

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



Mgr. Eva Plávalová

Autoreferát dizertačnej práce

Dynamika extrasolárnych planét v dvojhviezdach

na získanie akademického titulu
philosophiae doctor
v odbore doktorandského štúdia:
4.1.7.-8. astronómia a astrofyzika

Bratislava 2015

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



Mgr. Eva Plávalová

Autoreferát dizertačnej práce

Dynamika extrasolárnych planét v dvojhviezdach

na získanie akademického titulu

philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:

4.1.7.-8. astronómia a astrofyzika

Bratislava 2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Oddelení astronómie a astrofyziky Katedry astronómie fyziky Zeme a meteorológie, Fakulty matematiky fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave.

Predkladateľ: Mgr. Eva Plávalová
Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie
FMFI UK Bratislava

Školiteľ: RNDr. Eduard Pittich, DrSc.

Konzultant: N.A. Solovaya, DrSc.

Oponenti:
.....
.....

.....
.....
.....

.....
.....
.....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná 2015 o hod.
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie v odbore 4.1.7.-8. astronómia a astrofyzika na: FMFI UK, miestnosť:.....

Predseda spoločnej odborovej komisie:
doc. RNDr. Jozef Klačka, PhD.
Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie
FMFI UK Bratislava

Obsah

1 Úvod	4
2 Ciele dizertačnej práce	4
3 Metódy použité v dizertačnej práci	5
4 Výsledky dizertačnej práce	6
4.1 γ Cep	7
4.2 HD19994	8
4.3 16 Cyg	9
4.4 Porovnanie výsledkov analytickej teórie s numerickou integráciou	10
5 Záver	10
Zoznam použitej literatúry v autoreferáte	13
Abstract	15
Zoznam publikovaných prác	16
Zoznam citácií	17
Zoznam prednášok na konferenciách so zahraničnou účasťou	18
Zoznam posterov prezentovaných na konferenciách so zahraničnou účasťou	19
Účasť na konferenciách	19
Účasť na kurzoch a letných školách	21

1 Úvod

Skutočnosť, že Slnko je hviezdou podobnou miliardám hviezd v Galaxii, nás privádza k záveru, že aj slnečná sústava je iba jednou planetárnou sústavou z mnohých iných. Pozorovania extrasolárnych planét (planét obiehajúcich inú hviezdou ako Slnko) túto skutočnosť potvrdzujú. Objavom extrasolárnej planéty 51 Peg b (Mayor and Queloz, 1995) sa začala rozvíjať nová oblasť astronómie.

Niekoľko rokov po prvotnom objave astronómia prostredníctvom Dopplerovho javu (napr. Beugé et al., 2007) dokázali existenciu extrasolárnej planéty obiehajúcej jednu z hviezd dvojhviezdnej sústavy. Takýto tvar sústavy definoval Dvorak (1986) ako S typ (satelitný typ), kde planéta obieha okolo jednej zo zložiek dvojhviezdnej sústavy. Neskôr, v roku 2011, pozorovaním planéty Kepler 16(AB)b (Doyle et al., 2011) bola potvrdená aj existencia druhého typu sústavy – P typu (planetárneho typu), kde planéta obieha okolo oboch hviezd dvojhviezdnej sústavy na vzdialenej obežnej dráhe. Posledný Dvorakom navrhovaný tvar sústavy L typ (libračný typ), kde planéta obieha po rovnakej dráhe ako sekundárna hviezda v jednom z Lagrangeových libračných bodov, nebol doposiaľ pozorovaný.

V súčasnosti poznáme už skoro dve tisícky extrasolárnych planét s odlišnými vlastnosťami, ktoré obiehajú okolo hviezd rôznych spektrálnych typov (napr. Schneider et al., 2011). Pozorujeme planetárne sústavy, v ktorých extrasolárne planéty obiehajú pulzary (napr. Wolszczan and Frail, 1992), či planetárne sústavy nachádzajúce sa v dvojhviezdnych alebo mnohonásobných hviezdnych sústavách (napr. Bonavita and Desidera, 2007).

2 Ciele dizertačnej práce

Predložená práca sa zaoberá satelitným typom sústavy S typ, v ktorom extrasolárna planéta obieha okolo jednej zo zložiek dvojhviezdy (materskej hviezdy). Nakoľko žiadna zo súčasných pozorovacích metód (uvedené v práci) neumožňuje určiť všetkých šesť keplerovských dráhových elementov extrasolárnej planéty, cieľom práce je určiť také hodnoty chýbajúcich uhlových dráhových elementov, pre ktoré by dráha extrasolárnej planéty bola stabilná na

astronomicky dlhom časovom intervale. V opačnom prípade, ak dráha nie je dlhodobo stabilná, nemá zmysel hovoriť o telese ako o planéte.

