

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Teorinės fizikos ir astronomijos institutas

ŽVAIGŽDŽIŲ KINTAMUMO PAIEŠKA ŠIAURINIAME DANGUJE IR ANALIZĖ
PAGAL LAIKINĖS SKYROS FOTOMETRINIUS STEBĖJIMUS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Teorinės fizikos ir astrofizikos
studijų programa

Studentė
Darbo vadovas
Instituto atstovas

Rūta Urbonavičiūtė
dr. Erika Pakštienė
Prof. dr. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2020

Turinys

ĮVADAS	3
1. LITERATŪROS APŽVALGA	6
1.1. δ Scuti	6
1.2. BY Draconis	7
1.3. T-Tauri	7
1.4. Lėtai kintančios žvaigždės	8
1.5. Užtemdomos dvinarės žvaigždės	8
1.5.1. Algol ir β - Lyrae tipo dvinarės	9
1.5.2. Kontaktinės dvinarės žvaigždės	9
1.5.3. Periodai	10
1.5.4. Rošo ertmės ir ekvapotencialiniai paviršiai	10
1.5.5. Dvinarių žvaigždžių sąveika	10
2. STEBĖJIMŲ MEDŽIAGA IR TYRIMO METODIKA	12
2.1. Stebėjimų medžiaga	12
2.2. Tyrimo metodika	12
2.3. Šviesio apskaičiavimas užtemdomoms dvinarėms	14
2.4. Paklaidų įvertinimas	15
3. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS	16
3.1. Tiriamieji laukai	16
3.2. Trumpaperiodės kintamosios žvaigždės	21
3.3. Lėtai kintančios žvaigždės	29
3.4. Užtemdomos dvinarės žvaigždės	34
3.4.1. Užtemdoma kontaktinė dvinarė žvaigždė 23510987+78232819/Nr. 19	35
3.4.2. Užtemdoma dvinarė 23495911+78250995/Nr.18	40
3.4.3. Užtemdoma dvinarė 00433744+80012248/Nr.4	40
3.4.4. Užtemdoma dvinarė 09550834+76303511/Nr.22	43
3.4.5. Užtemdoma dvinarė 21350118+75 082260/Nr.21	46
IŠVADOS	49
SUMMARY	50
LITERATŪRA	51

IVADAS

Žvaigždžių ryškio kitimai buvo stebimi dar 2000 metų prieš mūsų erą. Stebimi kitimai buvo vaizduojami piešiniuose, akmenų raižiniuose bei skulptūrose. Ilgą laiką šių žvaigždžių tyrimų sritis nebuvo plėtota, o žvaigždžių šviesio pokyčiai buvo pastebimi atsitiktinai. Nepaisant to, kad žvaigždžių ryškio kintamumas buvo stebimas jau senovės civilizacijų laikais, svarbus istorinis įvykis nulėmęs kintamųjų žvaigždžių tyrimų pradžią įvyko tik 1596 metais, kai vokiečių kilmės pastorius ir astronomas David Fabricius pastebėjo, kad žvaigždė *Omicron Ceti* (dar žinoma kaip Mira) danguje periodiškai išnyksta ir vėl pasirodo (Percy 2007).

20 a. pradžioje įvyko dar vienas labai svarbus lūžis ne tik kintamųjų žvaigždžių tyrimuose, bet ir astronomijos srityje. 1912 metais Henrietta Leavitt publikavo straipsnį, kuriame aprašė periodo-ryškio sąryšį 25-iose Cefeidėse (vienas iš kintamųjų žvaigždžių tipų) esančias Mažajame Magelano debesyje (Leavitt ir Pickering 1912). Šis straipsnis yra labai svarbus astronomijos istorijoje, nes pasinaudojus periodo-ryškio sąryšiu galima nustatyti atstumus iki astronominių objektų, kas iki tol buvo labai sudėtinga užduotis. Vėliau paaiškėjo, kad ir kai kurios kitos kintamos žvaigždės gali būti naudojamos kaip atstumo indikatoriai (Percy 2007). Supratus kintamų žvaigždžių tyrimų svarbą, pradėta jas tyrinėti daugiau, o tyrinėjant buvo atrasta vis daugiau naujų kintamųjų tipų, kurie vienaip ar kitaip padeda pažinti mus supančią Visatą.

Kintamas žvaigždės tiria astronomijos šaka, kuri vadinama asteroseismologija (nuo Graikiškų žodžių *aster-* reiškiančio žvaigždė, *-seismos-* drebėjimas, *-logia* mokslas). Asteroseismologinių tyrimų kryptis yra vienintelė, kuri leidžia pažvelgti į žvaigždės vidinę sandarą. Šie tyrimai yra labai svarbūs norint suprasti ir išsiaiškinti žvaigždžių struktūrą, evoliuciją, suteikia galimybę tobulinti evoliucinius modelius. Pats tyrimo principas labai panašus į seismologinius Žemės rutulio gelmių tyrimus pasinaudojant žemės drebėjimais ir seisminėmis bangomis.

Užtemdomos dvinarės žvaigždės taip pat priskiriamos kintamo šviesio objektų grupei. Jų ryškis kinta ne dėl procesų žvaigždės viduje, o dėl dviejų žvaigždžių judėjimo. Stebėtojo atžvilgiu judėdamos žvaigždės užstoja viena kitos šviesą, dėl to stebimi ryškio pokyčiai. Šios

žvaigždžių grupės kompleksiniai (fotometriniai ir spektrometriniai) stebėjimai bei jų analizė leidžia tiksliau įvertinti žvaigždžių parametrus. Dvinarių žvaigždžių tyrimai suteikia galimybę išsiaiškinti ne tik tokius žvaigždžių parametrus kaip šviesis, dydis ir temperatūra, bet ir jų mases. Tuo tarpu pavienėms žvaigždėms nustatyti mases yra sudėtingas uždavinys, nes jos su niekuo gravitaciškai nesąveikauja. Taip pat dvinarės žvaigždės yra labai svarbios norint išsiaiškinti žvaigždžių evoliuciją ir jų įtaką spiečių, galaktikų formavimuisi bei struktūrai (Davies 2002). Dvinarės žvaigždės gali būti naudojamos kaip įrankiai ieškant mažo metalingumo žvaigždžių. Tai padėtų išsiaiškinti žvaigždžių praturtinimo sunkiaisiais elementais istoriją bei pirmųjų žvaigždžių (III populiacijos žvaigždžių) formavimąsi (Clark *et al.* 2011). Be to, vis populiarėjančiai tyrimų sričiai susijusiai su gravitacinėmis bangomis, dvinariškumas taip pat yra labai svarbus, nes gravitacinės bangos lengviausiai turėtų būti pastebimos dvinarėse sistemose, kurių nariai yra juodosios skylės, neutroninės žvaigždės ir baltosios nykštukės (Belczynski *et al.* 2002).

Nepriklausomai nuo kintamo šviesio žvaigždžių tipo, jų tyrimai padeda geriau suprasti žvaigždžių sandarą ir evoliuciją. Dvidešimt pirmame amžiuje vis daugiau kosminių teleskopų iškeliama į kosminę erdvę. Pavyzdžiui, 2018 metais į kosmosą iškeltas ir šiuo metu dangų skenuojantis TESS (angl. *Transiting Exoplanet Survey Satellite*) teleskopas, kurio gautus rezultatus naudojame ir šiame darbe. Taip pat ateityje planuojama į kosmosą iškelti tokius teleskopus kaip JWST (angl. *James Webb Space Telescope*, 2021 metais) ir PLATO (angl. *PLAnetary Transits and Oscillations of stars*, 2026 metais). Nors daugumos jų tikslai yra egzoplanetų paieška ir tyrimai, stebint egzoplanetas tokiais kosminiais teleskopais į stebėjimų lauką patenka ir kintamo šviesio žvaigždės, nes šių objektų stebėjimų metodika yra labai panaši. Siekiant efektyvesnių stebėjimų šiais teleskopais reikia surinkti kuo daugiau informacijos apie potencialius stebėjimų objektus, įskaitant ir jų kintamumą.

Šiame darbe pasinaudojus fotometriniiais stebėjimais, atliktais Molėtų astronomijos observatorijoje, tirti penki laukai šiauriniame danguje. Didžioji dauguma pasaulio teleskopų yra pastatyti pietiniame Žemės pusrutulyje arba arčiau pusiaujo, tad arti šiaurinio poliaus esančios žvaigždės yra jiems nepasiekiamos. Molėtų astronomijos observatorija yra viena iš šiauriausiai esančių aktyvių observatorijų, todėl jos geografinė padėtis leidžia stebėti šiaurinius objektus bet kurio sezono metu. Atitinkamai, šioje dangaus dalyje matomos žvaigždės yra mažiau ištirtos.

Darbo tikslas:

Atlikti žvaigždžių kintamumo paiešką šiauriniame danguje bei analizę pagal laikinės skyros fotometrinius stebėjimus Molėtų astronomijos observatorijoje.

Darbo uždaviniai:

1. Pasinaudojus turimais penkių šiaurinio dangaus laukų stebėjimais atrinkti kandidatus į kintamąsias žvaigždes.
2. Nustatyti naujai atrastų kandidačių į kintamo šviesio objektus kitimų amplitudę ir periodiškumą bei įvertinti galimą tų objektų tipą.
3. Pateikti rekomendacijas dėl tolimesnių šių objektų stebėjimų ir papildomų tyrimų.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Visos žvaigždės vienu ar kitu savo gyvenimo periodu tampa kintamosiomis žvaigždėmis. Šio tipo žvaigždžių šviesio kitimo priežastys yra įvairios, todėl negalima jų priskirti tik vienai konkrečiai grupei ar tik vienos grupės savybėmis paaiškinti esmines šviesio kitimo priežastis. Dažniausiai išskiriamos dvi pagrindinės grupės: 1) kuomet kitimai atsiranda dėl vidinių žvaigždės pokyčių, tokių kaip pulsacijos, erupcijos ar sproginiai; 2) kuomet žvaigždžių ryškis kinta dėl išorinių priežasčių, pvz., dėl žvaigždžių su dėmėmis sukimosi arba kai žvaigždę nuo stebėtojo laikinai užstoja kitas objektas (Percy 2007). Šiame darbe yra apžvelgiami tik keli kintamo šviesio žvaigždžių tipai iš didelės gausos kintamųjų žvaigždžių.

1.1. δ Scuti

δ Scuti žvaigždės yra pulsuojančios žvaigždės. Šios žvaigždės aptinkamos HR diagramoje klasikinių Cefeidžių nestabilumo juostos ribose. Šioms žvaigždėms būdingi periodai nuo 0.008 iki 0.42 dienos, o amplitudės svyruoja nuo 0.001 iki 1.7 mag (Sanchez Arias *et al.* 2017). Šių žvaigždžių masė įprastai būna nuo 1.5 iki 2.5 M_{\odot} (Goupil *et al.* 2005). Daugumos šių žvaigždžių spektriniai tipai yra tarp F5 ir A0, o jų šviesis gali būti nuo 5 iki 80 L_{\odot} . Sukimosi greitis gali būti nuo 0 iki 150 km/s (Catelan ir Smith 2015). Šios žvaigždės pasižymi radialinėmis ir neradialinėmis pulsacijomis. Radialinės pulsacijos paaiškinamos κ mechanizmu. Neradialines pulsacines modas ir jų priežastis galima paaiškinti labai įvairiai, jos gali vykti dėl p -modų, g -modų ar p -modų ir g -modų kartu. Osciliacinių pulsacijų mechanizmas šiose žvaigždėse nėra gerai ištirtas ir suprantamas. Aptinkama ir vien tik radialines pulsacijas turinčių δ Scuti žvaigždžių (Goupil *et al.* 2005).

Cousins ir Warren, 1963 metais pastebėjo, kad γ Doradus žvaigždė yra kintama, tačiau tik po trisdešimties metų, atradus pakankamai tokių pat žvaigždžių kaip γ Doradus, jos buvo suklasifikuotos kaip nauja kintamųjų grupė (Kaye *et al.* 1999, Aerts *et al.* 1998). Jų pozicija HR diagramoje yra artima δ Scuti kintamosioms ir jų nestabilumo juostos persidengia. Šių žvaigždžių spektriniai tipai gali būti nuo A7 iki F5. Joms būdingos

temperatūros nuo 6700 K iki 7400 K, o tipinės masės atitinka mažos masės δ Scuti žvaigždės ir aptinkamos 1.5–1.8 M_{\odot} ribose. Periodai būna nuo 0.4 iki 3 dienų, tačiau jų kitimo amplitudės Johnson V filtre ne didesnės nei 0.1 ryškio. γ Doradus pasižymi neradialinėmis g-modų pulsacijomis (Kaye *et al.* 1999).

1.2. BY Draconis

BY Draconis - vėsios pagrindinės sekos žvaigždės, kurių temperatūros patenka į intervalą nuo 2800 K iki 5200 K. Šių žvaigždžių kintamumo priežastis - žvaigždžių dėmės ir greitas sukimasis (Catelan ir Smith 2015). Žvaigždžių ryškio kitimo amplitudės paprastai mažesnės nei 0.3 mag, bet dažniausiai stebimi apie 0.1 mag amplitudės kitimai. Periodai trumpesni nei 5 dienos, tačiau yra ir išimčių. V645 priskiriama BY Draconis žvaigždžių grupei, bet jos periodas yra net 41 diena (Percy 2007).

1.3. T-Tauri

T-Tauri - žvaigždžių grupė, kurios yra nepasiekusios pagrindinės sekos (angl. *Pre-Main-Sequence*, sutrumpintai - PMS). Šios žvaigždės aptinkamos dujų ir dulkių regionuose, kuriuose formuojasi žvaigždės (Percy 2007). Fotometriškai kintamos T-Tauri žvaigždės skirstomos į pogrupius pagal požymius spektre. Šių žvaigždžių šviesio kitimai gali būti periodiniai arba ne, o trukmė svyruoti nuo 10 sekundžių iki 3500 dienų. Kintamumo priežastys įvairios: dėl sukimosi ir dėmių, dėl greitos arba lėtos disko akrecijos arba dėl žvaigždės kompanionės (Percy *et al.* 2010). Pagal H_{α} emisijos linijos stiprumą T-Tauri skirstomos į kelias grupes: į klasikinės T-Tauri žvaigždes, kurios pasižymi stipria emisija (angl. *Classical T-Tauri Stars*, CTTS) ir į silpnų linijų T-Tauri žvaigždes, kurios pasižymi silpna emisija (angl. *Weak-lined T-Tauri Stars*, WTTS). PMS žvaigždės, kurios yra praėjusios dikso-akrecijos stadiją, vadinamos evoliucionavusiomis T-Tauri žvaigždėmis (angl. *Post T-Tauri Stars*, PTTS). Jose stebimi tik menki kintamumo požymiai (Catelan ir Smith 2015). T-Tauri žvaigždžių tipinės temperatūros yra nuo 3500 K iki 7500 K, kitimų amplitudės V filtre - nuo 0.01 mag iki 2.8 mag (Percy 2007).

1.4. Lėtai kintančios žvaigždės

Didžiausia lėtai kintančių žvaigždžių grupė yra ilgaperiodės kintamosios žvaigždės (angl. *long-period variable*, LPV). Ilgo periodo kintamųjų žvaigždžių šviesos kreivėse fiksuojami kitimai nėra periodiški. Periodai svyruoja nuo 20 iki 4000 dienų. Šios žvaigždės Pagrindiniame kintamųjų žvaigždžių kataloge (*The General Catalogue of Variable Stars*¹) dar skirstomos į kelis pogrupius. SRA (angl. *Semiregular A*) - žvaigždės pasižyminčios mažos amplitudės šviesio kitimais, kurių periodai būna nuo 35 iki 1200 dienų. SRB (angl. *Semiregular B*) - milžinės, kurių periodiškumą sunku nustatyti. Periodai nebūna pastovūs, gali sutrumpėti arba pailgėti, jie būna nuo 20 iki 2300 dienų. SRC (angl. *Semiregular C*) - supermilžinės, kurių masės 10–20 M_{\odot} , periodai svyruoja nuo 30 iki 4000 dienų. Šių žvaigždžių amplitudė apie 1 mag. Paskutinis pogrupis SRD (angl. *Semiregular D*) - F, G arba K spektrinio tipo milžinės arba supermilžinės. Jų ryškio kitimo amplitudės varijuoja nuo 0.1 iki 4 mag, periodai - nuo 30 iki 1100 dienų. Taip pat verta paminėti ilgaperiodes kintamąsias žvaigždes Miras. Jų periodai būna nuo 80 iki 1000 dienų, o regimosios ryškio kitimo amplitudės - ne didesnės nei 2.5 mag. Šių žvaigždžių temperatūra apie 3000 K (Catelan ir Smith 2015).

1.5. Užtemdomos dvinarės žvaigždės

Užtemdomos dvinarės žvaigždės tradiciškai skirstomos į tris pagrindines grupes: Algol tipo dvinarės (EA), kurių komponentai nekontaktuoja; β - Lyrae dvinarės (EB), kurių vienas iš narių yra elipsinės formos; W Ursae Majoris tipo dvinarės (EW) arba kontaktinės dvinarės, kurių komponentai turi bendrą apvalkalą. Tačiau toks dvinarių grupavimas apibrėžiamas tik vizualiniu šviesos kreivės įvertinimu ir nesuteikia informacijos apie pačią sistemą. Todėl buvo įvestas papildomas dvinarių sistemų skirstymas pagal žvaigždžių sąveikos parametą - kontaktiškumą (Matijevic *et al.* 2012). Šis parametras apibūdina ar žvaigždės kontaktuoja, ar yra pusiau-atskirtos, ar jų komponentai nekontaktuoja. Šiame darbe dvinarės žvaigždės yra priskiriamos tiek tradicinei grupei, tiek naujai.

¹ <https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-meta.foot&-source=II/250>

1.5.1. Algol ir β - Lyrae tipo dvinarės

Algol dvinarės žvaigždės pavadintos pagal β Per (Algol) žvaigždę. Šios žvaigždės turi pirminį ir antrinį užtemimus, kurių gylyai yra skirtingi, tačiau tarp šių užtemimų sistemos šviesis nekinta arba kinta nežymiai. Užtemimų pradžios ir pabaigos taškai yra aiškūs. Klasifikuojant atsižvelgiama tik į šviesos kreivę, dvinarės nebūtinai turės β Per žvaigždės fizines charakteristikas.

Kita tradicinė dvinarių grupė yra β -Lyrae, tai tokia sistema, kurių komponentai vis dar yra atskiri, bet įgavę elipsoido formą. Šio tipo sistemoms būdingi masės perdavimo procesai. Užtemimų pradžios ir pabaigos aiškiai išreikštos, tačiau skirtingai nei EA tipo dvinarės, tarp užtemimų sistemos ryškis nuolat kinta. Pirminiai ir antriniai užtemimai yra nevienodo gylio.

1.5.2. Kontaktinės dvinarės žvaigždės

Kontaktinės dvinarės žvaigždės dar žinomos kaip W Ursae Majoris (W UMa) užtemdomų dvinarių tipas. Tai žvaigždžių sistemos, kurių komponentai turi bendrą vienodos temperatūros dujinį apvaskalą, dėl kurio šios žvaigždės atrodo liečia viena kitą (kontaktuoja). Tokiose sistemose komponentai užpildo Rošo ertmę. Šių žvaigždžių šviesos kreivėse matomas nuolatinis sąlyginai trumpo periodo ryškio kitimas, nes pirminis ir antrinis užtemimai be pertraukų keičia vienas kitą (Hilditch 2001).

