

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Teorinės fizikos ir astronomijos institutas

Tomas Narbuntas

**ŽVAIGŽDĖS SU PATVIRTINTOMIS EGZOPLANETOMIS: ŽVAIGŽDĖS-PLANETOS
RYŠYS**

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Teorinės fizikos ir astrofizikos studijų programa

Studentas

Tomas Narbuntas

Leista ginti

2023-05-24

Darbo vadovas

doc. dr. Edita Stonkutė

Instituto direktorius

prof. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2023

Turinys

Įvadas	3
1 Literatūros apžvalga	5
2 Tyrimo metodika	10
2.1 Stebėjimų duomenys ir metodai	10
2.1.1 Optiniai spektrai	10
2.1.2 Programiniai paketai	11
2.2 Žvaigždžių cheminės sudėties analizė	12
2.2.1 Pagrindiniai žvaigždžių atmosferų parametrai	13
2.2.2 Sintetiniai spektrai	15
2.2.3 Paklaidų skaičiavimas	16
2.3 Žvaigždžių kinematiniai parametrai	16
2.4 Žvaigždžių amžiaus ir masės nustatymas	17
3 Rezultatai	19
3.1 Žvaigždžių su planetomis cheminė analizė	19
3.1.1 Cheminių elementų gausų ir metalingumo ryšys žvaigždėse su planetomis .	19
3.2 Žvaigždžių su planetomis kinematiniai ir amžiaus parametrai	23
3.2.1 Kinematikos, amžiaus ir cheminių elementų gausų koreliacija	25
3.2.2 Žvaigždžių priskyrimo į Galaktikos diskus analizė	28
3.2.3 Kosminiai laikrodžiai	30
3.3 Žvaigždžių ir planetų ryšys	32
3.3.1 Elementų gausų ir jų santykių priklausomybė nuo planetų masės	32
3.3.2 Planetos, kinematika, amžiai	34
Išvados	39
Summary	40
Priedas	41
Literatūra	53

Įvadas

1992 metais, stebėjimais iš Žemės, buvo patvirtinta pirmoji planeta už Saulės sistemos ribų [1]. Nuo to laiko astronomijos tyrimai planetų srityje sparčiai, nepertraukiamai tobulėja ir jau yra patvirtinta daugiau nei 5330 planetų už Saulės sistemos ribų [2]. Turint pakankamą planetų imtį, galima atlikti išsamesnius statistinius tyrimus, kuriuose mokslininkai planetas nagrinėja kaip sąlyginai nepriklausomus kūnus, remiantis jų masėmis, spinduliais, orbitų periodais, ekscentricitetais ir kitais rodikliais. Iš didelio duomenų rinkinio randami dažniausiai ar rečiausiai pasikartojantys atvejai, tiriamas planetų multiplietiškumas prie vienos žvaigždės bei skirtingų planetų poveikis vienos kitoms vienoje sistemoje [3]. Be to, verta atsižvelgti į tai, kad skirtingi planetų aptikimo metodai yra optimalūs skirtingų dydžių planetoms, todėl skirtingais metodais aptiktų planetų imtys statistiškai gali gana stipriai skirtis viena nuo kitos. Nors kol kas planetų tiesiogiai nagrinėti yra praktiškai neįmanoma, daugiausia planetų analizuojama per žvaigždžių ir planetų ryšį. Tokiu būdu atliekama daug įvairių planetų tyrimų, pvz.: M. Hill ir kiti 2022 metais atliko gyvybės zonos planetų tyrimą, remdamiesi žvaigždžių ir planetų savybėmis [4], o R. Spaargaren ir kiti 2022 metais, remdamiesi žvaigždžių elementų gausomis, nagrinėjo Žemės tipo egzoplanetų sandarą [5].

Dauguma egzoplanetų atrastos naudojant Tranzitų ir Radialinio greičio metodus. Didžioji dalis iš jų buvo aptiktos naudojant Kepler kosminį teleskopą. Taip pat daugiau nei 330 patvirtintų planetų aptikta TESS misijos teleskopu, o virš 6580 planetų yra TESS misijos kandidačių sąrašė [6].

Dabar, kai James Webb kosminis teleskopas jau skrenda L2 orbitoje, mokslininkai yra įgalinti atlikti naujos kartos kosminius stebėjimus ir analizuoti dar daug nepažintų planetų. Galima teigti, kad astronomijos mokslas nuolat tobulėja, vertas didelio dėmesio bei skatina inžinerinį ir mokslinį tobulėjimą.

Besivystančios technologijos ir vis geresnė tyrimų kokybė bei patikimumas didina motyvaciją atlikti vis detalesnius mokslinius tyrimus su vis tikslesniais duomenimis. Akivaizdu, kad norint geriau suprasti planetas, pirmiausia reikia kuo detaliau ištirti žvaigždes. Šiame darbe praplečiama Magistrantūros studijų metu tirtų žvaigždžių su planetomis imtis iki 49 žvaigždžių, nagrinejamos jų cheminių elementų (Fe, C, N, O, Mg, Si, S, Y, Eu) gausos, amžiaus ir kinematinės savybės bei jų ryšys su planetomis.

Darbo tikslas: atlikti reprezentatyvios nykštukių ir milžinių Saulės aplinkos žvaigždžių su planetomis tyrimą per C, N, O, alfa bei sunkiųjų cheminių elementų gausų, kinematinį ir amžiaus parametrų ryšių analizę. Siekiant įgyvendinti šį tikslą, keliami uždaviniai:

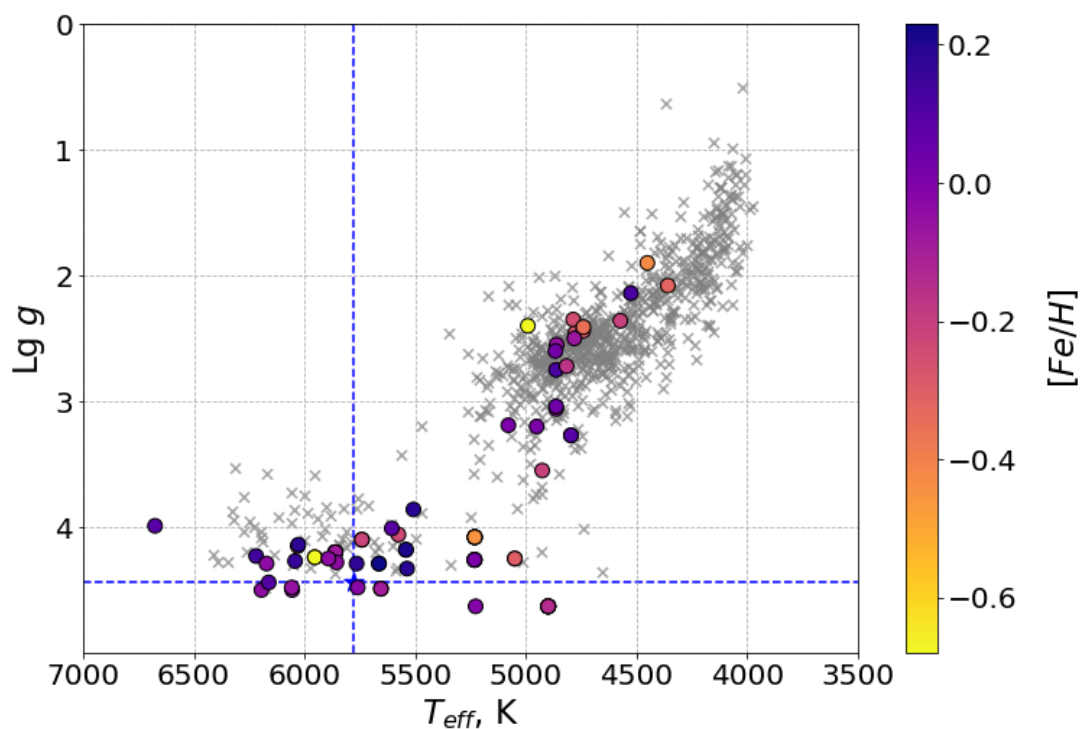
1. Susipažinti su aktualiomis mokslinėmis publikacijomis, aprašančiomis žvaigždžių cheminės sudėties, kinematikos bei amžiaus ryšius;
2. Ištirti 24 žvaigždes, nustatyti jų C, N, O, Mg, Si gausas ir pridėti jas prie Mokslinis darbas I, II ir III [7] [8] [9] tirtos imties, visoms 49 žvaigždėms nustatyti S, Y, Eu gausas.
3. Ištirti žvaigždžių kinematinį, amžiaus parametrų ir cheminių elementų gausų ryšį (paskirstyti žvaigždes į Galaktikos diskus, analizuoti kosminių laikrodžių reiškinių;

4. Rasti skirtumus tarp skirtingų dydžių planetas turinčių žvaigždžių, remiantis jų cheminių elementų gausomis, kinematiniais ir amžiaus parametrais.
5. Palyginti gautus rezultatus su mokslinėje literatūroje publikuotomis vertėmis.

Dalis šio tyrimo rezultatų pristatyti:

1. Tarptautinė konferencija "Planet-ESLAB-2023: understanding planets in the solar system and beyond". Pranešimo pavadinimas: "*High-resolution spectroscopic follow-up of known exoplanet-hosts and candidates: star-planet connection*". Kovo 20–24 d., 2023 m. ESA ESTEC, Olandija. Žodinis pranešimas (pristatė darbo vadovė).
2. Tarptautinė konferencija "Europlanet Telescope Network Science Workshop". Pranešimo pavadinimas: "*High-resolution spectroscopic follow-up of exoplanet-hosts using Europlanet Telescope Network facility*". Birželio 19–21 d., 2023 m. Bratislava, Slovakija. Žodinis pranešimas (pristato darbo vadovė).

1 Literatūros apžvalga



1 pav. Kiel diagrama. Spalvotais taškais pažymėtos šiame darbe nagrinėtos žvaigždės. "x" pažymėtos Tautvaišienės ir kt. 2022 darbe [10] nagrinėtos TESS programos žvaigždės be planetų palyginimui. Mėlyna punktyrine linija pažymėtos Saulės vertės.

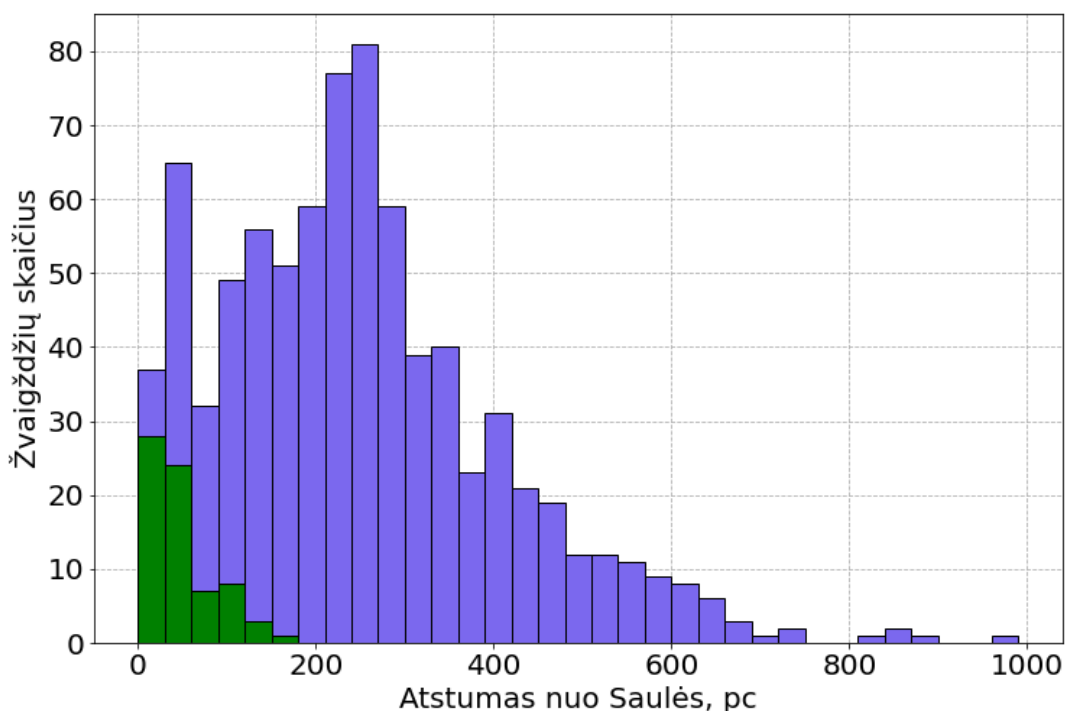
Šiame darbe buvo nagrinėtos 49 Saulės aplinkos žvaigždės su planetomis, o jų atmosferinių parametrų - efektinės temperatūros T_{eff} ir paviršiaus gravitacijos $\lg g$ - vertės pavaizduotos paveiksle nr. 1. Šio paveikslo taškų spalvos rodo žvaigždės geležies gausą. Darbe nagrinėtų žvaigždžių parametrai bus lyginami su Tautvaišienės ir kitų autorių darbe [10] nagrinėtais žvaigždžių parametrais, kurie buvo nustatyti taikant tuos pačius metodus. Kai kuriems duomenų palyginimams, taip pat naudoju ir Tautvaišienės ir kt. 2021 metų darbą [11] ar Mikolaičio ir kt. 2019 metų darbą [12].

Paveiksle nr. 1 matyti, kad žvaigždžių efektinė temperatūra pasiskirsto plačiame ruože tarp 4000 ir 7000 Kelvinų, o paviršiaus gravitacijos pagreitis svyruoja nuo 1 iki 4,5. Geležies gausa yra nuo $-0,6$ iki $0,2$, o vidurkis ir standartinis nuokrypis yra atitinkamai lygūs $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle = -0,15 \pm 0,22$, taigi tiriamų žvaigždžių metalingumas vidutiniškai yra mažesnis nei Saulės. O parametrų erdvė yra gana reprezentatyvi.

Norint geriau suprasti šių žvaigždžių imtį, paveikslai nr. 2 ir 3 palygina šio darbo tiriamų žvaigždžių imtį su kitomis žvaigždėmis, neturinčiomis patvirtintų planetų. Paveiksle nr. 2 pateikta histograma, kurioje žalia spalva pažymėtos šio darbo imties žvaigždės, o purpurine spalva pažymėtos Tautvaišienės ir kitų 2022 metais tirtos žvaigždės [10]. Paveiksle nr. 3 raudona spalva pažymėti taškai rodo šiame darbe tiriamų žvaigždžių parametrus, o 'x' žymi Tautvaišienės ir kt. [10] tirtas žvaigždes. Reikia pabrėžti, kad netgi naudojant tuos pačius metodus, gali būti skirtumų dėl

skirtingo žvaigždžių pasiskirstymo Galaktikoje. Šiame darbe tirama žvaigždžių imtis gerai reprezentuoja Saulei artimos aplinkos žvaigždes - tolygiai padengia 4000 - 7000 Kelvinų temperatūros žvaigždžių, nutolusių nuo Saulės iki 200 parsekų, režį, o Tautvaišienės ir kt. darbe daugiau susikoncentruota į šaltesnes Saulės aplinkos žvaigždes. Nepaisant to, yra ir karštesnių palyginimo žvaigždžių, tačiau jų kiekis, lyginant su šaltomis, gerokai mažesnis.