3 Metódy použité v dizertačnej práci

V predloženej dizertačnej práci sme analytickú teóriu všeobecného problému troch telies, v ktorom vzdialenosť a_1 medzi materskou hviezdou a planétou je omnoho menšia ako vzdialenosť a_2 medzi hviezdami a pomer týchto dvoch vzdialeností je malý parameter, upravili pre štúdium pohybu extrasolárnej planéty okolo materskej hviezdy v dvojhviezdnej sústave. Hmotnosť extrasolárnej planéty, omnoho menšia ako hmotnosť jednotlivých hviezd, nie je v teórii zanedbaná.

Pohyb troch telies sme študovali v Jacobiho súradnicovej sústave. Za referenčnú rovinu sme zvolili Laplaceovu rovinu a použili kánonické Delaunayove elementy. Na rozloženie Hamiltoniána sústavy do radu sme použili Legendrové polynómy.

V Hamiltoniáne sme sa obmedzili iba na členy do druhého rádu pomeru veľkých polosí, pretože členy vyšších rádov sú malé a neopisujú sekulárne zmeny (Plávalová and Solovaya, 2013). Dvojnásobným použitím metódy von Zeipela (napr. Brouwer and Clemence, 1961; Meffroy, 1966) sme z Hamiltoniánu vylúčili členy l_1 a l_2 závislé na strednej anomálii planéty a vzdialenej zložky. Takto upravený Hamiltonián obsahuje iba jednu uhlovú premennú g_1 – argument pericentra planéty a kanonická sústava pohybových rovníc sa zmení na sústavu diferenciálnych rovníc s jedným stupňom voľnosti.

Pre takýto Hamiltonián sme našli presné riešenie sústavy kanonických rovníc metódou Hamiltona-Jacobi. Riešenie umožňuje nájsť vzťah medzi zmenou excentricity planéty s časom, ako aj vypočítať maximálnu a minimálnu hodnotu excentricity planéty.

Kvalitatívna analýza získaného riešenia diferenciálnych rovníc sústavy ukázala, že argument pericentra planéty ω_1 môže vykonávať kruhový pohyb, alebo môže librovať okolo 90° alebo 270° .

Detailnejšie sme študovali jednotlivé typy dráhy planéty, a to: kruhovú dráhu, dráhu blízku kruhovej a eliptickú dráhu s vyššou hodnotou excentricity. Stanovili sme podmienky, pri ktorých pohyb planéty je nestabilný,

respektívne podmienky, pri ktorých by pohyb mohol byť stabilný na astronomicky dlhom časovom intervale.

Stabilný pohyb planéty po eliptickej dráhe sme definovali pre prípad, ak maximálna excentricita planéty e_{1max} je menšia ako kritická excentricita e_{1R} . Pričom pod kritickou excentricitou e_{1R} rozumieme hodnotu excentricity dráhy planéty, pri ktorej planéta dosiahne Rocheovu medzu. Stabilný pohyb planéty po kruhovej dráhe nastane, ak uhol vzájomného sklonu medzi rovinou dráhy planéty a rovinou dráhy vzdialenej zložky sa nachádza v intervale hodnôt vypočítanom z nerovnosti (97) v dizertačnej práci.

4 Výsledky dizertačnej práce

Analytickú teóriu sme aplikovali na tri dvojhviezdne sústavy γ Cep, HD19994 (94 Cet) a 16 Cyg. Sústavy sme vybrali tak, aby reprezentovali prípady s rozdielnymi hodnotami excentricity planéty, a to; (1) s excentricitou planéty pohybujúcou sa po kruhovej dráhe – sústava γ Cep (s excentricitou $e_1 = 0$); (2), s excentricitou planéty pohybujúcou sa po dráhe blízkej kruhovej – γ Cep s vypočítanou excentricitou z pozorovaní; (3) s nízkou hodnotou excentricity planéty – sústava HD19994; (4) s vysokou excentricitou planéty – sústava 16 Cyg.