W UMa kontaktinės dvinarės skirstomos į A ir W potipius. A- potipio sistemos paprastai būna A-F spektrinio tipo, o W-tipo sistemos - G-K. Šios dvinarės turi skirtingas antrinių elementų pradines mases. Sistemos, kuriose antrinio komponento masė didesnė nei $1.8 \pm 0.1M_{\odot}$ tampa A-potipio sistema, o jeigu mažesnė masė - W-potipio sistema. Pirminio elemento masės dažniausiai yra $0.2-1.5M_{\odot}$, nors yra ir keletas išimčių. Nustatyti žvaigždžių masę yra labai svarbu, nes jų evoliucija ir struktūra visų pirma priklauso nuo masės. Taip pat reikia suprasti ir tai, kad kontaktinių dvinarių žvaigždžių struktūra skiriasi nuo pavienių žvaigždžių, dėl masės pernašos. Dvinarėje sistemoje žvaigždės evoliucionuoja kaip pavienės žvaigždės tol, kol tarp jų prasideda kontaktavimas. Pradžioje antrinis komponentas yra masyvesnis už pirminį. Antrinis komponentas praranda masę perduodamas ją mažiau masyviam pirminiam komponentui, tačiau ne visa masė pasisavinama ir dalis palieka sistemą. Dėl tokios sąveikos komponentų masių santykis pasikeičia. Kai masės pernaša sustoja arba

sulėtėja, antrinis komponentas pagal savo masę tampa gerokai per šviesus, kad išliktų pagrindinės sekos žvaigžde (Yildiz ir Dogan 2012; Yildiz 2014).

1.5.3. Periodai

Visų tipų užtemdomas dvinarės sistemas apibūdina jų orbitinis periodas. Užtemdomos dvinarės turi du užtemimus, pirminį ir antrinį. Pirminis užtemimas fotometriniuose stebėjimuose yra gilesnis lyginant su antriniu. Tai reiškia, kad karštesnė žvaigždė yra užtemdoma. Antrinis užtemimas vyksta tuomet, kai užtemdoma mažesnės temperatūros žvaigždė. Tačiau dvinarėse žvaigždėse periodiškumas nėra pastovus parametras. Tai reiškia, kad periodai gali ne tik keistis, bet ir laikui bėgant keičiasi. Jų kitimas gali įvykti dėl masės pernašos, kuriai vykstant sistemos judesio kiekio momentas išlieka pastovus, tačiau atstumas tarp žvaigždžių pradeda kisti. Taip pat, jeigu žvaigždės yra pakankamai arti viena kitos, stebimi potvyniniai efektai, dėl kurių gali keistis orbitinis periodas (Percy 2007).

1.5.4. Rošo ertmės ir ekvapotencialiniai paviršiai

Gravitacinis potencialas aplink objektą savo struktūra primena svogūną, kuomet kiekvienas lukštas atitinka paviršių su vienodu gravitaciniu potencialu, kurie vadinami ekvapotencialiniais paviršiais. Šių paviršių viršūnės vadinamos Lagranžo taškais.

Sistemose kuriose nėra kitų žvaigždžių, t.y. kuomet nėra gravitacinės deformacijos, šie paviršiai yra sferiniai. Tačiau jeigu nagrinėjame dvinarių ar daugianarių kūnų sistemas, jos sukuria susijungiančias lašo formos Rošo ertmes. Rošo ertmės dydis priklauso nuo žvaigždžių masių ir atstumo tarp žvaigždžių, o Rošo ertmės užpildymas priklauso nuo žvaigždžių masės ir atstumo tarp jų. Parametras, kuris yra svarbus ir apibrėžia Rošo ertmę yra Rošo ertmės užpildymo faktorius. Šis parametras keičiasi žvaigždėms sąveikaujant ir evoliucionuojant (Percy 2007).

1.5.5. Dvinarių žvaigždžių sąveika

Žvaigždės gali sąveikauti įvairiais būdais. Dvinarės žvaigždės sąveikauja savo gravitaciniais laukais, kurie sukelia potvyninius efektus, ir žvaigždžių vėjais. Dar stipresnė

sąveika pasireiškia, kai užpildomos Rošo ertmės, prasideda dalinimasis žvaigždžių medžiaga arba vyksta bendro apvalkalo evoliucija (angl. *common envelope evolution*). Keletas sąveikos būdų aprašyta toliau.

Žvaigždžių vėjo akrecijos mechanizmas veikia, kai sistemos komponentai nekontaktuoja t.y. kai nei vieno iš komponentų Rošo ertmė nėra užpildoma ir masės pernaša vyksta tik dėl žvaigždžių vėjo. Masyvių, vidutinės masės ir evoliucionavusių mažos masės žvaigždžių vėjas gali būti masės pernašos, praturtinimo cheminiais elementais arba žvaigždės sukimosi greičio sumažėjimo priežastimi.

Kitas žvaigždžių sąveikos būdas, kuris būdingas tik kontaktuojančioms sistemoms, vyksta tuomet, kai užpildoma bent vieno komponento Rošo ertmė. Žvaigždė užpildys Rošo ertmę ir perneš masę kitai žvaigždei tuomet kai bus išpildoma sąlyga: jeigu žvaigždės spindulys bus didesnis nei Rošo ertmės. Tikimybė užpildyti Rošo ertmę priklauso nuo orbitinio periodo ir žvaigždės evoliucijos stadijos. Trumpaperiodinėms sistemoms su baltąja nykštuke, juodąja skylė ar neutronine žvaigžde, esant medžiagos pernašai, medžiaga įgauna pagreitį ir gali susiformuoti akrecinis diskas apie kompanionę žvaigždę. Medžiagos pernaša taip pat galima ir esant ilgaperiodinei sistemai su pagrindinės sekos žvaigžde. Tačiau jeigu dvinarė sistema yra trumpaperiodė ir akrecija vyksta į pagrindinės sekos žvaigždę, akrecinis diskas nesusiformuos.

Dar vienas sąveikos mechanizmas yra susijęs su bendro apvalkalo evoliucija. Kuomet Rošo ertmės užpildymas yra dinamiškai nestabilus gali susiformuoti bendras apvalkalas. Tai gali įvykti tuomet, kai masės netenkanti žvaigždė yra raudonoji milžinė su giliu konvekciniu sluoksniu. Tokiu atveju vyksta masės atidavimas, kuris būna toks intensyvus, kad Rošo ertmė nuolat papildoma medžiaga. Dėl to, kad masės atidavimas vyksta greičiau nei akrecija į kompanionę, aplink žvaigždę pradeda kauptis medžiaga, kompanionė žvaigždė pradeda plėstis ir susiformuoja bendras apvalkalas (Beccari *et al.* 2019).

2. STEBĖJIMŲ MEDŽIAGA IR TYRIMO METODIKA

2.1. Stebėjimų medžiaga

Tyrimams naudojome stebėjimus atliktus nuo 2017-06-28 iki 2017-09-30. Stebėjimams buvo naudotas 31/51 cm Maksutov sistemos Molėtų astronomijos observatorijos (MAO) teleskopas. Naudota QSI 516s-M1 kamera, be filtro. Stebėtų žvaigždžių vaizdų redukcijai buvo naudojami kalibraciniai vaizdai: nulinės ekspozicijos kadrai, kuriuose yra fiksuojamas aparatinis triukšmas pikseliuose, tamsinės vaizdai šiluminių triukšmų pašalinimui ir tolygiai apšviesto fono vaizdai korekcijai dėl skirtingo kameros pikselių jautrumo. Tyrimui panaudoti 5 laukų stebėjimai, kurie buvo atlikti vykdant projektą *Spektroskopinė ir fotometrinė šiaurinio dangaus apžvalga* (angl. *Spectroscopic and Photometric Survey of the Northern Sky*, SPFOT) (Mikolaitis *et al.* 2019). Laukai pavadinti centrinių žvaigždžių vardais: NSV26138, NSV0255, NSV13673, NSV15053 ir NSV25919. Šios centrinės žvaigždės pasirinktos iš *The General Catalogue of Variable Stars*², kur jos turėjo potencialiai kintamų žvaigždžių žymą. Papildomai tyrimams buvo panaudoti dviejų dvinarių žvaigždžių, atrastų Molėtų astronomijos observatorijoje vykdant projektą SPFOT, stebėjimai gretimuose šiaurinio dangaus laukuose. Informacija apie tyrimams naudotus stebėjimus pateikta lentelėje 1. Papildomai buvo naudoti ir kosminio teleskopo TESS (angl. *The Transiting Exoplanet Survey Satellite*) stebėjimai (Ricker *et al.* 2015).

2.2. Tyrimo metodika

Gautiems vaizdams apdoroti, redukuoti ir gauti žvaigždžių šviesos kreives buvo naudota *Muniwin* programa (Hroch 2014), kuri yra sukurta programinio paketo *DAOPHOT* pagrindu. *DAOPHOT* paketas skirtas atlikti žvaigždžių fotometriją perpildytuose žvaigždžių laukuose (Stetson 1987). *Muniwin* programa skirta atlikti laikinės skyros diferencialinei apertūrinei fotometrijai ir kintamo šviesio žvaigždžių paieškai. Mes naudojome vaizdo kalibravimo procedūrą, kurios metu atimamos nulinės ekspozicijos, tamsinės vaizdai ir atliekama tolygiai apšviesto fono korekcija.

² <https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-meta.foot&-source=II/250>

Tinkama apertūra buvo pasirinkta priartėjimo būdu, keičiant vertes tol, kol buvo gauta mažiausia šviesos kreivių standartinio nuokrypio vertė. Diferencialinei fotometrijai buvo pasirenkama palyginamoji žvaigždė kiekviename lauke ir gaunami visų lauke esančių žvaigždžių diferencialiniai instrumentiniai ryškiai. Palyginamoji žvaigždė buvo parenkama tokia, kuri neturėjo jokių kintamos žvaigždės požymių, buvo pakankamai nutolusi nuo lauko kraštų, truputį ryškesnė nei vidutinis lauko žvaigždžių ryškis bei šalia kurios nebuvo kitų žvaigždžių.

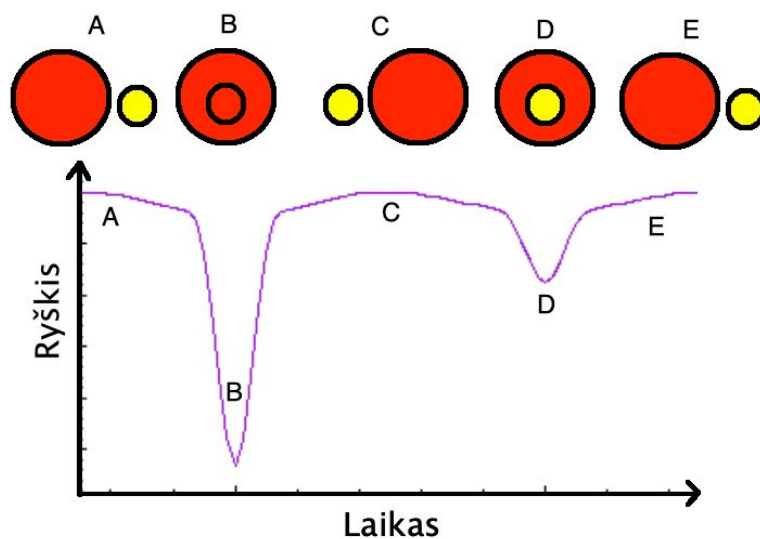
Šviesos kreivės buvo analizuojamos naudojant Furjė dekompozicijos metodą. Tam buvo panaudota *Period04* (Lenz ir Breger 2005) programa. Pirmiausia buvo skaičiuojamas Furjė transformacijos spektras bei jame nustatomas didžiausios amplitudės dažnis ir jo amplitudė bei fazė. Tuomet buvo skaičiuojamas signalo-triukšmo santykis (S/N) ties nustatytu dažniu. Darėme prielaidą, kad signalą galime laikyti patikimu, kai signalo-triukšmo santykis yra virš 4 (Breger *et al.* 1993). Jeigu signalo-triukšmo santykis ties nustatyta didžiausia amplitudė yra didesnis nei 4, dažnis, amplitudė ir fazė yra įtraukiami į tikrų signalų sąrašą. Pagal nustatytus dažnį, amplitudę ir fazę apskaičiuota sinusoidė yra atimama iš stebėtos šviesos kreivės ir skaičiuojamas šviesos kreivės likučio Furjė transformacijos spektras, kuris analizuojamas taip, kaip aprašyta aukščiau. Procedūra kartojama su šviesos kreivės likučiu tol kol S/N pasidaro mažesnis už 4. Viršutinė dažnio riba apibrėžiama kaip Naikvisto (angl. *Nyquist*) dažnis, kuris priklauso nuo laiko tarp atskirų objekto šviesio matavimų. Šiuo atveju Naikvisto dažnis buvo apie 70 c/d. Dažnių nustatymo procedūra atlikta visoms tiramosioms žvaigždėms. Tačiau dažniai ties 1 c/d, 2 c/d ir 3 c/d vertinami atsargiau, kadangi žemi dažniai gali būti nepatikimi dėl instrumentinių paklaidų, periodinių atmosferos sąlygų kitimų ar kitokių išorinių veiksnių.

Dvinarių žvaigždžių šviesos kreivės buvo analizuojamos pasinaudojus *Nightfall* (versija 1.92) programa (Wichmann 2011). Šios programos kodas naudoja Rošo ertmės užpildymo faktorių ir atstumą tarp žvaigždžių, žvaigždžių formai apibūdinti. Tai reiškia, kad mažinant Rošo užpildymo faktoriaus vertę automatiškai didėtų atstumas tarp žvaigždžių. Paprasčiausiame variante sistemai apibūdinti reikalingi šeši parametrai: masės santykis, orbitinis polinkis (angl. *inclination*), pirminės ir antrinės žvaigždžių Rošo ertmės užpildymo faktoriai, pirminės ir antrinės žvaigždžių temperatūros. Iteracijos buvo atliekamos ieškant geriausio sprendinio, kuris įvertinamas pagal χ^2 vertę. Tačiau naudojantis *Nightfall* programa nėra galimybės nagrinėti pusiau-atskirtų sistemų.

Kai kurių objektų tyrimui papildomai buvo naudoti kosminio teleskopo TESS stebėjimai. Žvaigždžių paieškai TESS duomenų bazėje naudotas *Web TESS Viewing Tool (WTV)*³. Žvaigždžių šviesos kreivėms gauti buvo naudojama programinis paketas *Eleanor* (Feinstein *et al.* 2019). Ši programa sukurta taip, kad parsisiūsta šviesos kreivė gali būti pakoreguota keliais skirtingais variantais. Programai reikia pateikti žvaigždės koordinatas.

2.3. Šviesio apskaičiavimas užtemdomoms dvinarėms

Vertinant regimąją sistemos komponentų ryškį buvo daroma prielaida, jog viena iš žvaigždžių yra pilnai užtemdoma. 1 pav. pavaizduota tokios sistemos užtemimų eiga. *A* padėtyje užtemimas nevyksta, o šviesos kreivėje matomas bendrasis sistemos ryškis. Šiuo atveju raudonas skritulys žymi vėsesnę žvaigždę, o geltonas - karštesnę. *B* padėtyje pilnai užtemdoma karštesnė žvaigždė - vyksta pirminis užtemimas. Šviesos kreivėje matome tik vėsesios žvaigždės regimąją ryškį. Padėtyje *C* užtemimas nevyksta, vėl stebime bendrą sistemos ryškį. Padėtyje *D*, kai karštesnė žvaigždė dalinai užtemdo vėsesnę, stebimas antrinis užtemimas.



1 pav. Užtemimų eiga dvinarėje sistemoje. Paveikslo viršuje pavaizduotos sistemos žvaigždės: raudonas skritulys žymi vėsesnę žvaigždę, geltonas - karštesnę. Apatinėje paveikslo dalyje vaizduojami sistemos ryškio pokyčiai, kurie atitinka žvaigždžių pozicijas viena kitos atžvilgiu.

³ <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/tess/webtess/wtv.py>

Apskaičiuojant sistemos šviesius bendrasis sistemos ryškis (1pav. padėtys A , C , E) buvo prilygintas vidutinei Gaia DR2 (Gaia Collaboration 2016, 2018) ryškio vertei.

Dvinarių sistemų komponentų absoliutiniams ryškiams įvertinti buvo naudojama atstumo modulio formulė (1) ir paralaksai iš Gaia DR2 (Gaia Collaboration 2016, 2018).

$$m - M = 5 \log_{10} \left(\frac{d}{10} \right) \quad (1)$$

Čia m - regimasis ryškis, M - absoliutinis ryškis, d - atstumas, kuris apskaičiuojamas $1/p$, čia p - paralaksas. Absoliutinis ryškis ir šviesis yra susieti per (2) formulę:

$$M = -2.5 \log_{10}(L) \quad (2)$$

Čia L_{\odot} - Saulės šviesis, L - žvaigždės šviesis. Iš (2) formulės išreiškiame šviesį:

$$L = 10^{-M/2.5} \quad (3)$$

Pasinaudoję (3) formule galime apskaičiuoti bendrąją sistemos šviesį ir vėsiosios žvaigždės šviesį. Tuomet atėmę iš bendrojo šviesio, vėsiosios žvaigždės šviesį, gausime karštosios žvaigždės šviesį:

$$L_2 = L_b - L_1 = 10^{-M_b/2.5} - 10^{-M_1/2.5} \quad (4)$$

Čia L_b - bendras sistemos šviesis, L_1 - vėsiosios žvaigždės šviesis, L_2 - karštosios žvaigždės šviesis, M_b - bendras sistemos absoliutinis ryškis, M_1 - vėsiosios žvaigždės absoliutinis ryškis.

2.4. Paklaidų įvertinimas

Paklaidas galime skirstyti į dvi grupes. Į pirmąją grupę patenka atsitiktinės paklaidos, kurios atsiranda dėl eksperimentinių matavimų rezultatų netikslumų. Jie įtakoti nežinomų ar nekontroliuojamų trikdžių. Kita paklaidų grupė - sisteminės paklaidos, kurios atsiranda dėl rezultatų nuokrypio nuo tikrosios vertės.

Paklaidas apskaičiuojame sumine jų išraiška, pagal formulę:

$$\sigma_f^2 = \left| \frac{\partial f}{\partial a} \right|^2 \sigma_a^2 + \left| \frac{\partial f}{\partial b} \right|^2 \sigma_b^2 + \dots + \quad (5)$$

Čia σ_f^2 - funkcijos f kvadratinis standartinis nuokrypis, σ_a^2 - a verčių kvadratinis standartinis nuokrypis, σ_b^2 - b verčių kvadratinis standartinis nuokrypis.

3. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

3.1. Tiriamieji laukai

Tiriamuose laukuose iš viso buvo atrasta dvidešimt kintamųjų žvaigždžių kandidačių iš 13367 žvaigždžių. Šiame darbe trumpaperiodesmis žvaigždėmis buvo laikomos tokios žvaigždės, kurių ryškio kitimo periodai buvo trumpesni nei viena diena. Lėtai kintančios žvaigždės buvo laikomos tokios, kurių periodai ilgesni nei vienas diena.

Tiriamajame lauke NSV26138 iš viso buvo atrasta dešimt kintamųjų žvaigždžių kandidačių. Lauke NSV0255 atrasta tik viena nauja kintamo šviesio žvaigždė. Lauke NSV15053 aptiktos dvi kandidatės į kintamas žvaigždes. Tiriamajame lauke NSV25919 aptiktos šešios kandidatės. Lauke NSV13673 kintamųjų žvaigždžių nepastebėta (1 lentelė). Taip pat į tiriamųjų sąrašą buvo įtrauktos dvi papildomos užtemdomos dvinarės sistemos atrastos stebėjimų Molėtų astronomijos observatorijoje 2016 metais pradėto ir jau užbaigto projekto SPFOT metu. Šis projektas buvo skirtas išnagrinėti šiaurinio dangaus žvaigždžių cheminę sudėtį naudojant didelės raiškos spektroskopinius ir fotometrinius stebėjimus (Mikolaitis *et al.* 2019). Šios žvaigždės pažymėtos Nr.21 ir Nr.22. Visų kandidačių nustatyti tipai išvardinti 1 lentelėje.