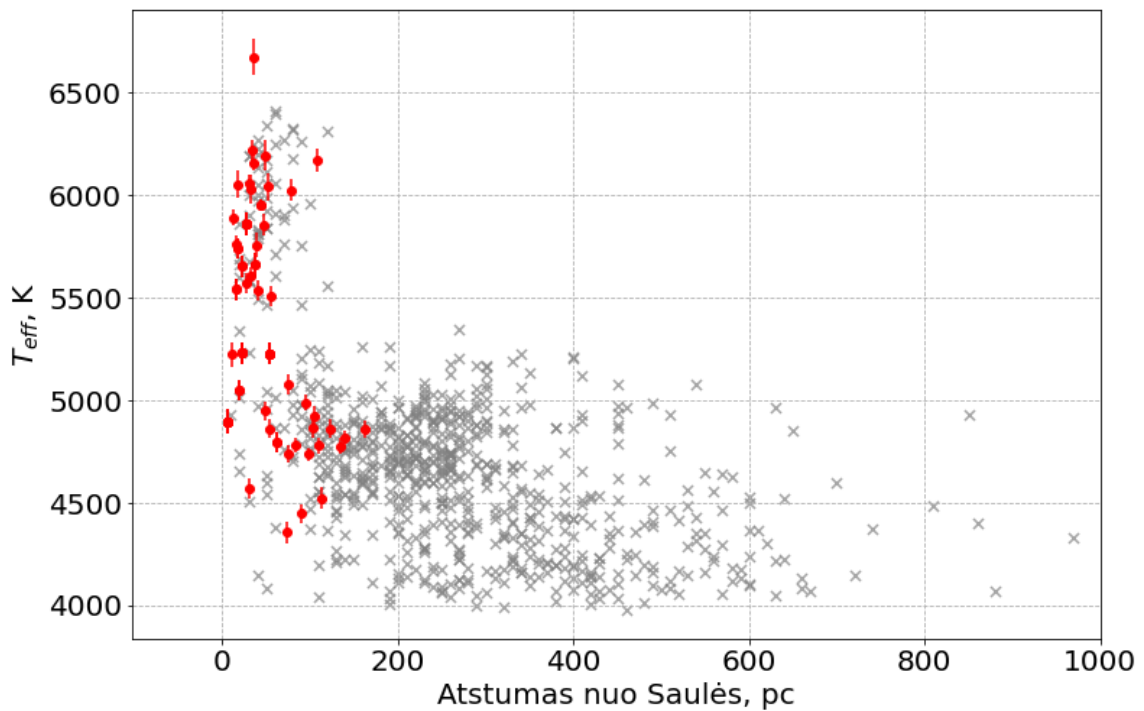
Tautvaišienės darbe nagrinėjamos žvaigždės nuo Saulės vidutiniškai nutolę per 266 Parsekus, o šiame darbe nagrinėjamos žvaigždės - per 58 Parsekus. Nors skirtumas nėra itin didelis, vis tiek yra vertas paminėjimo ir gali minimaliai nulemti skirtumus tarp rezultatų.



2 pav. Žvaigždžių atstumo nuo Saulės pasiskirstymo histograma. Žalia spalva pažymėtos tiriamos žvaigždės, o purpurine - Tautvaišienės ir kt. 2022 m. darbe nagrinėtos žvaigždės. [10]

Analizuojant Saulės aplinkos žvaigždes su planetomis iš amžiaus, kinematinės ar iš cheminės pusės galima pastebėti įvairių tendencijų, kurios atsako į mokslininkams kylančius klausimus. Žinoma, didžiulis kiekis tendencijų jau yra patvirtintos ir aprašytos moksliniuose darbuose. Pavyzdžiui, S. Buder ir kt. 2019 metų darbe [13], nagrinėdami žvaigždžių cheminių elementų gausas, pastebėjo priklausomybę tarp žvaigždžių amžiaus ir alfa elementų gausos. Didelis kiekis publikacijų kartoja šią tendenciją, kuri rodo, jog anksčiau Galaktikoje buvo dažnesnės antrojo tipo supernovos, kurioms sprogas tarpžvaigždinė erdvė gausiai papildoma alfa elementais ir tik vėliau, padažnėjus pirmojo tipo supernovoms, kurios susiformuoja per ilgesnį laiką, tarpžvaigždinė erdvė buvo sotinama geležimi. Tad, kaip ir teigiama minėtose mokslinėse publikacijose, $[\alpha/Fe]$ santykis jaunesnėse žvaigždėse yra mažesnis, o senesnėse - didesnis.

Taip pat S. Buder ir kiti savo 2019 metų darbe pastebėjo, jog Saulės aplinkos žvaigždės su labiau ekscentriškais orbitomis ir didesne nei palyginamų žvaigždžių imties alfa elementų gau-



3 pav. Žvaigždžių efektinės temperatūros priklausomybė nuo atstumo nuo Saulės. Raudoni taškai žymi darbe nagrinėjamas žvaigždes, o "x" pažymėtos Tautvaišienės ir kt. 2022 darbe [10] nagrinėtos TESS programos žvaigždės be planetų.

sa, tikriausiai yra senesnės, dabartinėje orbitoje atsirado dėl radialinės migracijos ir turi mažesni vidutinį orbitų spindulį R_{mean} .

Žvaigždžių skirstymas pagal jų lokaciją taip pat sulaukia nemažo susidomėjimo moksliniuose straipsniuose. Žvaigždės skirstomos į Galaktikos diskus ar tiriama jų radialinė migracija. Šiuos klausimus keliais metodais nagrinėjo L. Margini ir kiti 2022 metų darbe [14]: pagal vidutinio orbitos spindulio bei atstumo nuo Galaktikos centro skirtumą numatė radialinę migraciją, o pagal savituosius greičius žvaigždės skirstė į storojo ir plonojo Galaktikos disko populiacijas. Jei R_{mean} mažesnis už atstumą iki Galaktikos centro, laikoma, jog žvaigždė migravo iš išorinio Galaktikos disko ir atvirksčiai. Žinoma, dėl apskritiminės orbitos gali būti neaišku, kuriai grupei priskirti žvaigždę.

Įdomu, jog Saulė yra vidutiniškai metalingesnė už savo aplinkos žvaigždes. Tai reiškia, kad ji galėjo susiformuoti kitur, tad buvo pasiūlyta radialinės žvaigždžių migracijos koncepcija. Radialinė migracija prisatatyta Sellwood ir Binney 2002 darbe [15] bei vis dar yra aptarinėjama moksliniuose darbuose. Šio reiškinio metu dėl susiliejiimo (angl. blurring) ir suplakimo (angl. churning) kinta žvaigždės padėtis Galaktikoje. Tokiu būdu žvaigždžių pozicija Galaktikoje gali pakisti dideliais radialiniais atstumais.

Susiliejiimo proceso metu dėl žvaigždžių sąveikos su kitais Galaktikos objektais (pvz. spiralinėmis vijomis, Galaktikos skerse), jos pakeičia savo orbitą – didėja orbitos ekscentricitetas. Kita vertus, suplakimo metu žvaigždė sąveikauja su kitais masyviais kūnais (pvz. labai didelis mole-

kuliniais debesimis) ir taip keičia savo poziciją, tačiau orbitos ekscentricitetas nekinta. Priešingai nei suliejimas, dėl suplakimo gali pakisti orbitos kampinis momentas nepakintant ekscentricitetui. Galima sakyti, jog suplakimo metu ištrinama orbitos praeities kinematinė istorija, tad integruojant žvaigždės kinematinčius parametrus neįmanoma išsiaiškinti žvaigždės gimimo vietos Galaktikoje [16].

Taip pat kaikuriuose darbuose yra priimta, kad žvaigždės su savituoju greičiu (dedamųjų U, V ir W vektorine suma), didesniu nei 70 km/s ir mažesniu nei 200 km/s, tikėtina, priklauso storajam Galaktikos diskui, o žvaigždės, kurių savitasis greitis yra mažiau nei 50 km/s priskiriamos prie plonojo disko. Žvaigždės, kurių savitasis greitis didesnis nei 200 km/s, laikomos halo žvaigždėmis. Šį klausimą taip pat nagrinėjo AMBRE projekto komanda J. Perdigon ir kitų 2021 metų darbe [17] iš cheminės pusės bei lygino su kinematika. Šiame darbe mokslininkai parodė, jog į diskus žvaigždes galima skirstyti ir pagal $[\alpha/\text{Fe}]$ santykį bei atskirų alfa elementų gausas (pvz. $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ ar $[\text{S}/\text{Fe}]$). Žvaigždės, turinčios mažiau alfa elementų ir daugiau geležies, priskiriamos plonajam Galaktikos diskui, o nemetelingos žvaigždės su didele alfa elementų gausa priskiriamos storajam Galaktikos diskui.

Šiame darbe visoms tyrimo žvaigždėms matuotos sieros, itrio ir europio gausos, O 24-ioms naujoms žvaigždėms - ir C, N, O, Mg, Si. Visi elementai, lengvesni nei geležis yra gaunami žvaigždėse nukleosintezės metu. Tokie elementai, kaip magnis, silicis ir siera yra alfa elementai. Jie susiformuoja alfa proceso metu, kuris prasideda nuo helio atomo ir vyksta toliau prie atomo prijungiant helio atomą bei išspinduliuojant gama dalelę [18]. Šis procesas vyksta pačiose žvaigždėse.

Sunkieji elementai, tokie kaip itris ir europis pagaminami neutronų pagavimo reakcijų metu. Vykstant šioms atominėms reakcijoms cheminio elemento branduolys būna smūgiuojamas laisvais neutronais ir taip atsiranda sunkesni jonai. Po to sekančio beta skilimo metu susiformuoja sunkesnis cheminis elementas. Tokiomis reakcijomis pagaminami už geležį sunkesni cheminiai elementai [19]. Neutronų pagavimo reakcijos yra skirstomos į du pagrindinius procesus: s- ir r-procesai. Taip pat atskiriamas ir mažiau ištirtas i- procesas.

s-procesas yra lėtasis neutronų pagavimo reakcijos procesas, kurio pavadinimas kilo iš angliško žodžio *slow*. Šis procesas pagrinde vyksta asimptotinės šakos žvaigždėse (pagrindinė komponentė) bei didelės masės žvaigždėse (daugiau nei 8 Saulės masės - silpnoji komponentė). Pagrindinė sąlyga, apibūdinanti s-procesą ir atskirianti jį nuo r-proceso yra neutronų srautas. s-proceso reakcijų metu srautas yra maždaug $10^5 - 10^{11} n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Šio proceso metu neutronų pagavimai vyksta labai retai, tad beta skilimas spėja įvykti tarp dviejų pagavimų. Tuo tarpu r-procesas (angl. *rapid*) vyksta daug sparčiau branduoliui dažniau pagaunant neutronus dėl didelio jų tankio aplinkoje (maždaug $10^{24} n \cdot \text{cm}^{-3}$). r-procesas vyksta supernovų, dviejų neutroninių žvaigždžių ar juodosios skylės ir neutroninės žvaigždės susijungimo arba masyvių žvaigždžių kolapso metu [11] [20]. Abu aprašyti neutronų pagavimo procesų metu vyksta įvairių cheminių elementų gamyba, o s- ir r- procesų indėliai į kiekvieno elemento gamybą yra skirtingi. Yra keletas elementų, kurių gamyba išskirtinai didele dalimi vyksta tik s- (itris) ar r- (europis) procesų metu, tačiau šiuo metu moksliniai tyrimai tiksliai neparodo, kiek abu procesai prisideda prie tam tikrų elementų gamybos [11].

Turint nustatytas alfa bei neutronų pagavimo reakcijų (tiksliau, s-proceso) elementų gausas

galima pastebėti jų santykio priklausomybę nuo žvaigždės amžiaus. de Silva ir kiti 2012 metų studijoje parodė, jog $[Y/Mg]$ santykis aiškiai koreliuoja su žvaigždės amžiumi. Dėl skirtingose Galaktikos evoliucijos stadijose gausiau gaminamų s-proceso ar alfa elementų stebimas $[Y/Mg]$ mažėjimas didėjant žvaigždės amžiui [21]. Taip pat aktualu pastebėti, kad $[Y/Mg]$ priklausomybė nuo žvaigždės amžiaus turėtų skirtis tarp storjo ir plonojo disko žvaigždžių dėl skirtingų evoliucijos etapų.

2 Tyrimo metodika

2.1 Stebėjimų duomenys ir metodai

Šiame skyriuje aptariami darbe naudojami duomenys ir metodai. Atrinktų žvaigždžių su planetomis analizė pradėta nuo Molėtų observatorijoje surinktų spektrų su tikslu nustatyti pagrindinius žvaigždžių atmosferų parametrus. Šiame darbe naudojami ekvivalentinių pločių metodu mano moksliniame darbe I [7] nustatyti bei vadovės pateikti pagrindiniai žvaigždžių atmosferos parametrai. Cheminių elementų gausos nustatytos ekvivalentinių pločių bei spektrų sintezės metodais. Žvaigždžių kinematiniai parametrai nustatyti naudojant Galpy programinę įrangą su MWPotential2014 modeliu [22]. Amžių nustatymui naudotas UniDAM kodas [23].

Visi baigiamojo darbo duomenys buvo rinkti per visą Magistrantūros studijų laikotarpį. Šiame darbe pateikti nauji skaičiavimai yra kartu su mano Mokslinio darbo I [7], II [8] ir III [9] darbų rezultatais. Šiame darbe 24-ioms žvaigždėms nustačiau C, N, O, Mg, Si gausas, o visoms 49-ioms išmatavau S, Y ir Eu gausas. Ankstesniuose darbuose surinkti ir naudoti duomenys papildyti 24-iomis žvaigždėmis (su atmosferos parametrais, cheminių elementų gausomis bei kinematiniais ir amžiaus parametrais), o visoms 49 žvaigždėms apskaičiuotos sieros, itrio ir europio gausos.

Kaip jau minėjau šiame darbe nagrinėjamos 49 žvaigždės su planetomis. Žvaigždžių ir planetų sąrašas pateiktas Priede esančioje lentelėje nr. A1. Svarbu paminėti, jog kelios žvaigždės šiame darbe turi po daugiau nei vieną planetą:

- TYC4006-1866-1 turi 6 planetas, iš kurių 4 yra Žemės tipo, 1 – Neptūno tipo ir paskutinė dujų milžinė;
- TYC3888-1886-1 žvaigždė turi 5 planetas, iš kurių 4 yra Neptūno tipo, o viena – Žemės tipo;
- TYC4244-964-1 turi 5 planetas, iš kurių 3 yra Neptūno tipo, o 2 – dujų milžinės;
- TYC2099-2717-1 turi 4 planetas, iš kurių 2 yra Neptūno tipo, 1 – Žemės tipo ir 1 – dujų milžinė
- TYC4650-917-1 bei TYC1933-747-1 turi po dvi Neptūno tipo planetas;
- TYC2576-2228-1 bei TYC2153-2883-1 turi po vieną Neptūno tipo planetą ir vieną dujų milžinę;
- TYC2126-1196-1, TYC1761-192-1, TYC2595-1464-1 turi po dvi dujų milžines planetas.

2.1.1 Optiniai spektrai

Žvaigždžių spektroskopiniai stebėjimai atlikti su Vilniaus Universiteto Ešele Spektrografu, VUES [24], esančiu Molėtų astronomijos observatorijoje. VUES spektrografas yra prie $f/12$ 1.65 m skersmens Ritchey-Chretien teleskopo. Spektrografo, įrengto 2015 metais techninės specifikacijos pateiktos lentelėje nr. 1 .

1 lentelė. Vilniaus spektrografo (VUES) parametrai [24],

Parametras	Savybė
Fiksuojamų bangos ilgių sritis	400 – 880 nm
Spektrinė raiška	30000 / 45000 / 60000
Instrumentinis pralaidumas	25% ties 543 nm
Šviesolaidžio skersmens projekcijos kampinis dydis	2,5 arcsec

Spektrai atstebėti bei apdoroti Teorinės fizikos ir astronomijos instituto astronomų. VUES spektro ilgis yra 400 – 880 nm bangos ilgio intervale su R 36 000 skiriamąja geba. Tolimesni darbai atlikti gavus apdorotus spektrus.

2.1.2 Programiniai paketai

Darbai atlikti naudoti šie programiniai paketai:

1. DAOSPEC ir SPLAT-VO programos [25] [26]. Šios programos išmatuoja žvaigždžių ekvivalentinius pasirinktų cheminių elementų linijų pločius. Jos buvo naudotos antrojo pusmečio moksliniame darbe rankiniu būdu atliekant matavimus [8].
2. MOOG [27]. Programiniu paketu apskaičiuotos žvaigždės efektinės temperatūros, paviršiaus gravitacijos pagreičio, metalingumo bei mikroturbulencijos greičio vertės. Išvardinti atmosferos parametrai buvo keičiami iteraciniu priartėjimo metodu, taip randant T_{eff} , $\lg g$, v_t ir $[\text{Fe}/\text{H}]$ reikšmes. Darbas su MOOG buvo atliktas antrojo pusmečio moksliniame darbe [8].
3. TURBOSPECTRUM [28]. Ši programinė įranga buvo naudojama cheminių elementų gausų nustatymui sintetinių spektrų metodu. Mokslinis darbas II [8] pateikti rezultatai papildyti naujai surinktais duomenimis.
4. Galpy [22] programinis paketas su MWPotential2014 modeliu. Naudojantis šia Python biblioteka buvo apskaičiuoti žvaigždžių kinematiniai ir jų orbitų parametrai, tokie kaip perigalaktinis orbitos atstumas R_{peri} , apogalaktinis orbitos atstumas R_{apo} , vidutinis orbitos spindulys R_{mean} , orbitos ekscentricitetas ecc bei maksimalus žvaigždės atstumas iki Galaktikos plokštumos Z_{max} . Taip pat naudojant galpy RA, DEC koordinatės buvo konvertuojamos į galaktocentrines (stačiakampes bei cilindrinės). Visų galpy programine įranga gautų parametru paklaidos buvo įvertintos po 2500 skaičiavimo iteracijų, kiekvienos iš jų metu naudojant atsitiktinę įvesties vertę jos paklaidų ribose ir galiausiai kaip rezultata naudojant vidutinę 2500-ų atsakymų vertę ± 2500 -ų atsakymų standartinę deviaciją. Rezultatai paimti iš Mokslinis darbas III [9] ir papildyti šiame darbe.
5. UniDAM [23] programinis kodas. Šia programine įranga gaunami žvaigždžių amžius ir masė su paklaidomis, įvedus žvaigždės efektingą temperatūrą T_{eff} , paviršiaus laisvojo kritimo pagreitį $\lg g$, geležies gausą $[\text{Fe}/\text{H}]$ bei J, H, K ryškių. Rezultatai paimti iš Mokslinis darbas III [9] ir papildyti šiame darbe.

