Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Astronomijos observatorija

Arnoldas Šidlauskas

Automatinė egzoplanetų tranzitų paieška ir modeliavimas žvaigždžių spindesio kreivėse

Pagrindinių studijų baigiamasis darbas

Taikomosios fizikos
studijų programa

Studentas	Arnoldas Šidlauskas
Darbo vadovas	dr. Audrius Bridžius
Recenzentas	Saulius Raudeliūnas
Katedros vedėjas	prof. dr.Vladas Vansevičius

Vilnius 2016

Įžanga ... 3
1. Tranzitų paieška ... 4
1.1 Duomenys paieškai ... 4
1.2 Algoritmas ... 4
1.3 Blokinė diagrama ... 5
1.4 Kitų reiškinių daromos įtakos tranzito kreivei filtravimas ... 6
1.5 Potencialių tranzitų paieška ... 7
1.6 Periodinių pasikartojimų paieška ... 8
1.7 Tranzitų paieškos vartotojo sąsaja ... 10
2. Egzoplanetų sistemų modeliavimas ... 11
2.1 Tranzito schema ... 11
2.2 Tranzito modelinės kreivės ... 12
2.3 Modeliavimo sistemos vartotojo sąsaja ... 13
3. Sistemos testavimas ... 16
3.1 Tranzitų paieškos testavimo rezultatai ... 16
3.2 Tranzitų modeliavimo testavimo rezultatai ... 16
4. Naujų egzoplanetų paieška ... 19
4.1 Atrastos naujos egzoplanetos kandidatės ... 19
4.1.1 EPIC 211330113 ... 19
4.1.2 EPIC 211514106 ... 23
4.2 Atrastos naujos dvinarės žvaigždės ... 27
4.2.1 EPIC 211812160 ... 27
4.2.2 EPIC 211424769 ... 28
Išvados ... 30
Šaltiniai ... 31
Santrauka ... 33
Summary ... 34

Įžanga

Egzoplanetos - tai planetos esančios ne Saulės sistemoje. Klausimas ar Visatoje yra panašių į Žemę planetų jau daug metų domina mokslininkus ir daug kitų žmonių, tačiau techninės galimybės jas aptikti atsirado gana neseniai ir dabar tam skiriama labai daug dėmesio.

Šiuo metu daugiausia planetų aptinkama tranzitų metodu. Jis remiasi tuo, kad planeta praskriedama tarp stebėtojo ir žvaigždės uždengia dalį jos disko, dėl ko stebimas žvaigždės spindesys sumažėja.

Tranzitų metodo privalumas yra tas, kad taip atrastai planetai galima nustatyti jos spindulį. Kadangi tokiu metodu atrastos planetos orbitos polinkio kampas į regėjimo spindulį paprastai yra labai mažas, tai galima gana tiksliai išmatuoti ir jos masę radialinio greičio metodu, o po to apskaičiuoti ir jos tankį. Žinodami planetos tankį, galime analizuoti jos sudėtį. Didžiausias tranzitų metodo trūkumas yra tas, kad juo galime atrasti tik gana mažą dalį visų planetų (tikimybė tik apie 0.5% panašioms į Žemę planetoms [1]). Nes šiuo metodu galime užfiksuoti tik tas planetas, kurių orbitos polinkis į regėjimo spindulį yra mažas.

Norint atrasti planetas tranzitų metodų reikalingi labai tikslūs žvaigždės spindesio matavimai. Kadangi planetos yra daug mažesnės už žvaigždes, spindesio pokyčiai atsirandantys dėl tranzitų yra maži (jie proporcingi planetos ir žvaigždės spindulių santykio kvadratui). Žemėje esantys teleskopai dėl atmosferos ir kitų trikdžių leidžia išmatuoti žvaigždžių spindesį tik apie 1% tikslumu. Naudojantis tokiais matavimais mes galime aptikti tik Jupiterio arba didesnio dydžio planetas. Ieškant mažesnių planetų reikalingi žvaigždžių spindesio kitimo matavimai bent jau 0.01% tikslumu. Tokie stebėjimai įmanomi tik už atmosferos iškeltais teleskopais [2]. Tuo tikslu 2009 m. į orbitą buvo paleistas ir Kepler teleskopas [3], kurio stebėjimų duomenys naudojami šiame darbe.

Didelio surenkamų duomenų kiekio interaktyvus išanalizavimas užima labai daug laiko, o automatizuotas tranzitų aptikimas kol kas nėra pilnai patikimas. Vienas iš bandymų spręsti šią problemą yra Zooniverse projektas „Planet Hunters“, kai savanoriai žvaigždžių spindesio kreivėse ieško tranzitų vizualiai. Jų dėka yra surasta eilė planetų kandidačių, kelios iš kurių patvirtintos [4]. Nors tai ir padeda egzoplanetų paieškoje, problemos iki galo neišsprendžia, nes su laiku bus surenkama vis daugiau naujų duomenų. Todėl egzistuoja poreikis patogioms kompiuterinėms sistemoms, kurios tranzitų paieškos ir analizės procesą kiek įmanoma labiau automatizuotų.

Darbo tikslas: sukurti tokią kompiuterinę priemonę, kuri žvaigždžių spindesio kreivėse automatiškai surastų egzoplanetų tranzitus ir iš jų paskaičiuotų galimų planetų parametrus.

Darbo uždaviniai:

1) sukurti tranzitų paieškos programą;
2) sukurti aptiktų tranzitų modeliavimo programą;
3) ištestuoti sukurtų programų patikimumą;
4) atlikti tranzitų paiešką naujausiuose Kepler duomenyse;
5) nustatyti aptiktų galimų tranzitinių objektų orbitinius ir fizinius parametrus.

1. Tranzitų paieška

1.1 Duomenys paieškai

Pirmame Kepler misijos etape buvo stebima apie 150000 žvaigždžių Gulbės žvaigždyne [3]. Stebėjimų lauke esančių žvaigždžių spindesys buvo matuojamas 90 dienų trukmės laikotarpiais ~30 min. ir ~1 min. laiko intervalais [3]. Trumpaisiais intervalais duomenys buvo renkami tik toms žvaigždėms, kurioms buvo norima patikslinti jau surastus tranzitus, o ilgesniais intervalais – visoms tą ketvirtį stebimoms žvaigždėms [3]. Šiame darbe naudojami ~30 min. intervalu gauti stebėjimų duomenys.

Po 2013 m. įvykusio mechaninio gedimo jau nebebuvo įmanoma išlaikyti teleskopo nukreipto į vieną tašką. Kepler stebėjimų planas buvo pakoreguotas ir pavadintas K2. Dabar su juo yra stebimi skirtingi dangaus taškai maždaug 75 dienų laiko tarpais. Dėl to stebimų žvaigždžių skaičius sumažėjo iki ~10 000 [5].

1.2 Algoritmas

Ieškant egzoplanetų tranzitų žvaigždžių spindesio kreivėse atliekami 3 pagrindiniai žingsniai:

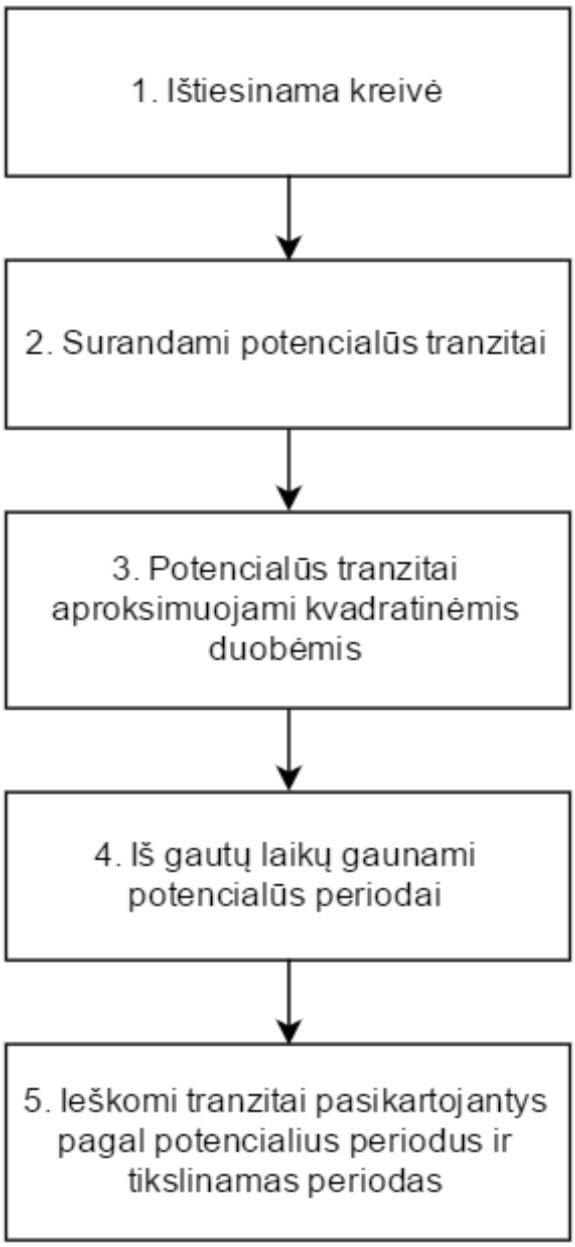
1. Sumažinama kitų reiškinių įtaką turimai žvaigždės spindesio kreivei. Tokių reiškinių gali būti labai daug. Pagrindinis iš jų yra žvaigždėje esančios dėmės, kurios gali laikui einant atsirasti ir išnykti. Taip pat, dėl žvaigždės sukimosi apie savo ašį, jų daroma įtaką žvaigždei nuolatos kinta. Tranzitai iš kitų, žvaigždės spindesiui įtaką darančių reiškinių, išsiskiria savo trumpumu ir periodišku pasikartojimu, į ką šioje dalyje būtina atsižvelgti.
2. Kreivėje surasti potencialius tranzitus – žvaigždės spindesio pokyčius, kurie savo forma yra panašūs į tranzitus.
3. Tarp rastų potencialių tranzitų ieškoti periodiško pasikartojimo.

Kitų autorių darbuose taip pat iš pradžių bandoma kreivę ištiesinti, taip sumažinant kitų reiškinių įtaką tranzitų paieškai. Bet tolimesnė veiksmų seka yra įvairi. S. Renner et al. darbe [6] bandoma ieškoti pavienių, nuo kreivės ženkliau nukrypusių taškų ir taip surasti potencialius tranzitus, tarp kurių paskui ieškoma periodiškai pasikartojančių. Panaši veiksmų seka daroma ir šiame darbe. Kituose darbuose, kaip P. Tenerbaum et al. [7] ir A. Vanderburg et al. [8] atskirų tranzitų ieškoma nėra, o bandoma iš karto prie kreivės priderinti daug įvairių tranzitų kreivių su įvairiais periodais ir fazėmis. Toks algoritmas praleidžia periodų spėjimų paiešką ir taip išvengia rizikos, kad šiame žingsnyje bus atmesti geri periodai. Taip pat jam mažesnę įtaką daro atsitiktiniai, į planetų tranzitus panašūs, žvaigždės spindesio pokyčiai. Tačiau dėl to tenka sekančius žingsnius atlikti su daug didesniu skaičiumi periodų.

Šiame darbe, kaip galima matyti 1 pav. pavaizduotoje blokinėje diagramoje, iš viso yra penki žingsniai. Tačiau trečia dalis yra skirta patikslinti antroje dalyje esantiems potencialiems tranzitams, tam, kad būtų galima geriau aptikti periodiškumus. Periodiškumo paieška tarp potencialių tranzitų išskirta į dvi dalis (4 ir 5 dalys blokinėje diagramoje).

Siekiant padidinti algoritmo veikimo greitį, iš pradžių išskiriami tik labiausiai tikėtini periodai ir tada jie tikrinami. Radus tranzitų, kurie pasikartoja pagal šį periodą, algoritmas dar patikslinamas. Toliau visi šie žingsniai aprašomi detaliau.

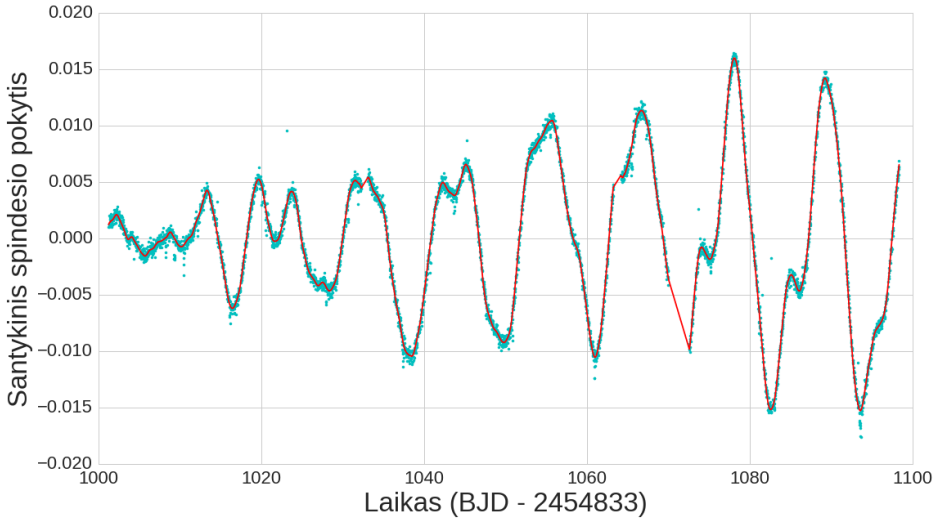
1.3 Blokinė diagrama



1 pav. Algoritmo blokinė diagrama.

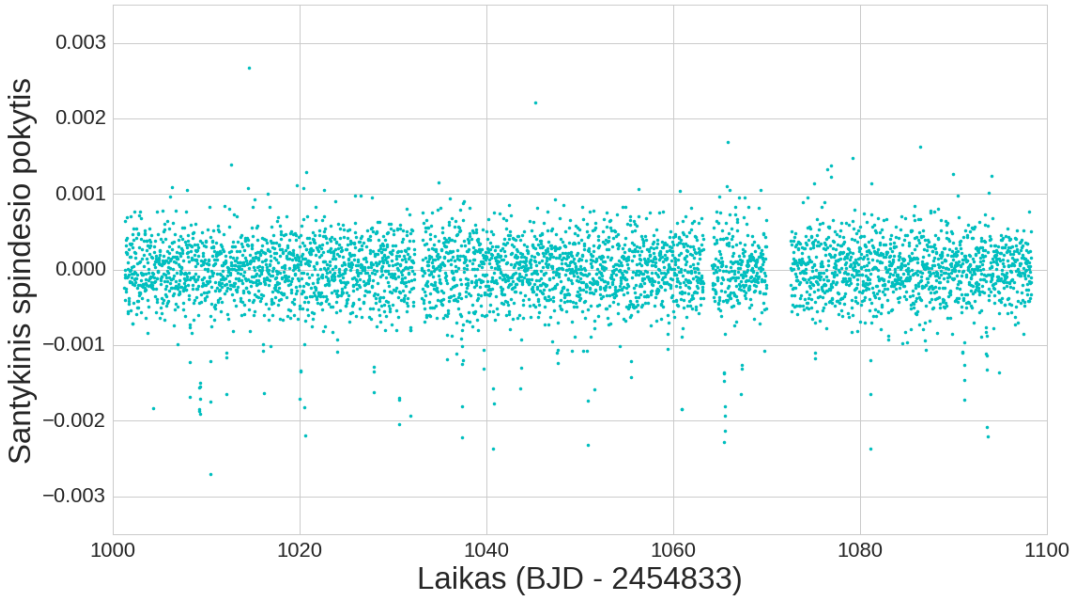
1.4 Kitų reiškinių daromos įtakos tranzito kreivei filtravimas

Pavyzdinė žvaigždės, apie kurią sukasi trys egzoplanetos, spindesio kitimo kreivė parodyta 2 pav. X ašyje pažymėtas laikas paromis, Y ašyje yra žvaigždės spindesio pokyčio ir žvaigždės vidutinio spindesio santykis. Kreivėje galime matyti įvairių reiškinių sukeliamus ilgalaikius žvaigždės spindesio svyravimus. Jie išfiltruojami aproksimuojant algoritmu ignoruojančiu trumpus ir staigius pokyčius, tokius kaip planetų tranzitai.