Atrastų kintamųjų žvaigždžių kandidačių šviesos kreivės pavaizduotos 2 pav. 2 lentelėje pateikiamas kintamųjų žvaigždžių-kandidačių sąrašas, jų koordinatės, efektinė temperatūra, šviesis, Gaia ryškis. Gaia ryškių duomenys paimti iš Gaia DR2 duomenų rinkinio (Gaia Collaboration 2016, 2018).

3 pav. pavaizduota žvaigždžių kandidačių padėtis HR diagramoje. Tačiau neįtrauktos šios žvaigždės: Nr.2, Nr.6, nes Gaia DR2 duomenų rinkinyje nėra jų šviesio verčių ir efektinės temperatūros verčių. Taip pat vertėtų paminėti, kad Gaia DR2 duomenų rinkinyje (Gaia Collaboration 2016, 2018) nurodyta temperatūra nėra visiškai tiksli, nes tarpžvaigždinė ekstinkcija įskaityta nepakankamai, todėl daugelio žvaigždžių pagal Gaia stebėjimus nustatyta temperatūra yra mažesnė nei galėtų būti iš tiesų.

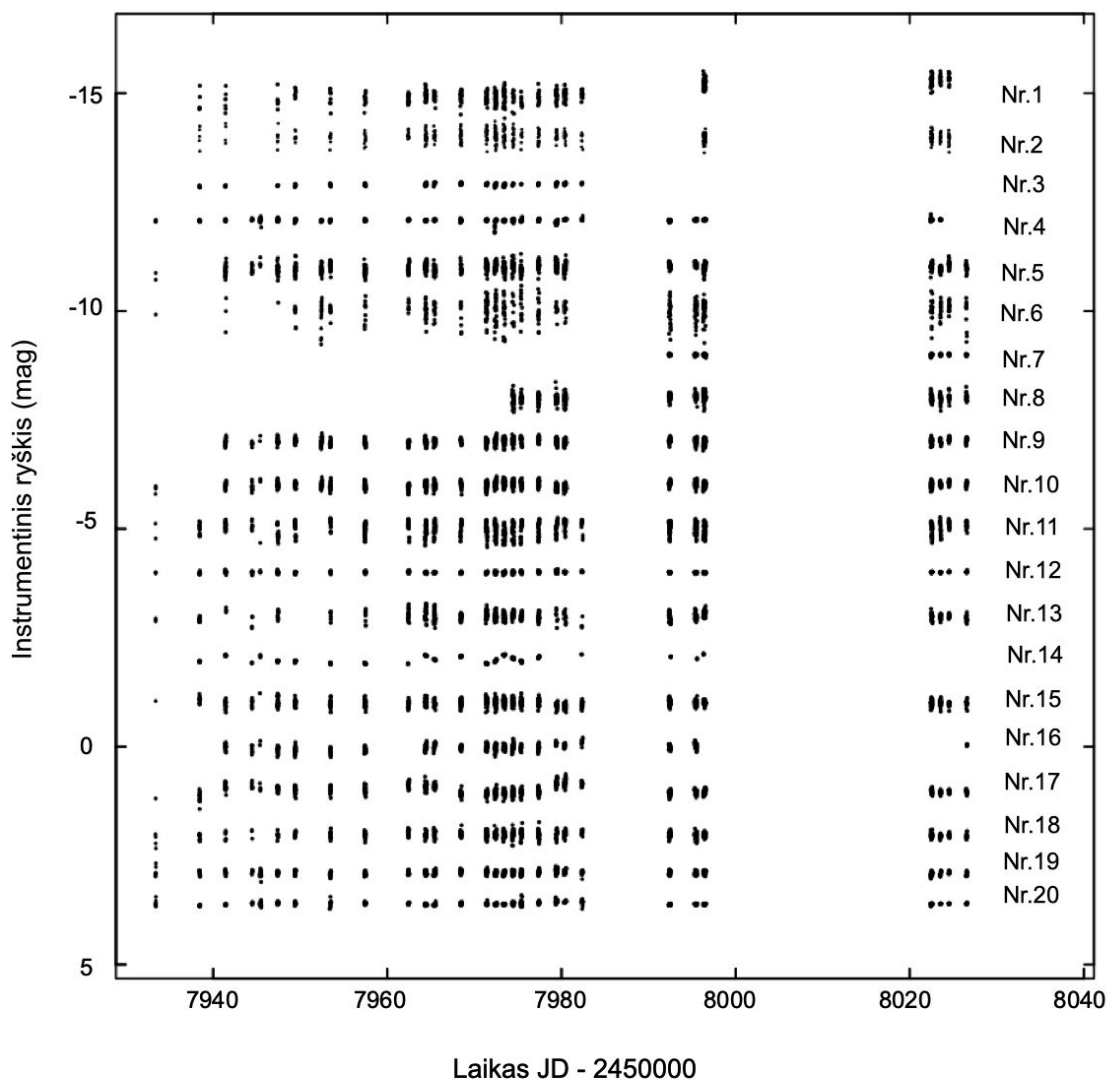
1 lentelė. Tiriamųjų laukų informacija.

Stebėtas laukas	R.A. (Equ. J2000)	Dec. (Equ. J2000)	Stebėjimų laikas, JD-2450000	Vaizdai	Stebėtų naktų skaičius	Žvaigždžių kiekis	Naujai surastos kintamosios žvaigždės
NSV26138	23 45 21.05	+78 33 28.57	7933.370 - 8026.604	2890	35	968	EW, EA, 4 lėtai kintančios, 3 T-Tauri arba BY Draconis, Submilžinė arba Raudonoji milžinė
NSV0255	00 41 40.10	+80 09 03.00	7933.383 - 7979.561	3045	35	874	EA
NSV13673	21 17 33.78	+82 31 03.12	7933.355 - 8026.590	1220	35	862	-
NSV15053	00 14 02.60	+76 01 37.19	7933.388 - 7974.511	3135	35	1414	2 lėtai kintančios, 1 trumpaperiodė
NSV25919	22 29 21.00	+77 34 57.00	7933.337 - 8026.605	3077	35	485	δ Scuti, 4 T-Tauri arba BY Draconis, 1 trumpaperiodė

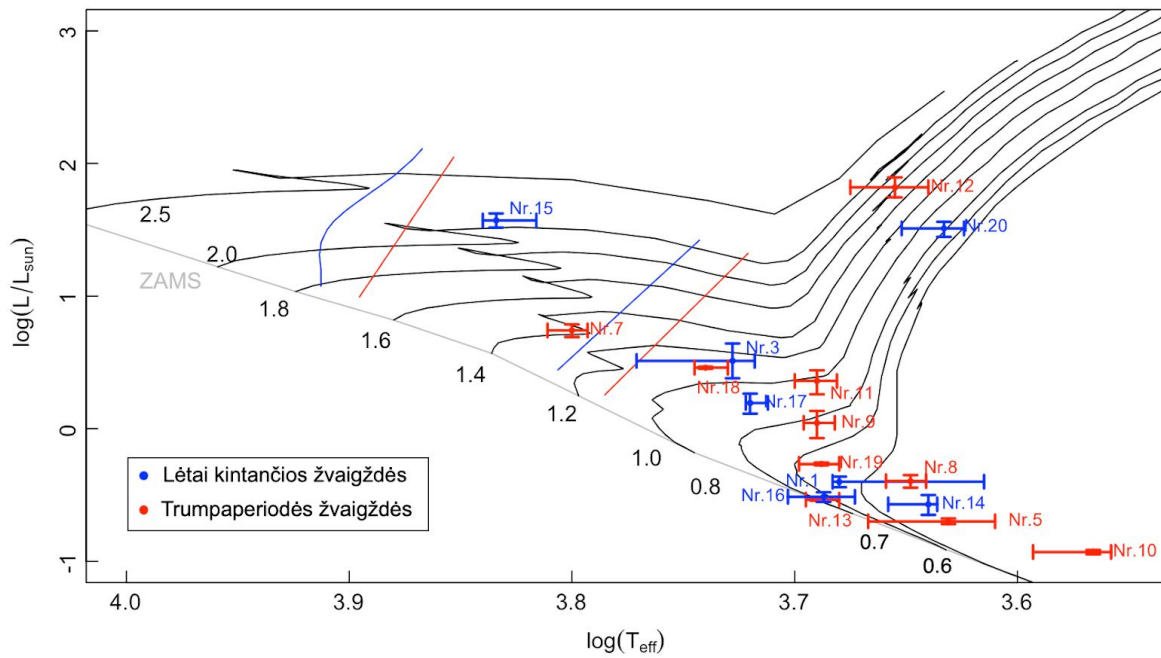
2 lentelė. Informacija apie atrastas kintamas žvaigždes kandidates.

Žv. Nr	CNAME	R.A. (Equ. J2000)	Dec. (Equ. J2000)	Gaia G, mag	Teff, K	L, L _☉	Kintamųjų tipas	Stebėtas laukas
1	00111362+76014728	00 11 13.62	+76 01 47.28	16.893	4855	0.39	Lėtai kintanti	NSV15053
2	00162090+76090726	00 16 20.90	+76 09 07.26	17.295	-	781.10*	Trumpaperiodė	NSV15053
3	00191819+75494360	00 19 18.19	+75 49 43.36	16.645	5344	3.25*	Lėtai kintanti	NSV15053
4	00433744+80012248	00 43 37.44	+80 01 22.48	13.925	5339	2.83	EA	NSV0255
5	22265531+77264179	22 26 55.31	+77 26 41.79	15.926	4285	0.19	T-Tauri / BY Dra	NSV25919
6	22271364+77440720	22 27 13.64	+77 44 07.20	17.302	-	0.72*	Trumpaperiodė	NSV25919
7	22285732+77265687	22 28 57.32	+77 26 56.78	13.130	6354	5.51	δ Scuti	NSV25919
8	22310474+77274082	22 31 04.74	+77 27 40.82	16.201	4451	0.40	T-Tauri / BY Dra	NSV25919
9	22342543+77271559	22 34 25.43	+77 27 15.59	16.491	4933	1.10	T-Tauri / BY Dra	NSV25919
10	22342747+77271982	22 34 27.47	+77 27 19.82	15.788	3683	0.11	T-Tauri / BY Dra	NSV25919
11	23410516+78244369	23 41 05.16	+78 24 43.69	15.873	5002	2.29	T-Tauri / BY Dra	NSV26138
12	23433908+78254966	23 43 39.08	+78 25 49.66	14.196	4526	66.48*	Submilžinė/ Raudonoji milžinė	NSV26138
13	23505367+78445853	23 50 53.67	+78 44 58.53	14.109	4965	0.29	T-Tauri / BY Dra	NSV26138
14	23405199+78313068	23 40 51.99	+78 31 30.68	13.954	4457	0.26	Lėtai kintanti	NSV26138
15	23415716+78381627	23 41 57.16	+78 38 16.27	16.547	6830	37.42*	Lėtai kintanti	NSV26138
16	23422898+78222205	23 42 28.98	+78 22 22.05	16.066	4875	0.30	Lėtai kintanti	NSV26138
17	23483926+78364919	23 48 39.26	+78 3649.19	15.930	5342	1.56	Lėtai kintanti	NSV26138
18	23495911+78250995	23 49 59.11	+78 25 09.95	13.135	5495	2.91	EA	NSV26138
19	23510987+78232819	23 51 09.87	+78 23 28.19	13.855	4877	0.54	EW	NSV26138
20	23521331+78242030	23 52 13.31	+78 24 20.30	13.589	4301	33.03	Lėtai kintanti	NSV26138
21	09550834+76303511	09 55 08.34	+76 30 35.11	12.589	6686	4.45	EB	SPFOT
22	21350118+75082260	21 35 01.18	+75 08 22.60	12.443	5782	4.14	EB	SPFOT

*Vertės apskaičiuotos naudojantis metodika aprašyta 2.3 skyriuje.



2 pav. Tirtųjų kintamų žvaigždžių kandidačių šviesos kreivės stebėjimo laikotarpiu. Eilės tvarka atitinka numeraciją 2 lentelėje.



3 pav. Kintamų žvaigždžių kandidačių padėtis HR diagramoje, kartu su δ Scuti ir γ Doradus nestabilumo juostomis. Žvaigždžių efektinės temperatūros ir šviesių vertės paimtos iš Gaia DR2 archyvo (Gaia Collaboration 2016, 2018). Nestabilumo sričių teoriniai modeliai δ Scuti (mėlynos juostos) ir γ Doradus (raudonos juostos) žvaigždėms paimti iš Xiong et al. (2016). Naudoti “Padova 2”⁴ evoliuciniai trejai skirtingos masės žvaigždėms (0.6 M_{\odot} , 0.7 M_{\odot} , 0.8 M_{\odot} , 1.00 M_{\odot} , 1.2 M_{\odot} , 1.4 M_{\odot} , 1.6 M_{\odot} , 1.8 M_{\odot} , 2 M_{\odot} , 2.5 M_{\odot}). ZAMS linija - nulinio amžiaus pagrindinė seka.

⁴ <http://pleiadi.pd.astro.it/>

3.2. Trumpaperiodės kintamosios žvaigždės

Šiame darbe stebėta dešimt trumpaperiodžių kintamųjų žvaigždžių, kurių periodas yra didesnis, nei vienas ciklas per dieną. 3 lentelėje pateikti dažnių, periodų, amplitudžių, triukšmo ir signalo-triukšmo santykių vertės, kurios buvo nustatytos su *Period04* programa.

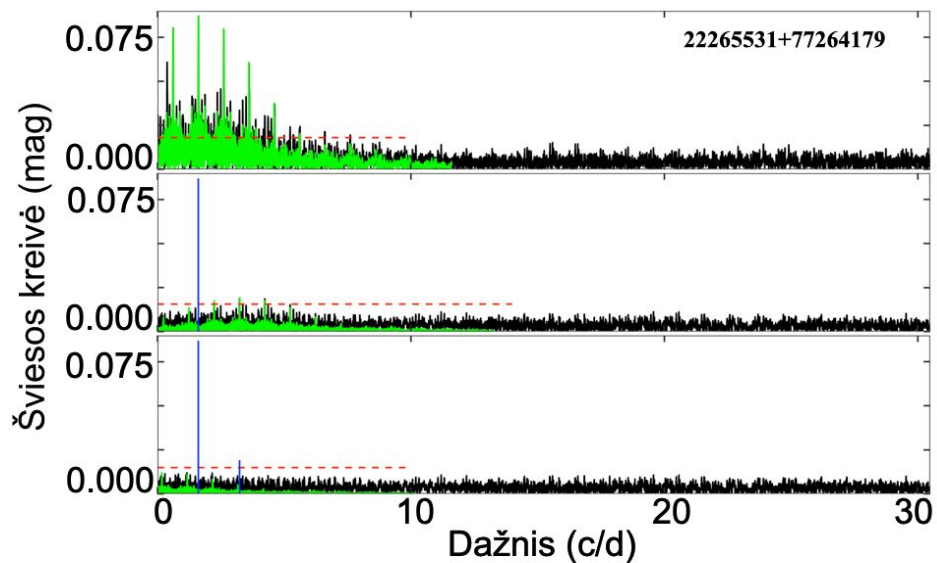
Šiame darbe stebėtas trumpaperiodes kintamąsias žvaigždes kandidatas galima skirstyti į tris grupes: T-Tauri žvaigždes, BY Draconis ir δ Scuti. T-Tauri ir BY Draconis žvaigždės priklauso žemų temperatūrų žvaigždžių klasei, kadangi jų temperatūrų sritys persikloja, šiame darbe jų atskirti negalime.

Šiame darbe šešias žvaigždes įtraukėme kaip galimas kandidatas į T-Tauri arba BY Draconis žvaigždžių kategoriją: Nr.5, Nr.8, Nr.9, Nr.10, Nr.11, Nr.13 (numeracija pagal 2 lentelę). Šių žvaigždžių temperatūra patenka į intervalą nuo 3683 K iki 5002 K, amplitudžių intervalas nuo 0.0066 mag iki 0.1977 mag, periodų intervalas nuo 3.59 h iki 14.82 h. 3 pav. pavaizduotoje HR diagramoje žvaigždžių padėtys atitinka tipines T-Tauri žvaigždžių padėtis.

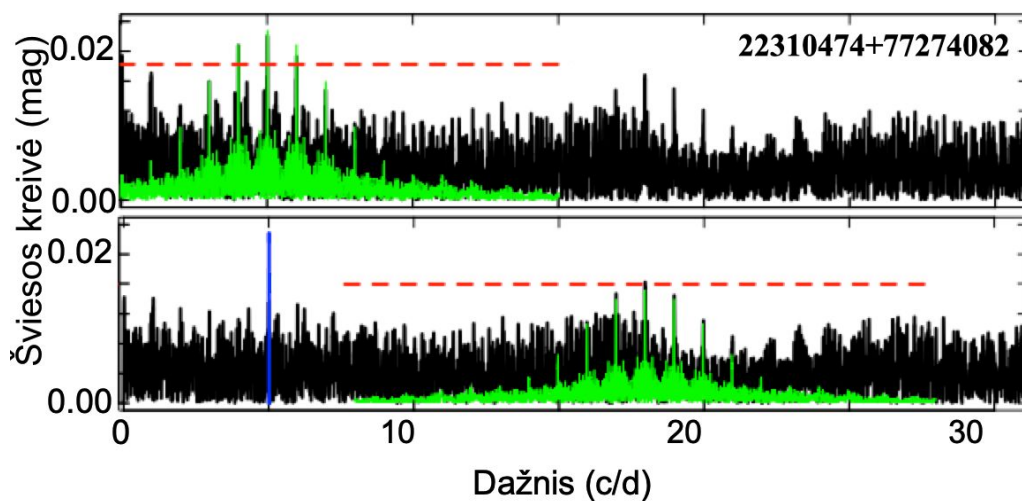
Žvaigždei Nr.5 pritaikytas Furjė dekompozicijos metodas pavaizduotas 4 pav. Procedūra buvo atliekama tol, kol S/N būna > 4 . Nustatyti du reikšmingi pikai ties 1.6185 c/d su amplitude 0.0829 mag ir 3.2370 c/d su amplitude 0.0191 mag.

Žvaigždei Nr.8 nustatytas dažnis 5.0120 c/d su amplitude 0.0586 mag. Nustatytas tik vienas pikas, kurio S/N > 4 (5 pav.). Šiai žvaigždei atlikta Furjė dekompozicijos procedūra tokiu pačiu principu kaip ir žvaigždei Nr.5 (4 pav.).