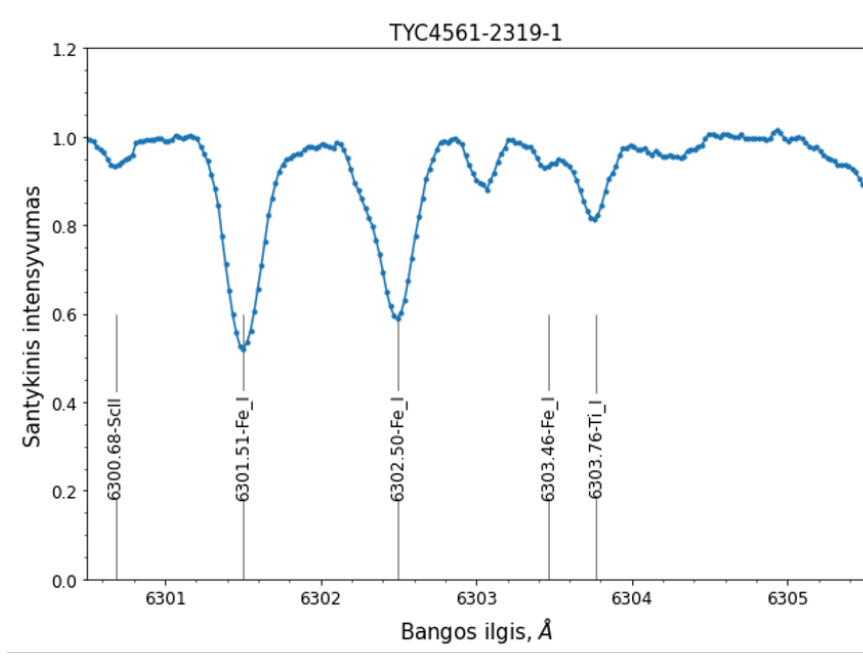
6. Python 3 [29]. Duomenų atvaizdavimas įgyvendintas programinio paketo Anaconda Spyder sąsajoje.

2.2 Žvaigždžių cheminės sudėties analizė

Antrojo pusmečio tiriamojo darbo metu [8] atlikta 25 žvaigždžių cheminės sudėties analizė (C, N, O, Mg, Si), kurios duomenys papildyti šiame darbe iki 49 žvaigždžių bei daugiau cheminių elementų. Darbe nustatytos C, N, O, Mg, Si, S, Y, Eu gausos.

Spektrai analizuoti diferencialiniu atmosferų modelių metodu naudojant TURBOSPECTRUM [28]. Pagrindiniai atmosferų parametrai toliau nustatyti naudojant Eqwidth programinį paketą, remiantis išmatuotais ekvivalentiniais linijų pločiais bei turimais atominiais duomenimis. Jie paimti iš Gaia-ESO spektrinės apžvalgos. Darbe naudoti MARCS [30] atmosferų modeliai.

Spektras, paruoštas ekvivalentinių pločių matavimui, su matomomis sugerties linijomis bangos ilgių ruože nuo 6300,5 iki 6305,5 Å pateiktas paveiksle nr. 4. Įdubimai spektruose indikuoja ne tik žvaigždžių cheminės sudėties skirtumus, bet atspindi ir kitus žvaigždžių parametrus: temperatūrą, dujų slėgį fotosferoje, kuris priklauso nuo gravitacijos pagreičio ir kt. Taigi spektro linijas keičiančius parametrus galima nustatyti analizuojant pačius spektrus.

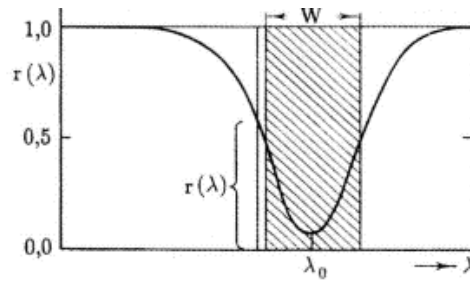


4 pav. Normuotas spektras, paruoštas ekvivalentinių pločių matavimui

Dėl žvaigždės atmosferoje sugertų atomų, spektre atsiradusios sugerties linijos matuojamos ekvivalentiniais pločiais, W (5 pav.). Jie išreikšti bangų ilgio matavimo vienetais, Å. Šis parametras yra stačiakampio plotis, kurio pagrindas atitinka nulinį energijos srautą, aukštis lygus ištinio spektro energijos srautui linijos centre, o plotas – visos linijos sugertam energijos srautui.

Ekvivalentinio pločio apskaičiavimui naudojama formulė:

$$W = \int (1 - r(\lambda)) d\lambda, \quad (1)$$



5 pav. Sugerties spektrinės linijos ekvivalentinis plotis (W) [31]

čia – $r(\lambda)$ yra intensyvumas tiriamame bangos ilgio ruože, kai spektras sunormuotas į vienetą [2].

Darbe matuoti neutralios bei jonizuotos geležies sugerties linijų ekvivalentiniai pločiai. Kai kurios iš parinktų sugerties linijų buvo užterštos (blenduotos) ir dėl neaiškių jų sparnų būtų sudėtinga išmatuoti tikrą geležies sugerties linijos plotį, tad pastarosios buvo pašalintos iš analizės kiekvienai žvaigždei individualiai. Visų žvaigždžių ekvivalentiniai linijų pločiai buvo matuojami automatinio būdu su DAOSPEC, o nuo vidurkio ženkliai nutolę rezultatai buvo permatuoti rankiniu būdu patikslinant kontinuumo vertę, atmetant blendas ar patikslinant patį linijos ekvivalentinį plotį.

2.2.1 Pagrindiniai žvaigždžių atmosferų parametrai

Žvaigždės efektingą temperatūrą teoriškai galima nustatyti tokiu būdu: suintegravus spindulio (šiuo atveju idealaus) energijos pasiskirstymą prie visų bangos ilgių / dažnių, gaunama to kūno skleidžiama energija vienetiniame plote. Pastaroji yra proporcinga temperatūrai, pakeltai ketvirtuoju laipsniu. Tai yra Stefano ir Bolcmano dėsnis:

$$E = \sigma T_{\text{eff}}^4, \quad (2)$$

čia $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ - Stefano ir Bolcmano konstanta.

Norint rasti žvaigždės spinduliavimo galią (šviesį) L, reikia suskaičiuotą energiją padauginti iš jos paviršiaus ploto, kai žinomas spindulys R:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4, \quad (3)$$

taigi žvaigždės efektingą temperatūrą gali būti nustatoma iš šios formulės:

$$\sigma T_{\text{eff}}^4 = \frac{L}{4\pi R^2}, \quad (4)$$

Egzistuoja ir kitų metodų, kuriais galima nustatyti žvaigždės efektingą temperatūrą (pvz. fotometrijos) [31]. Šiame darbe naudojama žvaigždžių su planetomis efektingą temperatūrą buvo nustatyta spektroskopiškai – sužadavimo balanso metodu.

Gravitacijos pagreitis paviršiuje, kaip ir efektinė temperatūra, gali būti nustatomas analitiškai. Anksčiau minėtame vadovėlyje „Astronomija“ [31] šis parametras aprašomas kaip:

$$g = \frac{GM}{R^2}, \quad (5)$$

čia M – žvaigždės masė (kg); G – gravitacijos konstanta ($N \cdot kg^{-2}m^2$); R – žvaigždės spindulys (m).

Iš pateiktos formulės 5 galima suprasti, jog planetos masei mažėjant ir (ar) spinduliui didėjant, žvaigždės gravitacijos pagreitis bus mažesnis. Tai reiškia, jog jos atmosfera retesnė ir retesnėje terpėje susidūrimų tarp jonų ir atomų kiekis taip pat mus atitinkamai mažesnis. Taigi, esant mažesniai jonų ir atomų sąveikavimui, didesnis kiekis fotonų pasieks stebėtoją ir šis reiškinys jau tiesiogiai atsispindės stebėjimų metu užregistruotuose spektruose [31]. Tokiu būdu, pagal 5 formulę, gravitacijos pagreitį nustatyti sunkiau, nes žvaigždės spindulį galima nustatyti tik labai artimoms žvaigždėms.

Šiame darbe naudojamų gravitacijos pagreičio žvaigždės paviršiuje, $\lg g$ verčių nustatymas buvo atliekamas jonizacijos pusiausvyros principu.

Mikroturbulencijos greitis yra vienas iš pagrindinių spektrinių linijų plėtimosi veiksnių. Tai yra ne terminių reiškinų sukeltas atmosferoje esančių dujų masių bendras judėjimas, kurio greitis yra maždaug keli kilometrai per sekundę. Toks dujų judėjimas sukelia Doplerio efektą, kuriam pasireiškus spektrinės linijos gali atrodyti platesnės nei jos iš tikrųjų yra. Didžiausią efektą šis reiškinys turi stiprioms linijoms, kurios yra saturuotos. Tokiu atveju paprastai šiame bangos ilgyje atsiradus daugiau atomų, kurie gali sugerti iš žvaigždės sklindančius fotonus, linija labiau nepasikeistų, nes praktiškai visas sklindančių fotonų kiekis ir taip būna sugertas. Dėl mikroturbulencijos, apie šį bangos ilgį esantys atomai bus paslenkami į raudoną ar mėlyną spektro pusę nuo centrinio linijos bangos ilgio ir tokiu būdu dirbtinai sudarys vaizdą, jog sugerties linijos sparnai yra platesni – fotonų absorbcija vyks platesniame bangos ilgių diapazone nei be mikroturbulencijos reiškinio [32].

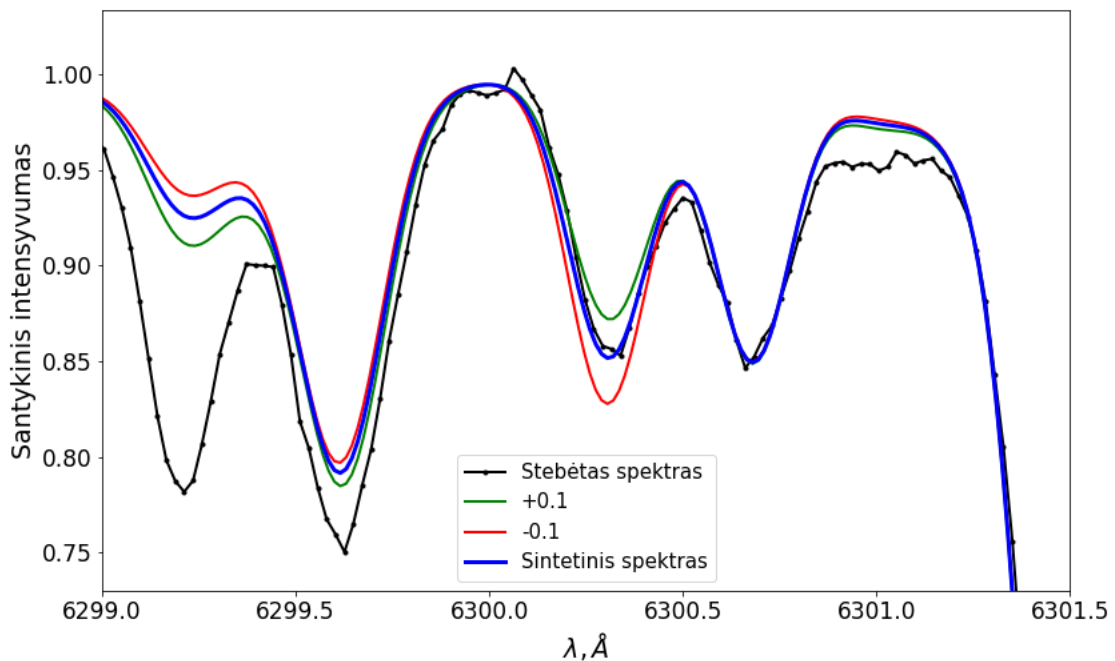
Nustačius T_{eff} bei $\lg g$ vertes, lieka paskutinis žingsnis – mikroturbulencijos greičio nustatymas. Šis parametras nustatomas keičiant v_t vertę ir siekiant minimizuoti neutralios geležies standartinį nuokrypį $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$. Mikroturbulencijos greitis laikomas teisingu, kai $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ yra mažiausias.

Žvaigždės metalingumas, kaip parametras, apibūdina žvaigždės atmosferos cheminę sudėtį, parodo sunkesnių už vandenilį ar helį elementų gausą. Paprastai žvaigždžių metalingumas vaizduojamas kaip santykinis dydis, lyginant megalingumo vertę su Saule. Tai yra logaritminis dydis. Saulės absoliutinis metalingumas $A(\text{Fe})$ yra 7,45 [11], o santykinis, $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$.

Metalingumo vertė gauta jau nustačius visus aukščiau minėtus parametrus su MOOG. Kai pagrindiniai atmosferos parametrai nustatyti teisingai, žvaigždės metalingumas bus lygus visų atominių linijų geležies gausų vidurkiui. $[\text{Fe}/\text{H}]$ parametras nagrinėtoms žvaigždėms, kartu su kitais nustatytais žvaigždžių atmosferų duomenimis pateikiami lentelėje nr. A2.

2.2.2 Sintetiniai spektrai

Nustačius pagrindinius žvaigždės atmosferos parametrus, toliau buvo detaliau nagrinėta tos žvaigždės cheminė sudėtis. Kadangi ekvivalentinių pločių metodu tą padaryti yra sudėtinga silpnoms linijoms, naudotas ir sintetinių spektrų metodas. Sintetinių spektrų metodu galima įvertinti tiek silpnas linijas, tiek kažkiek blenduotas linijas. Tai padaryti leidžia kitų elementų atominių duomenų įvertinimas. Turint blenduotą liniją, kito elemento įvertinimas leidžia vertinti ir tokius spektrus. Šis metodas yra palyginamasis - programinė įranga pagal vartotojo įvestus pradinius parametrų spėjimus sugeneruoja sintetinį spektrą, kuris yra tiesiogiai palyginamas su spektroskopu nuskaitytu realiu spektru.



6 pav. Sintetinio spektro pavyzdys prie uždraustos [O I] 6300 Å linijos

Pirmieji žingsniai prieš matuojant elementų gausas buvo žvaigždės sukimosi greičio $v \sin i$, kuris parodo spektro linijų išplatėjimą dėl žvaigždės sukimosi, bei kontinuumo suderinimas pagal matuojamos spektro linijos aplinką jau sugeneravus sintetinį spektrą. Tuomet su TURBOSPECTRUM [28] iteraciniu būdu keičiama tiriamo elemento gausos vertė kiekvienoje linijoje ir generuojamas spektras tos linijos aplinkoje. Kai sintetinis spektras sutapo su stebėtu spektru tiriamos linijos aplinkoje, elemento gausa tai linijai fiksuota ir tie patys žingsniai atlikti su kitomis linijomis. Jei vieno elemento gausa nustatinėta iš kelių skirtingų linijų, galutiniu rezultatu laikytas gausų prie tų linijų vidurkis, o paklaida - standartinis nuokrypis.

Sugeneruoto sintetinio spektro deguonies linijos aplinkoje palyginimas su stebėtu spektru matomas paveiksle nr. 6, kur juoda taškuota linija atitinka stebėtą spektrą, mėlyna linija atitinka sugeneruotą sintetinį spektrą, o žalia ir raudona linijos vaizduoja, kaip atrodytų sintetinis spektras su atitinkamai 0,1 didesne ir 0,1 mažesne to elemento gausa.