2 pav. Kepler duomenų pavyzdys (KIC10002866) su aproksimacijos linija (raudona)

2 pav. raudona linija pavaizduota minėtu algoritmu atlikta žvaigždės spindesio kitimo aproksimacija. Turint aproksimacijos kreivę, galima iš žvaigždės spindesio taškų atimti aproksimacijos vertes, gautas ties šių taškų laiko momentais. Tokiu būdu „ištiesintoje“ žvaigždės spindesio taškų sekoje išryškėja trumpos trukmės spindesio pokyčiai (3 pav.) ir taip apdorotus duomenis patogiau toliau analizuoti.



3 pav. Ištiesinta spindesio kreivė (KIC10002866).

Siekiama gerai aproksimuoti ilgalaikius žvaigždės spindesio pokyčius, nedarant įtakos tokiems trumpalaikiams pokyčiams kaip planetų tranzitai. Ankstesniame A. Šidlausko darbe [9] buvo naudojamas panašus algoritmas, tačiau čia kreivės dalinės aproksimacijos intervalas sumažintas iki trijų dienų, taip siekiant pagerinti ištiesinimą didesnių dažnių svyravimams. Trijų dienų intervalas parinktas atsižvelgiant į tai, kad jis yra pakankamai trumpas, todėl gerai glotnina ilgalaikius periodus, bet nėra per trumpas – yra gerokai ilgesnis už planetų tranzitus, kuriuos mes turime galimybę aptikti. Kepler misijos metu duomenys buvo renkami 4 metus. Norint teigti, kad yra atrastas planetos tranzitas, reikia surasti bent tris pasikartojančius tranzito atvejus, todėl teoriškai galimas aptikti planetų skriejimo apie žvaigždę periodas – 2 metai arba mažiau, tačiau praktikoje aptikimai su didesniu už vienerius metus periodu labai reti.

Kuo mažesnis skriejimo apie žvaigždę periodas, tuo mažesnė planetos tranzito trukmė. Taip yra, nes planetos skriejimo apie žvaigždę tangentinis greitis didėja mažėjant orbitos spinduliui. Žingsnis tarp dviejų aproksimacijų sumažinamas nuo vieno aproksimacijos intervalo dydžio iki ¼ intervalo dydžio – taip visi taškai patenka į daugiau nei vieną intervalą. Vėliau šie visi intervalai sujungiami į vieną bendrą kreivę ir tokiu būdų padidinamas aproksimacijos tikslumas. Visi intervalai aproksimuojami trečio laipsnio polinomu. Trečio laipsnio polinomas pasirinktas atsižvelgiant į tai, kad tranzitų spindesio pokytis yra staigus, todėl toks polinomas į savo aproksimaciją neįtrauks mūsų intervale esančio tranzito net ir aproksimuojant santykinai mažais intervalais. Aproksimacijos polinomu metu kraštiniai taškai dažnai aproksimuojami netiksliai, todėl kiekvieno intervalo kraštiniai taškai nebuvo naudojami juos sudedant į bendrą aproksimacijos kreivę. Intervalų aproksimacijai atlikti šiame darbe panaudotos „numpy“ bibliotekos funkcijos [10].

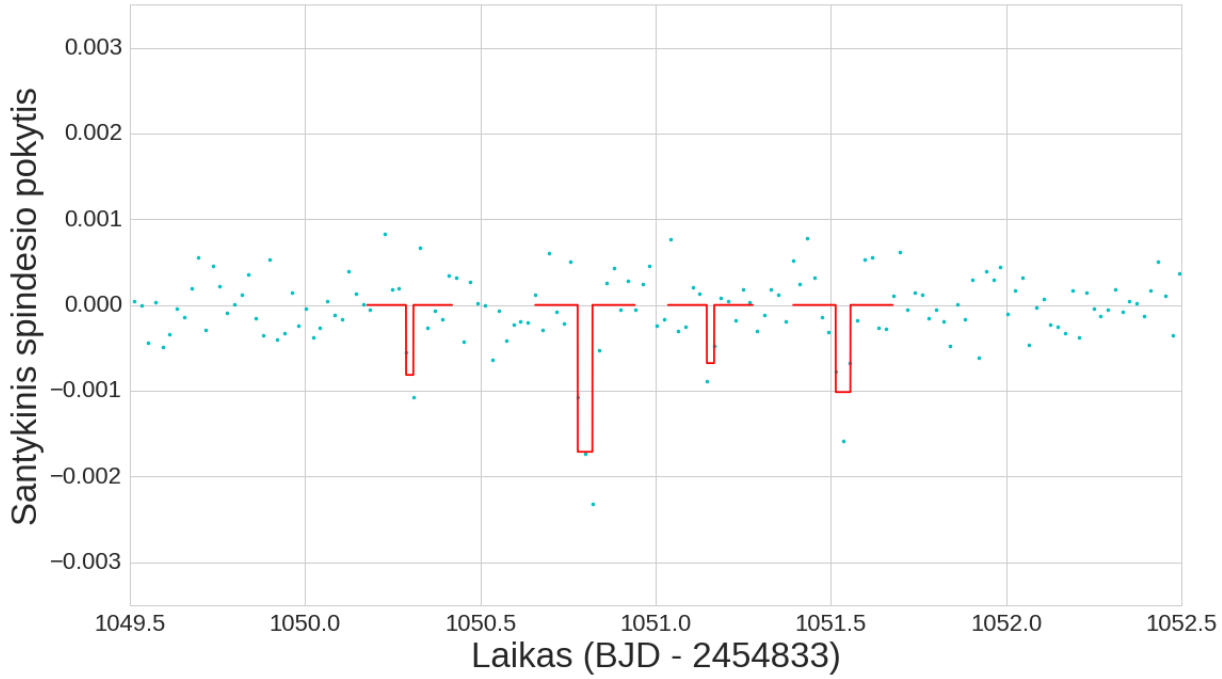
1.5 Potencialių tranzitų paieška

Sekantis žingsnis yra ieškoti į tranzitus panašių nukrypimų nuo spindesio kreivės (2-a ir 3-ia dalys 1-me paveiksle pavaizduotoje blokinėje diagramoje). Iš pradžių yra įvertinamas spindesio kreivėje esantis triukšmas. Tada ieškoma dvejų arba daugiau taškų seka, kurioje taškai yra vidutiniškai nukrypę nuo kreivės ženkliau negu triukšmas.

A. Šidlausko darbe [9] buvo ieškomi pavieniai, nuo kreivės nukrypę, taškai ir ieškoma jų sankaupų – taip gaunant potencialius tranzitus. Tačiau, taip ieškant sunku aptikti nedidelius tranzitus. O nustatant žemesnę ribą, nuo kurios ieškomi potencialūs tranzito taškai atsiranda labai daug pavienių triukšmo taškų, kurie yra žemiau negu ši riba. Todėl tolimesnė analizė pasidaro labai sudėtinga. Tikimybė, kad keli iš eilės einantys spindesio kreivės taškai bus visi ženkliau nukrypę nuo vidurkio daug mažesnė, todėl galime pasirinkti mažesnę ribą nuo kurios ieškome tranzitų ir taip rasti mažesnių planetų tranzitus. Duomenis, kurie naudojami egzoplanetų paieškai, Kepler registruoja tik pusės valandos intervalais, todėl ieškant dviejų arba daugiau iš eilės nuo kreivės nutolusių taškų suprastėja galimybės aptikti tranzitus, kurių trukmė yra mažesnė nei valanda. Tačiau mes galime aptikti tranzito tašką ir šalia jo esantį dėl triukšmo nukrypusį tašką, todėl mes ir tokį tranzitą galime užfiksuoti. Dalis trumpų tranzitų bus nepastebėta, bet tokie tranzitai vyksta labai mažu periodu, todėl kreivėje jų bus labai daug, taigi vis tiek galima užfiksuoti pakankamai tranzito taškų. Šiame žingsnyje svarbu parinkti tinkamą nuokrypio nuo kreivės ribą nuo kurios taškai laikomi galimais tranzitais.

Šiame algoritme skaičiuojamas kreivės standartinis nuokrypis (σ). Tada ieškoma: 2-jų taškų sekos nukrypusios daugiau kaip 2.5σ, 3-jų taškų sekos nukrypusios >2σ ir nuo 4-ių iki 7-ių taškų sekos nukrypusios >1.75σ. Svarbu tinkamai parinkti šias ribas, nes kuo jos mažesnės, tuo daugiau bus aptinkama netikrų tranzitų ir tuo bus sunkiau tolimesniuose žingsniuose iš visų aptiktų galimų tranzitų išskirti tuos, kurie periodiškai kartojasi. Dėl ko ženkliai krenta algoritmo veikimo greitis, tačiau, parinkus per didelę ribą, nebus aptinkami kai kurie mažesnių planetų tranzitai.

Radus tokius potencialius tranzitus yra įvertinami jų galimi parametrai, kurie toliau yra tikslinami juos aproksimuojant kvadratinėmis duobėmis. Šis tranzito modelis nėra tikslus, tačiau yra labai paprastas, todėl parankus veikimo greičio atžvilgiu. Pagrindinis parametras, kurio mums reikia sekančiame žingsnyje yra laiko momentas, kada įvyko tranzitas. Šis parametras, aproksimuojant tranzitą kvadratine duobe, dėl tranzito simetriškumo nustatomas pakankamai tiksliai. Surastų ir aproksimuotų kvadratine duobe tranzitų pavyzdys pavaizduotas 4 pav.



4 pav. Prieš tai parodytos 3 pav. kreivės priartinta dalis, kurioje aptikti potencialūs tranzitai yra pažymėti kvadratinės duobės modelio kreivėmis.

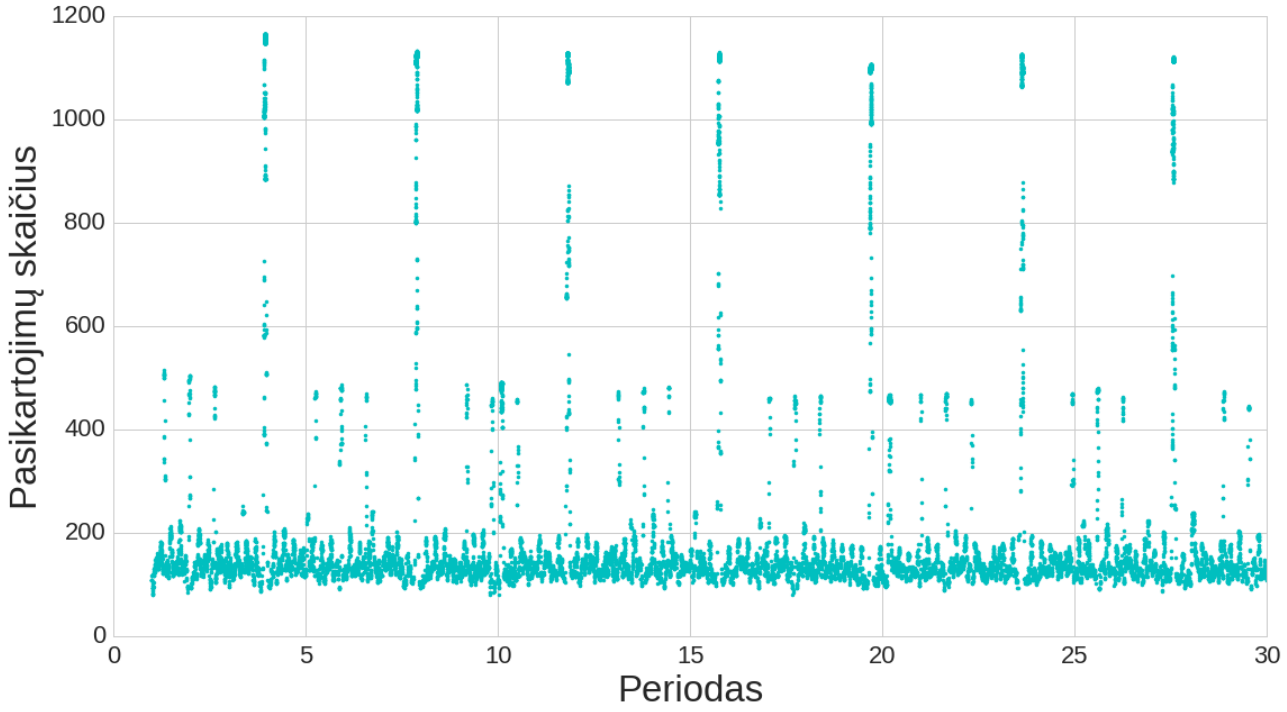
1.6 Periodinių pasikartojimų paieška

Gavus potencialių tranzitų laikus, sekantis žingsnis yra jų periodiškų pasikartojimų ieškojimas. Siekiant padidinti veikimo spartą, iš pradžių buvo bandomi surasti labiausiai tikėtini periodai (4-ta dalis blokinėje diagramoje), o tik tada jie buvo detaliau analizuojami (5-ta dalis blokinėje diagramoje). Norint rasti tikėtiniausius periodus, buvo skaičiuojami laiko skirtumai tarp visų potencialių tranzitų, visi jie laikyti galimais periodais ir tada vertintas jų tikėtinumas. Kiekvienam gautam laikų skirtumui ieškoma kitų panašių laiko skirtumų (pasirinktas ±0.05 paros kriterijus, t.y., dviejų spindesio kreivės taškų paklaida, –

taip atsižvelgiama į aproksimuojant potencialius tranzitus gaunamas paklaidas). Taip pat siekiant padidinti tikslumą ieškoma 2 arba 3 kartus didesnių laiko skirtumų.

Gauto tokios paieškos rezultato pavyzdys KIC 10002866 atveju pavaizduotas 5 pav. X ašyje pažymėti visi gauti laikų skirtumai tarp aptiktų potencialių tranzitų (galimi periodai). Y ašyje parodyta kiek aptikta panašių laiko skirtumų. Rodomi tik iki 30 dienų periodai, bet skirtumai skaičiuojami ir toliau. Apie šią žvaigždę skrieja trys patvirtintos planetos: 3.937, 28.082 ir 10.089 dienų periodais. Šiame paveiksle galima pastebėti, kad ties tomis vertėmis ir sveiką skaičių kartų už jas didesnėmis vertėmis pasikartojimų skaičius pakyla. Taip pat du ar tris kartus didesnių laiko skirtumų atsiranda daug pakilimų prie verčių du ar tris kartus mažesnių nei planetų skriejimo periodai.

Pažymėtina, kad svarbu pasirinkti gerą kriterijų šių periodų atsirinkimui, nes pasirinkus aukštą slenkstį gali būti atmetami egzistuojančių planetų tranzitų periodai, o pasirinkus per žemą slenkstį daug laiko bus išeikvota analizuoti triukšmo sukeltiems panašiems į planetų tranzitus nukrypimams ir dėl to labai ženkliai nukris algoritmo veikimo greitis.



5 pav. Laikų skirtumų tarp tranzitų pasikartojimai (KIC10002866). X ašyje pažymėti visi gauti laikų skirtumai tarp aptiktų potencialių tranzitų (galimi periodai). Y ašyje parodyta kiek aptiktą panašių laiko skirtumų.