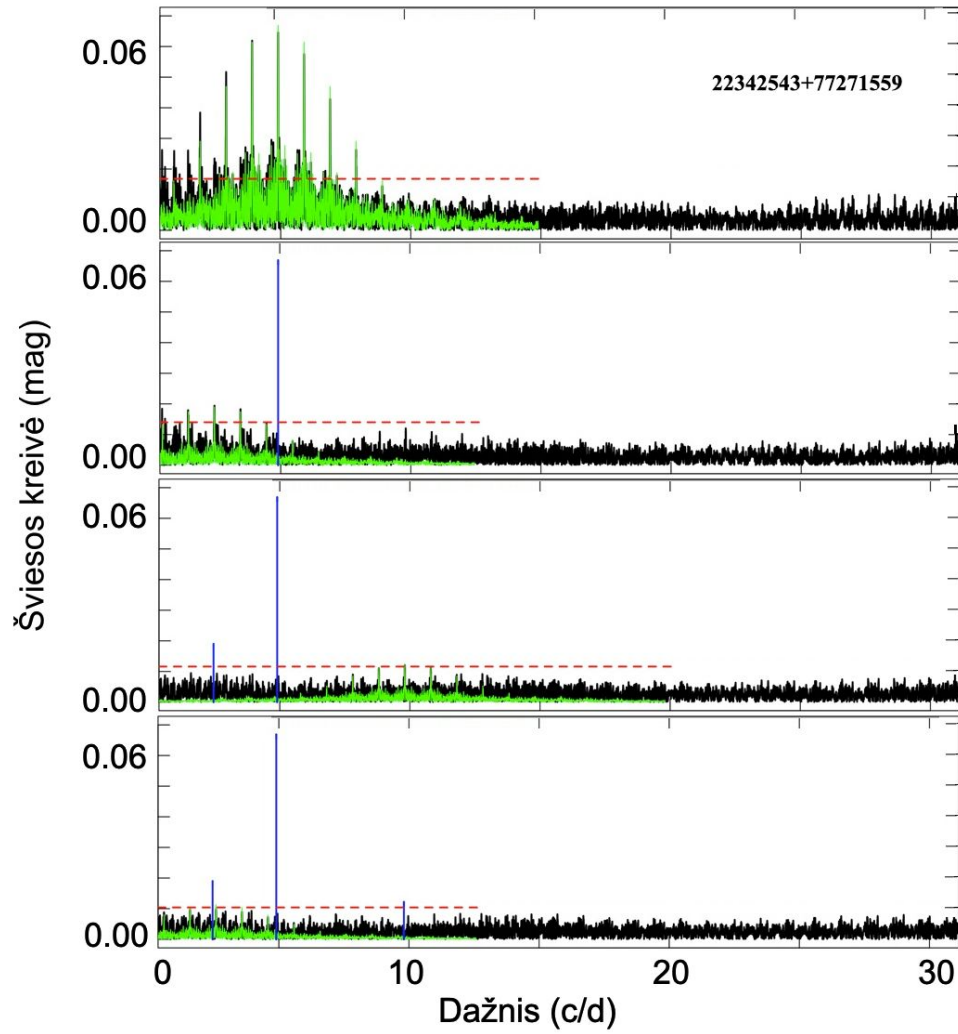
Žvaigždės Nr.9 ir Nr.10 pasižymi labai panašiais dažniais. Nr.9 - 4.9023 c/d, Nr.10 - 4.9020 c/d (6 pav. ir 7 pav. atitinkamai). Pagal koordinates jos yra arti viena kitos. Jų koordinatės skiriasi tik keturiomis minutėmis, todėl yra tikimybė, kad vienos žvaigždės šviesio kitimai daro įtaką kitos žvaigždės stebimai šviesos kreivei. Atsižvelgus į S/N santykį, stipresnis kintamumo signalas yra žvaigždės Nr. 9 šviesos kreivėje, todėl būtent ji galėtų daryti įtaką žvaigždei Nr.10. Abejoms žvaigždėms atlikta Furjė dekompozicijos procedūra (6 pav. ir 7 pav.).



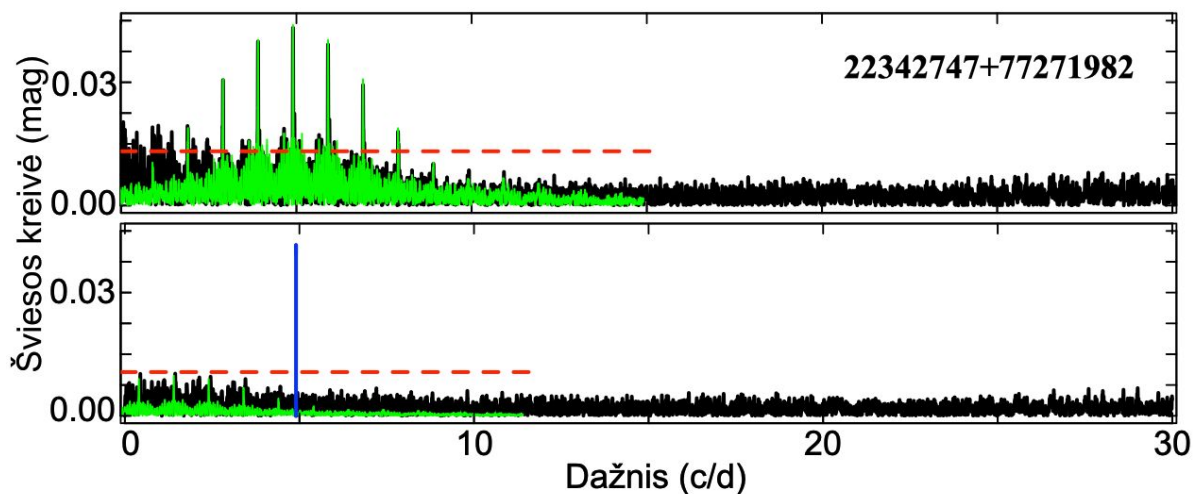
4 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių žvaigždei Nr.5. Juoda kreivė vaizduoja amplitudės spektrą. Žalia kreivė vaizduoja spektrinį langą. Raudonas punktyras vaizduoja keturgubą triukšmo lygį ties pasirinktu dažniu. Mėlyna vertikali linija žymi pašalintą dažnį. Procedūra atliekama iki tol, kol S/N būna >4 .



5 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių žvaigždei Nr.8. Simboliai paaiškinti 4 pav.

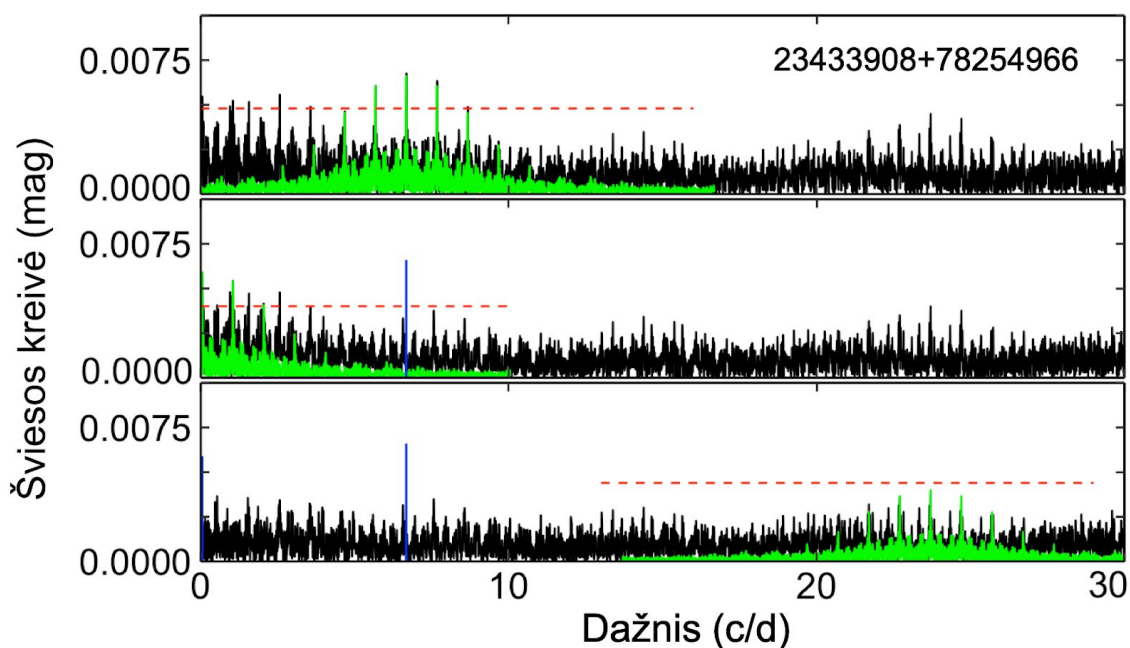


6 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių žvaigždei Nr.9. Simboliai paašškinti 4 pav.



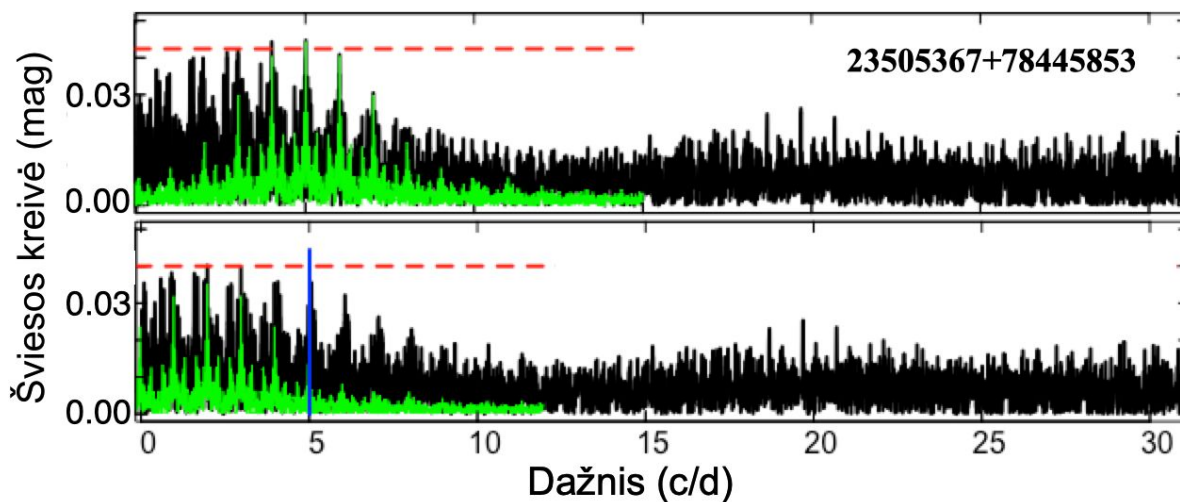
7 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių žvaigždei Nr.10. Simboliai paašškinti 4 pav.

Žvaigždei Nr. 12 pritaikytas Furjė dekompozicijos metodas (8 pav.) taip pat, kaip ir žvaigždei Nr.5 (4 pav.). Nustatyti du reikšmingi dažniai ties 6.6762 c/d su amplitude 0.0066 mag ir 0.0455 c/d su amplitude 0.0455mag. Tačiau patvirtinti žemąjį dažnį reikalingi ilgesni stebėjimai. Pagal padėtį HR diagramoje (3 pav.) ši žvaigždė galėtų būti submilžinė arba raudonoji milžinė.



8 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių žvaigždei Nr.12, simboliai paašškinti 4 pav.

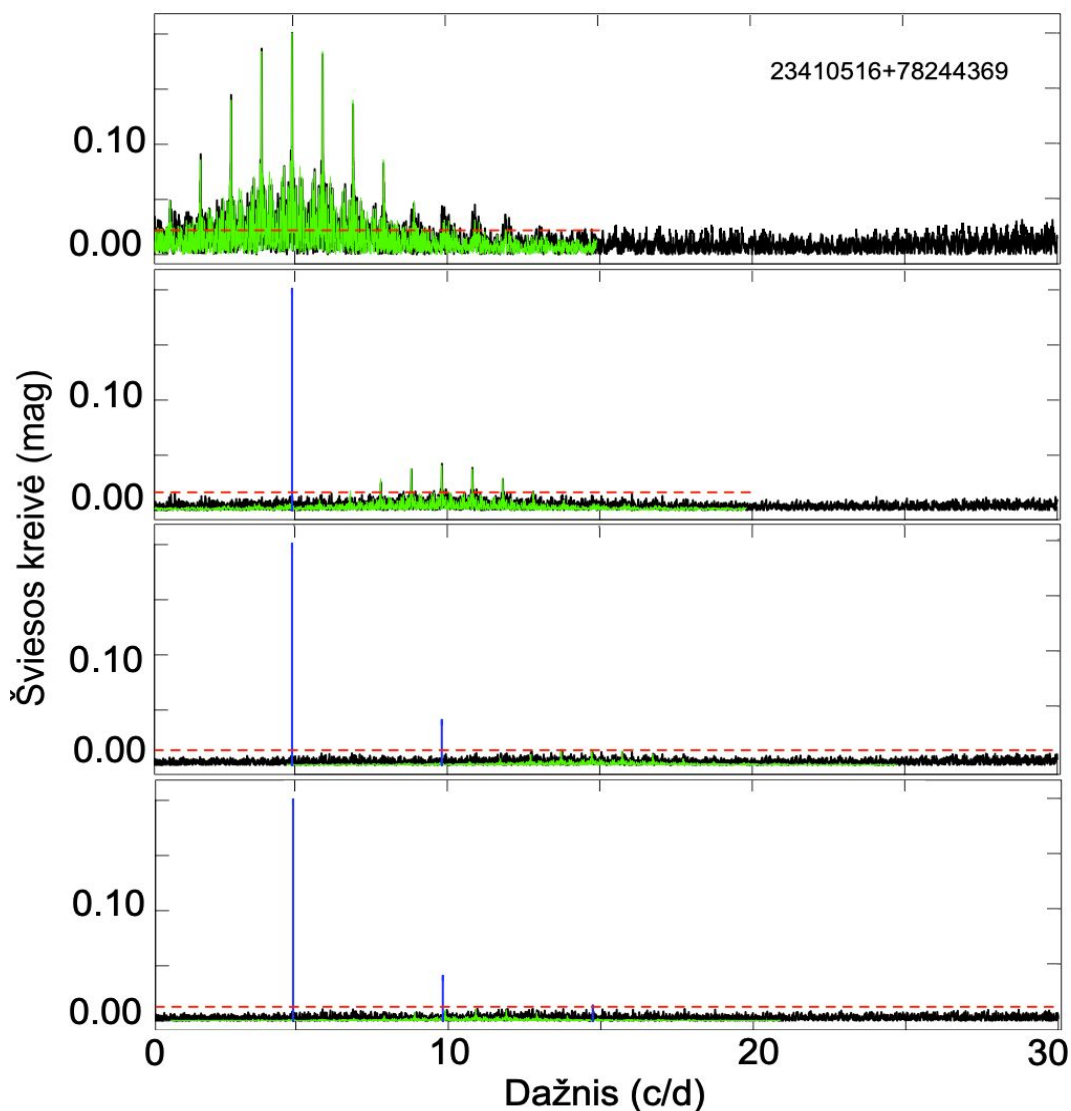
Žvaigždei Nr.13 pritaikytas Furjė dekompozicijos metodas (9 pav.) kaip ir žvaigždei Nr.5 (4 pav.). Nustatytas vienas pikas ties 5.0127 c/d su amplitude 0.0443 mag.



9 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių žvaigždei Nr.13. Simboliai paaiškinti 4 pav.

Žvaigždei Nr.11 pritaikytas Furjė dekompozicijos metodas (10 pav.) kaip ir žvaigždei Nr.5 (4 pav.). Nustatytas dažnis 4.9123 c/d, amplitudė 0.1977 mag, periodas 4.88 h.

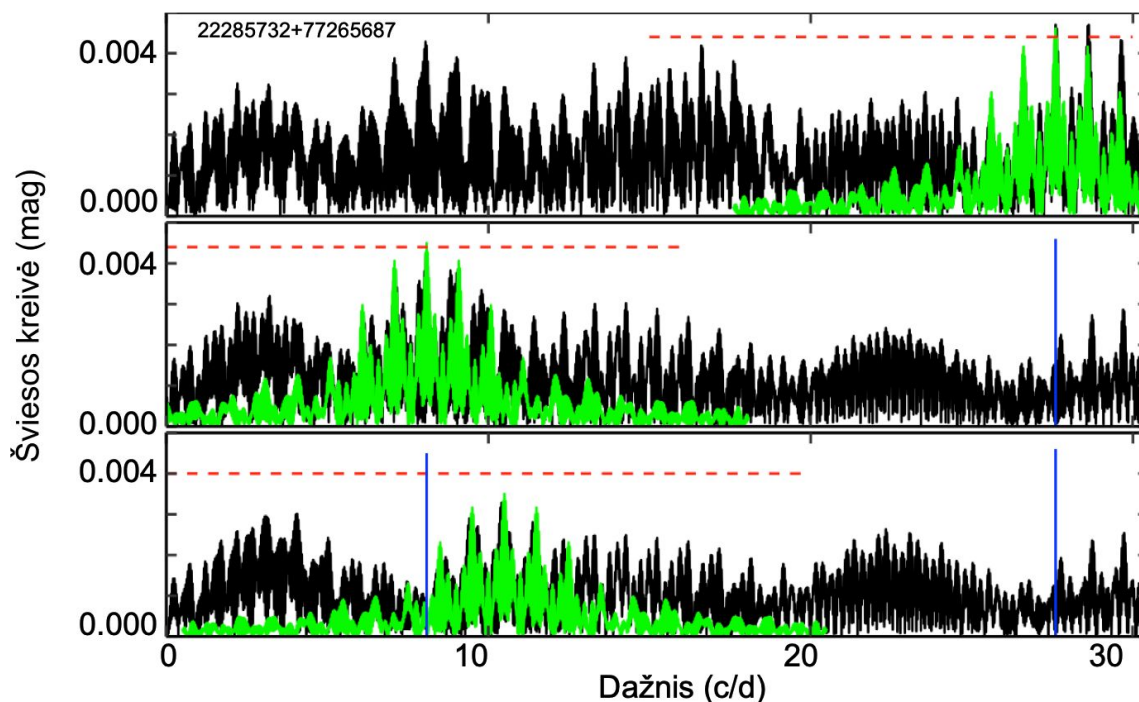
Žvaigždei Nr.7 pritaikytas Furjė dekompozicijos metodas (11 pav.) kaip ir žvaigždei Nr.5 (4 pav.). Šios žvaigždės periodas 0.82 h, temperatūra 6354 K. Ši žvaigždė patenka į teorines δ Scuti ir γ Doradus nestabilumo juostų ribas (3 pav.). Tipiniai δ Scuti pulsacijų periodai varijuoja nuo 0.19 h iki 10 h, o γ Doradus - nuo 7.2 h iki 3 d. (Sanchez Arias *et al.*, 2017). Tipinės γ Doradus žvaigždžių temperatūros būna intervale nuo 6700 K iki 7400 K, δ Scuti - nuo 6400 K iki 8600 K (Catelan ir Smith 2015). Žvaigždė Nr.7 patenka į δ Scuti apibrėžimo ribas.



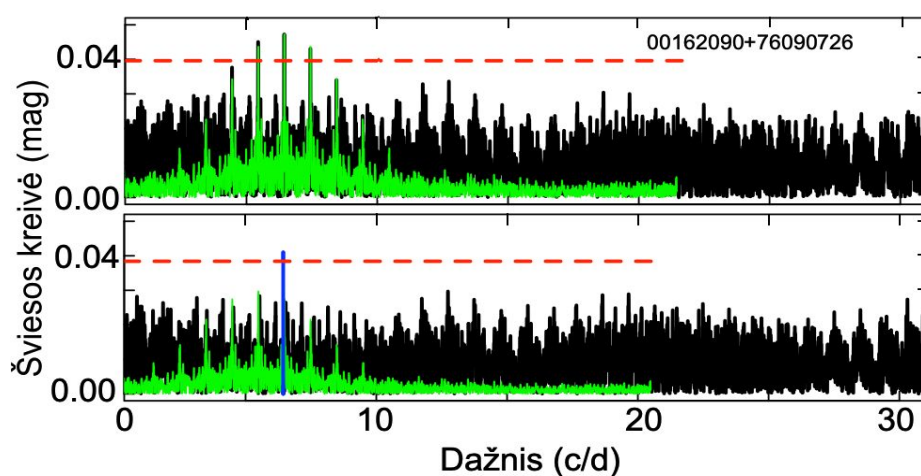
10 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių žvaigždei Nr.11. Simboliai paaiškinti 4 pav.