2.2.3 Paklaidų skaičiavimas

Šiame darbe nustatytų pagrindinių atmosferos parametrų paklaidos gali būti priskirtos į vieną iš dviejų grupių: tos, kurių poveikis įvertinamas kiekvienai spektrinei linijai atskirai arba tos, kurios vienu metu veikia visas linijas kartu.

Pirmoji paklaidų kategorija gali būti susijusi su atominių parametrų netikslumais, gausinio profilio pritaikymo linijai ar ištisinio spektro įvertinimo paklaidomis. Jos visos įvertinamos skaičiuojant skirtingoms linijoms gaunamų rezultatų išsibarstymus ir yra žymimos kaip $\sigma[\text{Fe}/\text{H}]$. Į kitą kategoriją patenka paklaidos, susijusios su žvaigždžių atmosferos parametrais.

Darbe apskaičiuotos ir Mg/Si, C/O bei S/N santykių paklaidos. Skaičiuojant Mg/Si iš [Mg/H] ir [Si/H] bei C/O iš [C/H] ir [O/H], naudojant absoliutines Saulės gausų vertes iš Gravesse 2007 darbo [33]: $A(\text{Mg}) = 7.53$, $A(\text{Si}) = 7.51$, $A(\text{C}) = 8.39$, $A(\text{O}) = 8.66$, $A(\text{S}) = 7.14$, $A(\text{N}) = 7.78$ atitinkamai pagal formules:

$$\text{Mg/Si} = \frac{10^{7.53+[\text{Mg}/\text{H}]}}{10^{7.51+[\text{Si}/\text{H}]}} \quad (6)$$

$$\text{C/O} = \frac{10^{8.39+[\text{C}/\text{H}]}}{10^{8.66+[\text{O}/\text{H}]}} \quad (7)$$

$$\text{S/N} = \frac{10^{7.14+[\text{S}/\text{H}]}}{10^{7.78+[\text{N}/\text{H}]}} \quad (8)$$

Šioms C/O, Mg/Si bei S/N vertėms 3σ paklaidos apskaičiuotos suskaičiuojant minimalią ir maksimalią šių santykių vertes (santykio maksimali vertė = skaitiklyje rašoma elemento išmatuota vertė + paklaida, o vardiklyje - elemento išmatuota vertė - paklaida; minimali vertė atvirkščiai) ir įvertinant skirtumą nuo apskaičiuotos vidutinės vertės. 1σ paklaida gaunama dalinant gautą paklaidos vertę iš 3. Paveiksluose ir rezultatų lentelėse pateikiamos vieno standartinio pasiskirstymo dydžio (1σ) paklaidos. Visi žvaigždžių cheminės sudėties rezultatai pateikiami lentelėje nr. A3.

2.3 Žvaigždžių kinematiniai parametrai

Šiame darbe naudojamos Mokslinis darbas III [9] nustatytos bei vadovės pateiktos kinematinų parametrų vertės. Nustatytos galaktinių greičių dedamosios U, V ir W. Tai buvo atlikta žinant tiriamųjų žvaigždžių atstumus iki Saulės (d, [pc], [34]), savuosius judėjimus (μ , [“ per metus], Gaia dr3 [35] [36] [37]) ir radialinių greičių vidurkius (vrad, [km/s], iš spektrų). Greičių dedamosios yra apibrėžtos dešiniarankėje Galaktikos koordinačių sistemoje, kurioje greitis U nukreiptas į Galaktikos centrą ($l = 0^\circ$, $b = 0^\circ$), V – Galaktikos sukimosi kryptimi ($l = 90^\circ$, $b = 0^\circ$), o greitis W nukreiptas į Šiaurinę Galaktikos polių ($b = 90^\circ$). Skaičiavimams naudoti Saulės parametrai: atstumas nuo Galaktikos centro - 8 kpc [38], atstumas nuo Galaktikos plokštumos - 0,02 kpc [39],

greitis - 220 km/s [38], o Saulės judėjimas aplinkinių žvaigždžių atžvilgiu (angl. Local standard of rest) (U, V, W) - (11,1; 12,24; 7,25).

Aprašyti parametrai naudojantis Galpy buvo nustatyti sekančiu principu. Programos kode metodu galpy Orbit.integrate atliktas žvaigždžių orbitų integravimas (MWPotential2014 modelis) su RA, DEC, pmRA, pmDEC bei radialinio greičio parametrais, kartu įrašant Saulės atstumą iki Galaktikos centro ir Saulės skriejimo greitį. Visi minėti įvesties parametrai pateikti kaip atsitiktinė Gausinio pasiskirstymo vertė savo paklaidų ribose. Atlikus 2500 tokių integravimo iteracijų visi išsaugomi parametrai įgijo 2500 elementų dydžio masyvo formas. Kiekvieno šių masyvų vidutinė vertė atitinka parametro reikšmę, o standartinis pasiskirstymas - parametro paklaidą (1σ). Skaičiavimų išvesties parametrai pateikti lentelėje nr. A4.

2.4 Žvaigždžių amžiaus ir masės nustatymas

Amžiai ir masės buvo apskaičiuoti žinant J, H, K žvaigždžių ryškius (Vizier 2MASS katalogas [40]) bei T_{eff} ([K]), $\lg g$ ir [Fe/H] iš spektrų). Amžių ir masių skaičiavimui naudotas UniDAM [23] programinis paketas. UniDAM naudoja spektroskopinius duomenis iš skirtingų apžvalgų kartu su infraraudonosios fotometrijos duomenimis iš 2MASS bei ALLWISE. Šie duomenys pagal Bajeso teoremą lyginami su PARSEC izochromis - taip gaunamos tikimybių tankio funkcijos žvaigždžių masėms, amžiams ir atstumams. Su žinomais efektinės temperatūros, paviršiaus laisvojo kritimo pagreičio bei metalingumo duomenimis žvaigždėms dažnai galima rasti keletą tinkamų amžiaus ir masės kombinacijų. Tokiu atveju gaunamos tikimybės tankio funkcijos turi kelis skirtingus pikus. Dėl to jos išskiriamos į kelias skirtingas tikimybės tankio funkcijas pagal skirtingus žvaigždžių evoliucijos stadijų bei parametrų modelius. Rezultatai vartotojui pateikiami lentelės pavidalu, kur nurodyti visi gauti masių bei amžių sprendiniai (tikimybės tankių funkcijų pikų vertės) su jų statistiniu svoriu ir tikimybe būti tinkamiausiu modeliu. Šių vartotojui pateiktų m modelio tikimybės tankio funkcijų svoris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$V_m = \frac{\sum_{j \in m} W_j}{\sum W_j}, \quad (9)$$

čia V_m – tikimybės tankio funkcijos svoris; W_j – j -ojo modelio svoris;

Tikimybė būti tinkamiausiu modeliu apskaičiuojama pagal to modelio sutapimą su stebėjimų parametrais. Taip pat pateikiami kiekvieno sprendinio kokybės žymėjimai, kurie gali būti:

- 1 - vienintelė tikimybės tankio funkcija, rasta žvaigždei;
- A - didžiausio svorio tikimybės tankio funkcija. Jos svoris yra 0,9 ar daugiau;
- B - dvi didžiausio svorio tikimybės tankio funkcijos. Jų svorių suma yra 0,9 ar daugiau;
- C - trys didžiausio svorio tikimybės tankio funkcijos. Jų svorių suma yra 0,9 ar daugiau;
- D - trys didžiausio svorio tikimybės tankio funkcijos. Jų svorių suma yra mažiau nei 0,9;

- L - mažo svorio (0,03 - 0,1) tikimybės tankio funkcija;
- E - mažo svorio tikimybės tankio funkcija, kuriai rasti naudoti fotometrijos ir spektriniai duomenys nesutampa;
- X - didžiausio svorio tikimybės tankio funkcija su svoriu, mažesniu nei 0,1 (tikėtina, jog naudoti prastos kokybės fotometrijos duomenys);
- N - tikimybės tankio funkcija turi mažiau nei 10 modelių, tad rezultatas nepatikimas.

Tolesniam darbui kiekvienai žvaigždei buvo atrinkta po vieną didžiausio svorio rezultatą, kuris turėjo 1, A, B, C arba D kokybės žymėjimą. UniDAM programa gauti rezultatai pateikiami Priede kaip lentelė nr. A5. Reikia paminėti, jog parametrų paklaidos yra vieno standartinio pasiskirstymo dydžio.

3 Rezultatai

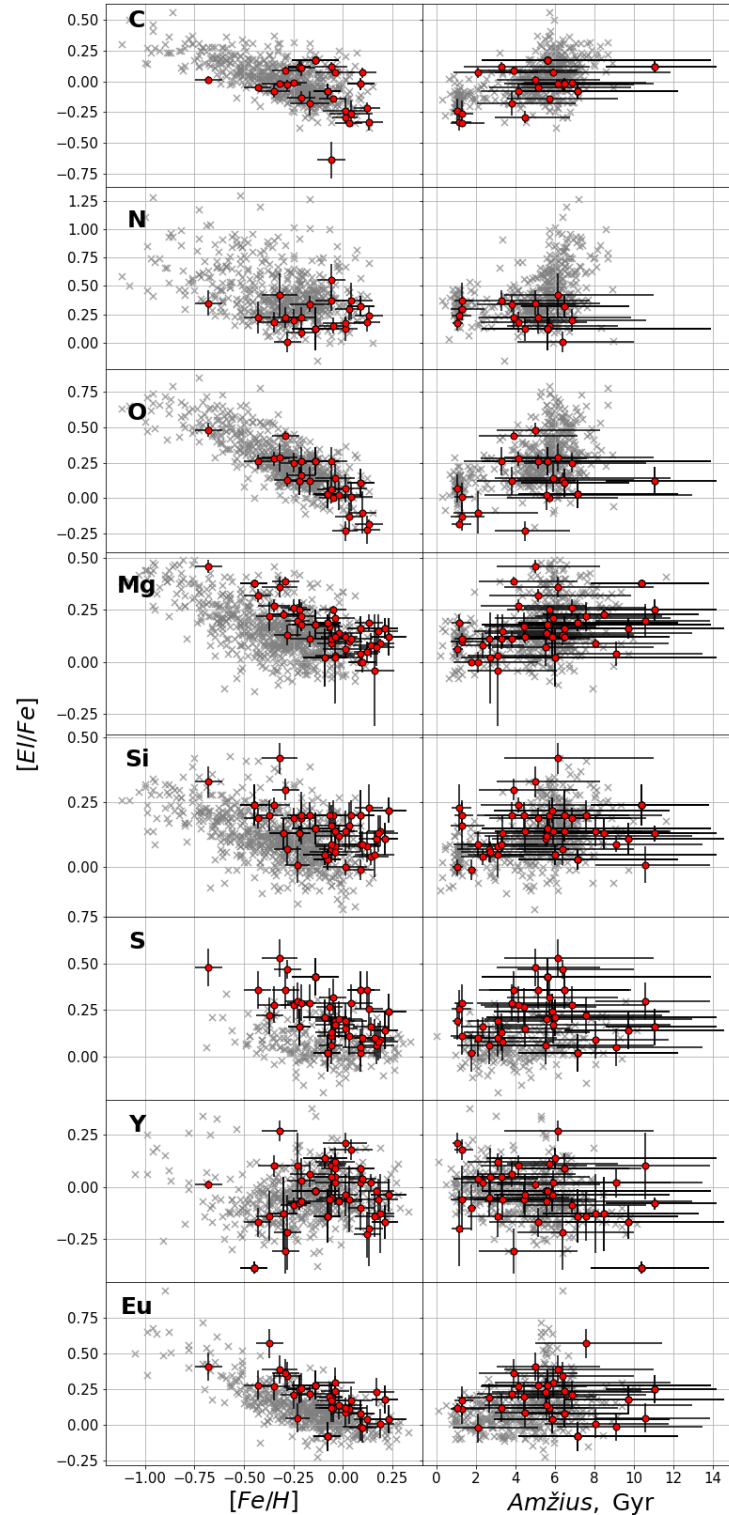
Darbe naudoti Mokslinis darbas II [8] 25 žvaigždžių cheminių elementų (C, N, O, Mg, Si) duomenys, kurie buvo aprašyti iki 49 žvaigždžių imties ir papildomai ištirtos S, Y, Eu gausos. Kai kurių žvaigždžių spektrai dėl savo kokybės (triukšmo ar blendavimo su Žemės atmosferos linijomis) nebuvo tinkami vieno ar kelių elementų gausų analizei. Pilna lentelė su cheminės sudėties analizės rezultatais pateikta Priede kaip lentelė nr. A3. Kinematiniai parametrai naudoti iš Mokslinis darbas III [9] bei pateikti darbo vadovės (duomenys pateikti Priede lentelėje nr. A4, kur vadovės pateikti duomenys atskirti lentelės aprašyme nurodytu žymėjimu): perigalaktinis (R_{peri}) ir apogalaktinis orbitos atstumas (R_{apo}), ekscentricitetas (ecc), atstumas nuo Galaktikos plokštumos ($|Z_{\text{maxl}}$), galaktocentrinės koordinatės bei greičiai (U, W, V). Visi minėti kinematiniai parametrai gauti naudojant galpy programinę įrangą [22]. Jų analizės įvesties vertės paimtos iš Gaia dr3 [36] bei Bailer Jones [34] (tik atstumas iki Saulės) archyvų. Amžiai ir masės skaičiuoti naudojant UniDAM programinį kodą [23] Mokslinis darbas III [9], o dalis duomenų pateikti darbo vadovės. Rezultatai pateikti Priede kaip lentelė nr. A5, kur mano ir vadovės pateikti duomenys atskirti nurodytu žymėjimu. Būtina pastebėti, jog žvaigždžių amžių ir masių nustatymas yra itin netikslus procesas, tad gaunamos didelės verčių paklaidos. Vidutinė amžiaus paklaida: ($\sigma_{\log(A_{\text{mius}})} \approx 0,24$).

3.1 Žvaigždžių su planetomis cheminė analizė

Paveiksle nr. 7 pateikiami žvaigždžių su planetomis cheminių elementų gausos ir amžiai (raudoni taškai). Palyginimui naudojamos kitų autorių tirtos žvaigždės iš Tautvaišienės ir kitų 2021 [11] bei 2022 [10] metų straipsnių bei iš Mikolaičio ir kitų 2019 metų straipsnio [12]. Matome, kad vidutiniškai žvaigždės su planetomis yra metalingesnės nei žvaigždės be planetų. Pradedant nuo lengviausių cheminių elementų - C, N, O - galima pastebėti, kad ryškių skirtumų tarp žvaigždžių su planetomis ir žvaigždžių be planetų nėra tiek metalingumo, tiek amžių grafikuose. Tiesa, tęsiant darbus, būtų naudinga žvaigždes atskirti į milžines ir nykštukes siekiant tiksliau nagrinėti šių elementų gausas, nes milžinėse žvaigždėse dėl evoliucijos šie elementai yra pakitę. Alfa proceso elementai (Mg, Si, S) demonstruoja jau aiškesnius skirtumus tarp darbe tirtų žvaigždžių su planetomis ir palyginimui naudotų žvaigždžių. Magnio ir silicio gausos ženkliai nesiskiria, bet norint patvirtinti arba paneigti reiktų detalesnės analizės. Kita vertus, sieros gausa vidutiniškai yra didesnė žvaigždėse su planetomis. Atskiriant pagal amžius skirtumų išvelgti sunkiau. Sunkieji elementai europis ir itris elgiasi pakankamai skirtingai: s-proceso elemento itrio gausa nerodo skirtumų tarp žvaigždžių su ir be planetų, o r-proceso elementas europis elgiasi panašiai kaip alfa elementai - matoma didesnė gausa žvaigždėse su planetomis. Taigi statistiškai matomas neženklus Mg ir Si bei ryškesnis S ir Eu gausų padidėjimas žvaigždėse su planetomis.