Dráhové elementy pre všetky tri extrasolárne planéty boli vypočítané z pozorovaní získaných metódou radiálnych rýchlostí. Prostredníctvom tejto metódy nie je možné získať hodnoty sklonu dráhy planéty I_1 a dĺžky výstupného uzla planéty Ω_1 . Analytická teória prezentovaná v predloženej práci umožnila vypočítavať hodnoty chýbajúcich dráhových elementov I_1 a Ω_1 , pre ktoré pohyb extrasolárnych planét je stabilný na astronomicky dlhom časovom intervale. Pri identifikácii extrasolárnej planéty metódou radiálnych rýchlostí je možné získať minimálnu hodnotu hmotnosti planéty v tvare $m_1 \sin I_1$. Z vypočítaných hodnôt sklonu dráhy I_1 pre jednotlivé extrasolárne planéty sme vypočítali ich hodnoty hmotností.

4.1 γ Cep

		1. variant	2. variant
m_1	hmotnosť [M_{Jup}]	$2,47 \pm 0,6$	$2,47 \pm 0,6$
a_1	veľká polos [AU]	$2,05 \pm 0,06$	$2,05 \pm 0,06$
e_1	excentricita	$0,049 \pm 0,034$	$0,049 \pm 0,034$
I_1	sklon dráhy [$^\circ$]	60 ± 23	120 ± 23
Ω_1	dĺžka výstupného uzla [$^\circ$]	198 ± 8	18 ± 8
ω_1	argument pericentra [$^\circ$]	$94,6 \pm 34,6$	$94,6 \pm 34,6$
P_1	obežná doba [deň]	$903,3 \pm 1,5$	$903,3 \pm 1,5$

Tabuľka 1: Sústava γ Cephei: Hmotnosť a keplerovské dráhové elementy extrasolárnej planéty γ Cep Ab.

Hmotnosť m_1 a uhlové dráhové elementy I_1 a Ω_1 boli vypočítané v predloženej práci. Ostatné dráhové elementy boli prevzaté z literatúry.

Sústava γ Cep (HD 222404, HIP 116727), spektroskopická dvojhviezda, sa nachádza na vzdialenosti 13,8 pc. Obsahuje primárnu hviezdu γ Cep A, viditeľnú voľným okom ($V = 3,2$ mag), spektrálnej klasifikácie K1III-IV a sekundárnu hviezdu γ Cep B spektrálnej klasifikácie M4V (Neuhäuser et al., 2007). Dráhové elementy pre túto sústavu vypočítal a publikoval Neuhäuser et al. (2007) v práci, kde sú prezentované aj prvé priame pozorovania B-zložky sústavy.

Extrasolárna planéta γ Cep Ab obieha zložku A dvojhviezdy. Nakoľko je hodnota excentricity extrasolárnej planéty γ Cep Ab $e_1 = 0,049 \pm 0,03$, aplikovali sme teóriu pre kruhový pohyb, a tiež teóriu pre pohyb po dráhe blízkej kruhovej.

V prípade kruhovej dráhy bude sklon dráhy $I_1 = 60,5 \pm 38,5^\circ$, pre stabilný pohyb planéty. Nedostatkou tejto metódy je skutočnosť, že dĺžka výstupného uzla Ω_1 je dráhový element, ktorého hodnotu prostredníctvom tohto prístupu nedokážeme vypočítať.

V prípade dráhy blízkej kruhovej sme vypočítali hodnoty sklonu dráhy planéty $I_1 = 60^\circ \pm 23^\circ$ a dĺžky výstupného uzla $\Omega_1 = 198^\circ \pm 8^\circ$ pre stabilný pohyb pre 1. variant, respektíve $I_1 = 120^\circ \pm 23^\circ$ a $\Omega_1 = 18^\circ \pm 8^\circ$ pre stabilný

pohyb pre 2. variant (Tab. 1).

Extrasolárna planéta γ Cep Ab je pozorovaná metódou radiálnych rýchlostí. Z takýchto pozorovaní je možné odvodiť iba minimálnu hmotnosť planéty ako súčin hmotnosti a sklonu dráhy $m_1 \sin I_1$ (napr. Beaugé et al., 2007). S použitím vypočítaných hodnôt sklonu dráhy planéty $I_1 = 60^\circ \pm 23^\circ$ a $I_1 = 120^\circ \pm 23^\circ$ sme vypočítali hmotnosť planéty $m_1 = 2,47 \pm 0,6 M_{Jup}$.

4.2 HD19994

		1. variant	2. variant
m_1	hmotnosť [M_{Jup}]	$1,855 \pm 0,045$	$1,855 \pm 0,045$
a_1	veľká polos [AU]	1,42	1,42
e_1	excentricita	$0,3 \pm 0,004$	$0,3 \pm 0,004$
I_1	sklon dráhy [$^\circ$]	65 ± 3	115 ± 3
Ω_1	dĺžka výstupného uzla [$^\circ$]	264 ± 4	84 ± 4
ω_1	argument pericentra [$^\circ$]	41 ± 8	41 ± 8
P_1	obežná doba [deň]	$535,7 \pm 3,1$	$535,7 \pm 3,1$

Tabuľka 2: Sústava HD19994 (94 Cet): Hmotnosť a keplerovské dráhové elementy extrasolárnej planéty HD19994 b.

