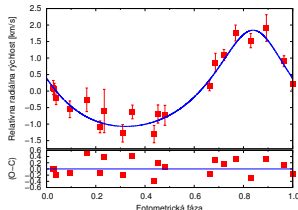
Výsledky



HAT-P-2: G1 a GAO/PO
(0,6m a 0,5/1,0m)



WASP-14: G1 a NOT/OHP
(0,6m a 2,5/1,93m)



XO-3: G1 a OHP
(0,6m a 1,93m)

SPEKTROSKOPIA A FOTOMETRIA SYSTÉMOV HAT-P-2, WASP-14 A XO-3

Výsledky

Parameter preloženia	Hodnota určená iba z G1	Hodnota určená iba z OHP	Hodnota určená z G1+OHP	Hodnota z literatúry
T_c [BJD]	2454449,8681	2454449,8681	2454449,8681	2454449,8681(2)
P_{orb} [dni]	3,191523	3,191523	3,191523	3,191523(6)
a/R_s	–	–	–	7,0(3)
$(R_p + R_s)/a$	0,158(13)	0,146(8)	0,146(8)	–
R_p/R_s	0,1012(19)	0,1008(19)	0,1009(19)	0,0905(5)
i [°]	84,8(6)	84,4(3)	84,4(3)	84,2(5)
e	0,265(19)	0,285(3)	0,285(3)	0,288(3)
ω [°]	346(13)	348,8(15)	348,9(15)	346,3(13)
γ [m.s ⁻¹]	-12045(51)	-12030(7)	-12030(7)	-12045(8)
K [m.s ⁻¹]	1456(91)	1502(10)	1501(10)	1503(10)
c_1 (Filter V)	0,351	0,351	0,351	0,351
c_2 (Filter V)	0,311	0,311	0,311	0,311
L_{sf} [mag]	-0,0001(2)	-0,0001(2)	-0,0001(2)	–

Parametre preloženia v prípade XO-3.

SPEKTROSKOPIA A FOTOMETRIA SYSTÉMOV HAT-P-2, WASP-14 A XO-3

Výsledky

- Porovnanie presnosti RV (spriemerované chyby RV):
 - HAT-P-2 – 170 vs. 177 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (G1 vs. GAO/PO – 0,5/1,0m)
 - WASP-14 – 220 vs. 10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (G1 vs. NOT/OHP – 2,5/1,93m)
 - XO-3 – 260 vs. 35 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (G1 vs. OHP – 1,93m)

Presnosť RV z G1 je porovnateľná s presnosťou RV získaných na iných submetrových/metrových ďalekohľadoch. V porovnaní s dvojmetrovými ďalekohľadmi dáva náš prístroj chyby radiálnych rýchlostí o jeden rád väčšie.

ZHRNUTIE HLAVNÝCH VÝSLEDKOV PRÁCE

- 1 **Prvá problematika:** Podpora modelu o katastrofickom rozpadávaní sa planetárnych telies.
- 2 **Prvá problematika:** Potvrdenie existencie kvázikometárneho chvosta pri KOI 2700 b.
- 3 **Druhá problematika:** Objav exoplanetárneho kandidáta J221550.6+495611 v poli otvorenej hviezdokopy NGC 7243.
- 4 **Tretia problematika:** Získanie prvých spektroskopických dráh exoplanetárnych sústav na Slovensku.

The image features a large, vibrant orange-red sun on the left side, showing solar flares and a small black dot representing a transit. In the bottom right corner, a portion of a blue planet is visible against a dark, starry background. A light blue speech bubble with a white border is centered over the sun, containing the text "ĎAKUJEM ZA POZORNOST!".

ĎAKUJEM ZA POZORNOST!