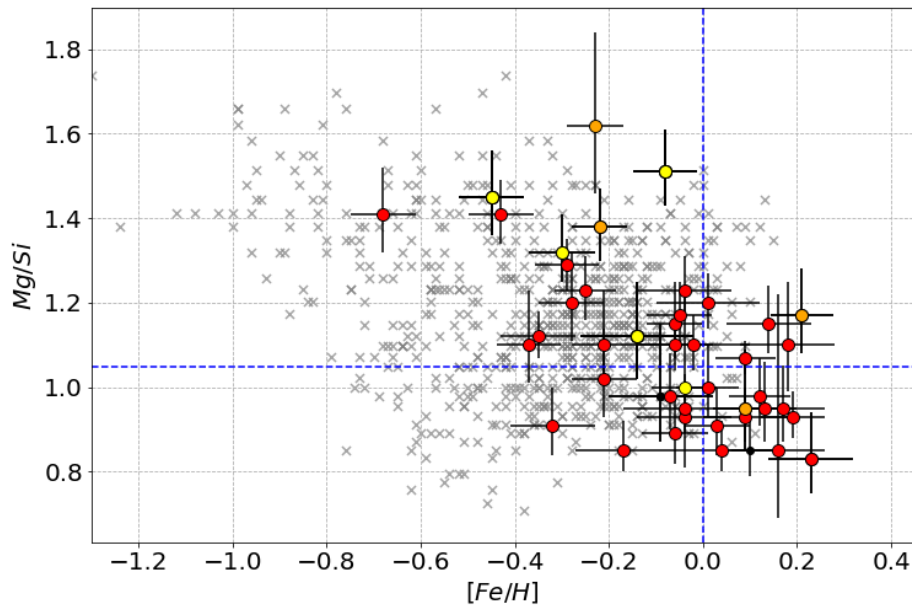
3.1.1 Cheminių elementų gausų ir metalingumo ryšys žvaigždėse su planetomis

Vienas iš detalios žvaigždės cheminės sudėties tyrimo etapų šiame darbe buvo cheminių elementų gausų priklausomybės nuo žvaigždės metalingumo analizė. Šis ryšys buvo nustatytas tirtiems cheminiams elementams, matomas anksčiau minėtame paveiksle nr. 7 ir elementų santykiams (C/O;



7 pav. Cheminių elementų gausų priklausomybė nuo metalingumo ($[Fe/H]$) ir žvaigždžių amžių. Raudonais taškais pažymėtos šiame darbe tirtos žvaigždės su planetomis. Pilkais 'x' simboliais – palyginimo žvaigždės: C, N, O, Mg, Si iš Tautvaišienė ir kiti 2022 m. [10], S– iš Mikolaitis ir kiti 2019 m. [12], o Y ir Eu iš Tautvaišienė ir kiti 2021 m. [11].

Mg/Si; S/N), pateiktiems paveikslėliuose nr. 8 - 10, kur žvaigždės dar atskirtos spalviškai pagal planetos masę: geltona spalva pažymėtos žvaigždės su mažos masės planeta(-omis) iki $16 M_{\oplus}$,



8 pav. Mg/Si santykio žvaigždėje priklausomybė nuo metalingumo. Geltonais taškais – žvaigždės, kurių lengviausia planeta yra $< 16 M_{\oplus}$, oranžine spalva - tarp 16 ir $116 M_{\oplus}$, o raudona - žvaigždės, turinčios tik milžines planetas, kurių lengviausios masė $> 116 M_{\oplus}$. "x" – Tautvaišienės ir kt. 2022 m. žvaigždes be planetų [10]. Mėlyna punktyrine linija pažymėtos Saulės vertės.

ornažinių žvaigždžių lengviausios planetos masė yra tarp 16 ir $116 M_{\oplus}$, o raudonos žvaigždės turi tik planetas, kurių masės viršija $116 M_{\oplus}$.

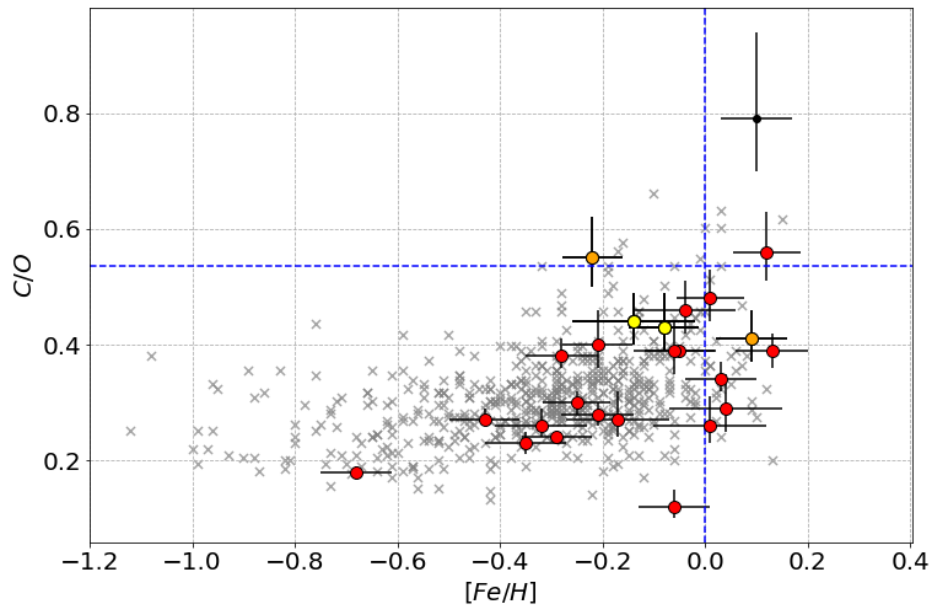
Kaip matoma paveikslėliuose nr. 8 – 10, imtyje dominuoja didelės masės planetos. Akivaizdu, kad tų elementų gausų, kurių nepavyko nustatyti žvaigždėms su mažos masės planetomis, ryšiai su planetų mase, nebus reprezentatyvūs.

Žvelgiant į [O/Fe] priklausomybę nuo [Fe/H], matosi, jog deguonies gausa žvaigždėje ženkliai mažėja didėjant metalingumui (pav. nr. 7). Taip yra, nes deguonis pagrindė yra gaminamas masyviose žvaigždėse, kurios greičiau praturtina tarpžvaigždinę erdvę taip vadinamais alfa elementais, kaip deguonis, nei geležimi. O tuo tarpu geležis yra gaminama Ia tipo supernovų sprogo metu. Taip pat verta paminėti, kad dauguma cheminių elementų gausų nerodo aiškaus pasiskirstymo tarp skirtingų masių planetas turinčių žvaigždžių arba imtyje yra per mažai lengvas planetas turinčių žvaigždžių su nustatytais gausomis, tad tokie paveikslai darbe nepateikiami (C, N, O, S, Y, Eu).

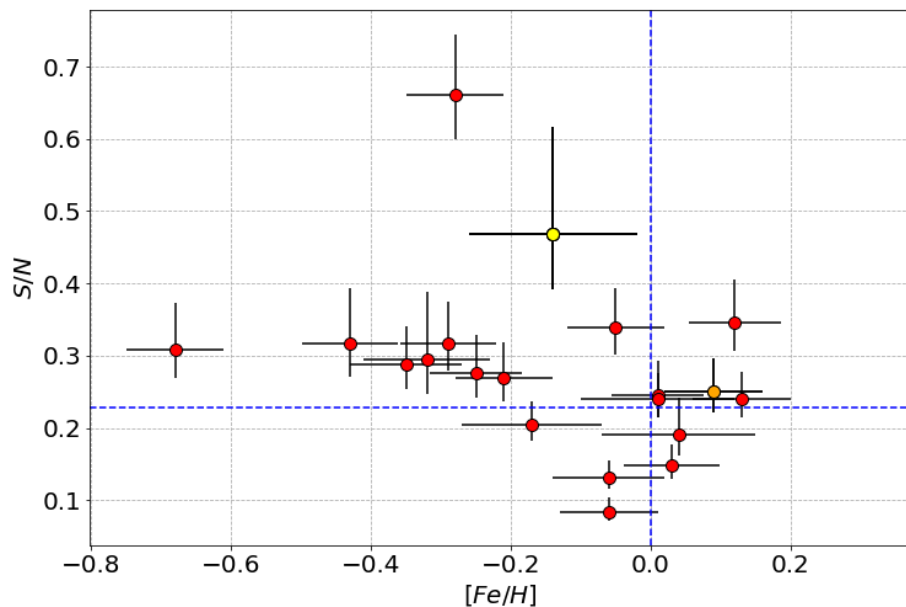
Pav. nr. 8 pavaizduota Mg/Si santykio žvaigždėje priklausomybė nuo metalingumo. Matome, kad metalingoms ($Fe/H > -0,5$) žvaigždėms, Mg/Si santykis nėra priklausomas nuo metalingumo. Taip pat galime pastebėti, kad žvaigždės su mažos masės planetomis turi vidutiniškai didesnį Mg/Si santykį ($Mg/Si_{lengvos} \sim 1,29$) nei žvaigždės su masyvesnėmis planetomis ($Mg/Si_{visos} \sim 1,09$).

C/O santykis didėjant metalingumui didėja (pav. nr. 9), taip pagrindė yra dėl [O/Fe] gausos mažėjimo prie metalingų žvaigždžių (žiūrėti pav. nr. 7). Stebime C/O padidėjimą prie žvaigždžių turinčių mažų masių planetas, bet reikia taip pat įvertinti kiek imtyje yra milžinių. Milžinių atmosferų anglies gausa būna pakitusi, todėl reikia nykštukių C/O analizuoti atskirai nuo milžinių.

Kalbant konkrečiai apie planetų mases, įdomu tai, jog mažos masės planetų daugiausia galima



9 pav. C/O santykio žvaigždėje priklausomybė nuo metalingumo. Geltonais taškais – žvaigždės, kurių lengviausia planeta yra $< 16 M_{\oplus}$, oranžine spalva - tarp 16 ir $116 M_{\oplus}$, o raudona - žvaigždės, turinčios tik milžines planetas, kurių lengviausios masė yra $> 116 M_{\oplus}$. "x" – Tautvaišienės ir kt. 2022 m. žvaigždes be planetų [10]. Mėlyna punktyrine linija pažymėtos Saulės vertės.



10 pav. S/N santykio žvaigždėje priklausomybė nuo metalingumo. Geltonais taškais žymimos žvaigždės, kurių lengviausia planeta yra lengvesnė nei $16 M_{\oplus}$, oranžine spalva - tarp 16 ir $116 M_{\oplus}$, o raudona - žvaigždės, turinčios tik milžines planetas, kurių lengviausios masė yra didesnė nei $116 M_{\oplus}$. Mėlyna punktyrine linija pažymėtos Saulės vertės.

aptikti prie metalingesnių žvaigždžių, lyginant su didelės masės planetomis, tai matoma visuose šio skyriaus grafikuose. Be šio dėsningumo galima pastebėti, jog Mg/Si bei C/O priklausomybes

nuo metalingumo vaizduojančiuose paveikslėliuose (nr. 8 bei 9) mažos masės planetos išsiskiria iš kitų ir rodo, jog mažos masės planetas turinčiuose žvaigždėse šie santykiai yra didesni nei kitose. Šie rezultatai sutampa su Delgado Mena ir kt. (2011) darbe [41] gautais rezultatais.

Mano darbe tirtos žvaigždės su mažos masės planetomis turi $\langle C/O \rangle$ mažiau nei 0,5 santykį bei Mg/Si santykį tarp 1 ir 2. Tai reiškia, jog mažos masės planetos prie šių žvaigždžių chemiškai yra panašios į Žemę [41].

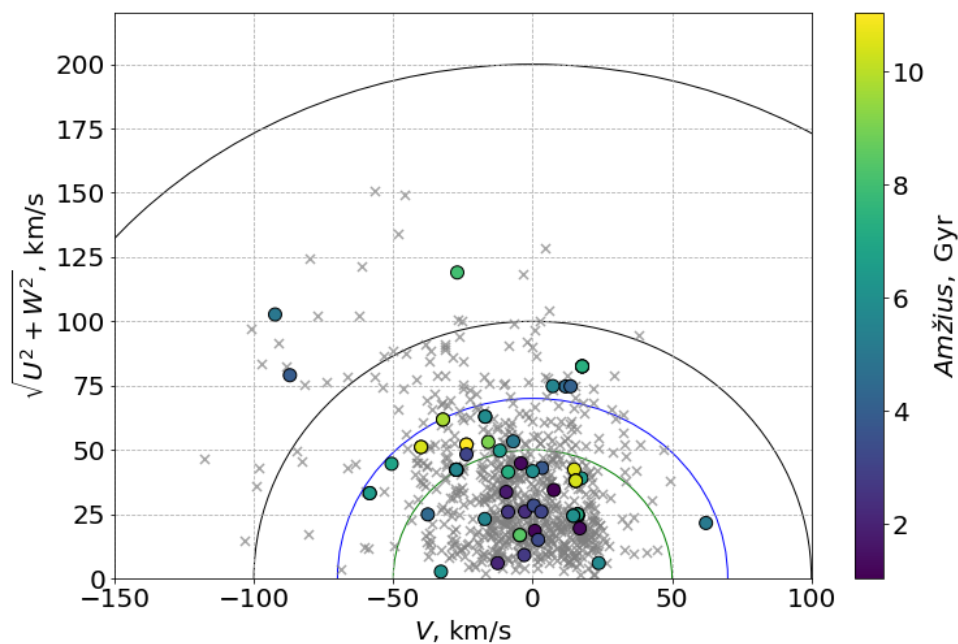
Paveiksle nr. 10 vaizduojama S/N santykio ir metalingumo ($[Fe/H]$) priklausomybė. Šis santykis įdomus todėl, kad parodo lakių (angl. *volatile*) ir nelakių (angl. *refractory*) elementų santykį. Siera šiame santykyje atitinka nelakių elementų gausas, kurios buvo gautos iš sugautų kietų medžiagų tarpžvaigždinėje erdvėje, o N gausa atspindi lakių elementų gausas, nes didžioji dalis azoto Galaktikos diskuose yra dujiniame pavidale. Šis santykis siejamas su milžinių planetų migracija, tačiau tuomet reiktų nagrinėti atskirų planetų sudėtis. Kuo daugiau kietų medžiagų planeta įsisavina, tuo didesnis būtų jų S/N santykis. Pavyzdžiui, esant mažesniai nei Saulės S/N santykiui, tačiau didesniai už Saulės metalingumui planetose, galima teigti, kad tokios milžinės planetos patyrė gana reikšmingą disko migraciją [42]. Aptariamo paveikslo dešiniame apatiniame kampe galima matyti dvi žvaigždes, kurių S/N santykis yra mažesnis nei Saulės, o metalingumas – didesnis. Šios žvaigždės turi milžines planetas, tad, darant prielaidą ir teigiant, kad žvaigždžių S/N atitinka planetų S/N , galima įtarti ir detaliau nagrinėti jų migraciją.

Kita vertus, nykštukėms žvaigždėms dėl silpnų linijų ir prastesnės spektrų kokybės buvo sunku nustatyti S ir N gausas, tad imtyje dauguma matomų žvaigždžių yra milžinės, dominuoja randoni taškai, žymintys žvaigždes su masyviomis planetomis. Dėl šių priežasčių neįmanoma palyginti žvaigždžių, turinčių skirtingų masių planetas.

3.2 Žvaigždžių su planetomis kinematiniai ir amžiaus parametrai

Šiame skyriuje apžvelgiamas žvaigždžių skirstymas į storąjį ir plonąjį diskus bei žvaigždžių radialinė migracija Galaktikoje, remiantis kinematinėmis savybėmis. Suskaičiuotas žvaigždžių judėjimas Galaktikoje. Galaktinių greičių dedamosios (U , V , W) buvo suskaičiuotos žinant tiriamųjų žvaigždžių atstumus (d , [pc], [34]), savuosius judėjimus (μ , [“ per metus], Gaia dr3 [35] [36] [37]) ir radialinių greičių vidurkius ($\langle v_{rad} \rangle$, [km/s], iš spektrų). Greičių dedamosios yra apibrėžtos dešiniarankėje Galaktikos koordinačių sistemoje, kurioje greitis U nukreiptas į Galaktikos centrą ($l = 0^\circ$, $b = 0^\circ$), V – Galaktikos sukimosi kryptimi ($l = 90^\circ$, $b = 0^\circ$), o greitis W nukreiptas į Šiaurinį Galaktikos polių ($b = 90^\circ$). Amžiai ir masės buvo apskaičiuoti žinant J , H , K žvaigždžių ryškumus (Vizier 2MASS katalogas [40]) bei T_{eff} ([K]), $\lg g$ bei $[Fe/H]$ iš spektrų.