12 ir 13 pav. pavaizduoti žvaigždžių Nr.2 ir Nr.6 Furjė transformacijos spektrai ieškant jų šviesio kintamumo dažnių. Žvaigždei Nr.2 nustatytas vienas pikas ties 6.4435 c/d su amplitude 0.0490 mag. Žvaigždei Nr. 6 nustatyti du reikšmingi pikai ties 6.2014 c/d su amplitude 0.2464 mag ir 13.4036 c/d su amplitude 0.0191 mag. Tačiau nėra žinomos šių žvaigždžių temperatūros. Pagal nustatytą dažnį galime priskirti prie trumpaperiodžių kintamų žvaigždžių kandidačių, bet negalime išskirti galimo kintamosios tipo. Pagal aprašytą metodiką 2.3 skyriuje buvo apskaičiuotas šviesio vertės, atstumai apskaičiuoti pagal Gaia DR2 (Gaia Collaboration 2016, 2018) pateiktas paralakso vertės. Žvaigždžių paralakso vertės: Nr.2 žvaigždei 0.011057 mas ir žvaigždei Nr.6 0.361694 mas. Norint klasifikuoti

T-Tauri arba BY Draconis žvaigždes reikalingi papildomi spektroskopiniai stebėjimai. Žvaigždėms Nr.2, Nr.6, taip pat reikalingi papildomi spektroskopiniai stebėjimai, nes nėra žinomas šviesis ir efektinė temperatūra (Nr.2) arba nežinomas tik šviesis (Nr.6).



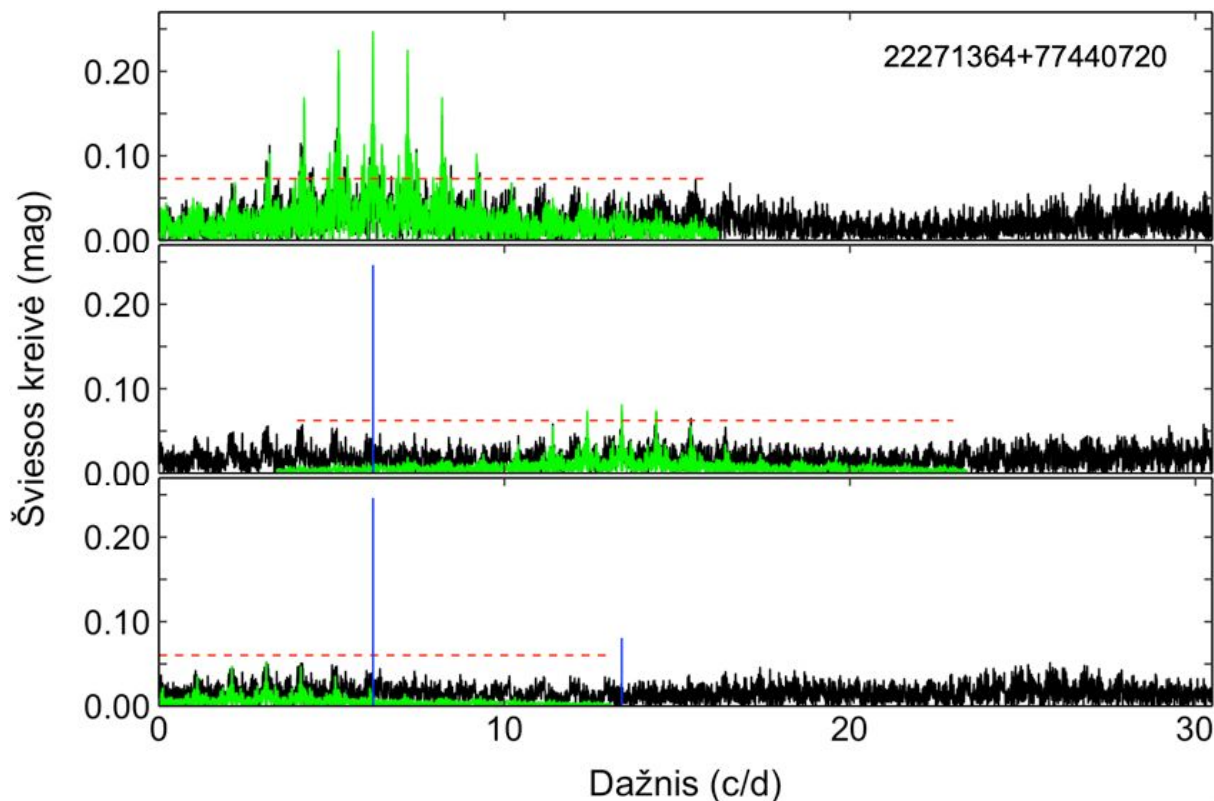
11 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių žvaigždei Nr.7. Simboliai paašškinti 4 pav.



12 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių žvaigždei Nr.2. Simboliai paašškinti 4 pav.

3 lentelė. Apskaičiuotos dažnio, amplitudės, fazės, FT spektro triukšmo, signalo-triukšmo santykio bei periodo vertės šio darbo metu atrastoms trumpaperiodėms kintamoms žvaigždėms kandidatėms.

Dažnis $\pm \sigma$ c/d	Amplitudė $\pm \sigma$, mag	Fazė $\pm \sigma$	Triukšmas, mag	S/N	Periodas, h
00162090+76090726 / Nr.2					
6.4435 \pm 0.0010	0.0490 \pm 0.0082	0.5932 \pm 0.0269	0.0099	4.94	3.72 \pm 0.0005
22265531+77264179 / Nr.5					
1.6185 \pm 0.0002	0.0829 \pm 0.0029	0.2155 \pm 0.0058	0.0045	18.04	14.82 \pm 0.0018
3.2370 \pm 0.0008	0.0191 \pm 0.0029	0.0851 \pm 0.0228	0.0039	4.79	7.43 \pm 0.0018
22271364+77440720 / Nr.6					
6.2014 \pm 0.0002	0.2464 \pm 0.0113	0.7004 \pm 0.0068	0.0182	13.47	3.87 \pm 0.0001
13.4036 \pm 0.0008	0.0808 \pm 0.0113	0.2476 \pm 0.0228	0.0156	5.16	1.79 \pm 0.0001
22285732+77265687 / Nr.7					
27.6131 \pm 0.0031	0.0046 \pm 0.0008	0.0058 \pm 0.0296	0.0011	4.06	0.87 \pm 0.00009
8.0876 \pm 0.0031	0.0045 \pm 0.0008	0.1712 \pm 0.0309	0.0011	4.14	2.96 \pm 0.0011
22310474+77274082 / Nr.8					
5.0120 \pm 0.0007	0.0285 \pm 0.0037	0.4758 \pm 0.0213	0.0057	4.94	4.78 \pm 0.0006
22342543+77271559 / Nr.9					
4.9023 \pm 0.0001	0.0669 \pm 0.0018	0.7926 \pm 0.0043	0.0042	15.76	4.90 \pm 0.00009
2.4561 \pm 0.0006	0.0199 \pm 0.0018	0.0698 \pm 0.0155	0.0035	5.56	9.77 \pm 0.0023
9.8058 \pm 0.0009	0.0122 \pm 0.0018	0.4673 \pm 0.0228	0.0029	4.18	2.44 \pm 0.0002
22342747+77271982 / Nr.10					
4.9020 \pm 0.0002	0.0586 \pm 0.0021	0.3203 \pm 0.0057	0.0044	13.24	4.90 \pm 0.0001
23410516+78244369 / Nr.11					
4.9123 \pm 0.00003	0.1977 \pm 0.0025	0.1977 \pm 0.0021	0.0055	35.38	4.88 \pm 0.00002
9.8247 \pm 0.0003	0.0412 \pm 0.0025	0.9955 \pm 0.0102	0.0041	9.94	2.44 \pm 0.00007
14.7387 \pm 0.0010	0.0143 \pm 0.0025	0.3486 \pm 0.0283	0.0034	4.11	1.65 \pm 0.0001
23433908+78254966 / Nr.12					
6.6762 \pm 0.0006	0.0066 \pm 0.0006	0.2989 \pm 0.0166	0.0012	5.35	3.59 \pm 0.0003
0.0455 \pm 0.0007	0.0059 \pm 0.0006	0.6769 \pm 0.0187	0.0010	5.47	527.47 \pm 8.11
23505367+78445853 / Nr.13					
5.0127 \pm 0.0004	0.0443 \pm 0.0041	0.8001 \pm 0.0131	0.0106	4.15	4.79 \pm 0.0003



13 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių žvaigždei Nr.6. Simboliai paaiškinti prie 4 pav.

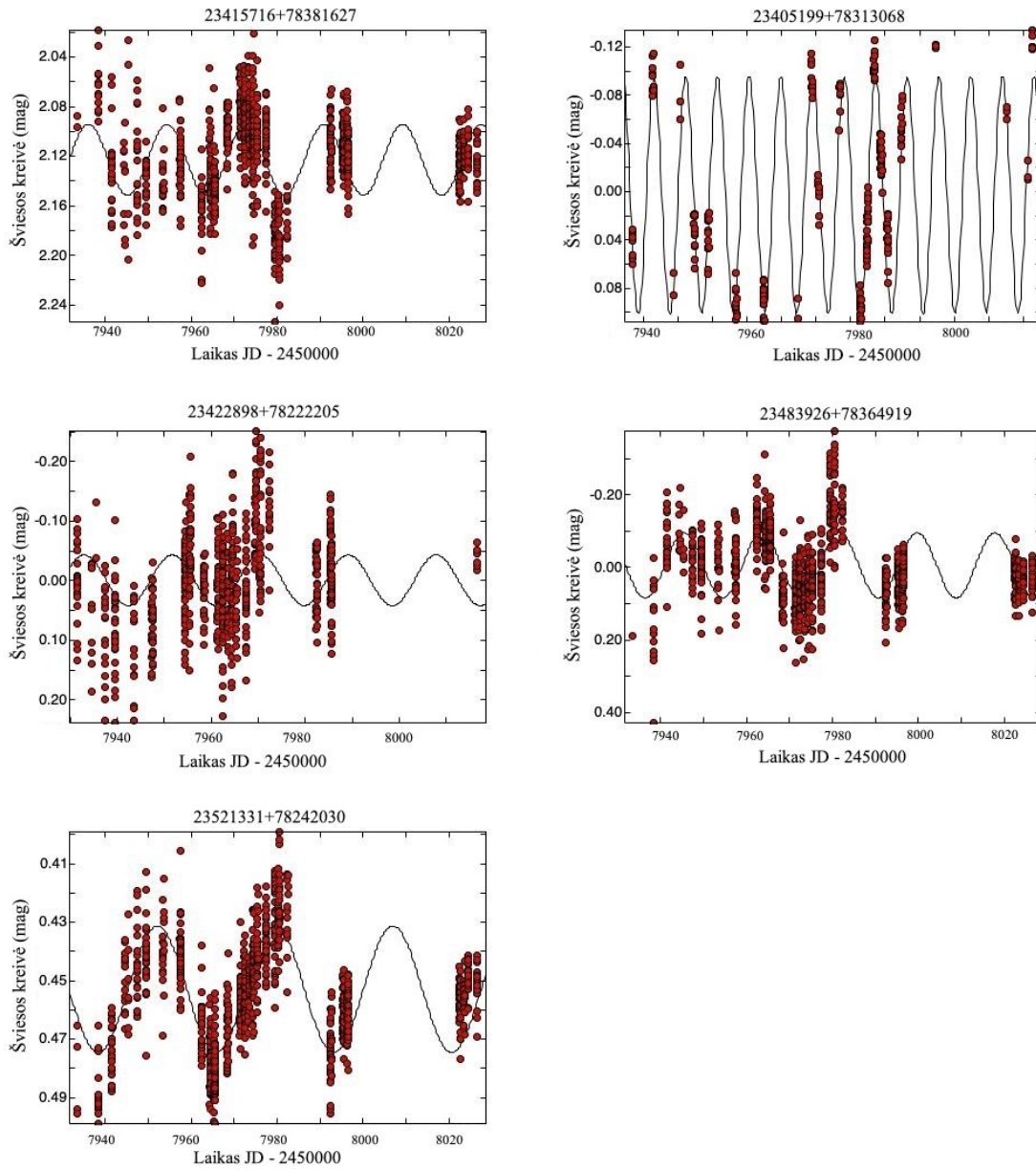
3.3. Lėtai kintančios žvaigždės

Lėtai kintančios žvaigždės šio tyrimo metu pastebėtos dviejuose stebėtuose laukuose (NSV15053 ir NSV26138). Rastos septynios lėtai kintančios žvaigždės, kurių šviesio kitimų charakteristikos nustatytos naudojant *Period04* programą ir pateiktos, 4 lentelėje. 14 pav. pavaizduotos visų ilgaperiodžių kandidačių žvaigždžių šviesos kreivės. Raudoni taškai vaizduoja atskirus stebėjimo momentus, juoda linija - geriausiai stebėtus šviesio kitimus atkartojanti sinusoidė. Visoms žvaigždėms pritaikytas Furjė dekompozicijos metodas, o žvaigždžių Furjė spektrai pavaizduoti 15 pav.

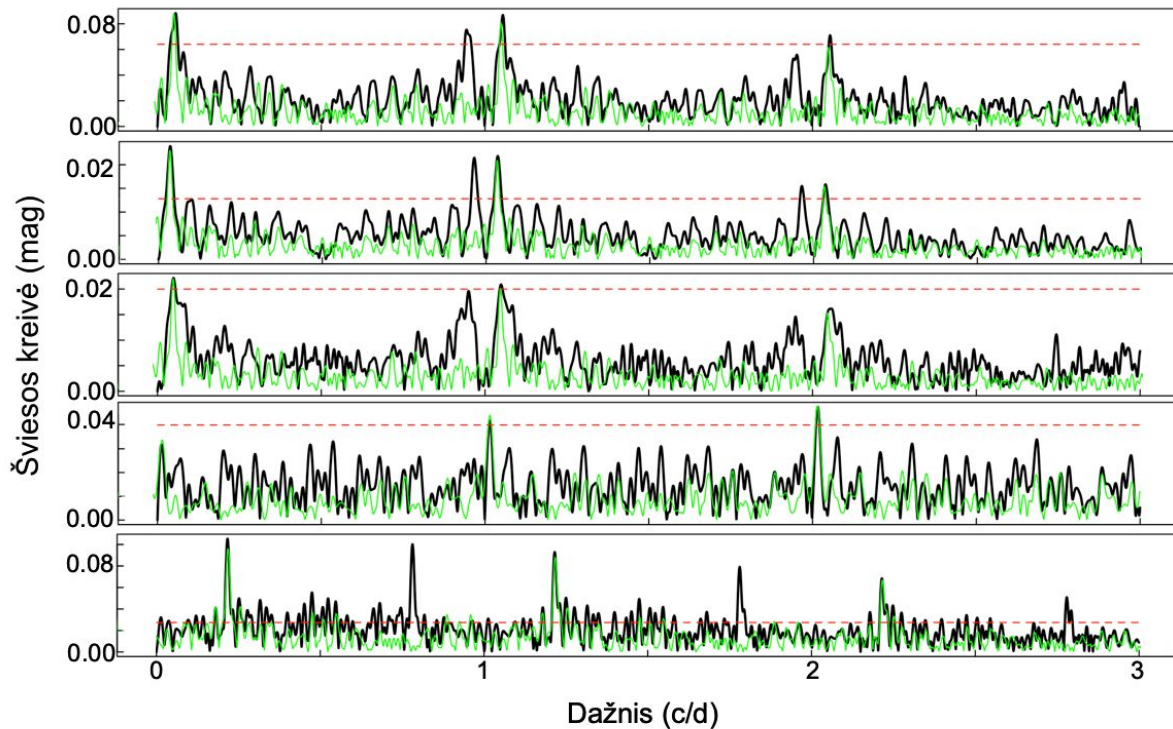
Žvaigždė Nr. 13 gali būti priskirta T-Tauri arba BY Draconis žvaigždžių tipui. Jai nustatytas periodas 4.5 dienos su amplitude 0.0960 mag. Tačiau tipo patikslinimui reikalingi papildomi spektroskopiniai stebėjimai.

4 lentelė. Nustatyti lėtai kintančių žvaigždžių šviesio kitimų parametrai.

Dažnis $\pm \sigma$ c/d	Amplitudė $\pm \sigma$, mag	Fazė $\pm \sigma$	Triukšmas, mag	S/N	Periodas, d
23405199+78313068 / Nr. 14					
0.2184 \pm 0.0001	0.0960 \pm 0.0013	0.7218 \pm 0.002	0.0020	46.0	4.5 \pm 0.002
23415716+78381627 / Nr. 15					
0.0547 \pm 0.0002	0.0287 \pm 0.0013	0.7171 \pm 0.007	0.0017	17.6	18.3 \pm 0.066
23483926+78364919 / Nr.17					
0.0552 \pm 0.0001	0.0928 \pm 0.0031	0.1542 \pm 0.005	0.0087	10.2	18.1 \pm 0.032
23422898+78222205 / Nr.16					
0.0533 \pm 0.0006	0.0477 \pm 0.0041	0.9423 \pm 0.015	0.0075	6.3	18.7 \pm 0.211
23521331+78242030 / Nr.20					
0.0364 \pm 0.0001	0.0189 \pm 0.0004	0.7291 \pm 0.004	0.0012	15.7	27.5 \pm 0.075



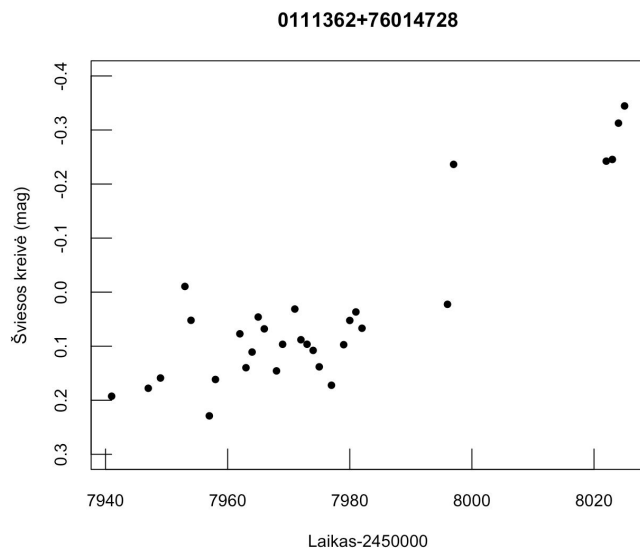
14 pav. Lėtai kintančių žvaigždžių kandidačių šviesos kreivės (raudoni taškai) ir pagal pagrindinį dažnį apskaičiuotos sinusoidės geriausiai atkartojančios šviesos kreivių eigą (juoda linija).



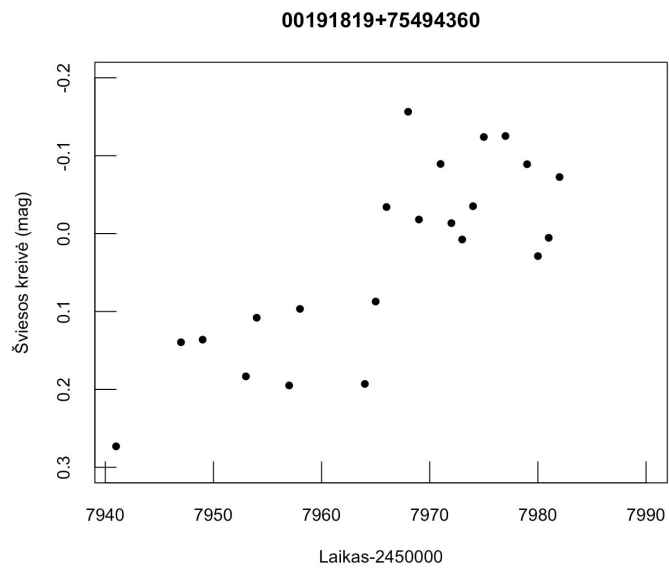
15 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių lėtai kintančioms žvaigždėms (nuo paveiklo viršaus): Nr. 14, Nr.15, Nr.16, Nr.17, Nr.20. Simboliai paaiškinti 4 pav.