Taip gaunami periodų spėjimai. Vėliau kiekvienam iš jų ieškoma kuo ilgesnė tranzitų laikų seka, kuri vyksta duoto periodo spėjimo arba labai panašiais tarpais. Radus tokią seką periodas yra patikslinimas, atsižvelgiant į rastų tranzitų laikus. Tokiu būdu gautas periodas toliau gali būti naudojamas modeliuojant tranzitines sistemas.

1.7 Tranzitų paieškos vartotojo sąsaja

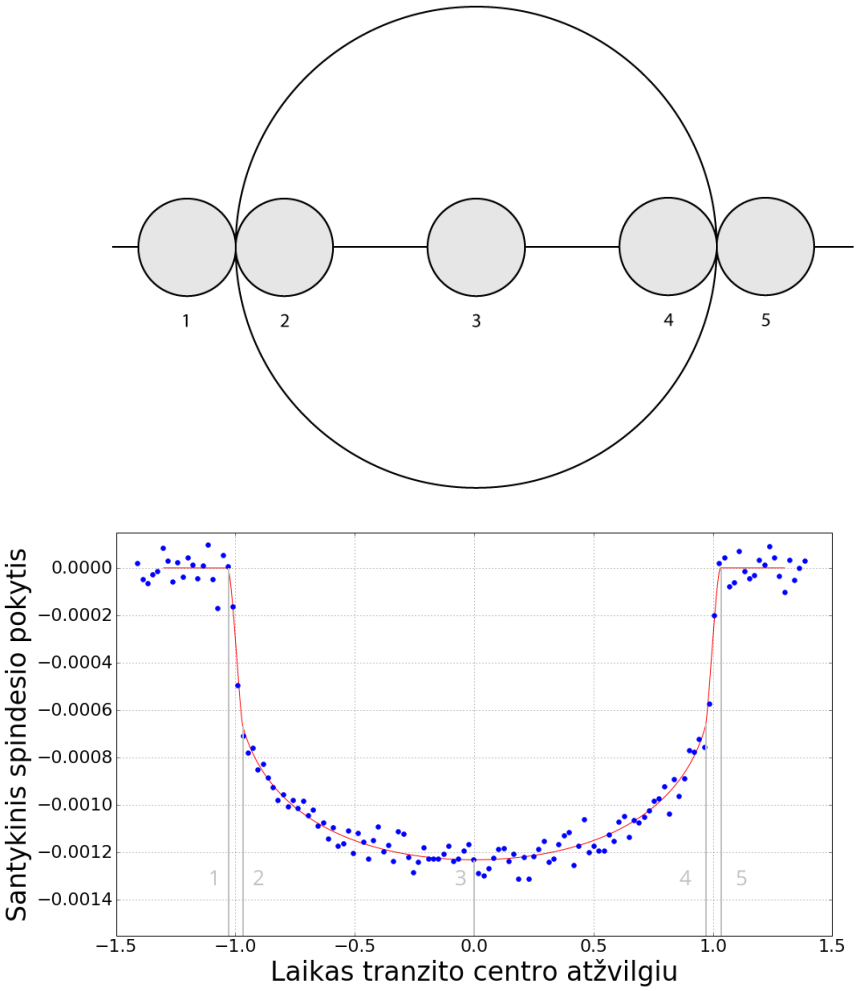
Vartotojo sąsaja pasiekiama adresu http://194.135.89.201:5002/. Ji leidžia įkelti kurios nors iš Kepler archyve esančių žvaigždžių stebėjimų duomenis. Iš pradžių parodoma pirmojo ketvirčio metu gauta ištiesinta spindesio kitimo taškų seka. Jei reikia, galima pasirinkti ir kito ketvirčio duomenis. Taip pat galima pasirinkti, kad būtų rodomos neištiesintos kiekvieno ketvirčio spindesio kitimo taškų sekos ir jas palyginti. Paspaudus mygtuką “detect transits” kvadratinėmis duobėmis pažymimi visi užkrautoje spindesio kitimo taškų sekoje surasti tranzitai. Pažymėjus norimą kreivės vietą galima ją priartinti.

2. Egzoplanetų sistemų modeliavimas

Suradus egzoplanetą žvaigždės spindesio kreivėje, svarbu įvertinti jos parametrus. Pasinaudojant tranzito modeliu, galime paskaičiuoti planetos ir žvaigždės spindulių santykį. Jei žinome žvaigždės spindulį, pasinaudodami šiuo santykiu galime gauti ir planetos spindulį. Taip pat turėdami žvaigždės masę ir planetos sukimosi apie žvaigždę periodą galime apskaičiuoti jos orbitos didjjį pusašį.

Šiame darbe, kuriant kompiuterinę modeliavimo sistemą, buvo panaudotas, Mandel ir Agol darbe [11] aprašytas, planetos tranzito metu vykstantis žvaigždės spindesio kitimo matematinis modelis. Šiam modeliui reikalingi žvaigždžių limbo tamsėjimo koeficientai buvo atrinkti iš pateiktų D.K. Sing darbe [12] (pagal konkrečių tirtų žvaigždžių parametrus).

2.1 Tranzito schema



6 pav. Centrinio tranzito schema: viršuje planetos praėjimo pro žvaigždę iliustracija, apačioje: tuo metu stebimo žvaigždės spindesio kitimo iliustracija (mėlyni taškai); raudona kreivė – prie „stebėjimų“ taškų priderinta modelinė tranzito kreivė. Pilkomis linijomis ir skaičiais 1 - 5 pažymėti parodyti pagrindiniai tranzito momentai aprašyti tekste.

Planetai praslenkant pro žvaigždę yra stebimas charakteringas žvaigždės spindesio kitimas, kuris schematiškai pavaizduotas 6 pav. centrinio tranzito atvejui: viršutinėje dalyje parodyta planeta (mažesnis skrituliukas) ir žvaigždės diskas jos fone, o apatinėje – žvaigždės spindesio kitimo kreivė. Skaičiais pažymėta: 1 – pirmas kontaktas, kai planetos diskas paliečia žvaigždės diską, 2 – pradinis momentas, kai planetos diskas jau visu savo plotu uždengia žvaigždės diską, 3 – tranzito vidurio momentas, 4 – paskutinis momentas, kai planetos diskas visu savo plotu dar uždengia žvaigždės diską, 5 – paskutinio kontakto momentas, kai planetos diskas jau pilnai nuslenka nuo žvaigždės disko.

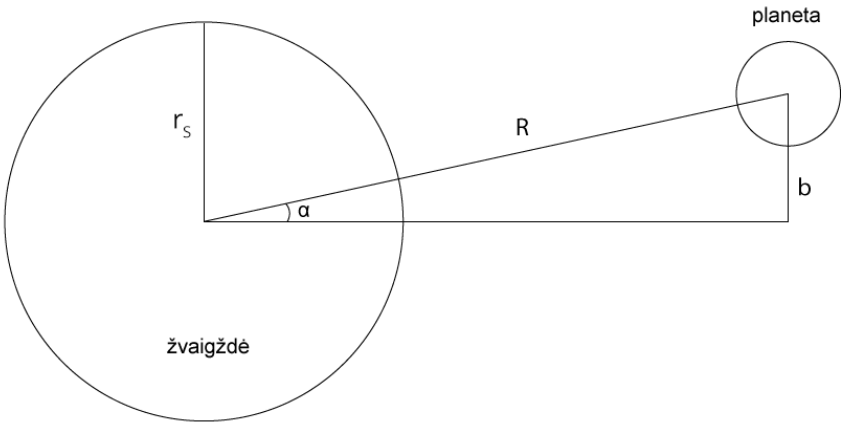
2.2 Tranzito modelinės kreivės

Planetų tranzitai gali vykti ne tik per žvaigždės centrą, bet ir per bet kurią kitą vietą. Kuo toliau nuo žvaigždės centro vyksta tranzitas, tuo tamsesnes žvaigždės vietas planeta uždengia ir tuo mažesnis spindesio pokytis stebimas tranzito metu. Be to, planetai skriejant tokiu pačiu greičiu, jei ji praskrieja toliau nuo centro, kelias, kuriame ji uždengia dalį žvaigždės šviesos tampa trumpesnis, todėl sumažėja ir stebimo tranzito trukmė. Dėl šių priežasčių pasikeičia stebima spindesio kitimo kreivės forma.

Necentrinio tranzito modeliavimo atveju (7 pav.) planetos santykinio nuotolio nuo žvaigždės centro įvertinimui naudojamas parametras *i*:

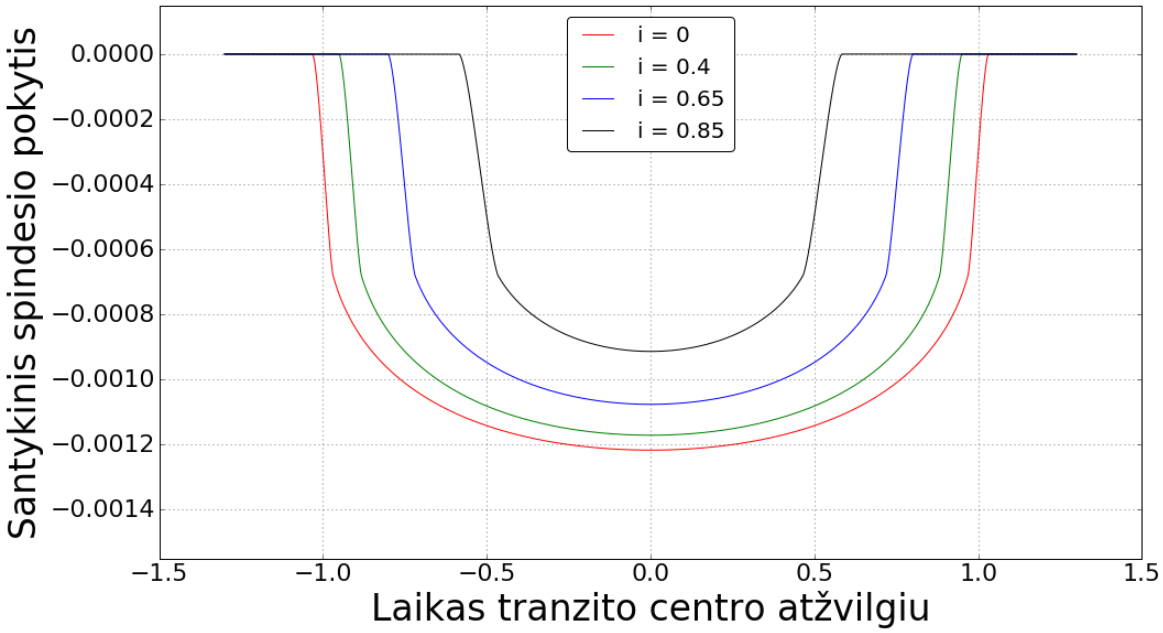
$$i = \frac{b}{r_s} = \frac{R\,sin(\alpha)}{r_s}, \quad (1)$$

kur r_s – žvaigždės spindulys, *b* – planetos nuotolis nuo žvaigždės disko centro, *R* – orbitos spindulys, α - orbitos polinkio kampas.



7 pav. Necentrinio tranzito geometrija; žymėjimai: žr. (1) formulę.

Kai *i* = 0 planetos centras praslenka pro žvaigždės disko centrą, kai *i* = 1 – pro žvaigždės disko kraštą. Pavyzdžiai, kaip atrodo tos pačios planetos modelinės tranzito kreivės, kintant parametrui *i*, pavaizduoti 8 pav.



8 pav. Planetos tranzito kreivės priklausomai nuo tranzito vietos: skirtingų spalvų linijos atitinka skirtingas parametro *i* vertes.

8 pav. matyti, kad necentrinio tranzito įtaka spindesio kitimo kreivei vis stipriau pasireiškia artėjant prie žvaigždės krašto: raudona (*i* = 0) ir žalia (*i* = 0.4) kreivės skiriasi mažiau negu mėlyna (*i* = 0.65) ir juoda (*i* = 0.85), nors skirtumas tarp *i* parametrų dvigubai mažesnis.

2.3 Modeliavimo sistemos vartotojo sąsaja

Tranzito modeliavimo programai reikalingi tokie parametrai:

- Tranzito pasikartojimo (planetos apskriejimo apie žvaigždę) periodas - P
- Vieno iš tranzitų laikas - t_t
- Žvaigždės efektinė temperatūra - T_{eff} (nežinant naudojama vertė 5500)
- Paviršiaus gravitacija - log g (nežinant naudojama vertė 4.0)
- Žvaigždės metalingumas - [Fe/H] (nežinant naudojama vertė 0.0)

Sistema pasinaudoja surastu tranzito pasikartojimo periodu ir vienu iš tranzito laiko momentu tam, kad surastų visus galimus to paties objekto tranzitų laiko momentus. Tada iš žvaigždės spindesio kreivės atskiromis grupėmis atrenkami tam tikru atstumu laike nuo kiekvieno tranzito vidurio laiko momento išsidėstę taškai. Iš visų tai pačiai grupei priklausančių taškų stebėjimų laikų atimamas tos grupės tranzito vidurio laiko momentas. Tada, tai pačiai planetai priskirtų tranzitų grupių taškai sudedami į vieną bendrą tranzito diagramą, prie kurios derinama modelinė tranzito kreivė, keičiant šiuos parametrus:

- tranzitinio objekto ir žvaigždės spindulių santykį $p = r_p/r_s$,
- tranzitinio objekto santykinį nuotolį nuo žvaigždės centro *i.*

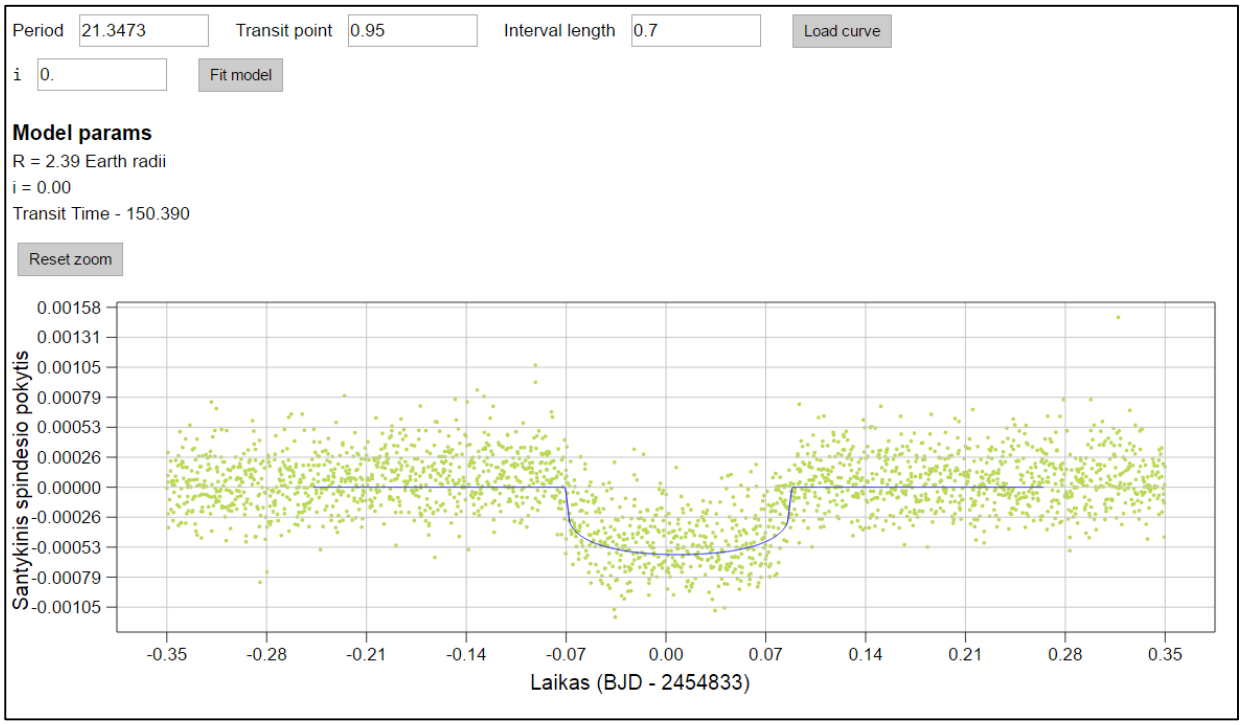
Modelinės kreivės priderinimas prie spindesio kitimo taškų sekos vykdomas panaudojant „scipy“ bibliotekos [13] „minimize“ funkcija ir L-BFGS-G algoritmą [14]. Šiam algoritmui reikalinga paklaidos funkcija (naudojamas kvadratinis taškų nuokrypis nuo modeliavimo kreivės), apytiksliai parametrų spėjimai (jie gaunami prie tranzitų taškų priderinus spindesio kitimo kreives) ir ribos kuriose parametras gali kisti (jos parenkamos plačios, atsižvelgiant į turimus duomenis, pvz. tranzito gylis negali būti mažesnis už 0 ir negali būti didesnis negu labiausiai nutolusio nuo spindesio kreivės taško vertė). Algoritmas optimizuoja duotus parametrus užduotose ribose, siekdamas kiek įmanoma sumažinti paklaidas.