Paveiksle nr. 11 matoma Toomre diagrama. Joje pavaizduota V greičio dedamosios priklausomybė nuo U ir W greičio dedamųjų vektorinės sumos. Taškai nuspalvini atitinkamai pagal žvaigždės amžių. Vektorinė visų dedamųjų suma $\sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ reiškia žvaigždės savitąjį greitį. Diagramoje matomi apskritimai atskiria 50, 70, 100 ir 200 km/s savitojo greičio ribas. Toomre diagrama gali būti naudojama žvaigždžių skirstymui į Galaktikos diskus. Tikėtina, kad žvaigždės, kurių savitasis greitis yra mažesnis nei 50 km/s, yra plonajame Galaktikos diske, o žvaigždės, kurių savitasis greitis viršija 70 km/s, bet nesiekia 200 km/s gali būti priskirtos storajam Galaktikos dis-



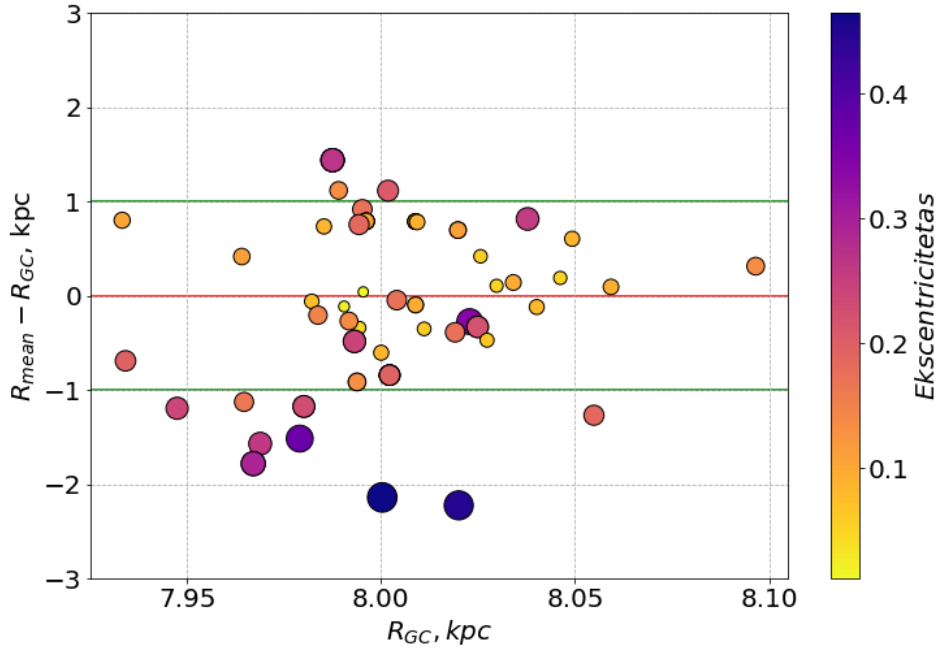
11 pav. Toomre diagrama. Apskritimai paveikslėlyje rodo žvaigždės savitojo greičio $\sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ konstantas ties 50, 70, 100 ir 200 km/s. Taškų spalvos parodo žvaigždės amžiaus vertę. 'x' – Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 m. žvaigždės be planetų [10]. Juodos linijos – halo riba. Mėlyna – storjo disko; žalia – plonojo disko.

kui. Žvaigždės su didesniais greičiais galėtų būti priskiriamos halui, tačiau tokių šio darbo imtyje nėra [14], [43]. Žalias ir mėlynas apskritimai rodo Galaktikos diskų priskyrimo ribas. Matoma, kad didelė dalis (28 iš 49, keturių amžius nenustatytas) tiriamųjų žvaigždžių priklauso plonajam Galaktikos diskui. Įdomu, jog mažesni už 50 km/s savitąjį greitį turi ir yra priskiriamos plonajam Galaktikos diskui yra tiek seniausios, tiek jauniausios šios imties žvaigždės. Žvaigždės, senesnės nei 8 milijardai metų turi savituosius greičius iki 70 km/s, o žvaigždės, kurių amžius maždaug lygus maždaug milijardui metų, turi savituosius greičius iki 50 km/s. Storajam diskui priskiriamos 9 žvaigždės, kurių amžius svyruoja tarp 4 ir 8 milijardų metų.

Paveiksle nr. 12 pavaizduota vidutinio žvaigždžių orbitos spindulio ir atstumo iki Galaktikos centro skirtumo $R_{\text{mean}} - R_{\text{GC}}$ priklausomybė nuo atstumo iki Galaktikos centro R_{GC} . Vidutinis žvaigždės orbitos spindulys apskaičiuotas kaip parigalaktinio ir apogalaktinio orbitos atstumų vidurkis. Žvaigždės su planetomis nuspalvintos pagal ekscentriciteto dydį.

Norint analizuoti aplinką, kurioje susiformavo žvaigždės su planetomis, bet dabar yra Saulės kaiminystėje, reikia analizuoti šių žvaigždžių nuotolius nuo Galaktikos centro ir orbitos geometrinis parametrus. Darbe lyginama dabartinė galaktocentrinė padėtis R_{GC} su vidutine jų orbitų padėtimi R_{mean} , taip kaip ir Magrini ir kt. 2022 darbe [14].

Iš paveikslo nr. 12 pastebima, kad daugumos žvaigždžių R_{mean} ir R_{GC} skirtumo modulis yra mažesnis nei 1. Vadinasi jų orbitos yra apskritiminės arba savo orbitose yra tokiaime taške, kai atstumas iki Galaktikos centro daugmaž sutampa su jų R_{mean} verte. Daroma prielaida, jog jos ir susiformavo Saulės kaiminystėje. Tačiau imtyje yra žvaigždžių, kurios yra virš viršutinės žalios



12 pav. Žvaigždžių vidutinio orbitos spindulio ir atstumo iki Galaktikos centro skirtumo $R_{\text{mean}} - R_{\text{GC}}$ priklausomybė nuo atstumo iki Galaktikos centro R_{GC} . Taškų spalva ir dydis rodo žvaigždės ekscentricitetą, raudona linija žymi $R_{\text{mean}} = R_{\text{GC}}$, o žaliomis linijomis – žvaigždžių migracijos riba.

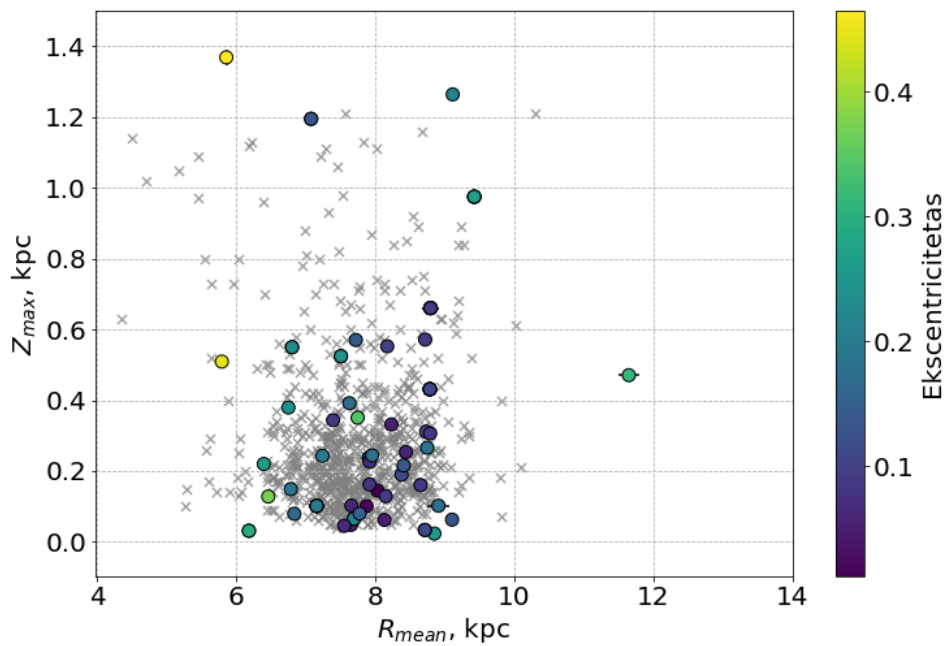
linijos arba po apatine žalia linija, viršydamos 1 kpc ribą. Manoma, kad žvaigždės, kurių $(R_{\text{mean}} - R_{\text{GC}}) > 1$ veikiausiai migravo iš Galaktikos disko išorės, o turinčios $(R_{\text{mean}} - R_{\text{GC}}) < -1$ tikriausiai migravo iš Galaktikos disko vidinės dalies.

Taip pat galima pastebėti, jog taškų spalvinimas pagal ekscentricitetą patvirtina tokią teoriją - tai ypatingai matoma apatinėje paveikslėlio dalyje, kur randamos 9 imties žvaigždės su dideliais ekscentricitetais ($\text{ecc} \sim 0,25$ ir daugiau), o vidurinėje grafiko dalyje, kur $-1 < (R_{\text{mean}} - R_{\text{GC}}) < 1$ didžioji dalis žvaigždžių skrieja beveik apskritiminėmis orbitomis su keliomis išimtimis. Žvaigždžių, kurių $(R_{\text{mean}} - R_{\text{GC}}) > 1$ (veikiausiai migravusių iš Galaktikos disko išorės), yra tik 3, o jų ekscentricitetai yra kiek mažesni, nei migravusių iš Galaktikos disko vidinės dalies ($\text{ecc} \sim 0,3$).

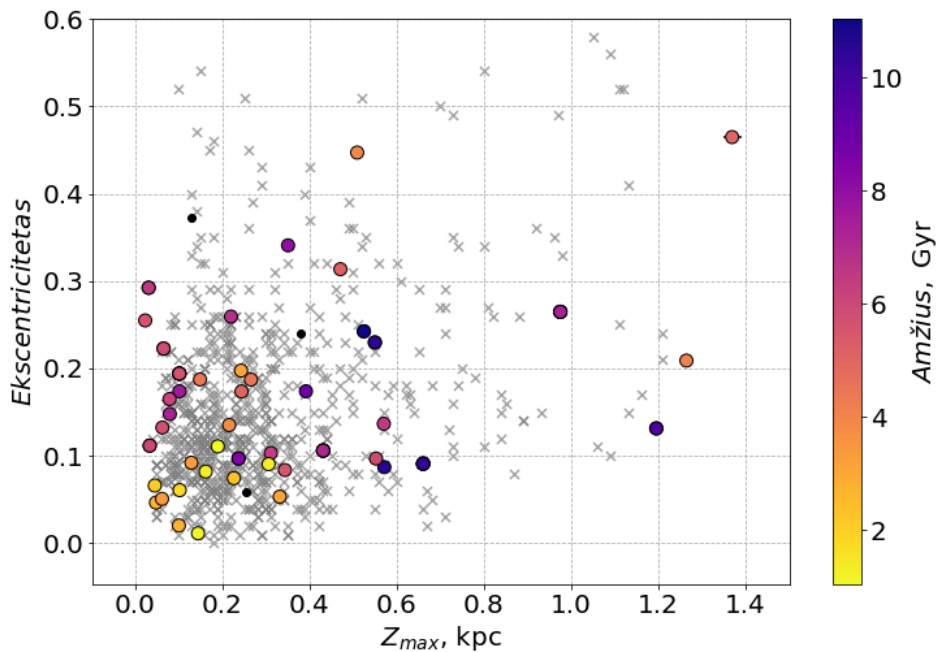
Šiuo atveju mes atsižvelgiame tik į vieną iš dviejų žvaigždžių migracijos Galaktikos diske padarinių: tą, dėl kurio orbitos praranda savo escentriškumą, o šis efektas dabar vadinamas "susiliejimu" (žr., angl. "blurring" [16]). Žvaigždžių migracijos difuzinio proceso požymis – "suplakimas" (angl. "churning"), paprastai prarandamas tiriant žvaigždės orbitines savybes, nes jis perkelia žvaigždę iš vienos apskritiminės orbitos į kitą [15]. Taigi iš principo negalime atmesti galimybės, kad visos žvaigždės, su apskritiminėmis orbitomis, gimė toje pačioje vietoje kur jas stebime dabar.

3.2.1 Kinematikos, amžiaus ir cheminių elementų gausių koreliacija

Šiame poskyryje aptariamas žvaigždžių kinematinų parametrų bei amžiaus ryšys su cheminių elementų gausomis. Paveikslėlyje nr. 13 matomi nustatyti pagrindiniai kinematiniai parametrai: ant X ašies pateiktas vidutinis orbitos spindulys R_{mean} , ant Y ašies matomas maksimalus atstumas



13 pav. Maksimalaus atstumo nuo Galaktikos plokštumos $|Z_{\max}|$ priklausomybė nuo vidutinio orbitos spindulio R_{mean} . Taškai nuspalvinti pagal žvaigždės orbitos ekscentricitetą. 'x' – Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 m. žvaigždės be planetų [10].



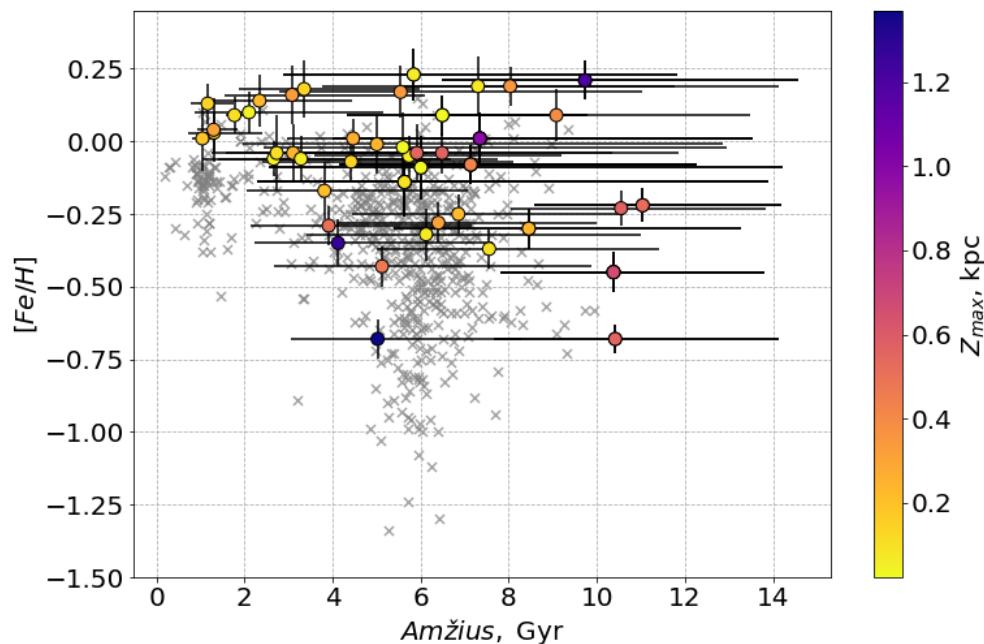
14 pav. Orbitų ekscentriciteto priklausomybės nuo maksimalaus atstumo iki Galaktikos plokštumos grafikas, spalvomis pažymėtas žvaigždžių amžius. 'x' – Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 m. žvaigždės be planetų [10].

nuo Galaktikos plokštumos $|Z_{\max}|$, o taškai nuspalvinti pagal orbitų ekscentricitetą. 'x' simboliai

žymi Tautvaišienės ir kt. 2022 metų darbe nagrinėtas žvaigždes [10].

Matome, kad tiek šiame, tiek Tautvaišienės ir kt. 2022 darbe, Saulės aplinkoje esančios žvaigždės turi daug nesiskiriančius dydžius. Analizuojant svarbu matyti, kad šio darbo žvaigždės yra pasiskirsčiusios visoje R_{mean} ir $|Z_{\text{max}}|$ erdvėje. Taip pat matoma viena aiški tendencija – kuo mažesnis R_{mean} , tuo didesnis žvaigždžių orbitų ekscentricitetas. Būtina pastebėti, kad tai yra žvaigždžių selekcijos pasekmė, nes, kaip matoma paveiksluose nr. 2 bei 3, visos nagrinėjamos žvaigždės yra Saulės aplinkoje (maždaug 8 kpc nuo Galaktikos centro). Taigi, kuo daugiau žvaigždės R_{mean} skiriasi nuo 8 kpc vertės, tuo jos orbitos ekscentricitetas didesnis. Pavyzdžiui dvi žvaigždės, kurių R_{mean} mažesnis nei 6 kpc, turi didžiausius ekscentricitetus visoje imtyje, viršijančius 0.4. Taip pat matome, kad mūsų tiriamos žvaigždės yra Galaktikos diske, o tik 5 iš jų yra nutolusios nuo Galaktikos disko ($|Z_{\text{max}}| > 0,6$ kpc).

Paveikslėlyje nr. 14 matomas žvaigždžių orbitų ekscentriciteto priklausomybės nuo maksimalaus atstumo iki Galaktikos plokštumos grafikas. Jame taškai nuspalvinti pagal amžių. 'x' simboliai žymi Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 metų darbe nagrinėtas žvaigždes [10]. Galima pastebėti, kad didžiausia žvaigždžių koncentracija yra ties ekscentricitetu nuo 0 iki 0,2 bei $|Z_{\text{max}}|$ nuo 0 iki 0,4, tai sutampa tiek Tautvaišienės, tiek mano darbo imtyse.