Lauke NSV15053 pastebėtos dvi žvaigždės, kurios turi lėtai kintančių žvaigždžių požymių. 16 ir 17 pav. pavaizduotos šių žvaigždžių šviesos kreivės, kur kiekvienas taškas atitinka atskirų naktų vidurkį. Paveiksluose matomas lėtas šių žvaigždžių šviesio didėjimas, tačiau apie šviesio kitimo periodiškumą ir amplitudę pasakyti nieko negalime, nes tokioms žvaigždėms charakterizuoti reikalingos gerokai ilgesnės šviesos kreivės.

Visas minėtas lėtai kintančias žvaigždes reikėtų stebėti ilgesnį laiką, kad būtų galima įvardinti jų tipą ir patvirtinti periodiškumą.



16 pav. Lētai kintanti zvaigždē - kandidatē Nr.1.



17 pav. Lētai kintanti zvaigždē - kandidatē Nr.3.

3.4. Užtemdomos dvinarės žvaigždės

Šiame darbe iš viso tyrinėjamos penkios užtemdomos dvinarės žvaigždės. Atrastos dvi naujos užtemdomos dvinarės žvaigždės tiriamajame lauke NSV26138 bei viena įtariama dvinarė dvinarė žvaigždė NSV0255 lauke. Taip pat papildomai į tyrimus įtrauktos dvi užtemdomos dvinarės Nr.21 ir Nr.22. 5 lentelėje pateikti visų tirtų dvinarių žvaigždžių parametrai: Gaia ryškis (Gaia Collaboration 2016, 2018), orbitinis periodas, stebėtų užtemimų gylis, užtemimo trukmė. Sutrumpinimai (P) ir (A) atitinka pirminį ir antrinį užtemimus. 6 lentelėje pateikti suskaičiuoti dvinarių žvaigždžių modelių parametrai: masių santykis (antrinės žvaigždės masė padalinta iš pirminės žvaigždės masės), orbitinis polinkis, užpildymo faktoriai, pirminės ir antrinės žvaigždžių temperatūros, sistemos tipas.

5 lentelė. Atrastų užtemdomų dvinarių žvaigždžių parametrai

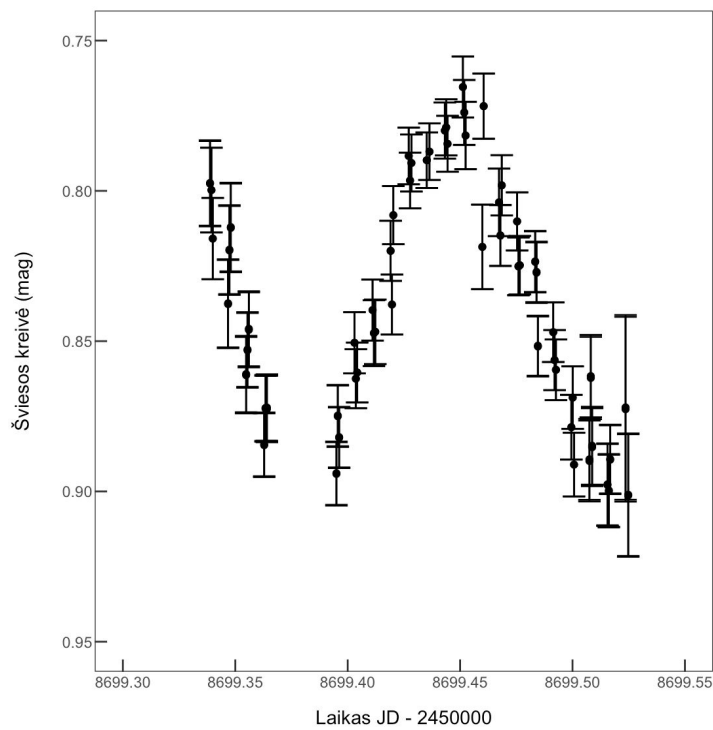
CNAME	23510987+78232 819 Nr. 19	23495911+78250 995 Nr.18	00433744+80012 248 Nr.4	09550834+76303 511 Nr.21	21350118+75082 260 Nr. 22
R.A. (Equ. J2000)	23 51 09.87	23 49 59.11	00 43 37.44	09 55 08.34	21 35 01.18
Dec. (Equ. J2000)	+78 23 28.19	+78 25 09.95	+80 01 22.48	+76 30 35.11	+75 08 22.60
Gaia G, mag	13.855	13.135	13.950	12.589	12.443
Orbitinis periodas, d	0.269 ± 0.0008	-	13.358 ± 0.0220	2.252 ± 0.012	0.9270 ± 0.00002
Užtemimo trukmė, d	0.135	~0.3	0.18(P) 0.39(A)	~0.13(P) ~0.13(A)	~0.12(P) ~0.11(A)
Gylis, mag	0.11	~0.19	0.44(P) 0.11(A)	~0.08(P) ~0.01(A)	~0.12(P) ~0.04(A)
Tipas	EW	EA	EA	EB	EB

6 lentelė. Dvinarių žvaigždžių modelių parametrai. Modeliai skaičiuoti darant prielaidą, kad sistemų ekscentricitetas yra 0, o periastro argumentas - 90° .

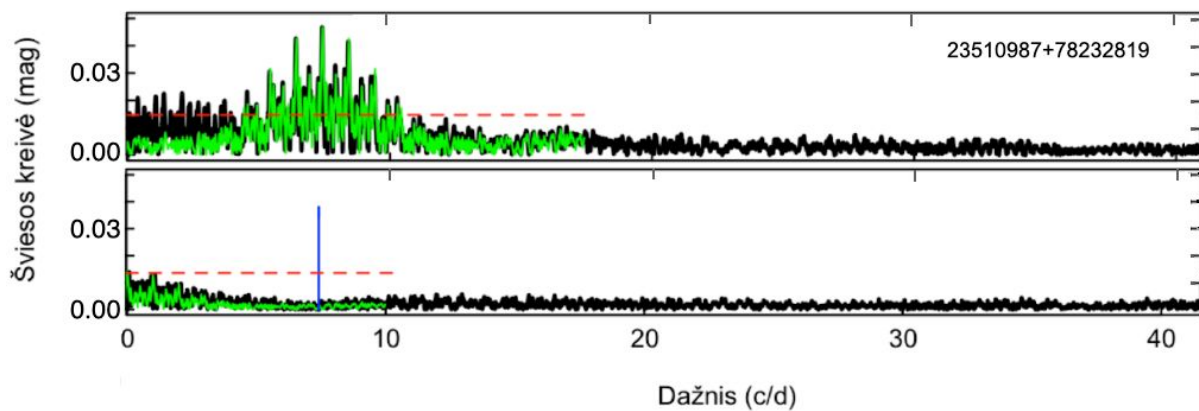
CNAME	23510987+78232819 Nr.19	09550834 +76303511 Nr. 21	21350118+75082260 Nr. 22
Masių santykis	0.767	0.500	0.960
Orbitinis polinkis, °	27.260	85.653	65.391
Užpildymo faktorius (P)	1.150	0.450	0.917
Užpildymo faktorius (A)	1.150	0.060	0.67
Temperatūra (P), K	4850	4500	5800
Temperatūra (A), K	4890	8000	13000
Tipas	EW	EB	EB

3.4.1. Užtemdoma kontaktinė dvinarė žvaigždė 23510987+78232819/Nr. 19

Lauke NSV26138 stebėta žvaigždė 23510987+78232819/Nr.19. Žvaigždės padėtis HR diagramoje nėra būdinga jokiai kintamųjų žvaigždžių grupei, tačiau jos šviesos kreivė būdinga W Ursae Majoris tipo dvinarėms žvaigždėms (3 pav.). Be anksčiau minėtų stebėjimų, šiai žvaigždei tirti buvo panaudoti papildomi stebėjimai atlikti Molėtų astronomijos observatorijoje nuo 2019-07-19 iki 2019-09-25 su Johnson V filtru. 18 pav. pavaizduotas užtemimas stebėtas 2019-08-03. Norėdami sužinoti šios žvaigždės periodą pritaikėme Furjė dekompozicijos metodą, tačiau tokiu būdu nustatomas periodas kontaktinėms dvinarėms yra apytiksliai dvigubai ilgesnis (19 pav.). Periodo vertės patikslinimui buvo apskaičiuota fazės diagrama ir geriausiai atitinkanti teorinė šviesos kreivė pažymėta raudona spalva (20 pav.). Nustatytas periodas 0.269 d. Užtemimo trukmė 0.135 d.



18 pav. Žvaigždės 23510987+78232819/Nr.19 šviesos kreivė Johnson V filtre, stebėta 2019-08-03.

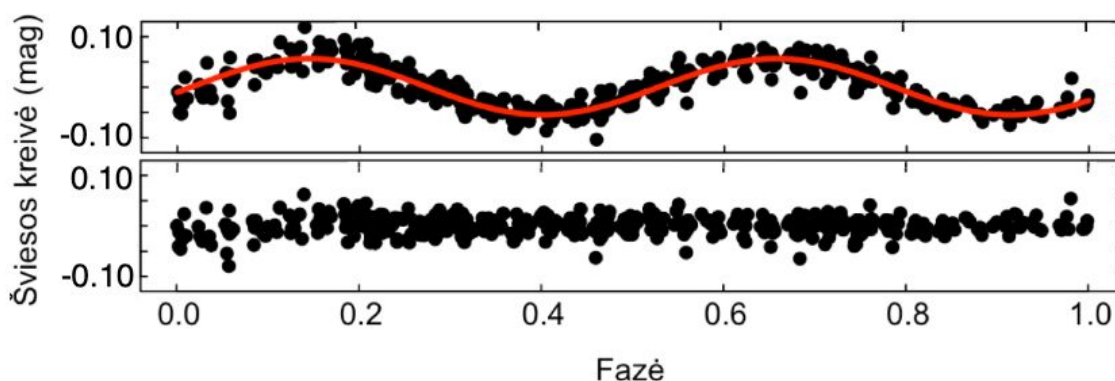


19 pav. Furjė transformacijos spektras ieškant dažnių žvaigždei 23510987+78232819/Nr.19. Simboliai paaiškinti 4 pav.

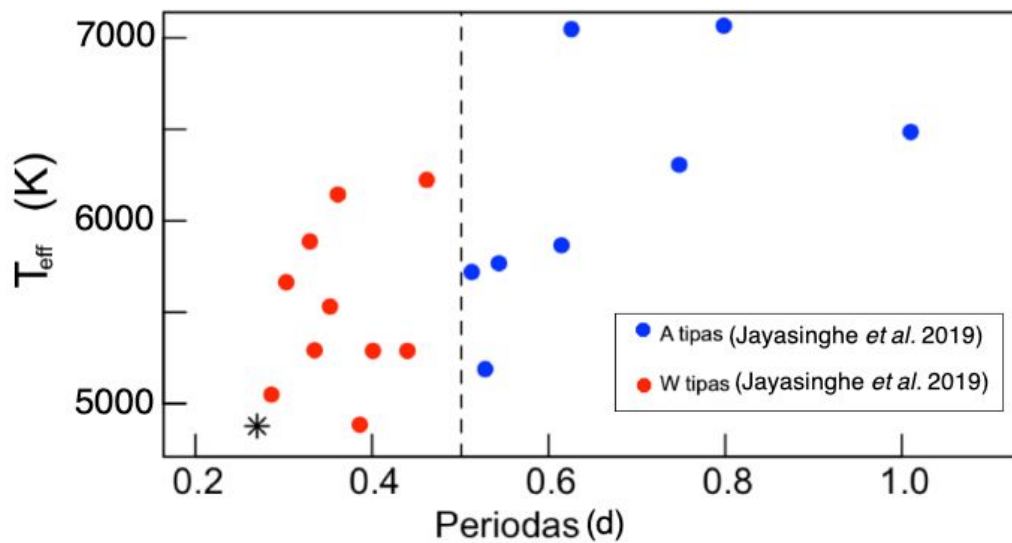
W Ursae Majoris kontaktinės užtemdomos dvinarės skirstomos į du tipus, pagal spektrinius tipus ir pradines mases į A potipį ir W potipį. Jayasinghe *et al.* (2019) nustatė

naują ribą ties $P=0.5011$ d. skiriančią šiuos du tipus. 21 pav. mėlynais taškais pavaizduotos A tipo dvinarės, raudonai - W tipo dvinarės (Jayasinghe *et al.* 2019). Juoda žvaigždute pavaizduota žvaigždė Nr.19. Kadangi nustatytas žvaigždės Nr.19 orbitinis periodas yra lygus 0.269 d., ši žvaigždė patenka į W užtemdomų kontaktinių dvinarių apibrėžimo ribas.

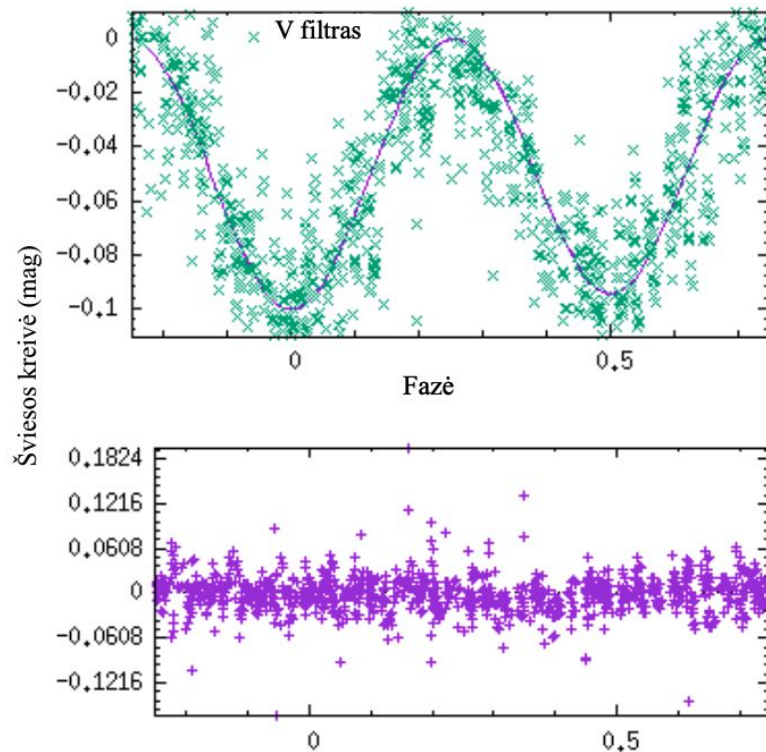
Pasinaudojus *Nightfall* programa buvo atrastas geriausiai šviesos kreivę atitinkantis modelis (22 pav.). 23 pav. pavaizduotas Rošo ertmių užpildymas šioje sistemoje. Ši sistema pilnai užpildo Rošo ertmę ir išsiplečia už Lagranžo pirmojo taško, kuris pažymėtas L1. Jeigu abi žvaigždės išsiplečia už L1 taško, tai žvaigždės tampa pilnai kontaktuojančios ir turi bendrą apvaskalą. Šios sistemos 3D modelis pavaizduotas 24 pav., kuriame matosi kontaktiškumas ir sąlyčio taškas. Nustatyti parametrai pirminei ir antrinei žvaigždei: masių santykis lygus 0.767, pirminės ir antrinės žvaigždės Rošo užpildymo faktoriaus vertės 1.15, temperatūros - pirminės 4850 K ir antrinės 4890 K. Dvinarės parametrai pateikti 5-oje ir 6-oje lentelėje. Tačiau, norint įsitikinti modelio teisingumu reikalingi papildomi spektroskopiniai stebėjimai, iš kurių būtų galima įvertinti žvaigždžių radialinius greičius ir patikslinti masių santykį.



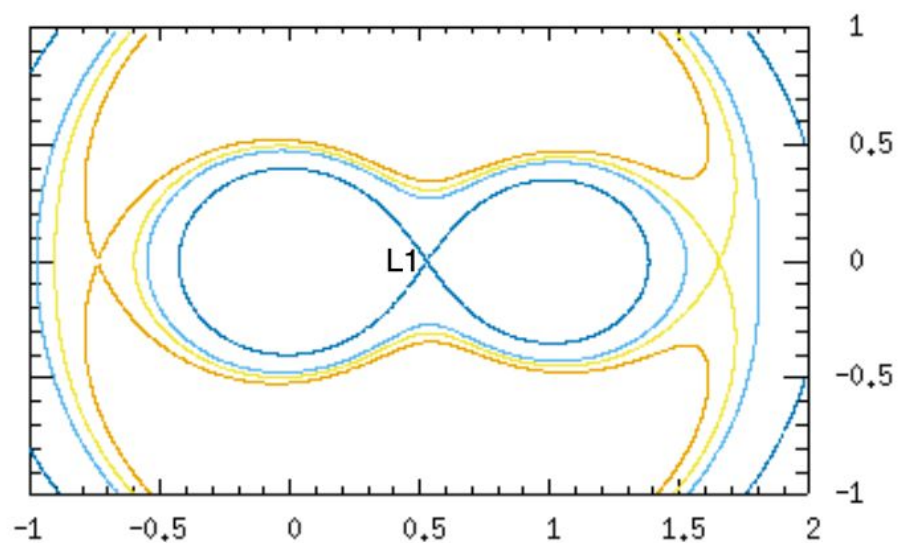
20 pav. Fazės diagrama žvaigždei 23510987+78232819/Nr.19. Viršutiniame paveiksle fazės diagrama, raudona kreivė - geriausiai amplitudės kitimą atitinkanti teorinė funkcija. Apatiniame paveiksle pavaizduotas likutis. Nustatytas periodas 0.269 d. Standartinio nuokrypio vertė 0.0175.



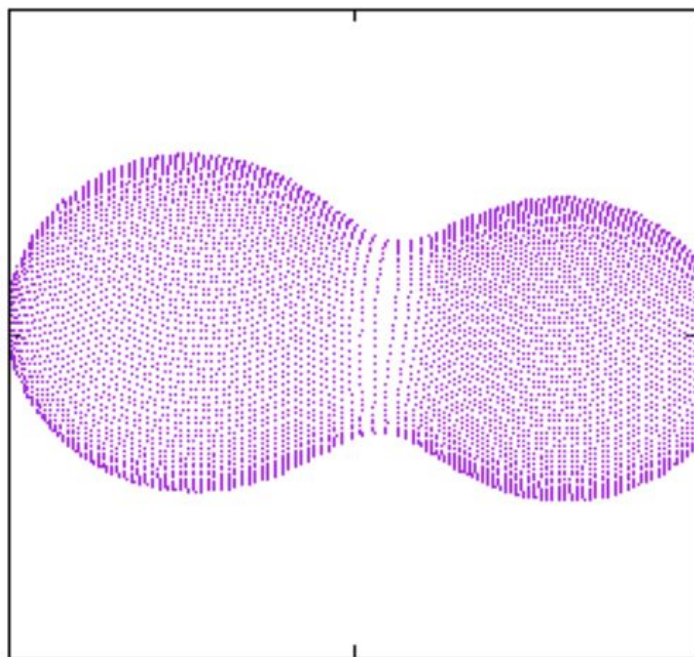
21 pav. Raudoni taškai - W tipo kontaktinės dvinarės, mėlyni taškai - A tipo kontaktinės dvinarės. Juoda žvaigždutė - šiame darbe atrasta užtemdoma kontaktinė dvinarė 23510987+78232819/Nr.19.