Hmotnosť m_1 a uhlové dráhové elementy I_1 a Ω_1 boli vypočítané v predloženej práci. Ostatné dráhové elementy boli prevzaté z literatúry.

Dvojhviezdna sústava HD19994 (94 Cet, ADS2406AB, HIP14954, HR962) sa skladá z primárnej zložky 94 Cet A spektrálneho typu F8V, s hmotnosťou $1,34 M_\odot$ (Schneider et al., 2011) a sekundárnej zložky 94 Cet B spektrálneho typu M3V (Hale, 1994), s hmotnosťou $0,37 M_\odot$ (Tokovinin, 2005). Dráhové elementy pre túto sústavu publikoval Hale (1994). Extrasolárna planéta HD1994 b obieha A zložku dvojhviezdnej sústavy HD19994.

Našli sme nasledujúce dvojice uhlových dráhových elementov, pri ktorých bude pohyb planéty stabilný na astronomicky dlhom časovom intervale: sklon dráhy $I_1 = 65^\circ \pm 3^\circ$ a dĺžka výstupného uzla $\Omega_1 = 264^\circ \pm 4^\circ$ pre 1. variant stabilnej dráhy, respektíve hodnota sklonu dráhy planéty bude $I_1 = 115^\circ \pm 3^\circ$ a dĺžka výstupného uzla bude $\Omega_1 = 84^\circ \pm 4^\circ$ pre 2. variant stabilnej dráhy.

Ako v predchádzajúcom prípade aj extrasolárna planéta HD19994 b je pozorovaná metódou radiálnych rýchlostí, a teda je jej hmotnosť určená výrazom $m_1 \sin I_1$. Pre vypočítané hodnoty sklonu dráhy planéty I_1 ($65^\circ \pm 3^\circ$ pre 1. variant stabilnej dráhy a $115^\circ \pm 3^\circ$ pre 2. variant stabilnej dráhy) je hmotnosť extrasolárnej planéty $m_1 = 1,855 \pm 0,045 M_{Jup}$ (Tab. 2).

4.3 16 Cyg

		1. variant	2. variant
m_1	hmotnosť [M_{Jup}]	$2,376 \pm 0,041$	$2,376 \pm 0,041$
a_1	veľká polos [AU]	1,69	1,69
e_1	excentricita	$0,689 \pm 0,011$	$0,689 \pm 0,011$
I_1	sklon dráhy [$^\circ$]	45 ± 2	135 ± 2
Ω_1	dĺžka výstupného uzla [$^\circ$]	133 ± 3	313 ± 3
ω_1	argument pericentra [$^\circ$]	$38,4 \pm 3$	$130,4 \pm 3$
P_1	perióda [deň]	799,5	799,5

Tabuľka 3: Sústava 16 Cyg: Hmotnosť a keplerovské dráhové elementy extrasolárnej planéty 16 Cyg Bb.

Hmotnosť m_1 a uhlové dráhové elementy I_1 a Ω_1 boli vypočítané v predloženej práci. Ostatné dráhové elementy boli prevzaté z literatúry.

Extrasolárna planéta 16 Cyg Bb, ktorá obieha okolo B zložky dvojhviezdnej sústavy 16 Cyg bola objavená pomocou metódy radiálnej rýchlosti ako jedna z prvých v roku 1996 (Cochran et al., 1997). Členmi sústavy sú: primárna hviezda 16 Cyg A (HD186408) s hmotnosťou $1,53 M_\odot$ spektrálneho typu G1,5V (Tokovinin, 2005) a sekundárna hviezda 16 Cyg B (HD186427) s hmotnosťou $1,01 \pm 0,04 M_\odot$ spektrálneho typu G2,5V (Schneider et al., 2011). Dráhové elementy tejto sústavy ako prvý publikoval Romanenko (1994) a o niekoľko rokov ich upravili Hauser a Marcy (1999).