Norint pasinaudoti tranzitų modeliavimu, sukurtoje vartotojo sąsajoje (žr. 9 ir 10 pav.) reikia pasirinkti norimą žvaigždę ir paspausti mygtuką “Switch to modeling”. Tada galima įvesti norimą periodą ir tranzito vietą ir reikia paspausti mygtuką “Load curve”. Sistema pagal užduotą periodą ir tranzito vietą sugeneruos bendrą visų užduotų tranzito vietų kreivę. Nustačius tinkamus parametrus reikia paspausti mygtuką “Fit model”. Tada sistema prie duotos kreivės priderins planetos tranzito modelį ir parodys apskaičiuotus parametrus.

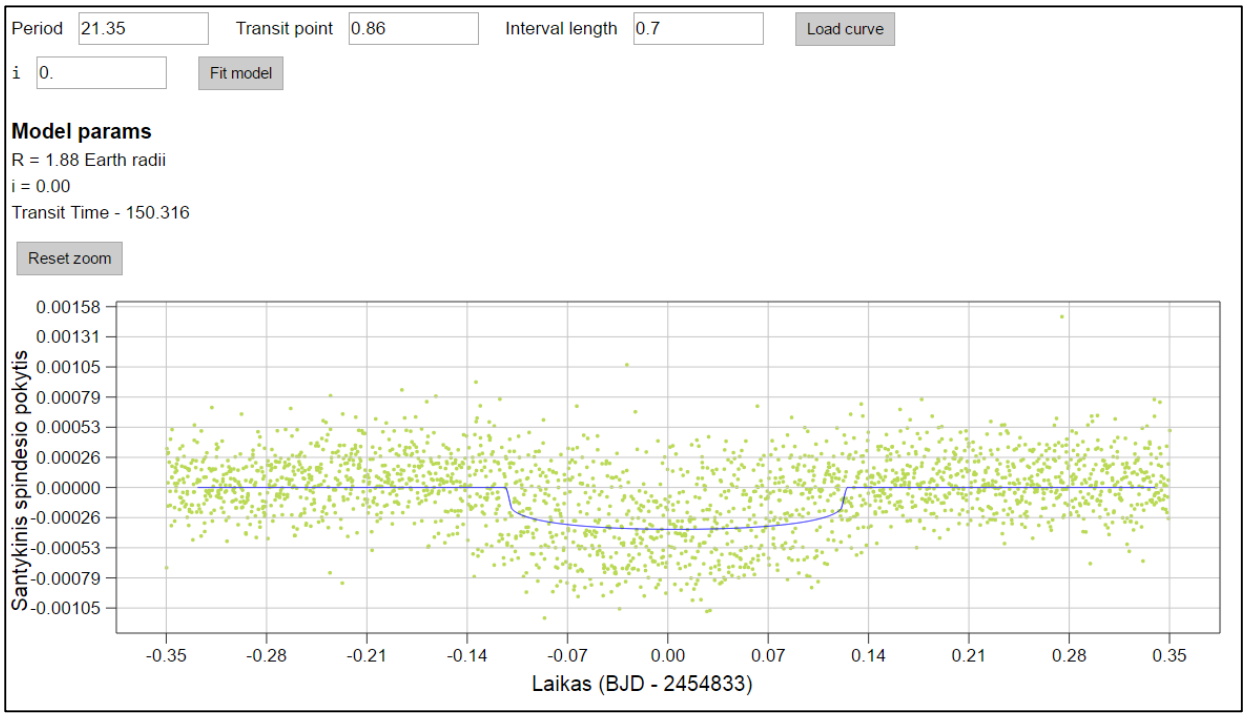
Labai svarbu prieš derinant modelį surasti kuo tikslesnį periodą, nes kitaip, tranzitų, nutolusių per kelis periodus nuo duotojo tranzito vidurio laiko momento, vidurio laikai bus gauti netiksliai. Susumavus tokių tranzitų taškus į vieną laikinę seką, jie blogai sutaps ir dėl to bus nustatyti blogi parametrai (10 pav.).

Parametrą *i* galima įvesti rankiniu būdu ir analizuoti, kaip gerai priderinamos modelio gaunamos kreivės planetai praeinat skirtingu nuotoliu nuo žvaigždės centro ir kokią tai daro įtaką gaunamam planetos spinduliui.

Modeliavimo vartotojo sąsaja pasiekiama adresu http://194.135.89.201:5002/ .



9 pav. KIC10019643 spindesio kreivė su priderintu modeliu, kai periodas parinktas gerai.

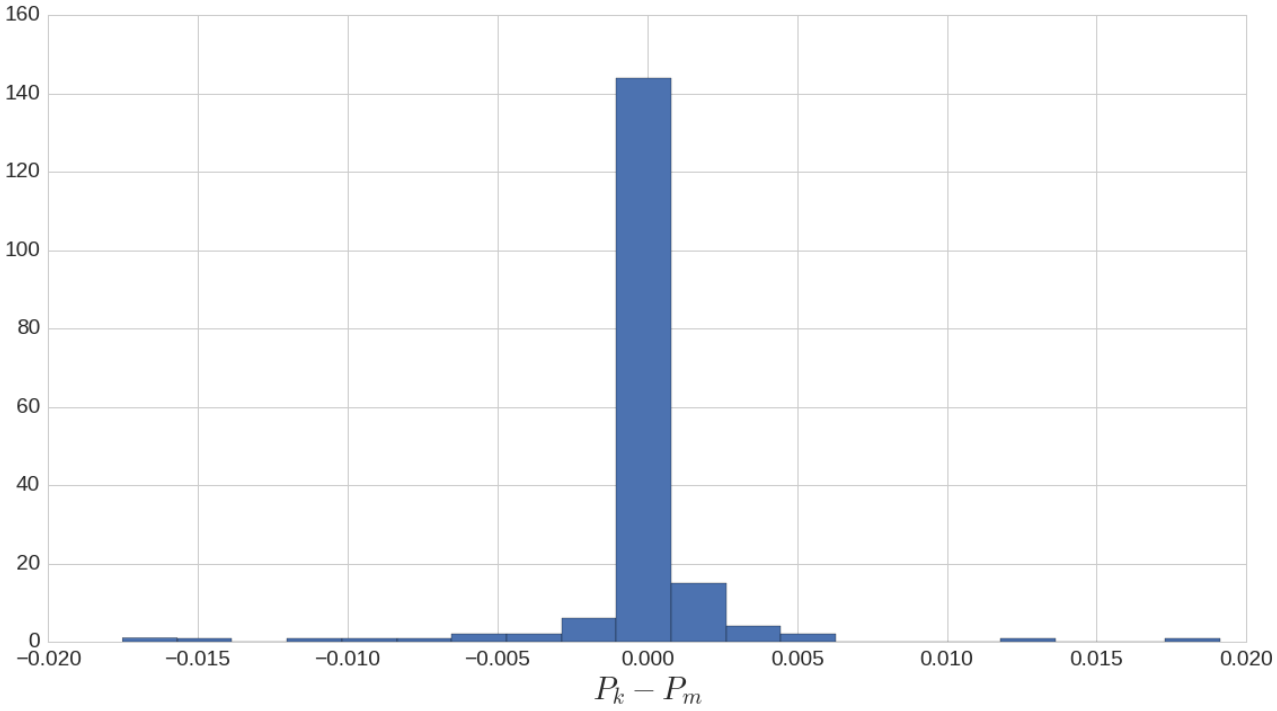


10 pav. KIC10019643 spindesio kreivė su priderintu modeliu, kai periodas parinktas blogai.

3. Sistemos testavimas

3.1 Tranzitų paieškos testavimo rezultatai

Sistema buvo testuota su 94 žvaigždžių spindesio kreivėmis, apie kurias skrieja 206 patvirtintos planetos. Sistema surado 88.3% visų planetų. Bent po vieną planetą buvo rasta prie 95.7% testuotų žvaigždžių.

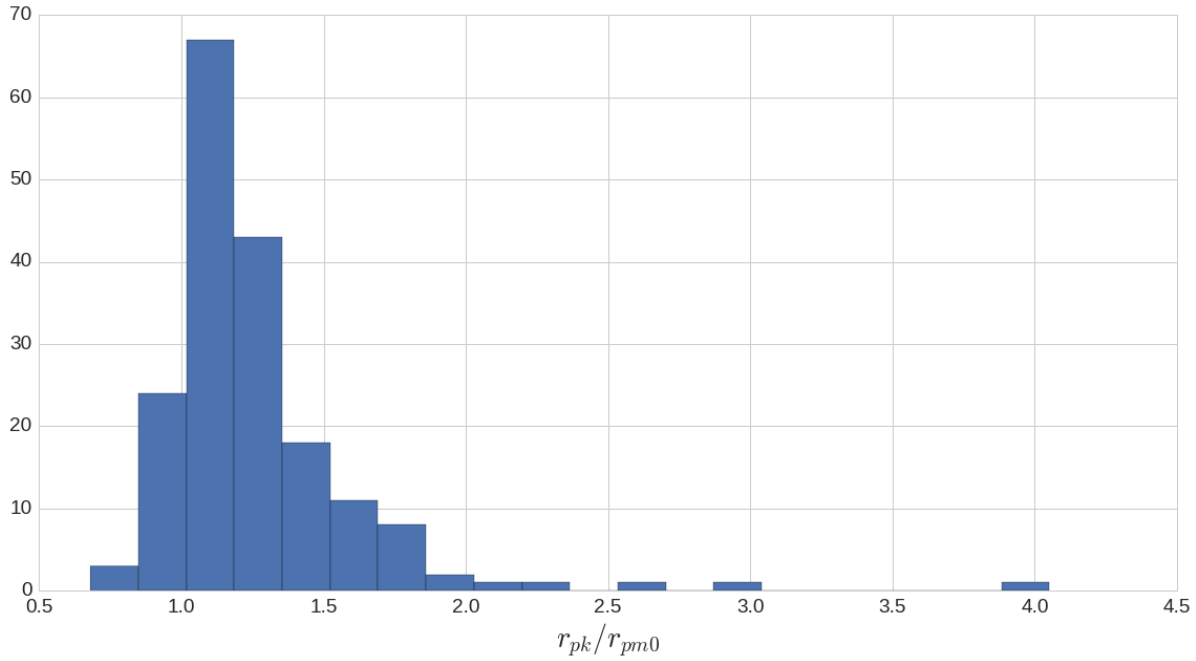


11 pav. Egzoplanetų kataloge [15] pateikiamų periodų ir periodų gautų su paieškos sistema skirtumų histograma

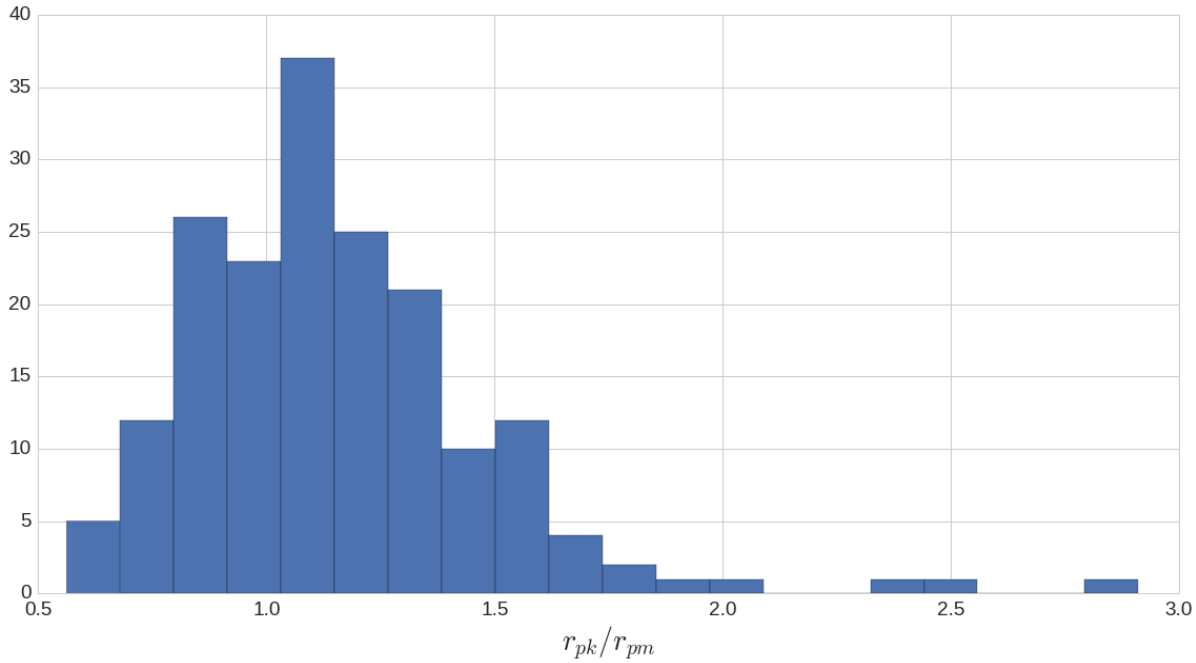
11 pav. matyti, kad sistemos aptikti egzoplanetų periodai neženkliai skiriasi nuo kataloge pateikiamų reikšmių. 92% atvejų su sistema gautas periodas nuo pateiktojo kataloge skiriasi mažiau kaip 0.003 paros (260 s), o 81% atvejų – mažiau nei 0.001 paros.

3.2 Tranzitų modeliavimo testavimo rezultatai

Visoms 3.1 skyriuje aprašyto testavimo metu surastoms planetoms pritaikyta modeliavimo sistema. Apskaičiuotas planetos spindulys, planetos spindulys centrinio tranzito atveju (taip įvertinama planetos spindulio apatinė riba) ir planetos orbitos didysis pusašis. Visi šie dydžiai palyginti su egzoplanetų kataloge [15] pateikiamais dydžiais. Rezultatai pavaizduoti 12-14 pav. Modeliuojant gauti dydžiai pažymėti indeksu *m*, o dydžiai pateikiami kataloge – indeksu *k*.