15 pav. $[Fe/H]$ priklausomybė nuo amžiaus, kur taškai nuspalvinti pagal maksimalų žvaigždžių atstumą nuo Galaktikos plokštumos. 'x' žymi Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 m. žvaigždes be planetų.

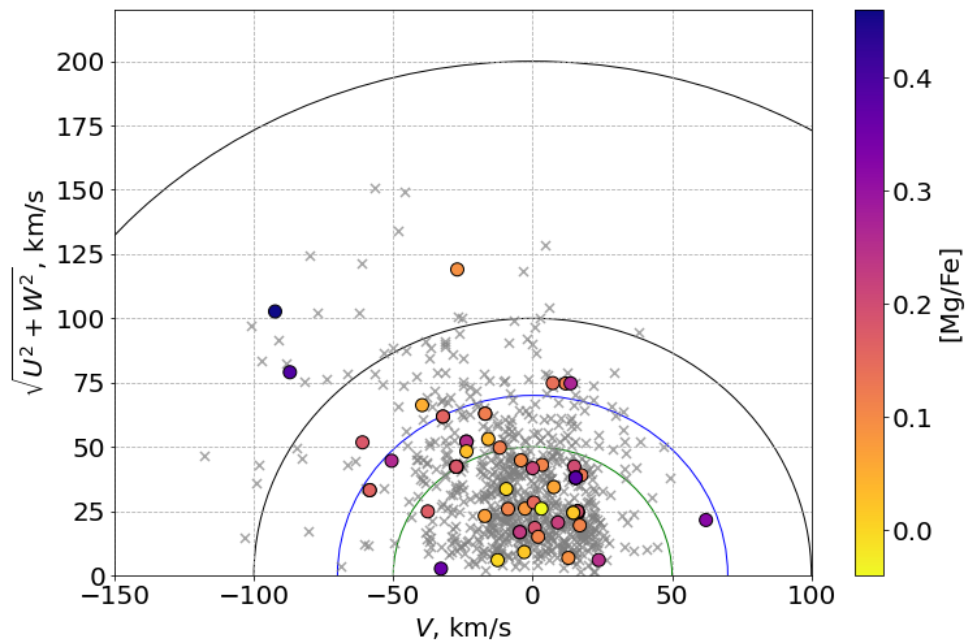
Paveiksle nr. 15 matoma $[Fe/H]$ priklausomybė nuo amžiaus, kur taškai nuspalvinti pagal maksimalų žvaigždžių atstumą nuo Galaktikos plokštumos, o 'x' žymi Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 metų darbe nagrinėtas žvaigždes. Didžioji dalis grafike matomų žvaigždžių yra senesnės nei 4 milijardai metų. Pastebima akivaizdi tendencija, jog jaunesnės žvaigždės su planetomis turi mažesnę $|Z_{\text{max}}|$ bei yra ženkliai metalingesnės. Dauguma jaunesnių nei 4 milijardai metų žvaigždžių

yra metalingesnės nei $-0,25$, kai tuo tarpu senesnių žvaigždžių su planetomis metalingumas pasiskirstęs nuo $-0,75$.

Įdomu yra tai, kad savo imtyje turime ir senų nemetalingų žvaigždžių su planetomis, kur $|Z_{\max}| > 0,40$ (pvz. žvaigždė TYC2153-2883 (9,5 milijardo metų), kuri turi 2 planetas su masėmis $19 M_{\oplus}$ ir $489 M_{\oplus}$; žvaigždė TYC2576-2228-1 (11 milijardų metų) taip pat turi dvi planetas su masėmis atitinkamai 25 ir $332 M_{\oplus}$; žvaigždės TYC3888-1886-1 (7 milijardai metų) bei TYC4244-964-1 (10 milijardų metų) turi po 5 planetas su masėmis atitinkamai nuo 2,22 iki 6,14 M_{\oplus} bei nuo 5,8 iki 2065 M_{\oplus} ; žvaigždė TYC3475-1198-1 (5 milijardai metų) turi vieną planetą, kurios masė yra 289 M_{\oplus} ; žvaigždė TYC2595-1464-1 (10,4 milijardo metų) turi dvi planetas, kurių masės atitinkamai 261 ir 316 M_{\oplus} .

Būtina atsižvelgti į dideles amžiaus verčių paklaidas - jos logaritminėje skalėje yra vidutiniškai $\pm 0,24$. Natūralu, kad tokio dydžio paklaidos rodo, jog amžių įvertinimas yra sudėtingas procesas, tačiau šio darbo kontekste vaizduojamos statistinės tendencijos negali būti paneigtos. Pastebimas aiškus metalingumo pasiskirstymas tarp senesnių ir jaunesnių žvaigždžių, kaip ir $|Z_{\max}|$ pasiskirstymas, kuris parodo, jog senesnės žvaigždės turi didesnes $|Z_{\max}|$ vertes. Ši informacija koreliuoja su Galaktikos evoliucijos modeliu, sakančiu, kad storasis Galaktikos diskas yra senesnis už plonąjį.

3.2.2 Žvaigždžių priskyrimo į Galaktikos diskus analizė



16 pav. Toomre diagrama. Žvaigždės nuspalvintos pagal $[Mg/Fe]$ gausą. 'x' žymi Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 metų darbe nagrinėtas žvaigždes [10].

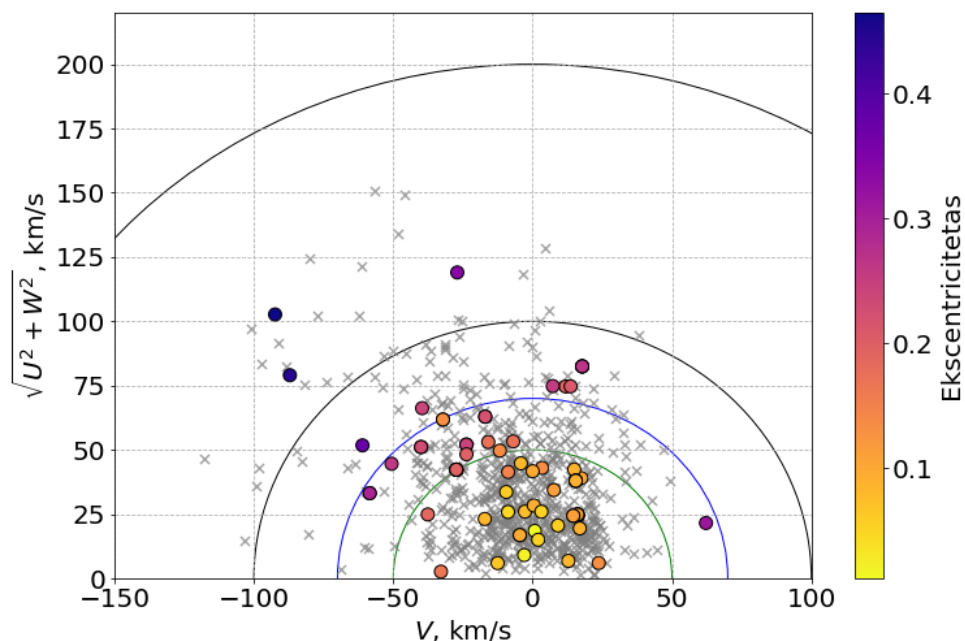
Žvaigždės gali būti skirstomos į Galaktikos diskus pagal keletą skirtingų aspektų, kurie jau buvo trumpai aptarti ankstesnėse darbo dalyse. Storasis Galaktikos diskas pasižymi tokiomis savybėmis kaip didesni žvaigždžių greičiai, didesnės alfa elementų gausos bei mažesnis metalingu-

mas. Taip pat storasis Galaktikos diskas yra senesnis nei plonasis.

Šiame darbe žvaigždės storajam ar plonajam diskams priskiriamos pagal savituosius greičius. Paprasčiausias įrankis tokiam skirstymui yra Toomre diagrama, kuri vaizduoja savituosius žvaigždžių greičius (skirstymo principas jau trumpai aprašytas 3.2 skyriuje). 2D diagramoje atvaizduojami savitieji greičiai per U, V, W laisvojo judėjimo greičių dedamųjų geometrinę sumą. Paveiksluose nr. 11 bei 16 pateikiamos Toomre diagramos, kuriose žvaigždės nuspalvintos atitinkamai pagal jų amžių bei [Mg/Fe] gausą.

Teoriškai, vidiniame apskritime (savitasis greitis ≤ 50 km/s) turėtų būti jauniausios ir mažiausią [Mg/Fe] gausą turinčios žvaigždės, kadangi šis regionas pagal žvaigždžių savituosius greičius atitinka plonąjį Galaktikos diską, o regione, už mėlyno apskritimo, kur žvaigždžių savitieji greičiai viršija 70 km/s, turėtų būti seniausios ir daugiausiai [Mg/Fe] turinčios žvaigždės, priskiriamos storajam Galaktikos diskui. Visgi matoma, kad plonajam diskui šiuo būdu priskiriama ir keletas senų (viena maždaug 8 milijardų metų, o dvi - daugiau nei 9 milijardų metų amžiaus), ir keletas turinčių aukštą [Mg/Fe] gausą (0.3 - 0.4) žvaigždžių. Kita vertus, storajam diskui priskiriamos tik žvaigždės, kurių amžius didesnis nei 6 milijardai metų, tačiau [Mg/Fe] gausa tolygiai pasiskirsčiusi nuo 0.1 iki 0.4 ir kiek daugiau. Šiuo atveju išskirtinė žvaigždė yra TYC4244-964-1, kuriai nustatyta [Mg/Fe] gausa lygi 0.38, amžius – 10.4 milijardo metų, $|Z_{\max}|$ – 660 parsekų, o savitasis greitis – maždaug 41 km/s. Taigi, vertinant šią žvaigždę pagal nustatytą savitąjį greitį būtų galima ją priskirti prie plonojo Galaktikos disko, tačiau amžius, [Mg/Fe] gausa bei $|Z_{\max}|$ rodo, jog žvaigždė tikriausiai priklauso storajam Galaktikos diskui. Kita vertus, svarbu paminėti, jog dėl prastos spektro kokybės šiai žvaigždei pavyko nustatyti tik magnio, silicio ir itrio gausas – tai rodo, jog TYC4244-964-1 gausų nustatymo tikslumas taip pat gali sukelti kažkiek abejonių. Dar viena žvaigždė, kuri pagal savitąjį greitį priskiriama prie plonojo Galaktikos disko ir turi didelę [Mg/Fe] gausą, yra TYC2037-1826-1. Jos [Mg/Fe] = 0,36, savitasis greitis – 33 km/s, amžius yra 6,1 milijardo metų, o $|Z_{\max}|$ – 79 pc. Šiuo atveju priskyrimui prie plonojo Galaktikos disko abejonių kelia tik [Mg/Fe] gausa, kurios paklaida darbe yra $\pm 0,13$. Šiuo atveju, priimama prielaida, kad žvaigždė priklauso plonajam diskui dėl amžiaus, savitojo greičio ir $|Z_{\max}|$ verčių. Visos kitos žvaigždės nėra ir senos, ir prisotintos magnio. Taigi daugeliui žvaigždžių skirstymas pagal savitąjį greitį sutampa su skirstymu pagal bent kelis kitus parametrus, tad viena ar dvi išsiskiriančios žvaigždės nepakeis statistinio vaizdo. Dėl šios priežasties tolesnėse diskusijose žvaigždžių cheminės ar kinematinės savybės bei žvaigždės-planetos ryšys bus nagrinėjami žvaigždės į Galaktikos diskus paskirsčius pagal jų savitąjį greitį. Žvaigždės, kurių savitasis greitis yra tarp 50 ir 70 km/s žymimos, kaip nepriskiriamos nei plonajam, nei storajam Galaktikos diskams.

Įdomu, kad, kaip matoma paveiksle nr. 14, jauniausios žvaigždės yra mažoje zonoje ties 0 - 0,10 ekscentriteto bei 0 - 0,20 $|Z_{\max}|$ vertėmis. Ten žvaigždės yra maždaug vieno - trijų milijardų metų amžiaus (amžiaus vidurkis darbo imtyje yra 5,4 milijardo metų, o standartinis nuokrypis 2,7 milijardo metų). Didėjant ekscentricitetui bei $|Z_{\max}|$ amžius auga iki maždaug 10 milijardų metų. Didėjantis $|Z_{\max}|$ rodo, jog senesnės žvaigždės su ekscentriškesnėmis orbitomis šioje imtyje priklauso storajam diskui, o žvaigždės, su mažiau ekscentriškomis orbitomis priklauso plonajam Galaktikos diskui.



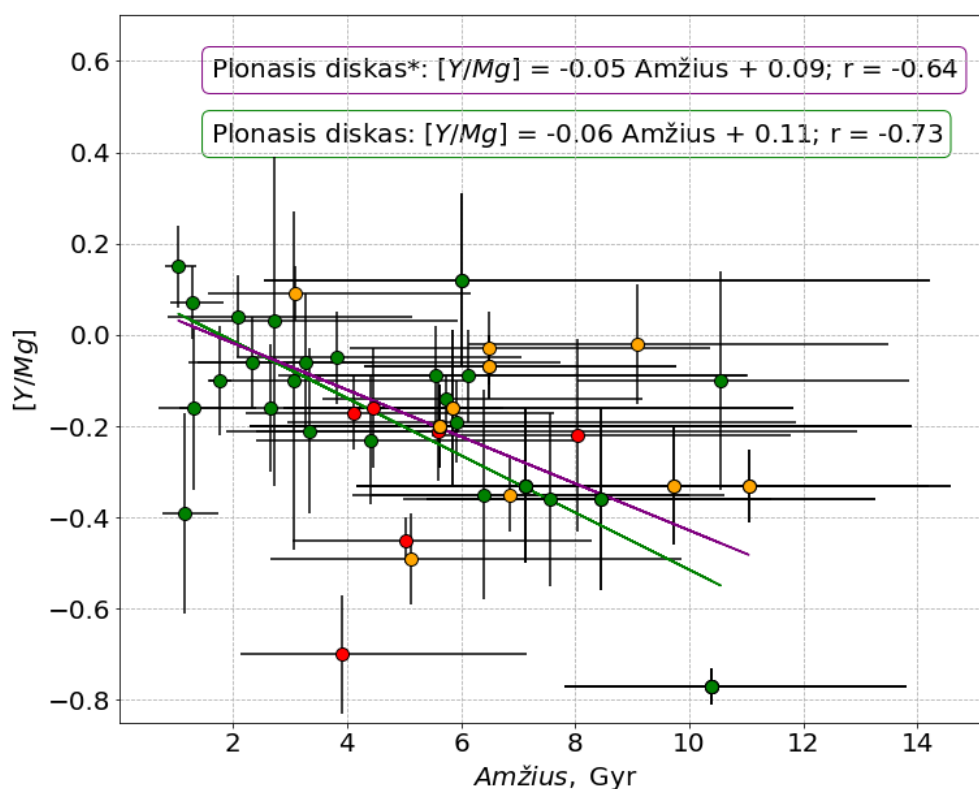
17 pav. Toomre diagrama. Taškų spalvos parodo žvaigždės orbitos ekscentriciteto vertę. 'x' – Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 m. žvaigždės be planetų [10].

Atvaizdavus ekscentriciteto pasiskirstymą Toomre diagramoje 17 pastebima, kad dauguma žvaigždžių su ekscentricitetu iki 0,20 turi savitąjį greitį iki 50 km/s, o žvaigždės, kurių savitasis greitis viršija 70 km/s turi ekscentricitetus nuo maždaug 0,30 iki 0,45. Taigi pastebima, jog plonojo disko žvaigždės turi mažiau ekscentriškas orbitas nei storjo disko žvaigždės, o storjo disko žvaigždės vidutiniškai turi didesnes ekscentriciteto vertes. Taigi svarbu pastebėti, kad žvaigždės orbitos ekscentricitetas šiame darbe koreliuoja su amžiumi [14] [44]. Kita vertus, paveiksle nr. 14 galima matyti ir, tikėtina, plonojo disko žvaigždžių, kurių ekscentricitetas yra maždaug 0,10, tačiau amžius artimas 10 milijardų metų, tad išimčių šiai tendencijai yra. Reikalinga didesnė žvaigždžių imtis, norint šį klausimą panagrinėti detaliau.