Vykonali sme výpočty podobným spôsobom ako v prechádzajúcom prípade a získali sme nasledovné výsledky: pohyb bude stabilný na astronomicky dlhom časovom intervale pre 1. variant, ak bude hodnota sklonu dráhy

$I_1 = 45^\circ \pm 2^\circ$ a hodnota dĺžky výstupného uzla $\Omega_1 = 133^\circ \pm 3^\circ$ a pre 2. variant, ak bude $I_1 = 135^\circ \pm 2^\circ$ a $\Omega_1 = 313^\circ \pm 3^\circ$ (Tab. 3). Na základe vypočítaných sklonov dráhy extrasolárnej planéty 16 Cyg Bb sme určili aj jej hmotnosť, ktorá je $m_1 = 2,376 \pm 0,041 M_{Jup}$ (Tab. 3).

4.4 Porovnanie výsledkov analytickej teórie s numeric-kou integráciou

Získané výsledky z analytickej teórie aplikovanej na uvedené dvojhviezdne sústavy sme porovnali s výsledkami numerickej integrácie pohybových rovníc týchto sústav. Použili sme metódu numerickej integrácie vypracovanú Everhartom (1985), ktorá je súčasťou programu Mercury v programovacom jazyku Fortran (Chambers, 1999). Porovnávali sme stabilné, a tiež nestabilné dráhy extrasolárnych planét.

Pre každú sústavu sme vykonali tri sady numerických integrácií, kde sme použili počiatočné hodnoty sklonov dráh planét, a to hodnoty pre 1. variant stabilnej dráhy a tri odlišné hodnoty dĺžky výstupného uzla Ω_1 . Veľkosti hodnôt Ω_1 sme vybrali na základe výsledkov získaných analytickou metódou tak, aby prezentovali stabilnú, a tiež nestabilnú dráhu extrasolárnych planét. Výsledky oboch metód sa pre jednotlivé typy dráh zhodujú minimálne na intervale integrácie pohybových rovníc 10^7 rokov.

5 Záver

Na popisanie modelu sústavy, v ktorej je pohyb planéty stabilný na astronomicky dlhom časovom intervale je vhodnejšia analytická metóda. Prostredníctvom časovo nenáročných výpočtov dokážeme priamo a rýchlo určiť také chýbajúce parametre extrasolárnej planéty, pre ktoré je jej pohyb stabilný na astronomicky dlhom časovom intervale. Naopak, pri použití numerickej integrácie pohybových rovníc sústavy dokážeme iba z veľkého počtu modelových dráh určiť hodnoty neznámych elementov Ω_1 a I_1 pre ktoré je dráha dráha stabilná či nestabilná. Takáto metóda je časovo náročná na výpočty a v porovnaní s analytickou metódou neefektívna. Navyše presnosť analytickej metódy je rovnaká pre ľubovoľne dlhý časový interval. To nemožno povedať

o metóde numerickej integrácie, pri ktorej presnosť výsledku s narastajúcim časovým intervalom sústavne klesá.

V dizertačnej práci sme ukázali že:

1. Pohyb extrasolárnej planéty obiehajúcej okolo jednej z hviezd dvoj-hviezdnej sústavy môžeme študovať analytickou metódou všeobecného problému troch telies.
2. Definovali sme podmienky, pri ktorých bude kruhová alebo eliptická dráha extrasolárnej planéty stabilná na astronomicky dlhom časovom intervale. Pre stabilitu pohybu planéty na kruhovej dráhe uhol vzájomného sklonu medzi rovinou dráhy planéty a rovinou dráhy vzdalenej zložky sa musí nachádzať v určenom intervale hodnôt. Pre stabilitu pohybu planéty na eliptickej dráhe musí maximálna hodnota excentricity dráhy planéty byť menšia ako jej kritická excentricita, vypočítaná z Rocheovej medze materskej hviezdy.
3. Na základe predloženej analytickej teórie zostavený počítačový program nám umožňuje zo známych keplerovských elementov dráhy extrasolárnej planéty vypočítať hodnoty jej uhlových dráhových elementov I_1 a Ω_1 , ktoré nie je možné určiť z pozorovaní pomocou metódy radiálnych rýchlostí.
4. Vypočítaná hodnota sklonu dráhy I_1 extrasolárnej planéty umožňuje vypočítať hodnotu jej hmotnosti.
5. Prednosti použitej analytickej metódy pred numerickej integráciou pohybových rovníc sú viaceré. Analytická metóda rýchlo a bez väčších nárokov na výpočtový čas umožňuje vypočítať keplerovské dráhové elementy stabilného pohybu planéty na ľubovoľný časový interval. Presnosť analytickej metódy nezávisí od zvolenej dĺžky časového intervalu, na ktorom študujeme stabilitu dráhy planéty.
6. Porovnateľné výsledky s výsledkami získanými analytickou metódou môžeme získať aj numerickej integráciou pohybových rovníc extrasolárnej planéty minimálne na obdobie 10^7 rokov. S tým rozdielom, že pri numerickej integrácii musíme modelovať veľký počet dráh s rôznymi I_1

a Ω_1 , čo je náročné na výpočtový čas. Navyše presnosť takto získaných dráhových elementov klesá úmerne s dĺžkou doby integrácie pohybových rovníc.