22 pav. Geriausiai stebėjimus atitinkantis šviesos kreivės modelis žvaigždei 23510987+78232819/Nr.19. Žali kryžiukai - stebėjimų taškai, violetinė kreivė - sistemos modelio kreivė. Apačioje likučio vertės.



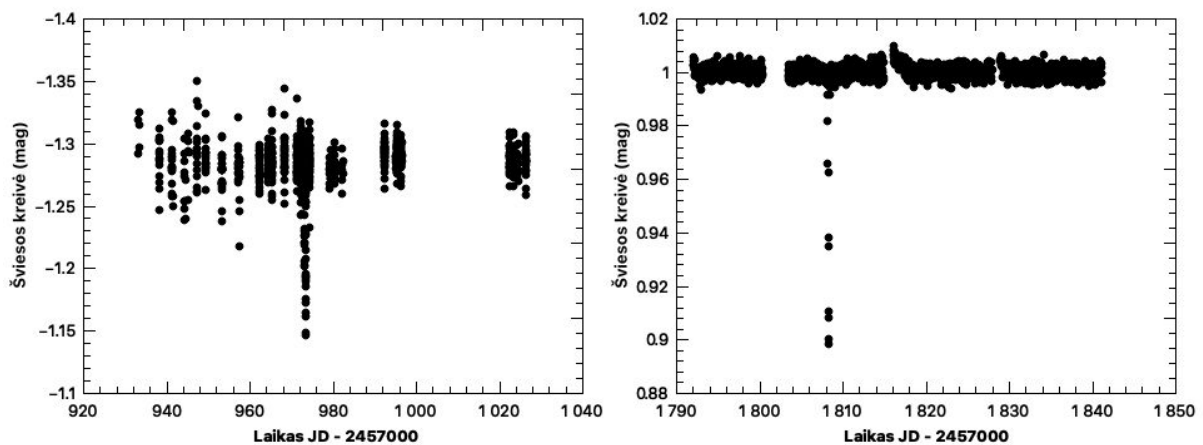
23 pav. Žvaigždžių sistemos 23510987+78232819/Nr.19, ekvapotencialinių paviršių kontūras. Mėlynas kontūras - Rošo ertmė, žydras kontūras - žvaigždžių kontūras (kairėje - pirminė žvaigždė, dešinėje - antrinė), L1 - pirmasis Lagranžo taškas.



24 pav. Žvaigždžių sistemos 23510987+78232819/Nr.19 3D modelis. Kairėje - pirminė žvaigždė, dešinėje - antrinė.

3.4.2. Užtemdoma dvinarė 23495911+78250995/Nr.18

Ši dvinarė aptikta NSV26138 lauke, jos stebėjimo laikas nuo 2017-06-28 iki 2017-09-30. Tačiau Molėtų astronomijos observatorijoje laikotarpiu nuo 2017-09-30 iki 2019-11-02 buvo pastebėtas tik vienas užtemimas. Šią dvinarę sistemą taip pat stebėjo ir TESS nuo 2019-11-02 iki 2019-12-24. Papildomai pasinaudojus šiais TESS stebėjimais buvo pastebėtas dar vienas užtemimas. 25 pav. pavaizduoti abu užtemimai. Todėl galime patvirtinti, kad tai tikrai užtemdoma dvinarė, tačiau periodiškumo iš fotometrinių stebėjimų nustatyti negalime, nes mes nežinome ar šie du užtemimai seka vienas po kito, ir ar nuo 2017-09-30 iki 2019-11-02 bei tarpų tarp stebėjimų metu nebuvo užtemimų. Kadangi šios sistemos orbitinis periodas akivaizdžiai yra gerokai ilgesnis nei kitų šiame darbe nagrinėtų dvinarių sistemų, tai jos orbitinį periodą lengviausia yra nustatyti atlikus papildomus spektrometrinius stebėjimus.



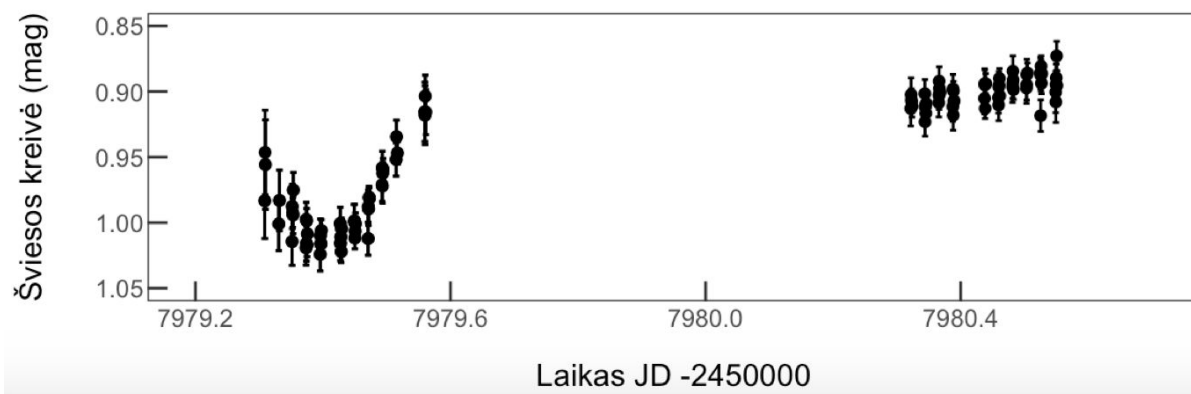
25 pav. Žvaigždės 23495911+78250995/Nr.18 stebėjimai. Kairėje paveikslo dalyje Molėtų astronomijos observatorijoje su Maksutov teleskopu stebėta šviesos kreivė Johnson V filtre. Dešinėje paveikslo pusėje - TESS kosminio teleskopo stebėta šviesos kreivė.

3.4.3. Užtemdoma dvinarė 00433744+80012248/Nr.4

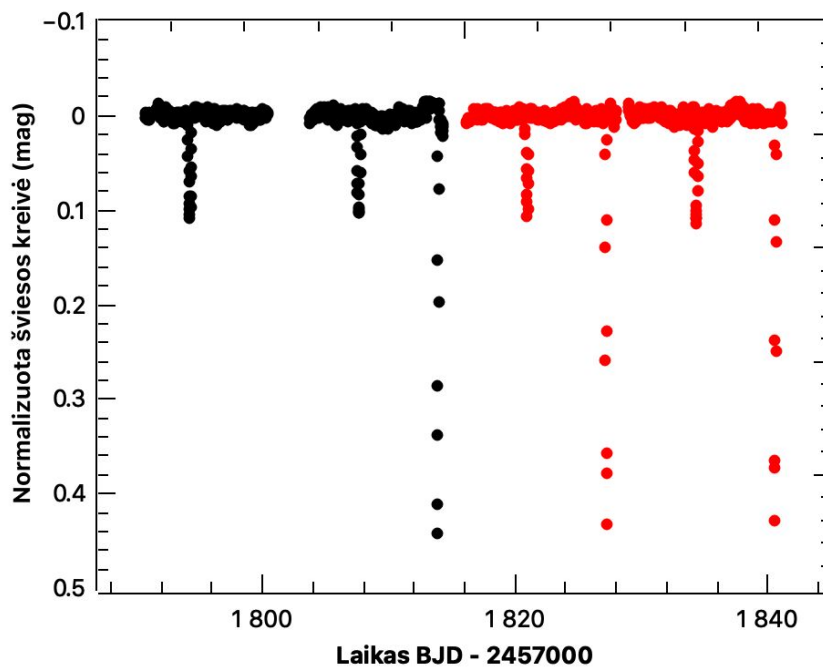
Ši užtemdoma dvinarė žvaigždė buvo atrasta tiriant lauką NSV0255. Jos stebėjimo laikas nuo 2017-06-28 iki 2017-09-30, Molėtų astronomijos observatorijoje. Tačiau buvo pastebėtas tik vienas užtemimas. Ji suklasifikuota kaip galima EA tipo dvinarė žvaigždė. Šios žvaigždės užtemimas stebėtas Molėtų astronomijos observatorijoje 2017-08-13 ir

2017-08-14 pavaizduotas 26 pav. Ši žvaigždė buvo stebėta dviejuose TESS sektoriuose nuo 2019-11-02 iki 2019-12-24. TESS stebėta šviesos kreivė pavaizduota 27 pav. Iš TESS šviesos kreivės galėjome patvirtinti, kad tai tikrai EA tipo užtemdoma dvinarė žvaigždė.

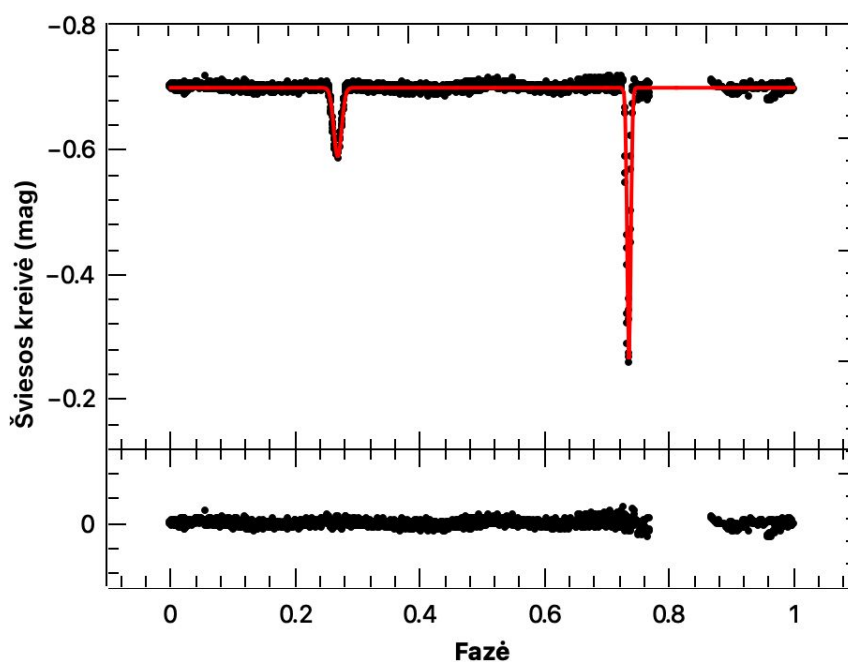
Pagal fazės diagramą buvo nustatytas geriausiai stebėtą šviesos kreivę atitinkantis orbitinis periodas, kuris lygus 13.358 d. 28 pav. pavaizduota apskaičiuota fazės diagrama ir Gauso funkcijos kreivė, geriausiai atkartojanti stebėtus užtemimus fazės diagramoje. Paveiklo apatinė dalyje pavaizduotos likučio vertės. Standartinio nuokrypio nuo pavaizduotos Gauso funkcijos kreivės vertė yra 0.0051 mag. Gauso funkcijos kreivė buvo panaudota užtemimų gyliams įvertinti. Gauta, kad pirminio užtemimo gylis yra 0.44 mag, o antrinio - 0.11 mag. Taip pat gauta, kad pirminio užtemimo trukmė yra 0.18 d., o antrinio - 0.39 d.



26 pav. Žvaigždės 00433744+80012248/Nr.4 šviesos kreivė Johnson V filtre, stebėta Molėtų astronomijos observatorijoje 2017-08-13 ir 2017-08-14.



27 pav. Užtendomos dvinarės 00433744+80012248/Nr.4 šviesos kreivė stebėta su TESS kosminiu teleskopu. Juodai pažymėti stebėjimai 18 sektoriuje, raudonai - 19 sektoriuje.



28 pav. Viršutiniame paveiksle pavaizduota fazės diagrama 00433744+80012248/Nr.4. Raudona kreivė - geriausiai amplitudės kitimą atitinkanti teorinė Gauso funkcija. Apatiniame paveiksle pavaizduotas likutis.

3.4.4. Užtemdoma dvinarė 09550834+76303511/Nr.22

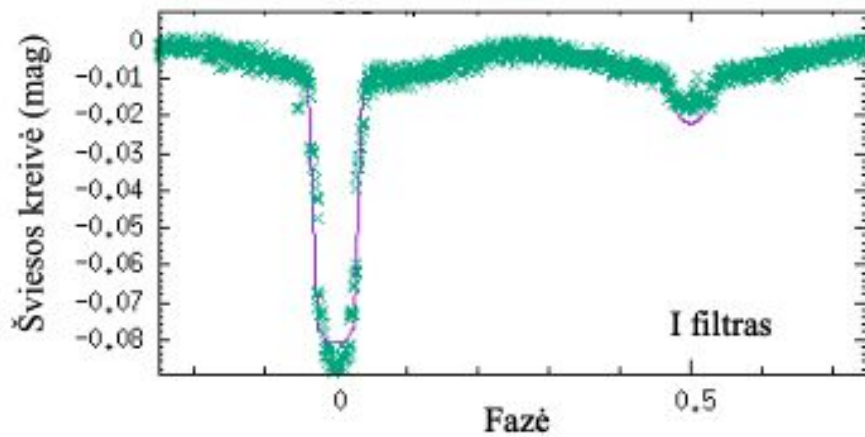
Šios žvaigždės stebėjimai paimti iš papildomo SPFOT projekto lauko. Pagal šviesos kreivę ji klasifikuojama kaip EB tipo užtemdoma dvinarė sistema, kuomet tarp užtemimų šviesos kreivė yra išlinkusi. Užtemdoma dvinarė buvo stebėta viename TESS sektoriuje nuo 2019-12-24 iki 2020-01-21, šiuos duomenis naudojome detalesnei analizei. 29 pav. pavaizduota apskaičiuota fazės diagrama, kurios pagalba nustatėme periodo vertę. Šiai žvaigždžių sistemai nustatyto orbitinio periodo vertė 2.252 d.

Pagal šio darbo skyriuje 2.3. aprašytą metodiką atskiriems sistemos komponentams buvo apskaičiuoti šviesiai. Pirminės žvaigždės $134.89 L_{\odot}$, antrinės žvaigždės $10.47 L_{\odot}$.

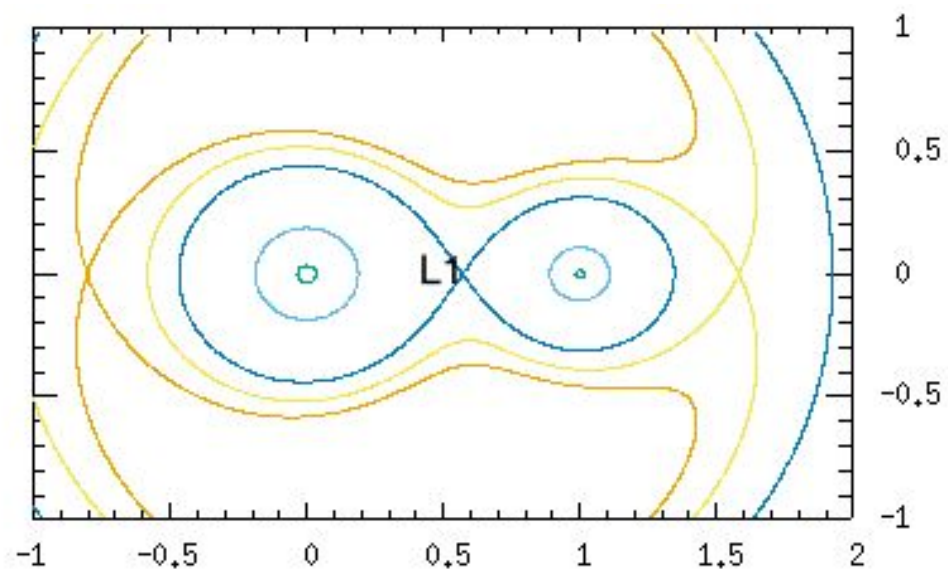
Pasinaudojus *Nightfall* programa buvo atrastas geriausiai šviesos kreivę atitinkantis modelis (29 pav.). 30 pav. pavaizduotas Rošo ertmių užpildymas. Ši sistema neužpildo Rošo ertmių ir nepasiekia Lagranžo pirmojo taško, kuris pažymėtas L1. Tokią sistemą laikome nekontaktuojančia. Sistemos 3D modelis pavaizduotas 31 pav.

Nustatyti modelio parametrai pirminei ir antrinei žvaigždei: masių santykis lygus 0.5; pirminės ir antrinės žvaigždės Rošo užpildymo faktoriaus vertės 0.45 ir 0.06; temperatūros - pirminės 4500 K ir antrinės 8000 K. Parametrai su paklaidų vertėmis pateikti 5-oje ir 6-oje lentelėse. Šios sistemos žvaigždžių padėtis HR diagramoje pavaizduota 32 pav. žvaigždžių pora pavaizduotos mėlyna spalva. Pagal padėtį HR diagramoje šią sistemą turėtų sudaryti raudonosios milžinės ir pagrindinės sekos žvaigždžių pora.

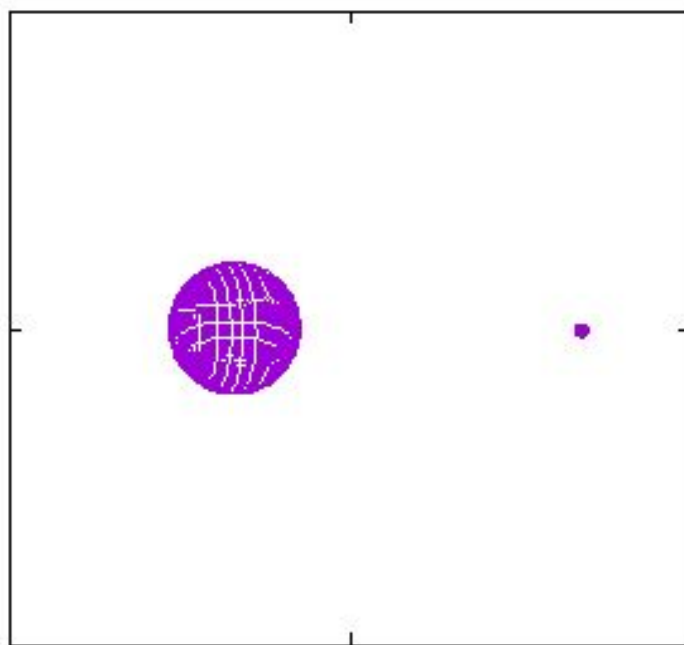
Sistemos modeliui patikslinti reikalingi papildomi spektroskopiniai stebėjimai, pagal kuriuos įvertintume žvaigždžių radialinius greičius, sistemos komponentų masių santykį. Papildomi spektroskopiniai stebėjimai galėtų padėti tiksliau įvertinti komponentų temperatūras, logg, cheminę sudėtį bei kitus parametrus. Papildomi stebėjimai su Johnson-Cousins arba Vilniaus fotometriniu sistema galėtų padėti nustatyti pirminės žvaigždės temperatūrą.