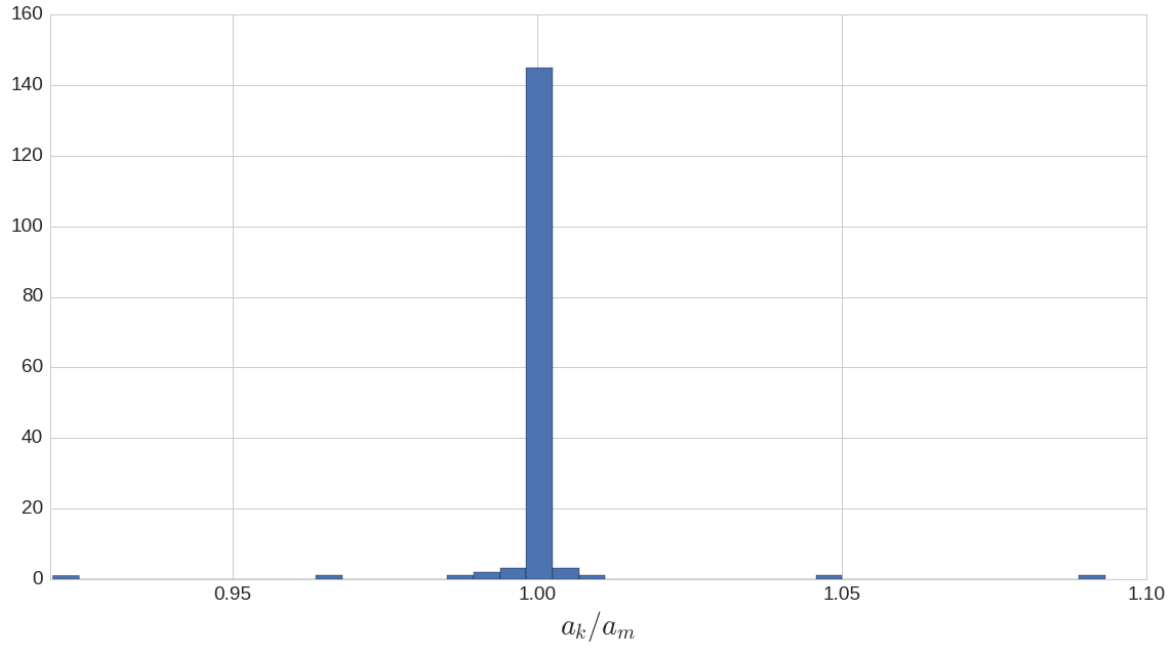
12 pav. Su sistema nustatytų spindulių, modeliuojant tranzitą per žvaigždės centrą, palyginimas su pateikiamais kataloge planetų spinduliais.



13 pav. Su sistema nustatytų spindulių palyginimas su kataloge pateikiamais planetų spinduliais.

Lyginant kataloge pateikiamą planetos spindulį ir modeliuojant gaunamą planetos spindulį centrinio tranzito atveju, dalis šių santykių yra mažesni už vieną. Taip yra todėl, kad neteisingai nustačius periodą, gaunamas per mažas spindulys. Dauguma santykių yra artimi vienetui ir tik maža dalis labiau skiriasi. Taip yra todėl, kad tranzitai, kurie vyksta ne arti krašto, nuo centrinis tranzito skiriasi ne ypač ženkliai (8 pav.).

Periodo nustatymo tikslumas gana ženkliai varijuoja, tai vyksta todėl, kad triukšmingose kreivėse sunku nustatyti gerą parametrą *i*, nuo kurio ženkliai priklauso nustatomas periodas.



14 pav. Apskaičiuoto planetos didžiojo pusašio palyginimas su pateikiamu kataloge.

Orbitos didysis pusašis 90% ištestuotų planetų skiriasi mažiau nei 1% nuo pateikto kataloge. Geras tikslumas gaunamas todėl, kad periodas, kuris naudojamas didžiojo pusašio skaičiavimui, buvo gautas taip pat gana dideliu tikslumu.

4. Naujų egzoplanetų paieška

Sukurta sistema buvo panaudota naujų egzoplanetų paieškai. Buvo ištirta apie 5000 žvaigždžių spindesio kitimo sekų, kurios buvo paimtos iš Kepler K2 Campaign 5 stebėjimų archyvo (M44 ir M67 žvaigždžių spiečių žvaigždės).

Paieškos metu buvo rastos 2 naujos kandidatės į egzoplanetas: viena žvaigždės EPIC 211330113 ir viena žvaigždės EPIC 211514106 stebėjimų duomenyse. Taip pat rastos 2 naujos galimos dvinarės žvaigždės: EPIC 211812160 ir EPIC 211424769.

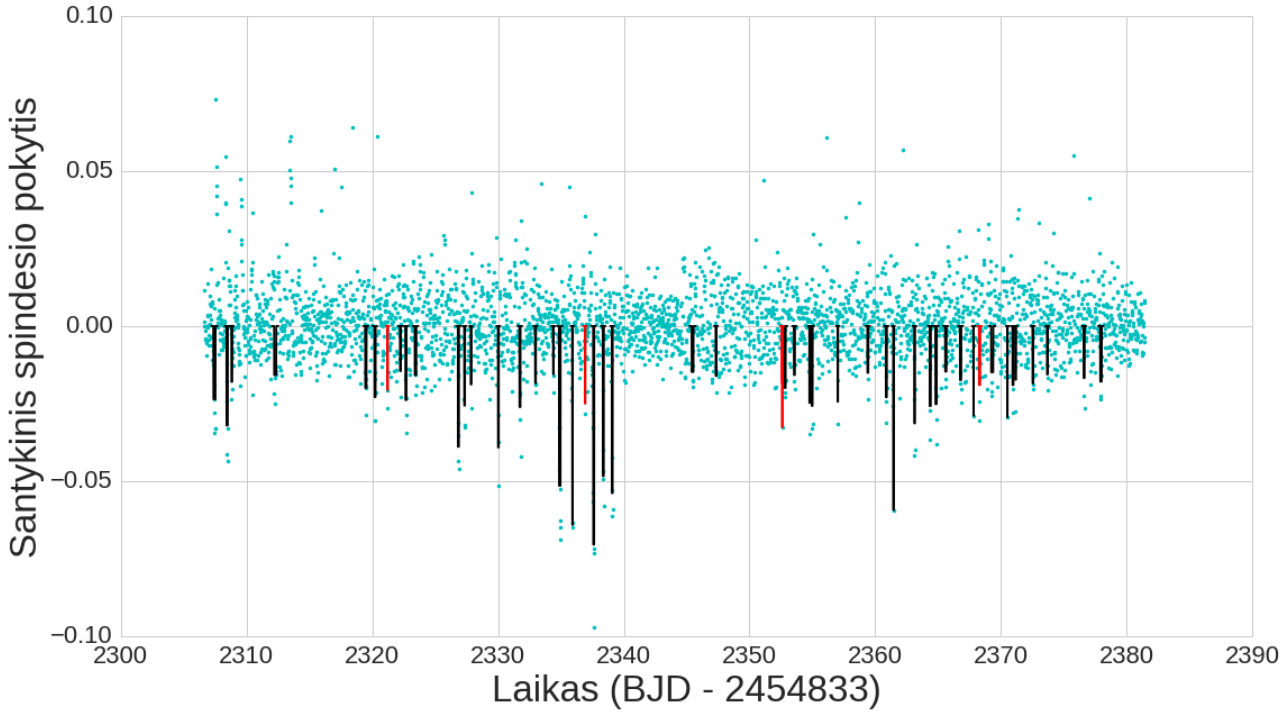
4.1 Atrastos naujos egzoplanetos kandidatės

4.1.1 EPIC 211330113

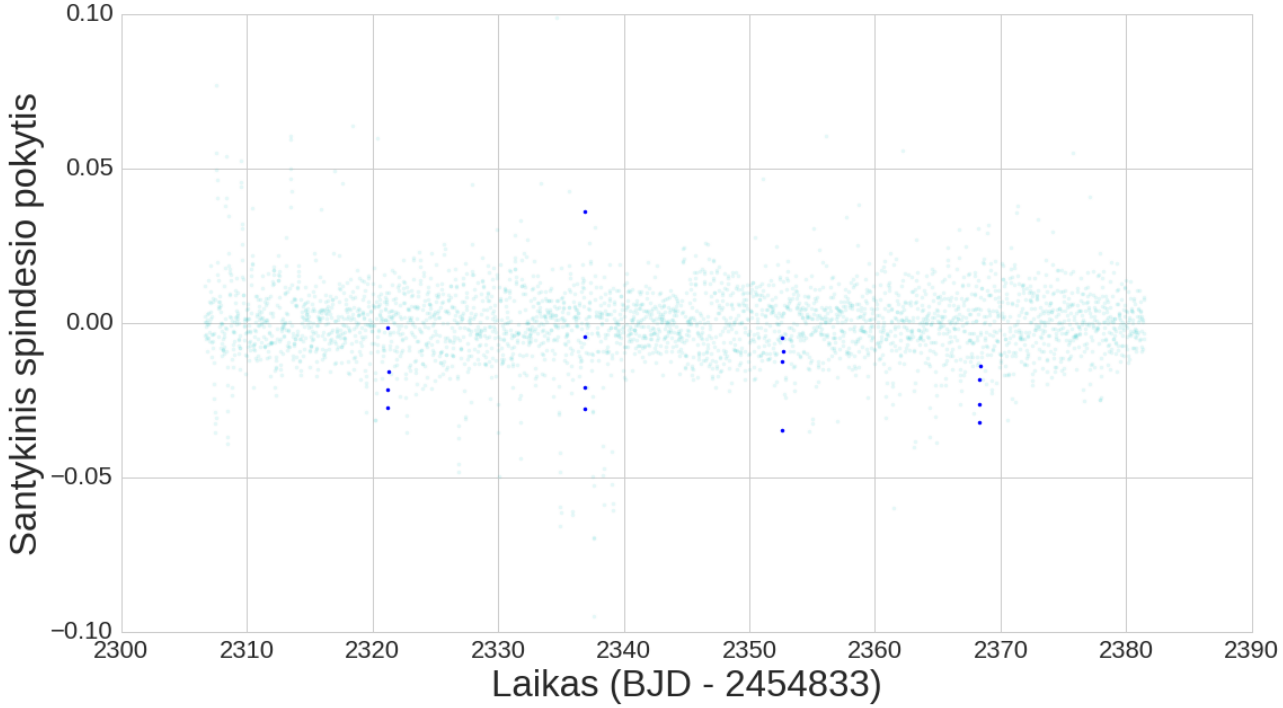
Ši žvaigždė yra raudonoji nykštukė, jos parametrai iš egzoplanetų archyvo [16] ir Huber et al. [17]:

- $T_{eff} = 3497 \pm 42K$
- $r = 0.229^{+0.014}_{-0.020} R_{\odot}$
- $M = 0.219^{+0.011}_{-0.024}\, M_{\odot}$
- $\log g = 5.053 \pm 0.032$
- $V(Kepler) = 17.365$
- $Atstumas = 203.5 \pm 7.5\, pc$
- $\left[\frac{Fe}{H}\right] = -0.032 \pm 0.1$

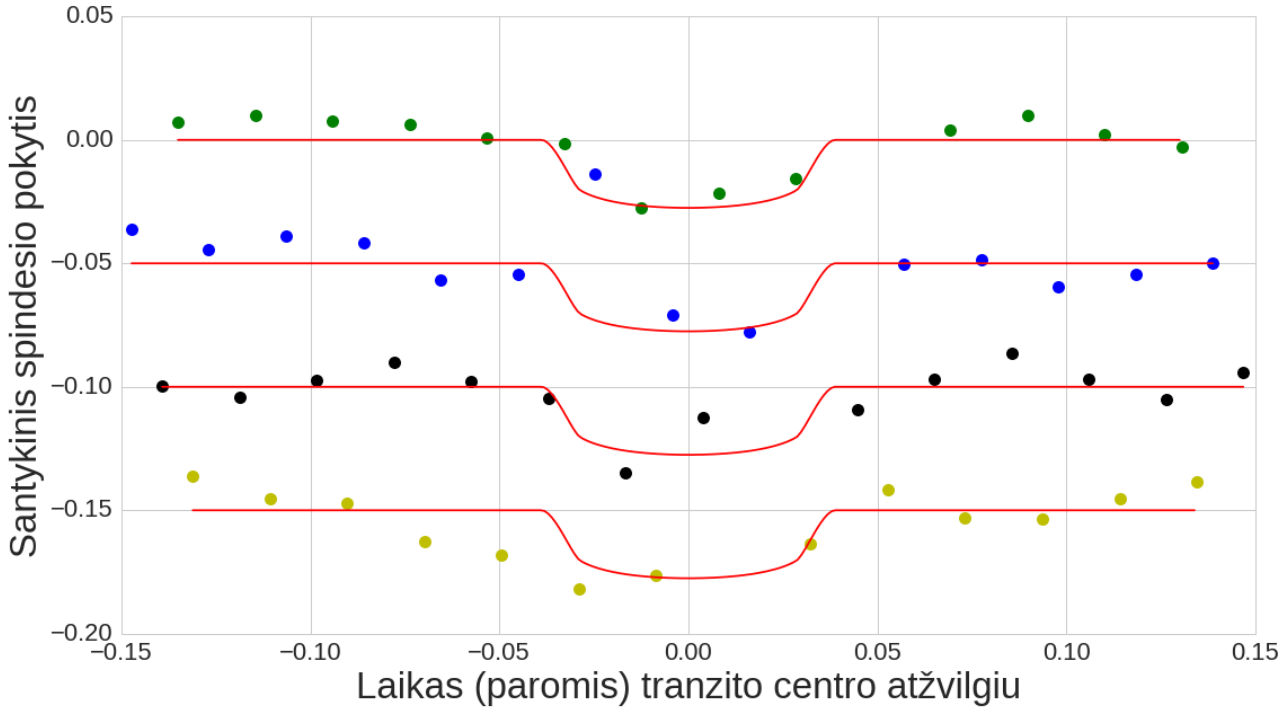
15 pav. pavaizduota ištiesinta tirtos žvaigždės spindesio kreivė su joje aptiktais potencialiais tranzitais. Ši kreivė gana triukšminga, taip yra dėl gana mažo žvaigždės EPIC 211330113 vizualinio ryškio [3]. Taip pat matosi trumpi ir ženklūs spindesio pokyčiai atsirandantys dėl trūkių palydovo renkamuose duomenyse. 16 pav. išryškinti spindesio kreivėje aptikti planetų tranzitai. Visų keturių surastų šios planetos kandidatės tranzitų sekos, kartu su darbe sukurta sistema gauta modeline kreive, pavaizduotos 17 pav. Dėl trumpo ~75 dienų matavimo intervalo aptikti tik 4 tranzitai. Siekiant įsitikinti, kad tai realūs tos pačios planetos tranzitai, pagal darbe [18] pateiktas rekomendacijas sudaryta visų keturių tranzitų suminė spindesio kreivė pavaizduota 18 pav. To paties objekto skirtingų tranzitų sekų taškų gero sutapatinimo atveju, tokioje kreivėje matomas aiškus spindesio sumažėjimas. 19 pav. pavaizduota sudėtinė visų aptiktų tranzitų taškų (sutapatinus skirtingų tranzitų vidurio laiko momentus) diagrama, prie kurios taškų ir buvo priderinta modelinė kreivė. Derinant buvo atmesti du ženkliausiai dėl triukšmo nuo kreivės nutolę taškai.