7. Porovnanie predloženej dizertačnej práce s publikovanými prácami ďalších autorov ukazuje na jej väčšiu komplexnosť pri výskume pohybu extrasolárnych planét.

Zoznam použitej literatúry v autoreferáte

- C. Beaugé, S. Ferraz-Mello, and T. A. Michtchenko. *Planetary Masses and Orbital Parameters from Radial Velocity Measurements*, page 1. 2007.
- M. Bonavita and S. Desidera. The frequency of planets in multiple systems. *Astronomy & Astrophysics*, 468:721–729, June 2007. doi: 10.1051/0004-6361:20066671.
- D. Brouwer and G. M. Clemence. *Methods of celestial mechanics*. New York: Academic Press, 1961, 1961.
- J. E. Chambers. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 304:793–799, April 1999. doi: 10.1046/j.1365-8711.1999.02379.x.
- W. D. Cochran, A. P. Hatzes, R. P. Butler, and G. W. Marcy. The Discovery of a Planetary Companion to 16 Cygni B. *The Astrophysical Journal*, 483: 457, July 1997. doi: 10.1086/304245.
- L. R. Doyle, J. A. Carter, D. C. Fabrycky, R. W. Slawson, and et al. Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet. *Science*, 333:1602–1606, September 2011. doi: 10.1126/science.1210923.
- R. Dvorak. Critical orbits in the elliptic restricted three-body problem. *Astronomy & Astrophysics*, 167:379–386, October 1986.
- E. Everhart. An efficient integrator that uses Gauss-Radau spacings. In A. Carusi and G. B. Valsecchi, editors, *Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution, Proceedings of IAU Colloq. 83, held in Rome, Italy, June 11-15, 1984. Edited by Andrea Carusi and Giovanni B. Valsecchi. Dordrecht: Reidel, Astrophysics and Space Science Library. Volume 115, 1985, p.185*, page 185, 1985.
- A. Hale. Orbital coplanarity in solar-type binary systems: Implications for planetary system formation and detection. *The Astrophysical Journal*, 107: 306–332, January 1994. doi: 10.1086/116855.

- H. M. Hauser and G. W. Marcy. The Orbit of 16 Cygni AB. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 111:321–334, March 1999. doi: 10.1086/316328.
- M. Mayor and D. Queloz. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378:355–359, November 1995. doi: 10.1038/378355a0.
- J. Meffroy. On Von Zeipel’s Method in General Planetary Theory. *SAO Special Report*, 229, November 1966.
- R. Neuhauser, M. Mugrauer, M. Fukagawa, G. Torres, and T. Schmidt. Direct detection of exoplanet host star companion γ Cep B and revised masses for both stars and the sub-stellar object. *Astronomy and Astrophysics*, 462: 777–780, February 2007. doi: 10.1051/0004-6361:20066581.
- E. Plávalová and N. A. Solovaya. Analysis of the Motion of an Extrasolar Planet in a Binary System. *The Astronomical Journal*, 146:108, November 2013. doi: 10.1088/0004-6256/146/5/108.
- L. G. Romanenko. Determination of Orbital Elements of Wide Double Stars ADS:10759 Psi-Draconis and ADS:12815 16-CYGNI with the Method of Apparent Motion Parameters. *Astronomicheskii Zhurnal*, 71:875, 1994.
- J. Schneider, C. Dedieu, P. Le Sidaner, R. Savalle, and I. Zolotukhin. Defining and cataloging exoplanets: the exoplanet.eu database. *Astronomy & Astrophysics*, 532:A79, August 2011. doi: 10.1051/0004-6361/201116713.
- A. Tokovinin. Multiple star catalog (MSC) has a new on-line interface. *IAU Commission on Double Stars*, 157:3, October 2005.
- A. Wolszczan and D. A. Frail. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12. *Nature*, 355:145–147, January 1992. doi: 10.1038/355145a0.

Abstract

Minimally 12% of extrasolar planets orbit in a binary or multiple stellar system. We investigated the motion of a planet revolving one star in a binary system with the use of the three-body problem.