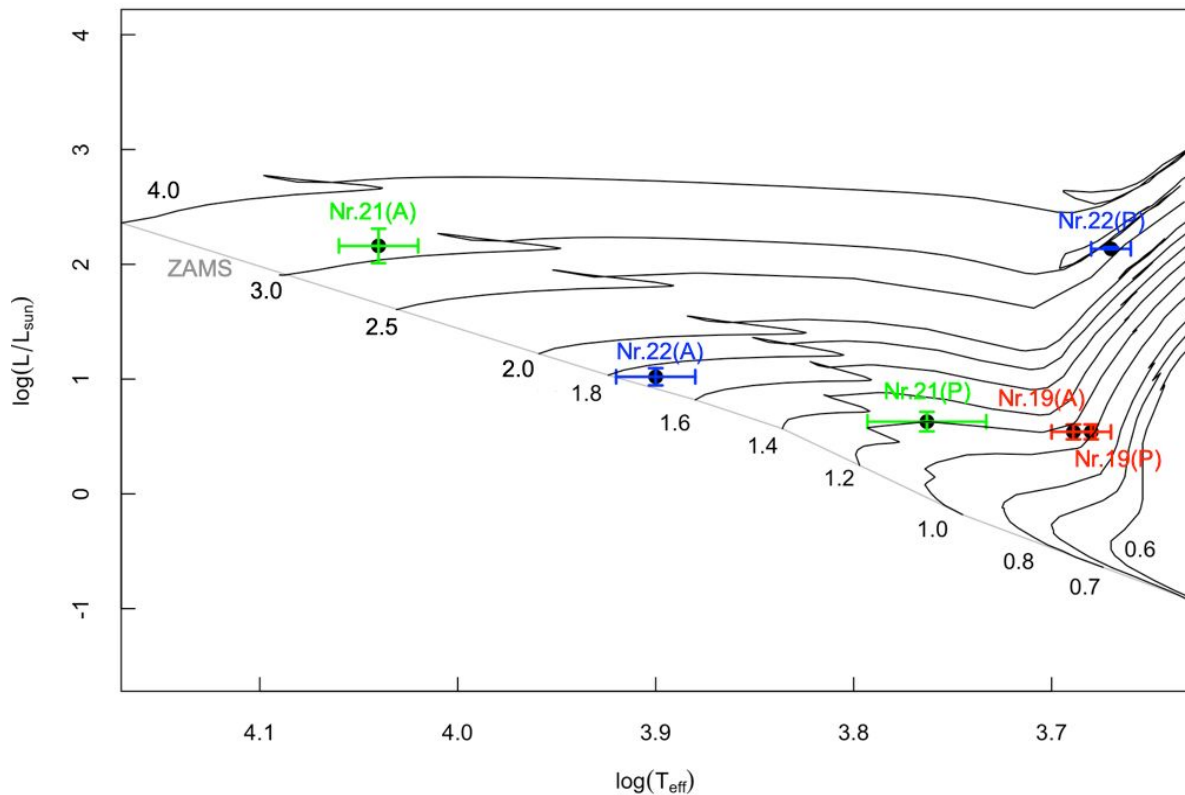
29 pav. 095508+763035/Nr.22 žvaigždės fazės diagrama apskaičiuota naudojant periodo vertę 2.252 d. Užtemdomos dvinarės stebėjimų taškai (žali kryžiukai) ir geriausiai tinkančio modelio (violetinė kreivė) šviesos kreivės.



30 pav. Žvaigždžių sistemos 23510987+78232819/Nr.19, ekvopotencialinių paviršių kontūras. Žydras kontūras - žvaigždžių kontūras, L1 - pirmasis Lagranžo taškas, tamsus mėlynas kontūras Rošo ertmė. Kairėje pavaizduota pirminė žvaigždė, dešinėje - antrinė.



31 pav. Žvaigždžių sistemos 095508+763035/Nr.22 3D modelis. Kairėje pavaizduota pirminė žvaigždė, dešinėje - antrinė.



32 pav. Dvinarių žvaigždžių kandidačių atskirų komponentų padėtis HR diagramoje. Naudoti “Padova 2” evoliuciniai trejai skirtingos masės žvaigždėms ($0.6 M_{\odot}$, $0.7 M_{\odot}$, $0.8 M_{\odot}$, $1.00 M_{\odot}$, $1.2 M_{\odot}$, $1.4 M_{\odot}$, $1.6 M_{\odot}$, $1.8 M_{\odot}$, $2 M_{\odot}$, $2.5 M_{\odot}$). ZAMS linija - nulinio amžiaus pagrindinė seka. Raudona spalva pavaizduota 23510987+78232819/Nr.19 kontaktinės dvinarės pora. Mėlyna spalva pavaizduota dvinarė sistema 095508+763035/Nr.22. Žalia spalva pavaizduota dvinarė sistema 21350118+75 082260/Nr.21.

3.4.5. Užtemdoma dvinarė 21350118+75 082260/Nr.21

Užtemdoma dvinarė TYC 4599-2284-1 (šiam darbe Nr.21) klasifikuota kaip EB tipo užtemdoma dvinarė, kataloge *The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars* (Høg *et al.* 2000). Šios žvaigždės periodas yra žinomas ir lygus 0.927033 d. (Høg *et al.* 2000), tačiau daugiau informacijos apie šią sistemą nėra. Šiame darbe buvo patikslinta periodo vertė. Pagal fazės diagramą (33 pav.) ir stebėtą šviesos kreivę buvo nustatytas orbitinis periodas, kuris lygus 0.927025 d.

Žvaigždžių sistema buvo stebėta SPFOT projekte papildomame lauke. Ši užtemdoma dvinarė pagal šviesos kreivę klasifikuojama kaip EB tipo, nes tarp užtemimų šviesos kreivė yra išlinkusi. Pagal šio darbo skyriuje 2.3. aprašytą metodiką atskiriems sistemos komponentams buvo apskaičiuoti šviesiai. Pirminės žvaigždės šviesis lygus $144.54 L_{\odot}$,

antrinės žvaigždės lygus $4.16 L_{\odot}$. Šie šviesiai suskaičiuoti darant prielaidą, kad antrinė žvaigždė yra pilnai užtemdoma pirminio užtemimo metu, todėl tikros šviesio vertės gali būti ir kitokios.

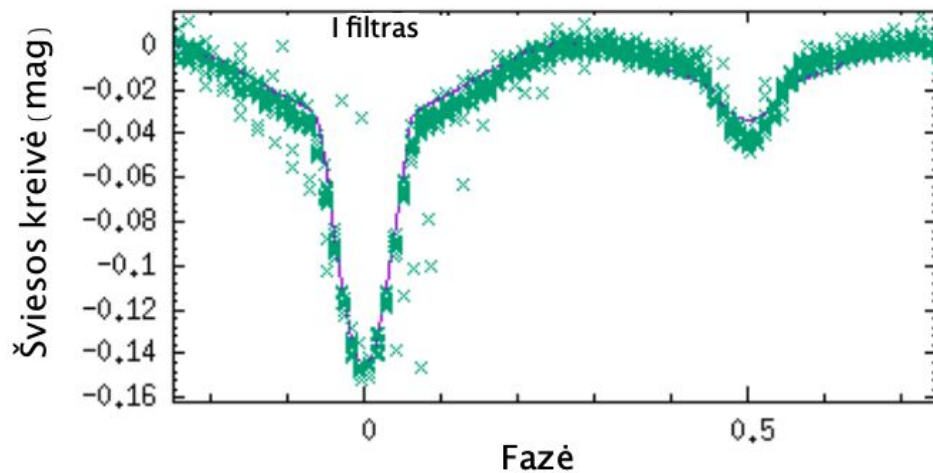
Pasinaudojus *Nightfall* programa, buvo atrastas geriausiai šviesos kreivę atitinkantis modelis (33 pav.). Nustatyti parametrai pirminei ir antrinei žvaigždei: masių santykis lygus 3; pirminės ir antrinės žvaigždės Rošo užpildymo faktoriaus vertės 0.917 ir 0.67; temperatūros - pirminės 5800 K ir antrinės 13000 K. Parametrai pateikti 5-oje ir 6-oje lentelėse.

Pagal padėtį HR diagramoje (32 pav.) ir nustatytus parametrus matosi, kad tai vėsios mažos masės raudonosios milžinės ir karštos didesnės masės pagrindinės sekos žvaigždės pora. Tai nėra tipinė žvaigždžių pora, tačiau būtent tokia pora gali susiformuoti dviejų pagrindinės sekos žvaigždžių poroje evoliucijos eigoje vykstant intensyviai medžiagos persiskirstymui tarp žvaigždžių. Šiuo metu esanti mažesnės masės evoliucionavusi pirminė žvaigždė evoliucijos pradžioje buvo pagrindinės sekos žvaigždė su didesne mase nei jos kompanionė, kuri dabar yra antrinė. Dėl šios priežasties pirminė žvaigždė evoliucionavo greičiau už antrinę pereidama į raudonųjų milžinių seką. Raudonosios milžinės evoliucijos stadijoje ji tiek išsipūtė, kad užpildė Rošo ertmę, o jos išorinių sluoksnių medžiaga per L1 tašką ėmė nutekėti į jos kompanionę (antrinę žvaigždę). Dėl to antrinės žvaigždės masė ir temperatūra smarkiai padidėjo, o pirminė žvaigždė pavirto evoliucionavusia mažos masės raudonąja žvaigžde. Tokios sistemos pavyzdys galėtų būti β Per žvaigždžių sistema. Nors žinome, kad tai ne dvinarė, o trinarė žvaigždžių sistema, tačiau kaip dvinarė sistema yra nagrinėjama mažo periodo pora, kurią sudaro pagrindinės sekos B8V spektrinio tipo žvaigždė ir raudonoji milžinė K2IV. Ši sistema yra pusiau atskirta, tai reiškia, kad tik raudonoji milžinė yra užpildžiusi Rošo ertmę ir perduoda medžiagą pagrindinės sekos žvaigždei, aplink kurią yra susiformavęs akrecinis diskas (Percy 2007).

Dvinarės sistemos 21350118+75082260/Nr.21 stebėtos šviesos kreivės forma, ypač tarpas tarp užtemimų, yra būdingas dvinarėms sistemoms, kurias sudaro baltosios nykštukės su raudonąja milžine poros. Tačiau šį variantą atmetėme, nes geriausiai stebėjimo duomenis atitinkantys modeliai davė komponentų masių santykius ir žvaigždžių dydžius, kurie neatitinka realiai galinčių egzistuoti žvaigždžių porų.

Sistemos modelį patikslinti būtų galima pasinaudojus papildomais spektroskopiniais stebėjimais, pagal kuriuos įvertintume žvaigždžių radialinius greičius, komponentų masių santykį, šviesį, temperatūrą, logg bei cheminių elementų gausas. Taip pat tokio tipo sistemai

reikalinga atlikti modeliavimą su kitomis programomis (*PHOEBE*⁵ ar *Eclipsing Light Curve*⁶), kuriose yra galimybė modeliuoti pusiau atskiras sistemas, kurios vienas iš komponentų yra užpildęs Rošo ertmę.



33 pav. Dvinarės 21350118+75082260/Nr.21 fazės diagrama apskaičiuota naudojant periodo vertę 0.927025 d., bei geriausiai atitinkantis stebėtą šviesos kreivę modelis. Žali kryžiuokai - stebėjimų taškai, violetinė kreivė - sintetinė šviesos kreivė suskaičiuota pagal geriausiai tinkantį modelį.

⁵ <http://phoebe-project.org/>

⁶ Orosz, J. A., ir Hauschildt, P. H. 2000, *A&A*, 364, 265

IŠVADOS

1. Iš 13367 žvaigždžių atrinkta dvidešimt kintančių žvaigždžių kandidačių. Taip pat papildomai į tyrimus įtraukėme kituose projekto *Spektroskopinė ir fotometrinė šiaurinio dangaus apžvalga* (angl. *Spectroscopic and Photometric Survey of the Northern Sky*. SPFOT) laukuose stebėtas dvi užtemdomas dvinarės žvaigždės, kurios nebuvo detaliau ištyrinėtos anksčiau.
2. Nustatytos naujai atrastoms kandidatėms šviesio kitimo amplitudės, periodiškumas, atlikta preliminari kandidačių klasifikacija. Atrastos trys užtemdomos dvinarės, viena δ Scuti žvaigždė, šešios lėtai kintančios žvaigždės, trys trumpaperiodinės žvaigždės, šešios T-Tauri arba BY Draconis žvaigždės ir viena submilžinė arba raudonoji milžinė.
3. Atliktas preliminarus trijų užtemdomų dvinarių 23510987+78232819/Nr.19, 21350118+75082260/Nr.21, 095508+763035/Nr.22, modeliavimas įvertinant sistemas sudarančių komponentų tipus ir preliminarias jų fizikines charakteristikas.
4. Pateiktos rekomendacijos:
 - Ilgiau stebėti šešias lėtai kintančias žvaigždės, kad būtų galima patvirtinti jų kintamumą ir tiksliau įvertinti periodiškumą.
 - Dviems trumpaperiodinėms žvaigždėms rekomenduojama atlikti papildomus spektroskopinius stebėjimus arba fotometrinius stebėjimus su Vilniaus fotometriniu sistema, nes nėra žinoma efektinė temperatūra (Nr.2 ir Nr.6).
 - T-Tauri arba BY Draconis žvaigždėms rekomenduojama atlikti papildomus spektroskopinius stebėjimus arba fotometrinius stebėjimus su Vilniaus fotometriniu sistema jų kintamumo tipo patikslinimui.
 - Užtemdomoms dvinarėms rekomenduojama atlikti spektroskopinius stebėjimus radialinių greičių kreivėms gauti, orbitiniams periodams patikslinti, žvaigždžių parametrams apskaičiuoti bei nustatytiems modelių parametrams patikslinti.

SUMMARY

Rūta Urbonavičiūtė

SEARCH FOR VARIABLE STARS IN THE NORTHERN SKY AND ANALYSIS OF PHOTOMETRIC TIME SERIES

Variable stars have been recognized to offer crucial insights into stellar structure and evolution. The aim of this work is to find variable stars in five fields, of which the central stars are NSV26138, NSV0255, NSV13673, NSV15053, NSV25919. To achieve this we used *Period04* and *Muniwin, Nightfall* computer programs. We found twenty previously unknown candidates of variable: EW, two EA, δ Scuti, subgiant or red giant, six T-tauri or BY Draconis, seven slow variable and two short-periodic variable stars. We determined amplitudes, periods, phases of their brightness variations and possible variability types. For eclipsing binaries we determined luminosities, temperatures, mass ratios and their types. Additionally we carried out analysis for two eclipsing binary stars from project *Spectroscopic and Photometric Survey of the Northern Sky*.

Also we present recommendations for further investigation: all long period variables need more photometric observations for longer periods of time to prove their variability, to determine more precisely variability parameters and to conclude their type of variability. We recommend spectroscopic or multicolour photometric observations for T-Tauri or BY Draconis candidates in order to determine their real type, and spectroscopic observations for eclipsing binaries in order to determine radial velocities of components, orbital periods and masses. For two unknown type short period variables we also recommend spectroscopic observations in order to determine their temperatures and luminosity.

LITERATŪRA

1. Aerts C., Eyser L., Kestens E., 1998, The discovery of new γ Doradus stars from the HIPPARCOS mission. *Astronomy & Astrophysics*, 337, 790
2. Beccari, Giacomo, & Boffin, Henri M. J., 2019. The Impact of Binary Stars on Stellar Evolution. (*Cambridge University Press*)
3. Belczynski, K., Kalogera, V., and Bulik, T., 2002. A Comprehensive Study of Binary Compact Objects as Gravitational Wave Sources: Evolutionary Channels, Rates, and Physical Properties. *ApJ*, 572, 407
4. Breger, M., Stich, J., Garrido, R., et al. 1993, Nonradial Pulsation of the Delta-Scuti Star Bu-Candri in the Praesepe Cluster. *Astronomy & Astrophysics*, 271, 482
5. Catelan, M., & Smith, H. A. 2015, Pulsating Stars (*Wiley-VCH*)
6. Clark, P. C., Glover, S. C. O., Smith, R. J., et al., 2011. The Formation and Fragmentation of Disks around Primordial Protostars. *Science*, 331, 1040
7. Cousins A.W.J., Warren P. R. 1963, Variable Stars Observed During the Cape Bright Star Programme. *MNRAS*, 22, 65
8. Davies, M. B., 2002, Stellar Exotica Produced from Stellar Encounters. *Astronomical Society of the Pacific*, 215
9. Feinstein A. D., Montet B. T., Foreman-Mackey D., Bedell M. E., Saunders N., Bean J. L., Christiansen J.L. et al., 2019, eleanor: An open-source tool for extracting light curves from the TESS Full-Frame Images. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*
10. Gaia Collaboration et al. 2016, The Gaia mission. *Astronomy & Astrophysics*, 595, A1
11. Gaia Collaboration et al. 2018, Gaia Data Release 2. *Astronomy & Astrophysics*, 616, A1
12. Goupil M.-J., Dupret M. A., Samadi R., Boehm T., Alecian E., Suarez J. C., Lebreton Y., Catala C., 2005, Asteroseismology of δ Scuti Stars: Problems and Prospects. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 26, 249
13. Hilditch R.W, 2001, Close Binary Stars (*Cambridge University Press*)
14. Hroch, F.: 2014, Munipack: General Astronomical Image Processing Software. *Astrophysics Source Code Library*. 1402.006
15. Høg E., Fabricius C., Makarov V. V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., Schwekendiek P., Wicenec A., 2000, The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. *Astronomy and Astrophysics*, 355, 27
16. Jayasinghe T., Stanek K. Z., Kochanek C. S., Shappee B. J., Pinsonneault M. H., Holoiien T. W. -S., Thompson Todd A., Pawlak Prieto J. L. , Pejcha O., Pojmanski G. , Otero S., Hurst N., Will D. 2019, The ASAS-SN Catalog of Variable Stars VII: Contact Binaries are Different Above and Below the Kraft Break. *Pateikta MNRAS*
17. Kaye A.,B, Handler G., Krisciunas K., Poretti E., Zerbi F. M, 1999, γ Doradus Stars: Defining a New Class of Pulsating Variables. *The Astronomical Society of the Pacific*, 111, 471

18. Leavitt, Henrietta S., Pickering, Edward C., 1912, Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. *Harvard College Observatory Circular*, 173, 1
19. Lenz, P., Breger, M., 2005, *Communications in Asteroseismology* 146, 53
20. Matijevič, G., Prša, A., Orosz, J. A., et al. 2012. Kepler Eclipsing Binary Stars. III. Classification of Kepler Eclipsing Binary Light Curves with Locally Linear Embedding. *AJ*, 143, 123
21. Mikolaitis Š., Tautvaišienė G., Drazdauskas A., Minkevičiūtė R., Klebonas L., Bagdonas V., Pakšienė E., Janulis R., 2019, Spectroscopy of Dwarf Stars Around the North Celestial Pole. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130, 989
22. Percy J. R., Esteves S., Glasheen J., et al. Lin A., Long J., Mashintsova M., Terziev E., Wu S., 2010, Photometric Variability Properties of 21 T Tauri and Related Stars from AA VSO Visual Observations. *JAAVSO*, 38
23. Percy John R. 2007, Understanding variable stars (*Cambridge University Press*)
24. Petersen J.O., Christensen-Dalsgaard J., 1999, Pulsation models of δ Scuti variables II. δ Scuti stars as precise distance indicators. *Astronomy & Astrophysics*, 352, 547
25. Ricker, George R., Winn, Joshua N., Vanderspek, Roland, et al., 2015. TRANSITING EXOPLANET SURVEY SATELLITE (TESS). *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 1
26. Sánchez Arias J. P., Córscico A. H. , L. G. Althaus L. G., 2017, Asteroseismology of hybrid δ Scuti- γ Doradus pulsating stars. *Astronomy & Astrophysics*, A 597, A29
27. Stetson P. B., 1987, DAOPHOT: A COMPUTER PROGRAM FOR CROWDED-FIELD STELLAR PHOTOMETRY. *Astronomical Society of the Pacific*, 99, 191
28. Wichmann, R. 2011, Nightfall: Animated Views of Eclipsing Binary Stars. *Astrophysics Source Code Library*, ascl:1106.016
29. Xiong D. R., Deng L. , Zhang C., Wang K., 2016, Turbulent convection and pulsation stability of stars – II. Theoretical instability strip for δ Scuti and γ Doradus stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 457, 3
30. Yildiz M., 2014, Origin of W UMa-type contact binaries - age and orbital evolution. *MNRAS*, 437, 1
31. Yildiz M., Dogan T., 2012. On the origin of W UMa type contact binaries – a new method for computation of initial masses. *MNRAS* 430, 2029