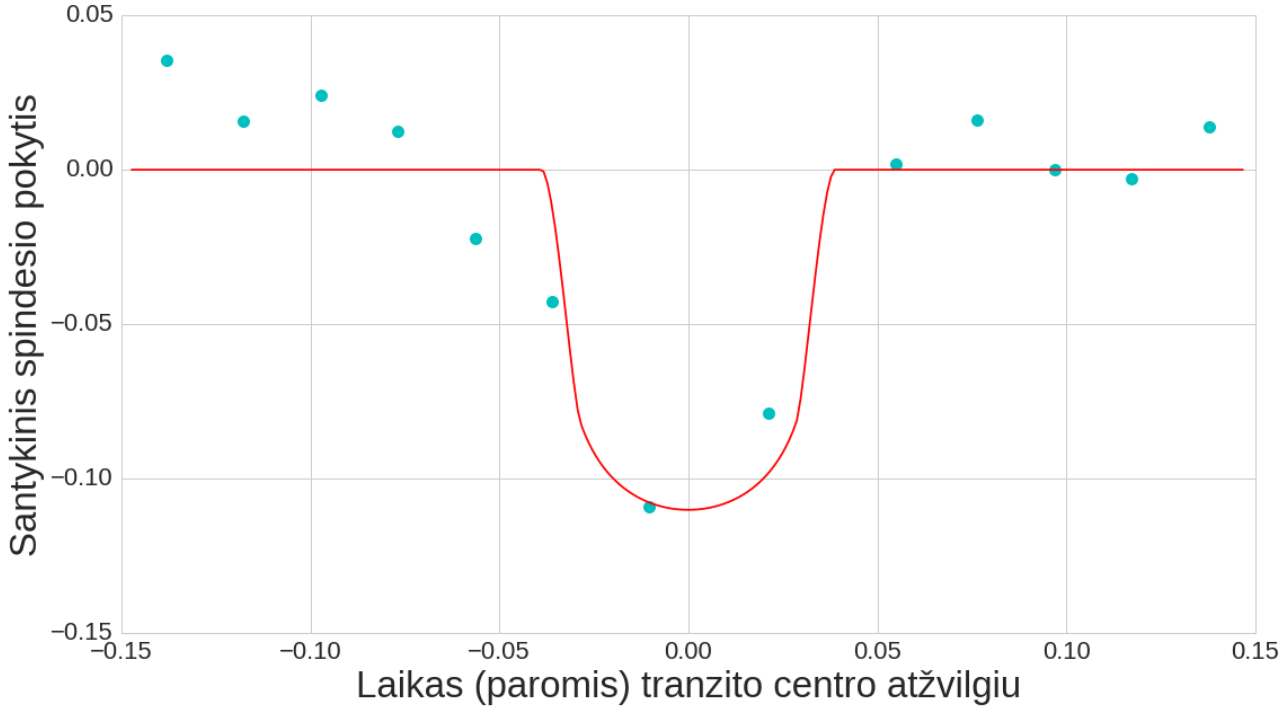
15 pav. Ištiesinta žvaigždės EPIC 211330113 spindesio kreivė su aptiktais potencialiais tranzitais (tranzitai priklausantys aptiktai planetai kandidatei pažymėti raudonai).



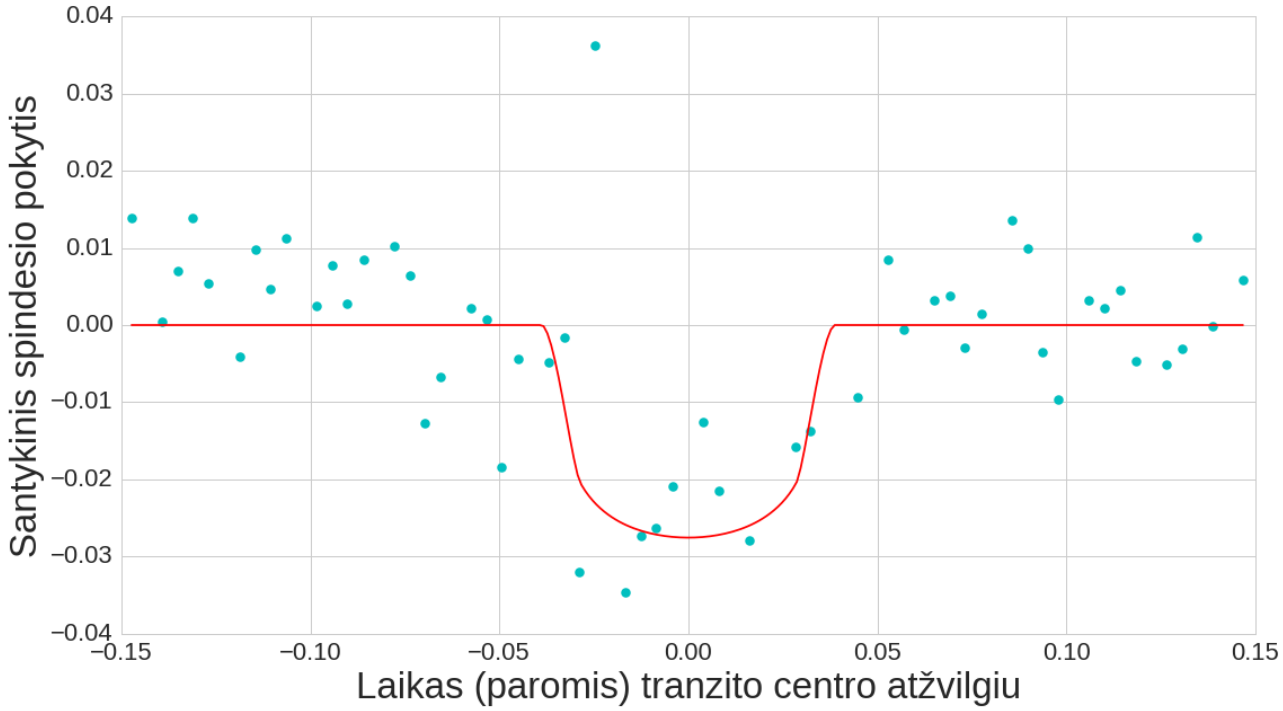
16 pav. Tas pat kaip 15 pav., bet kreivėje išryškinti tik egzoplanetos kandidatės tranzitų taškai.



17 pav. Aptiktų EPIC 211330113 planetos kandidatės tranzitų spindesio kreivės sudėtos į vieną paveikslą su postūmiais y ašyje (kiekviena kita kreivė pastumta žemiau per 0.05).



18 pav. Suminė visų EPIC 211330113 planetos kandidatės tranzitų spindesio kreivė: surastų 4 gretimų tranzitų matavimų taškai sudėti į vieną, vaizduojant jų laiko verčių vidurkį ir spindesio nuokrypių sumą, siekiant išryškinti planetos tranzitą.



19 pav. Sudėtinė EPIC 211330113 planetos kandidatės tranzitų spindesio kreivė – visų keturių tranzitų taškai sudėti į vieną paveikslą centruojant juos pagal spėjamą tranzito centrą, siekiant pagerinti signalo ir triukšmo santykį (raudona kreivė - priderintas tranzito modelis, kuriuo remiantis nustatomi egzoplanetos parametrai).

Paskaičiuoti surastos planetos kandidatės parametrai:

- Planetos spindulys: $4.2^{+1.4}_{-0.5} \mathrm{R}_{\oplus}$
- Orbitos didysis pusašis: $0.0740^{+0.0001}_{-0.0002}$ AU
- Periodas: 15.704 ± 0.006 dienos
- Pirmo aptikto tranzito laikas: 2321.21 (BJD - 2454833).

Planetos temperatūra (apskaičiuota laikant ją absoliučiai juodu kūnu):

- T = 297.6 K, kai albedo (A) = 0
- T = 273.1 K, kai A= 0.29
- T = 255.7 K, kai A= 0.455
- T = 420.9 K, kai A = 0 ir apšviečiama viena jos pusė

Laikant šią planetą visiškai juodu kūnu ir esant mažam jos albedo, planetoje gali egzistuoti skystas vanduo. Albedo pasiekus 0.29 (Žemės albedo) pasiekiamas vandens užšalimo taškas. Albedo esant 0.455 gaunama tokia juodo kūno temperatūra kaip Žemės. Planeta yra tinkamoje gyvybei zonoje, taip pat yra pakankamai didelė, kad išlaikytų atmosferą. Tačiau nors ir planeta gali būti tinkama gyvybei yra daug parametrų kurių nežinome, o jos tinkamumas labai stipriai priklauso nuo: albedo, šiltnamio efekto, sukimosi apie savo ašį periodo. Jei pastarasis lygus planetos sukimosi apie žvaigždę periodui, tai planetos juodo kūno temperatūra atsuktoje į žvaigždę pusėje bus 420.9 K, o tokia temperatūra netinkama žemiško tipo gyvybei [19].

Dėl šiek tiek pastebimo staigesnio spindesio kritimo tranzito pradžioje, buvo svarstomas ir besiardančios egzoplanetos variantas, tačiau toks scenarijus galimas tik planetai mažesnei už Žemę [20]. Šiuo atveju tokio, kaip buvo nustatyta, didelio spindulio planeta tyrėtų gana greitai irti – tam, kad išmestų pakankamai daug dulkių, kurios galėtų išsklaidyti tokį kiekį šviesos, koks yra stebimas. Tačiau tai neįmanoma santykinai žemoje 421K temperatūroje [20].

Kitų reiškinių, galinčių sukelti panašų spindesio nukrypimą, apsvarstymas:

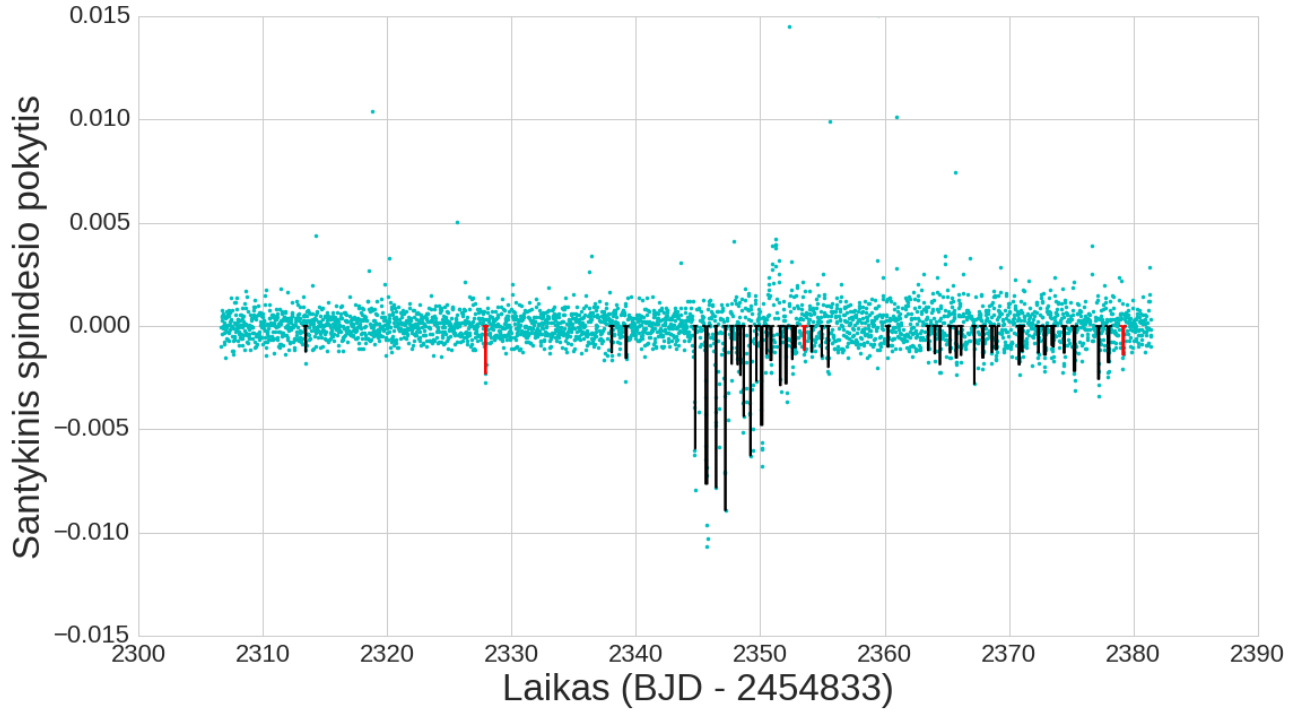
- Tai, kad tokį spindesio nuokrypį sukėlė dėmės mažai tikėtina dėl to, kad ištiesintoje kreivėje nesimato jokių ženklių spindesio pokyčių, taip pat šio tranzito metu labai greitai keičiasi žvaigždės spindesys, dėmės tokių staigių pokyčių paprastai nesukelia.
- Nebuvo aptikta ženklių antrinių užtemdymų, kurie būdingi dvinarei žvaigždžių sistemai, todėl tai mažai tikėtina.
- Seka periodiškai pasikartojančių matavimo netikslumų dėl techninių priežasčių. K2 misijos metu matome gana daug trūkių spindesio kreivėse po kurių būna staigūs šuoliai, tačiau stebimuose tranzituose nėra tokių didelių trūkių, kokie paprastai atsiranda dėl palydovo veiklos. Taip pat, trūkių metu spindesys kinta į vieną pusę ir paskui staigiai šoka į savo pradinę vertę, o 2-juose stebimuose tranzituose matomas gana tolygus perėjimas į abi puses.

4.1.2 EPIC 211514106

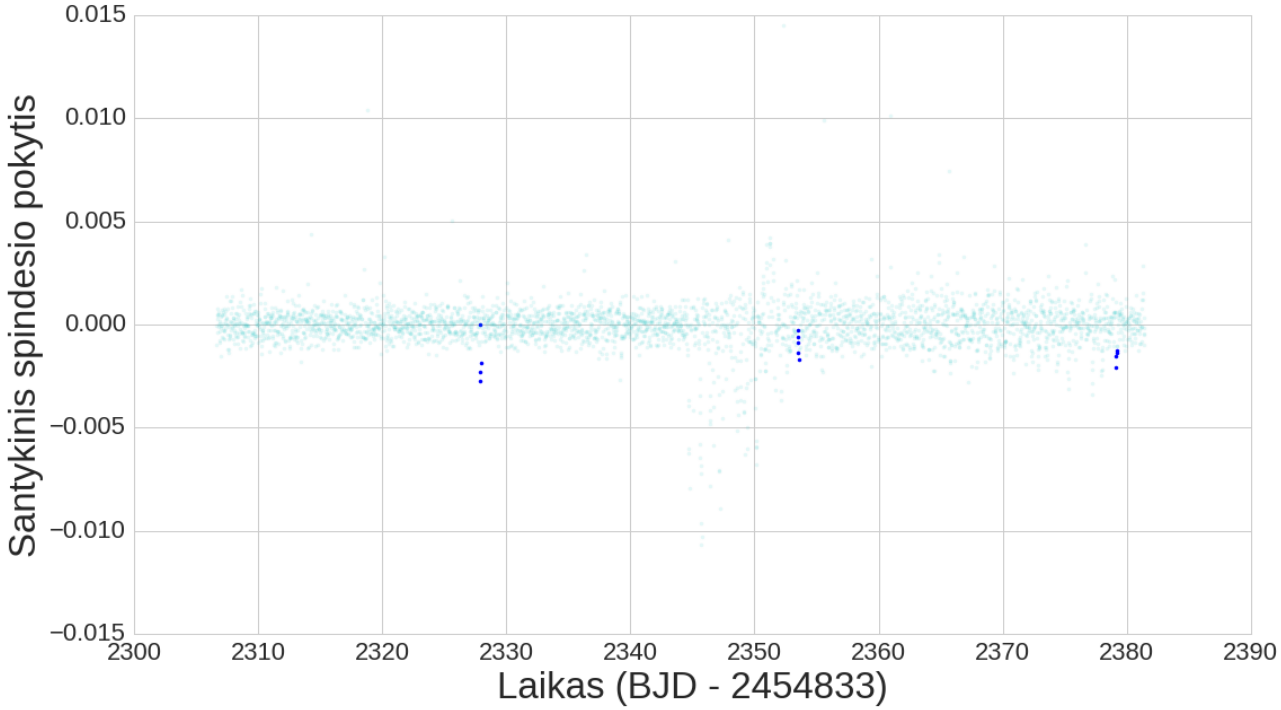
Ši žvaigždė yra raudonoji nykštukė, jos parametrai gauti iš egzoplanetų archyvo [16] ir Huber et al. [17]:

- $T_{eff} = 3723^{+56}_{-156} K$
- $r = 0.332^{+0.051}_{-0.077} R_{\odot}$
- $M = 0.364^{+0.056}_{-0.113}\, M_{\odot}$
- $\log g = 4.256 \pm 0.075$
- $V(Kepler) = 16.018$
- $Atstumas = 129.1 \pm 19.46\, pc$
- $\left[\frac{Fe}{H}\right] = 0.029 \pm 0.12$

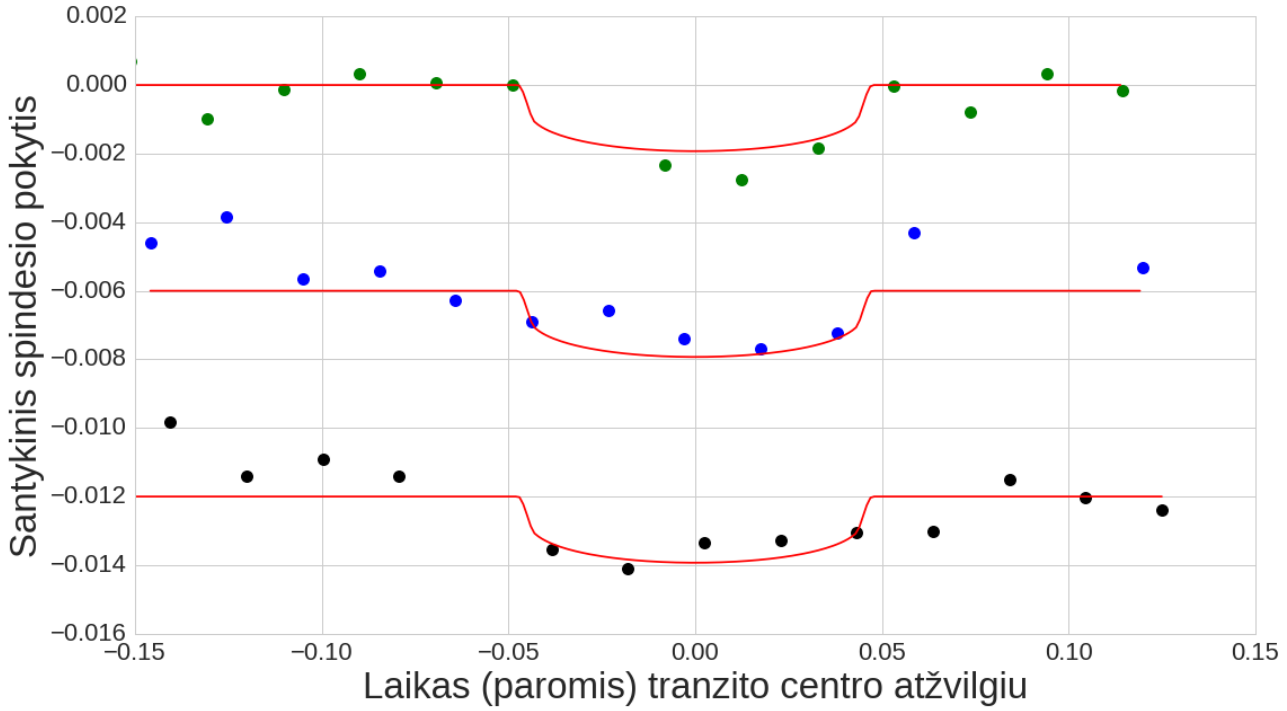
Planetos paieškos seka ir kontrolinės kreivės, pateiktos 20-24 pav., buvo gautos analogiškai, kaip ir prieš tai aprašytai egzoplanetai. Derinant modelines kreives prie duomenų buvo atmestas ženkliausiai dėl triukšmo nuo kitų nutolęs taškas, esantis 22 pav. pavaizduoto antro tranzito pirmoje pusėje.



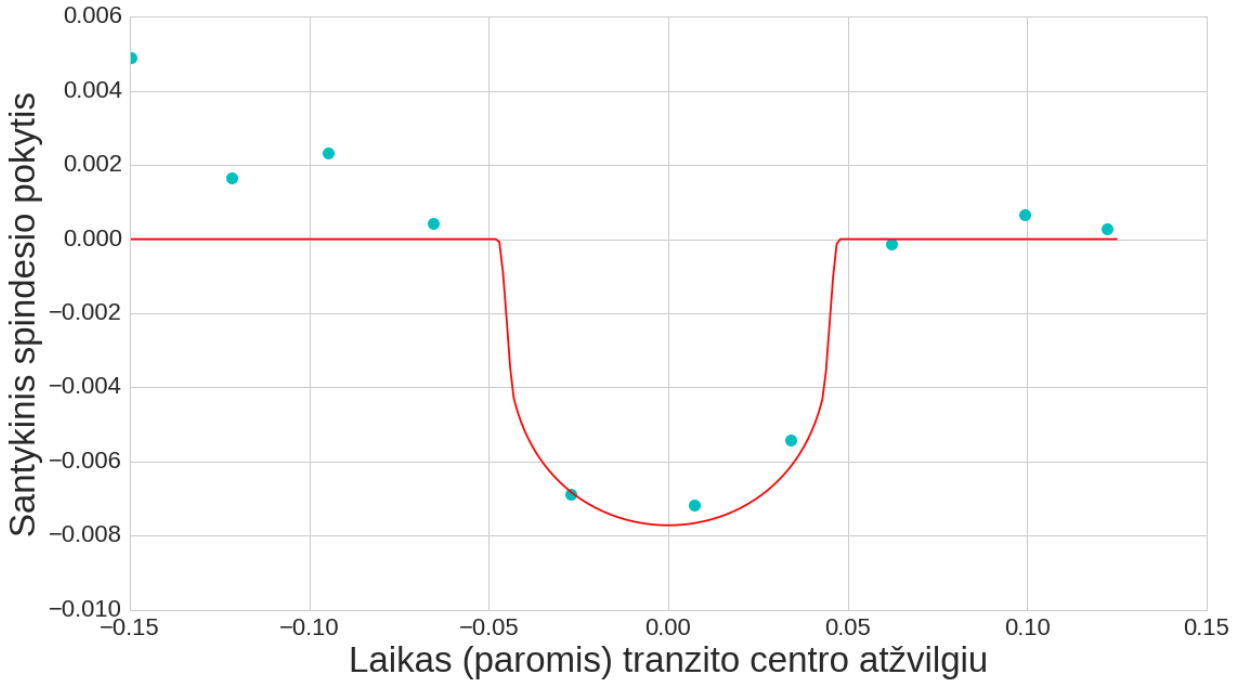
20 pav. Ištiesinta žvaigždės EPIC 211514106 spindesio kreivė su aptiktais potencialiais tranzitais (priklausantys aptiktai planetai kandidatei pažymėti raudonai).



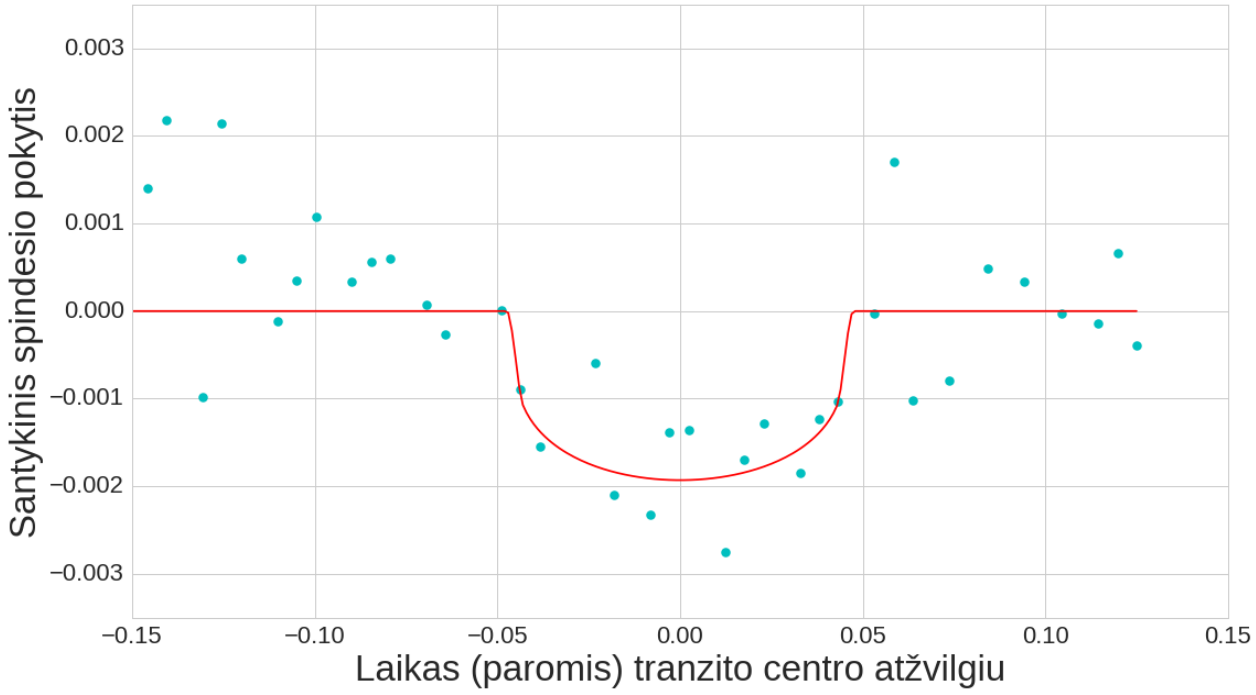
21 pav. Tas pat kaip 20 pav., bet kreivėje išryškinti egzoplanetos kandidatės tranzitų taškai.



22 pav. Aptiktų EPIC 211514106 planetos kandidatės tranzitų spindesio kreivės sudėtos į vieną paveikslą su postūmiu y ašyje (kiekviena kita kreivė pastumta per 0.006).



23 pav. Suminė visų EPIC 211514106 planetos kandidatės tranzitų spindesio kreivė.



24 pav. Sudėtinė EPIC 211514106 planetos kandidatės tranzitų spindesio kreivė.

Paskaičiuoti surastos planetos kandidatės parametrai:

- Planetos spindulys: $1.6^{+0.6}_{-0.4} \mathrm{R}_{\oplus}$
- Orbitos didysis pusašis: $0.1215^{+0.0005}_{-0.001}$ AU
- Periodas: 23.637 ± 0.008 dienos
- Aptikto tranzito laikas 2327.92 (BJD - 2454833)

Šiai planetai kandidatei paskaičiuotos juodo kūno temperatūros gautos beveik tokios pat kaip 4.1.1 skyriuje aprašytai planetai kandidatei (skiriasi tik 0.1K), taigi ji taip pat yra skystam vandeniui egzistuoti tinkamoje zonoje. Nors ir jos spindulys daugiau nei 2.5 karto mažesnis negu egzoplanetos kandidatės aprašytos 4.1.1 skyriuje, ji yra pakankamai didelė, kad galėtų išlaikyti atmosferą.

Kitų reiškinių, galinčių sukelti panašų spindesio nukrypimą, apsvarstymas:

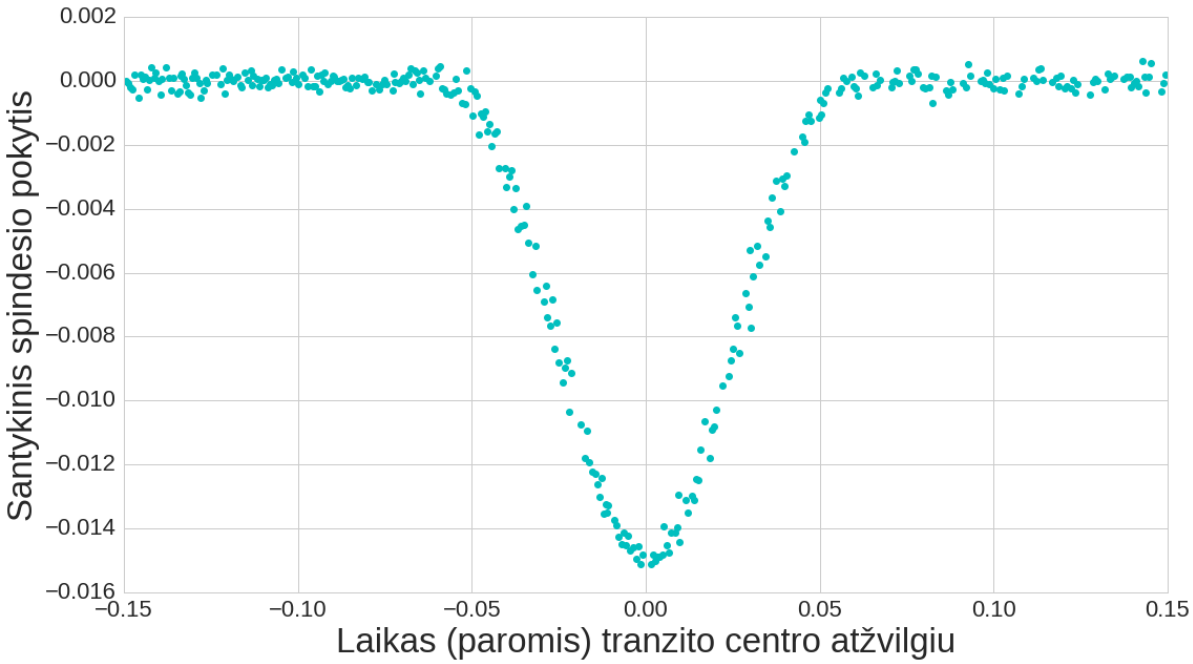
- Žvaigždės dėmių sukelti spindesio pokyčiai mažai tikėtini dėl to, kad ištiesintoje kreivėje nesimato jokio likusio ženklaus kitimo
- Dvinarės žvaigždės versija mažai tikėtina dėl labai mažo aptikto objekto dydžio ir dėl to, kad nėra matomi antriniai tranzitai
- Dėl paklaidų duomenų rinkimo proceso metu įvykę panašūs tranzitai yra galimi: analizuojant atskirų tranzitų taškų sekas kai kur matosi trūkiai, be to nei vienoje taškų sekoje nesimato tolygaus perėjimo nuo spindesio nukritimo į abi puses.