We considered a three body system, with gravitation interaction only and with the following conditions: (1) a planet in a binary system revolves around one of the components (parent star); (2) the distance between the stars is greater than the distance between the parent star and the orbiting planet (ratio of the semi-major axes is a small parameter); and (3) the mass of the planet is smaller than the mass of either star, but is not negligible. The Hamiltonian of the system without short periodic terms was used. We expanded the Hamiltonian in terms of the Legendre polynomial and truncated after the second-order term. This equation consists of only one angular variable. From the calculations, we obtained the system of the equations of motion which we used to establish the planet's orbit for long-term stability. As a criterion of stability of the planet's motion, we employed the Roche limit.

We have applied this theory to three binary systems with extrasolar planets; HD19994, 16 Cyg and γ Cep; each with a different value of eccentricity. We have proven that analytical theory allows us to calculate the unknown orbital elements (in our examples these are the planet's inclination and ascending node) which are not possible to calculate through observational data. Such method, and the proposed values of the orbital elements, could be used in the future for the explanation of the character of these systems.

We compared the results from the analytical theory with the numerical integration equations of motion. The results from the integration correspond exactly with the results from the analytical theory, at least for an interval of 10^7 years.

Key words: celestial mechanics – three body problem – numerical integration – extrasolar planets – HD19994 – 16 Cyg – γ Cep.

Zoznam publikovaných prác

1. *Analysis of the motion of an extrasolar planet HD120136 b in a binary system: calculating unknown angular orbital elements.*, akceptované do proceeding z konferencie Living Together: Planets, Stellar Binaries and Stars with Planets, Litomyšl, Czech Republic, September 8-12, 2014
2. *Classification of the extrasolar planets: new horizons*, akceptované do proceeding z konferencie Living Together: Planets, Stellar Binaries and Stars with Planets, Litomyšl, Czech Republic, September 8-12, 2014
3. *Why is it necessary to establish a classification of extra-solar planets?*, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, vol. 43, no. 3, p. 477-478.
4. *Analysis of the motion of an extrasolar planet in a binary system*, The Astronomical Journal, 146, pp.108, 2013.
<http://iopscience.iop.org/1538-3881/146/5>
5. *An Extra-Solar Planet in a Double Stellar System: The Modelling of Insufficient Orbital Elements*, IAU Symposium 282, pp.127, 2012.
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2012IAUS..282..127P>
6. *Taxonomy of the Extrasolar Planet*, Astrobiology, 12, pp.361, 2012.
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2012AsBio..12..361P>
7. *A double stellar system HD120136 (tau Boo) with an extrasolar planet: the modelling of insufficient orbital elements*, Proceedings of the 41st Conference on Variable Stars Research, Open European Journal on Variable Stars, 125,pp.1, 2010. <http://var.astro.cz/oejv>

Zoznam citácií

Práca 1: Analysis of the motion of an extrasolar planet in a binary system, *The Astronomical Journal*, 146, pp.108, 2013.

1. Davies, G. R.; Chaplin, W. J.; Farr, W. M.; García, R. A.; Lund, M. N.; Mathis, S.; Metcalfe, T. S.; Appourchaux, T.; Basu, S.; Benomar, O.; Campante, T. L.; Ceillier, T.; Elsworth, Y.; Handberg, R.; Salabert, D.; Stello, D., *Asteroseismic inference on rotation, gyrochronology and planetary system dynamics of 16 Cygni*, eprint arXiv:1411.1359, 10 pages accepted for publication in the MNRAS
2. Tucci Maia, M.; Meléndez, J.; Ramírez, I., *High Precision Abundances in the 16 Cyg Binary System: A Signature of the Rocky Core in the Giant Planet*, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 790, Issue 2, article id. L25, 5 pp. (2014).
3. Liu, F.; Asplund, M.; Ramírez, I.; Yong, D.; Meléndez, J., *A high-precision chemical abundance analysis of the HAT-P-1 stellar binary: constraints on planet formation*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Volume 442, Issue 1, p.L51-L55 (2014).

Práca 2: Taxonomy of the Extrasolar Planet, *Astrobiology*, 12, pp.361, 2012.

1. Hadhazy, A., *It's Time to Play "Name That Exoplanet!"*, *Discover Magazine*, July/August (2014).
2. Smith, W. M., Cockell, Ch. S., Leach, S., *Astrochemistry and Astrobiology*, Hedielberg, New York, Springer, 339 (2013).

Zoznam prednášok na konferenciách so zahraničnou účasťou

1. *Analysis of the motion of an extrasolar planet HD120136 b in a binary system: calculating unknown angular orbital elements.*, Living Together: Planets, Stellar Binaries and Stars with Planets, Litomyšl, Czech Republic, September 8-12, 2014
2. *Analysis of the motion of an extra-solar planet in a binary system*, IAU-Symposium: Complex Planetary Systems, Namur, Belgicko, 07-11 júl 2014
3. *Taxonomy of extrasolar planets*, 44. Konference o výzkumu proměnných hvězd, Hvězdárna a planetárium Brno, Česká republika, 2-4 november 2012
4. *Taxonomy of the Extra-Solar Planets, Extraterrestrial Life - Beyond Our Expectations?*, Viedeň, Rakúsko, 21 - 22 máj, 2012
5. *Taxonomy of the extra-solar planets*, NEAT 2011 Workshop, Grenoble, Francúzsko, 21-22 november 2011
6. *Dvojhviezdna sústava HD120136 (τ Boo) s extrasolárnou planétou: modelovanie chýbajúcich dráhových elementov.*, 41. konference o výzkumu proměnných hvězd, Petřínská hvězdárna, Praha, Česká republika, 27-29 november 2009

Zoznam posterov prezentovaných na konferenciách so zahraničnou účasťou

1. *Classification of the extrasolar planets: new horizons*, Living Together: Planets, Stellar Binaries and Stars with Planets, Litomyšl, Czech Republic, September 8-12, 2014
2. *Why is it necessary to establish a classification of extra-solar planets?*, IAU-Symposium: Complex Planetary Systems, Namur, Belgicko, 07-11 júl 2014
3. *Why is a system for classification of extrasolar planets increasingly necessary?*, Exoplanet UK Community Meeting – Cambridge, Cambridge, UK, 14-16 apríl 2014
4. *Taxonomy of the Extrasolar planet*, Observing techniques, instrumentation and science for metre-class telescopes, Tatranská Lomnica, Slovensko, 23-26 september 2013
5. *Taxonomy of the extra-solar planets*, NEAT 2011 Workshop, Grenoble, Francúzsko, 21-22 november 2011
6. *An extra-solar planet in a double stellar system: the modelling of insufficient orbital elements*, IAU Symposium 282, Tatranská Lomnica, Slovakia, 18—22 July, 2011
7. *A classification extra-solar planets*, Putting our Solar System in Context: Origin, Dynamical and Physical Evolution of Multiple Planet Systems, Universitätszentrum Obergurgl, Obergurgl, Rakúsko, 25-30 apríl 2010
8. *About the criterion of the stability of extra-solar planetary orbits near to circular ones*, JENAM 2009, The University of Hertfordshire, UK, 20-23 april, 2009
9. *Some features in the motion of an extra-solar planet in a double system*, JENAM 2008, Viedeň, Rakúsko, 8-12 september 2008

Účast na konferenciách

1. Living Together: Planets, Stellar Binaries and Stars with Planets, Litomyšl, Czech Republic, september 8-12, 2014
2. IAU-Symposium: Complex Planetary Systems, Namur, Belgicko, 07-11 júl 2014
3. Exoplanet UK Community Meeting – Cambridge, Cambridge, UK, 14-16 apríl 2014
4. 1st CHEOPS science meeting, Bern, Švajčiarsko, 15-16 máj 2013
5. Observing techniques, instrumentation and science for metre-class telescopes, Tatranská Lomnica, Slovensko, 23-26 september 2013
6. 44. Konference o výzkumu proměnných hvězd, Hvězdárna a planetárium Brno, Česká republika, 2-4 november 2012
7. Extraterrestrial Life - Beyond Our Expectations?, Viedeň, Rakúsko, 21-22 máj 2012
8. NEAT 2011 Workshop, Grenoble, Francúzsko, 21-22 november 2011
9. The History and Philosophy of Astrobiology, Ven, Švédsko, 27-28 september 2011
10. IAU Symposium 282, From Interacting Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools, Tatranská Lomnica, Slovensko, 18-22 júl 2011
11. Putting our Solar System in Context: Origin, Dynamical and Physical Evolution of Multiple Planet Systems, Universitätszentrum Obergurgl, Obergurgl, Rakúsko, 25-30 apríl 2010
12. 41. konference o výzkumu proměnných hvězd, Petřínská hvězdárna, Praha, Česká republika, 27-29 november 2009
13. JENAM 2009, The University of Hertfordshire, UK, 20-23 april, 2009
14. JENAM 2008, Viedeň, Rakúsko, 8-12 september 2008

15. Super-Earths Workshop, Nantes, Francúzsko, 16-18 jún 2008

Účasť na kurzoch a letných školách

1. Summer School NOVICOSMO 2009: Highlights in Astrophysics, RABAC, Chorvátsko, 20-30 september 2009