4.2 Atrastos naujos dvinarės žvaigždės

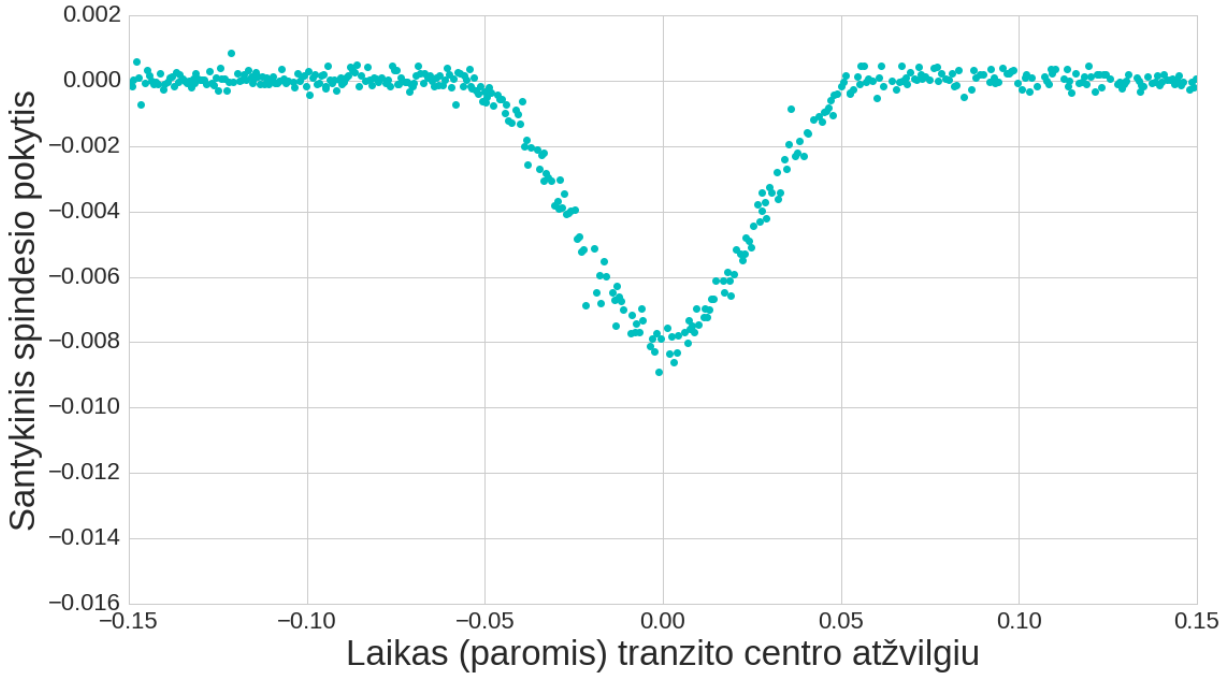
4.2.1 EPIC 211812160

Šios žvaigždės parametrai gauti iš egzoplanetų archyvo [16] ir Huber et al. [17]:

- $T_{eff} = 6364 \pm 128K$
- $r = 1.289 \pm 0.255 R_{\odot}$
- $M = 1.135 \pm 0.106\ M_{\odot}$
- $\log g = 4.256 \pm 0.075$
- $V(Kepler) = \ 13.485$
- $Atstumas = 827.6 \pm 156.5\ pc$
- $\left[\frac{Fe}{H}\right] = -0.201 \pm 0.12$



25 pav. Sudėtinė pagrindinio EPIC 211812160 užtemdymo spindesio kreivė



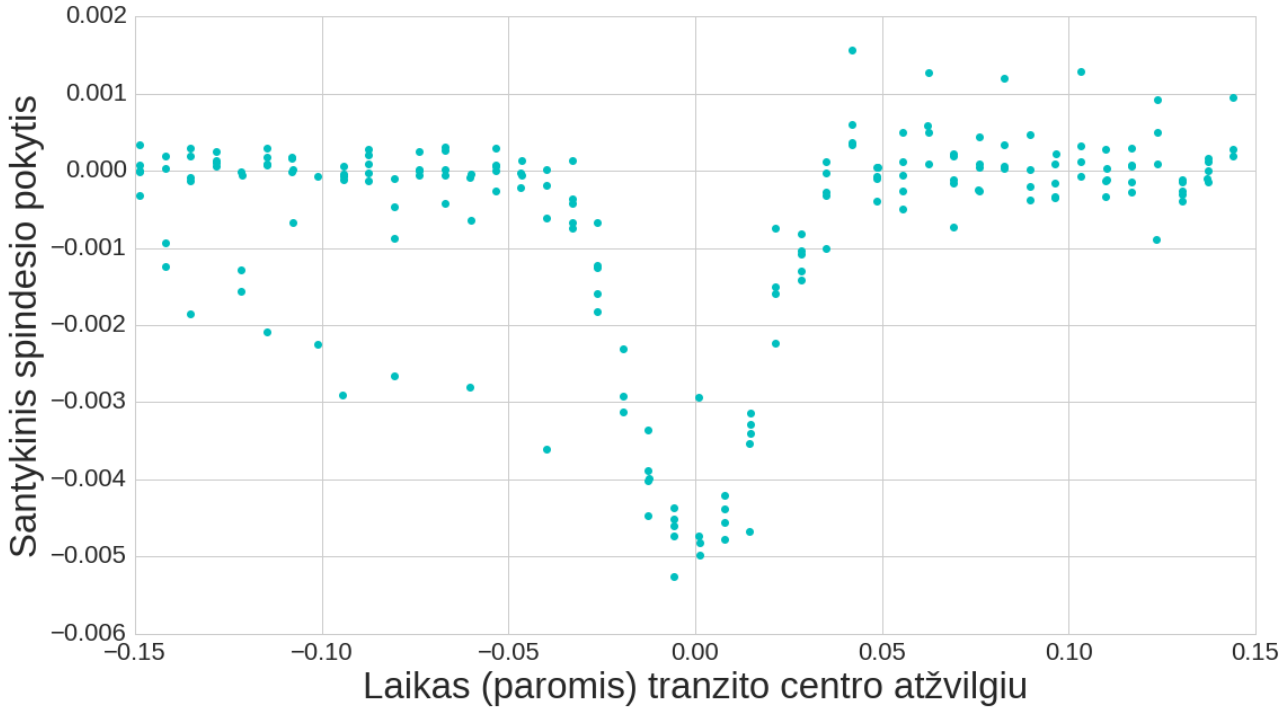
26 pav. Sudėtinė antrinio EPIC 211812160 užtemdymo spindesio kreivė

EPIC 211812160 spindesio kreivėje matomi 2.17±0.001 parų periodu pasikartojantys pirminiai ir antriniai tranzitai (25 pav. ir 26 pav.), kurie būdingi dvinarių žvaigždžių sistemai.

4.2.2 EPIC 211424769

Šios žvaigždės parametrai gauti iš egzoplanetų archyvo [16] ir Huber et al. [17]:

- $T_{eff} = 5678 \pm 138\ K$
- $r = 0.963 \pm 0.149\ R_{\odot}$
- $M = 0.998 \pm 0.076\ M_{\odot}$
- $\log g = 4.46 \pm 0.045$
- $V(Kepler) = 9.438$
- $Atstumas = 79.59 \pm 15.92\ pc$
- $\left[\frac{Fe}{H}\right] = 0.037 \pm 0.12$



27 pav. Sudėtinė pagrindinio EPIC 211424769 tranzito spindesio kreivė

EPIC 211424769 spindesio kreivėje 6.856±0.002 parų periodu galime stebėti spindesio kritimus, kurių sudėtinė kreivė pavaizduota 27 pav. Taip pat aptikti ir antriniai tranzitai – jų santykinis dydis apie ~2.5 • 10^{-4}. Nors planetos atveju žvaigždės spindesio sumažėjimas antrinio tranzito metu yra gana mažas, tačiau šiuo atveju jis vis dar per didelis, kad tai būtų galima priskirti antriniam planetos tranzitui už žvaigždės [21], todėl šiuo atveju labiausiai tikėtina dvinarė žvaigždžių sistema.

Išvados

- Sukurta kompiuterinė sistema, kuri žvaigždžių spindesio kitimo sekose gali automatiškai aptikti tranzitus.

- Sukurta tranzitų modeliavimo sistema, kuri leidžia įvertinti tranzitinio objekto spindulį ir jo orbitos polinkio kampą į regėjimo spindulį.

- Tranzitų aptikimo ir modeliavimo sistema ištestuota su 94 žvaigždžių, prie kurių yra patvirtintų egzoplanetų, stebėjimų duomenimis: sistema aptiko ~88% visų planetų; bent po vieną planetą aptikta 96% atvejais.

- Sukurta sistema panaudota naujų egzoplanetų paieškai: išanalizavus 5000 kreivių aptiktos 2 egzoplanetos kandidatės ir 2 naujos dvinarių žvaigždžių sistemos.

- Nustatyti rastųjų dvinarių žvaigždžių orbitiniai periodai:
  - EPIC 211812160: P = 2.17±0.001 parų
  - EPIC 211424769: P = 6.856±0.002 parų

- Su sukurta sistema atrastoms egzoplanetoms kandidatėms paskaičiuoti jų parametrai:
  - Žvaigždės EPIC 211330113 spindesio kreivėje:
    - Planetos spindulys: $4.2^{+1.4}_{-0.5}\mathrm{R}_{\oplus}$
    - Orbitos didysis pusašis: $0.0740^{+0.0001}_{-0.0002}\ \mathrm{AU}$
    - Periodas: 15.704 ± 0.006 paros
  - Žvaigždės EPIC 211514106 spindesio kreivėje:
    - Planetos spindulys: $1.6^{+0.6}_{-0.4}\mathrm{R}_{\oplus}$
    - Orbitos didysis pusašis: $0.1215^{+0.0005}_{-0.001}\ \mathrm{AU}$
    - Periodas: 23.637 ± 0.008 paros

- Jei šių planetų albedo nedidelis (<0.3) ir jos pakankami greitai sukasi apie savo ašį, jų paviršiaus temperatūra gali būti tinkama skystam vandeniui egzistuoti.

Šaltiniai

1. R. Dvorak, 2008, Extrasolar planets 207-233, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
2. M. Perryman, 2011, The Exoplanet Handbook 103-146, Cambridge University Press, New York
3. D. G. Koch, W. J. Borucki, G. Basri, et al., Kepler mission design, realized photometric performance, and early science, The Astrophysical Journal Letters 713, L79, 2010
4. J. Wang, A. Fischer, T. Barclay, et al., Planet Hunters. VIII. Characterization of 41 long-period exoplanet candidates from kepler archival data, The Astrophysical Journal 815, 127, 2015
5. S. B. Howell, C. Sobeck, M. Haas, et al., The K2 Mission: Characterization and Early results, Publications of the astronomical society of the pacific 126:398-408, 2014
6. S. Renner, H. Rauer, A. Erikson, et al., The BAST algorith for transit detection, Astronomy & Astrophysics 492, 617, 2008
7. P. Tenenbaum, J. L. Christiansen, J. M. Jenkins, et al.,Detection of potential transit signals in the first three quarters of Kepler mission data, The Astrophysical Journal Supplement Series 199, 24, 2012
8. A. Vanderburg, D. W. Latham, L. A. Buchhave, et al.,Planetary candidates from the first year of the K2 Mission, The Astrophysical Journal Supplement Series 222, 1, 2016
9. A. Šidlauskas. Keplerio egzoplanetų paieškos Sistema. Kursinis Darbas. Vilniaus Universitetas, 2016
10. S. van der Walt, S. C. Colbert, G. Varoquaux, The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation, Computing in Science & Engineering, 13, 22-30, 2011
11. K. Mandel, E. Agol, Analytic light curves for planetary transit searches, The Astrophysical Journal 580, 171, 2002
12. D. K. Sing, Stellar limb-darkening coefficients for CoRot and Kepler, Astronomy & Astrophysics 510, A21, 2010
13. T. E. Oliphant. Python for Scientific Computing, Computing in Science & Engineering, 9, 10-20, 2007
14. R. H. Byrd, P. Lu, J. Nocedal, A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing 16 (5): 1190-1208, 1995
15. H. Rein,A proposal for community driven and decentralized astronomical databases and the Open Exoplanet Catalogue, arXiv:1211.7121v2, 2012
16. http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/
17. D. Huber, S. T. Bryson, M. R. Haas et al., The K2 Ecliptic Plane Input Catalog (EPIC) and Stellar Classifications of 138,600 Targets in Campaigns 1-8, The

Astrophysical Journal Supplement Series 224, 1, 2016

18. http://kepler.nasa.gov/science/about/characteristicsOfTransits/transitDetectionAndSimulation/

19. N. Madhusudan, M. Agundez, J. I. Moses , Y. Hu, Exoplanetary Atmospheres – Chemistry, Formation Conditions, and Habitability, arXiv:1604.06092v1, 2016

20. S. Rappaport, A. Levine, E. Chiang, et al., Possible disintegrating short-period super-mercury orbiting KIC 12557548, The Astrophysical Journal 752:1, 2012

21. D. Angerhausen, E. DeLarme, J. A. Morse, A comprehensive study of Kepler phase curves and secondary eclipses – temperatures and albedos of confirmed Kepler giant planets, arXiv:1404.4383v3, 2015

Arnoldas Šidlauskas

Automatinė egzoplanetų tranzitų paieška ir modeliavimas žvaigždžių spindesio kreivėse

Santrauka

Paskutiniu metu, atsirandant techninėms galimybėms vis didėja susidomėjimas egzoplanetų paieška. Tam gaminami vis geresni kosminiai teleskopai, skirti egzoplanetų paieškai planetų tranzitų metodu. Vien Kepler teleskopas, kuris pradėjo savo misiją 2009m. gegužę, savo pagrindinės misijos metu rinko duomenis iš 150 000 žvaigždžių. Taip pat jau planuojama naujų egzoplanetų paieškos misijų, todėl surenkamų duomenų kiekis tik didės. Tokio duomenų kiekio interaktyvus išanalizavimas užima labai daug laiko, o automatizuotas tranzitų aptikimas kol kas nėra pilnai patikimas. Todėl egzistuoja poreikis patogioms kompiuterinėms sistemoms, kurios tranzitų paieškos ir analizės procesą kiek įmanoma labiau automatizuotų.

Šio projekto tikslas buvo sukurti kompiuterinę priemonę, kuri žvaigždžių spindesio kreivėse automatiškai surastų egzoplanetų tranzitus ir iš jų paskaičiuotų galimų planetų parametrus.

Darbo metu buvo sukurta kompiuterinė priemonė, kuri analizuodama spindesio kreives ieško egzoplanetų tranzito metodu ir tada pasinaudodama modeliu apskaičiuoja aptiktos planetos parametrus. Sukurta sistema buvo ištestuota su 94-ių žvaigždžių, apie kurias skrieja patvirtintos egzoplanetos, atrastos tranzitų metodu. Sukurta sistema sėkmingai surado 88.3% egzoplanetų ir bent po vieną iš jų rado prie 95.7% tirtų žvaigždžių. Taip pat sukurta sistema buvo panaudota naujų egzoplanetų paieškai K2 Campaign 5 duomenyse. Sistemai išanalizavus 5000 spindesio kreivių surastos dvi naujos egzoplanetos kandidatės ir su sukurtos modeliavimo sistemos pagalba buvo apskaičiuoti įvairūs jų parametrai.

Arnoldas Šidlauskas

Automatic Search and Modeling of Exoplanetary Transits in Stellar Light Curves

Summary

Recently, with the emergence of better and more accurate technologies, the interest in the exoplanet search has greatly increased. For this reason increasingly better space telescopes are being produced to search for exoplanets using the planet transit method. Kepler telescope alone, which has started its mission in May of 2009 has been collecting data from around 150 000 stars. Also there are further exoplanet missions being planned, therefore the amount of data collected is going to increase even more. Interactively analysing such amount of data tackles a lot of time and automated transit detection is still not completely reliable, therefore there is a need for convenient computer systems which can automate the search and analysis of exoplanetary transits as much as possible

The goal of this project was to create a computer tool, which would automatically find exoplanet transits in stellar flux curves and using them would calculate the parameters of potential planets.

During the project a computer system has been created, which searches for exoplanets by analyzing stellar flux curves and using the model estimates their parameters. The created system was tested with light curves of 94 stars which host confirmed exoplanets detected with transit method. The created system successfully found 88.3% of confirmed exoplanets that those 94 stars host. Also the system found at lest 1 exoplanet in 95.7% of the stars that have been analyzed. The created system was then used to search for new exoplanets in K2 Campaign 5 data. After analyzing 5000 light curves two new exoplanet candidates have been found and with the help of the created modeling system various parameters of the detected planet candidates have been calculated.