3.2.3 Kosminiai laikrodžiai

Žvaigždžių amžius yra vienas iš esminių parametru nagrinėjant jų evoliuciją. Per savo gyvavimo žvaigždės pereina keletą evoliucijos etapų, kurie vyksta būtent tam tikru žvaigždės gyvavimo metu. Nors pagrindinis parametras, nulemiantis žvaigždės gyvenimo trukmę, yra jos pradinė masė, kurios tiesiogiai įvertinti nėra galimybės, tad ir amžiaus, remiantis žvaigždės mase, nustatyti negalima.

Egzistuoja metodai, kuriais apytikriai galima nustatyti žvaigždės amžių. Tai padaryti būtų galima įvertinant, kuriame evoliucijos etape yra žvaigždė (pvz. trumpai trunkančioje submilžinių stadijoje). Kita vertus, didžioji dalis žvaigždžių ilgiausiai būna pagrindinėje sekoje, kai jų parametrai praktiškai nesikeičia, tad tiesioginiais metodais amžių nustatyti per sunku. Taigi norint nustatyti žvaigždės amžių reikia ieškoti ir tirti parametrus, kurie dinamiškai kinta einant laikui [45].



18 pav. $[Y/Mg]$ priklausomybė nuo amžiaus. Žvaigždės suskirstytos pagal Galaktikos diskus: žalia spalva - plonojo disko, oranžine - tarpinės, o raudona – storjo disko žvaigždės. Žalia linija rodo plonojo disko žvaigždžių $[Y/Mg]$ priklausomybę nuo amžiaus, o purpurinė linija – plonojo disko ir nepriskirtų nei vienam diskui žvaigždžių rinkinio.

Šiame darbe žvaigždžių amžiai nustatyti izochronų derinimo metodu (angl. isochrone fitting), tačiau šiame skyriuje nagrinėjama, ar darbe tiriamoms žvaigždėms cheminių elementų gausos gali būti naudojamos, kaip kosminiai laikrodžiai, kurių santykis parodo žvaigždės amžių.

Žinoma, jog $[Y/Mg]$ santykis Saulės tipo žvaigždėse kinta su jų amžiumi – tiesiškai didėja nuo seniausių iki jauniausių žvaigždžių [21], o Nissen ir kiti savo 2017 metų darbe žvaigždžių imtį praplėtė ir Kepler LEGACY žvaigždėmis [46]. Pastarajame darbe Kepler bei Saulės tipo žvaigždėms nustatyta $[Y/Mg]$ priklausomybė nuo amžiaus atrodo taip:

$$[Y/Mg] = 0.150(\pm 0.007) - 0.0347(\pm 0.0012) \times Age [Gyr]. \quad (10)$$

Paveiksle nr. 18 matoma $[Y/Mg]$ priklausomybė nuo žvaigždžių amžiaus. Šią priklausomybę nustatinėsime tik plonojo disko žvaigždėms (ar plonojo disko + nepriskirtų nei vienam diskui) dėl to, kad storjo disko žvaigždės teoriškai turėjo kitokią evoliuciją, o atskirai joms priklausomybės nustatyti neįmanoma dėl per mažos imties. Nustatyta priklausomybė rodo tokį $[Y/Mg]$ ir amžiaus santykį plonojo disko žvaigždėms:

$$[Y/Mg]_{plonasis} = 0.11 - 0.06 \times Age[Gyr], \quad (11)$$

su koreliacijos koeficientu $r = -0.73$. Galima teigti, jog tokia priklausomybė rodo, jog amžių tikrai galima apytikriai įvertinti pagal $[Y/Mg]$ santykį ir matematinės išraiškos kryptis sutampa su literatūroje pateikiama, tačiau dėl mažos imties ar daugiau nuo vidurkio nutolusių žvaigždžių šio santykio skaitinės vertės gana stipriai nesutampa su kitų autorių nustatytu. Taip pat reikia įvertinti parametrų paklaidas.

Taip pat paveiksle pateikiamas ir kitas santykis, pažymėtas "Plonasis diskas*", kuris aprašo plonojo Galaktikos disko ir nepriskirtų nei vienam diskui žvaigždžių rinkinį:

$$[Y/Mg]_{plonasis*} = 0.09 - 0.05 \times Age[Gyr], \quad (12)$$

su koreliacijos koeficientu $r = -0.64$. Šis koeficientas mažesnis dėl didesnio žvaigždžių išsibarstymo, tačiau skaitinės vertės priartėjo prie literatūroje aprašytos išraiškos.

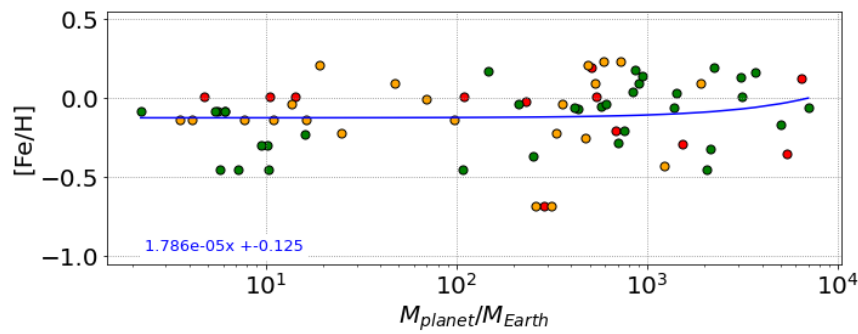
Nissen ir kitų autorių 2017 metų darbe taip pat kalbama ir apie kitus elementus, kuriuos galima naudoti žvaigždžių amžių nustatymui [46]. Litis minimas kaip vienas iš jų. Ateityje būtų naudinga žvaigždes palyginti ir pagal šį cheminį elementą bei susieti jį su žvaigždžių amžiumi. Šiame darbe ličio gausą pavyko nustatyti mažiau nei 20 žvaigždžių, tad buvo priimtas sprendimas tokią imtį laikyti nereprezentatyvia ir daugiau dėmesio Li gausai skirti vėlesniuose darbuose.

3.3 Žvaigždžių ir planetų ryšys

3.3.1 Elementų gausų ir jų santykių priklausomybė nuo planetų masės

Norint detaliau įsigilinti į planetų masės reikšmę bei planetų masės ir žvaigždžių cheminės sudėties ryšį, buvo nustatytos elementų gausų ir santykių priklausomybės tiesiogiai nuo planetos masės. Šios priklausomybės matomos paveikslėliuose nr. 19 - 21. Skirtingomis spalvomis atskirtos skirtingų Galaktikos diskų žvaigždės: žali taškai - plonojo Galaktikos disko žvaigždės, raudoni - storjo, o oranžiniais taškais pažymėtos žvaigždės, nepriskirtos nei vienam diskui. Verta pastebėti, kad taškų yra tiek, kiek planetų, tad žvaigždės, turinčios po daugiau nei vieną planetą yra atidėtos kelis kartus. Šių paveikslų esmė yra atvaizduoti, prie kokių žvaigždžių yra išsidėsciusi kiekviena darbo imtyje esanti planeta.

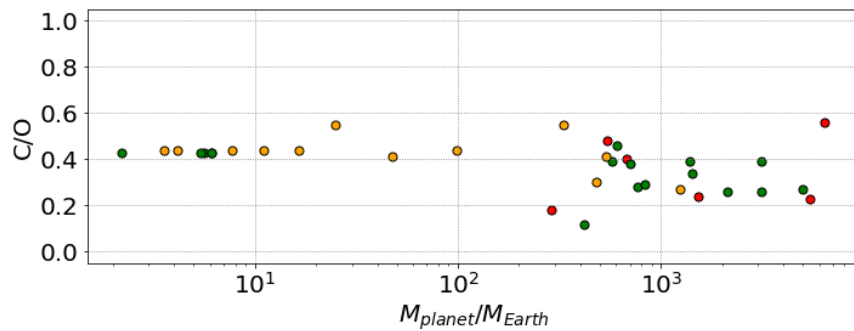
Pirmiausia paveikslėlyje nr. 19 galima pastebėti, kad šio darbo imtyje žvaigždžių $[Fe/H]$ priklausomybė nuo planetų masių yra sąlyginai nežymi. Mėlyna linija žymi tiesinę priklausomybę. Kita vertus, didesnė imtis, ypač turint nemetalingų žvaigždžių, leistų šią išvadą patvirtinti ar paneigti. Iškart svarbu paminėti, kad 4 raudoni taškai, išsidėstę ties $[Fe/H] = 0,01$ ir planetų masėmis, lygiomis 4,74; 10,5; 14,3 ir $109 M_{\oplus}$ priklauso vienai žvaigždei TYC2099-2717-1. Tai yra vienintelė šiame darbe storajam diskui priskirta žvaigždė, turinti planetų, lengvesnių nei $200 M_{\oplus}$. Nors būtų įdomu detaliau panagrinėti šios žvaigždės parametrus, dėl labai prastos kokybės spektro jai



19 pav. [Fe/H] gausos žvaigždėje priklausomybė nuo planetos masės. Plonojo disko žvaigždės pažymėtos žaliais taškais, storio - raudonais, o oranžiniais taškais žymimos nei vienam diskui nepriskirtos žvaigždės. Daugiau apie žymėjimą skaityti skyriuje 3.3.1.

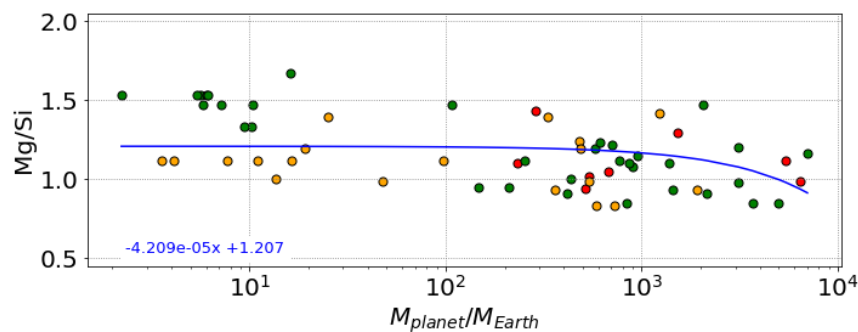
nebuvo nustatyta jokių cheminių elementų gausų. Šios žvaigždės amžius yra 7,3 milijardo metų.

Pav. nr. 20 matoma C/O santykio žvaigždėje priklausomybė nuo planetų masės. C/O santykio priklausomybę nuo planetų masės nagrinėti sunku, nes tai yra elementai, kurie susiję su žvaigždės evoliucijos stadija, tačiau žvaigždžių imtyje nepastebima didelio statistinio atsiskyrimo tarp skirtingų diskų žvaigždžių ar skirtingų masių planetų.



20 pav. C/O santykio žvaigždėje priklausomybė nuo planetos masės. Žymėjimas kaip ir pav. 19.

Darbe nustatyti azoto gausą [N/Fe] žvaigždėms su mažos masės planetomis buvo per daug sudėtinga dėl spektrų kokybės ir dėl to, kad žvaigždės pagrindė buvo nykštukės, tad [N/Fe] priklausomybė nuo planetos masių šiame skyriuje nėra atvaizduojama.

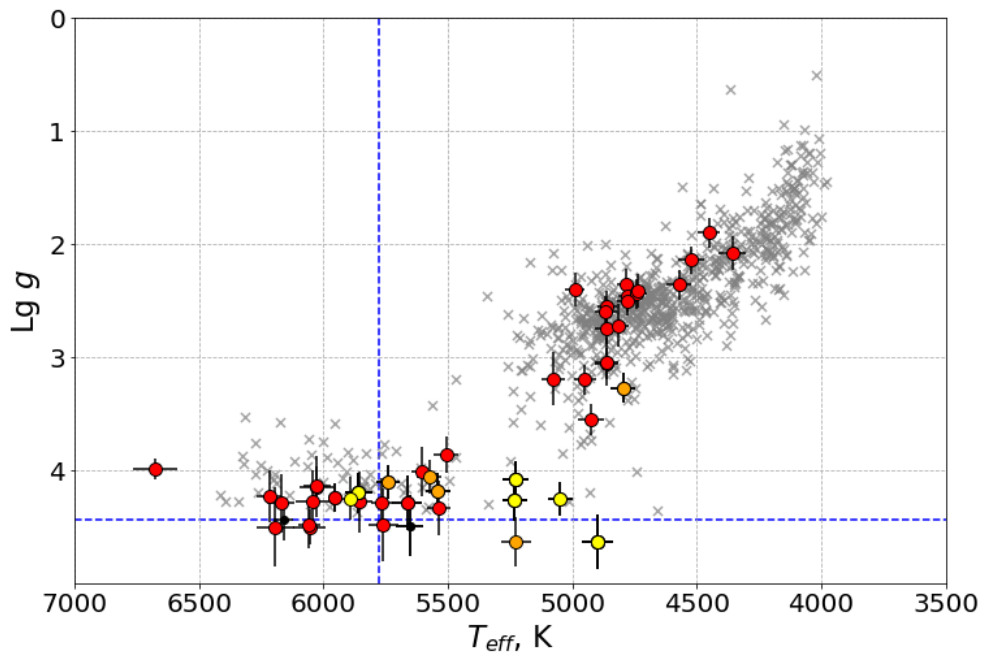


21 pav. Mg/Si santykio žvaigždėje priklausomybė nuo planetos masės. Žymėjimas kaip ir pav. 19.

Kalbant apie magnį ir silicį, Mg/Si santykis (pav. 21) yra vienas iš įdomiausių parametrų nag-

rinėjant planetų formavimąsi. Kaip ir minėta anksčiau, šiuose grafikuose dar ryškiau matosi, kad mažos masės planetas turinčios žvaigždės šiame tyrime turi Mg/Si santykį, kuris yra tarp 1 ir 2. Tikėtina, jog apie šias žvaigždes susiformavusių planetų cheminė kompozicija yra panaši į Žemės ir jų sandaroje dominuoja O, Fe, Mg, Si, taip pat yra nedaug Ca ir Al. Pačiose žvaigždėse gausu olivino ir piroksino silikatų [41].

Pav. nr. 21 matome, kad didėjant žvaigždės masei Mg/Si santykis mažėja, tad nesunku pastebėti, kad [Mg/Fe] gausa taip pat mažėja, o [Si/Fe] auga. Vadinasi, didelės masės planetas turinčios žvaigždės turi mažesnį Mg/Si santykį nei mažas planetas turinčios žvaigždės. Planetų sistemoje, kur Mg/Si santykis nukrenta žemiau vieneto, dominuoja piroksinas ir Fe, o olivino kiekiai mažesni. Kadangi didžioji dalis magnio būna sunaudota piroksinui, lieka Si perteklius [41]. Reikalingi tolimesni Mg, Si detalūs tyrimai, ypač masyvių planetų žvaigždėse.



22 pav. Kiel diagrama, kurioje spalviškai žvaigždės atskirtos pagal lengviausios planetos masę. Geltona - lengviausios planetos masė iki $16 M_{\oplus}$, oranžinė - lengviausios planetos masė tarp 16 ir $116 M_{\oplus}$, raudona - lengviausios planetos masė virš $116 M_{\oplus}$. 'x' žymi Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 metų darbe nagrinėtas žvaigždes. [10]. Mėlyna punktyrinė linija pažymėtos Saulės vertės.

3.3.2 Planetos, kinematika, amžiai

Toliau darbe nagrinėjama Mg/Si arba C/O priklausomybė nuo žvaigždės amžiaus, ekscentriciteto ir kt. parametų. Visuose paveiksluose žvaigždės suskirstytos pagal savo lengviausios planetos masę, kur geltona reiškia mažos masės planetas turinčias žvaigždes (iki 16 Žemės masių), oranžinė atitinkamai vidutinės masės (nuo 16 iki 116 Žemės masių), o raudona - didelės masės planetas ($> 116 M_{\oplus}$). Kaip ir anksčiau matytuose paveikslėliuose, 'x' žymi Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 metų darbe [10] nagrinėtas žvaigždes. Visi 4 paveikslai (nr. 23 – 26) rodo statistinius sutapimus

tarp Tautvaišienės ir šio darbo žvaigždžių – šiuo aspektu neįprastų tendencijų nematoma, nepaisant kelių išskirtinių atvejų, kurie bus pakomentuoti prie kiekvieno paveikslo atskirai.

Paveiksle nr. 22 pateikiama Kiel diagrama, kurioje žvaigždžių taškai nuspalvinti pagal lengviausios planetos masę. Matoma, kad visos mažos masės planetos aptiktos prie nykštukių žvaigždžių. Toks reiškinys pastebimas dėl planetų aptikimo metodų techninių ribojimų, kai prie milžinių žvaigždžių techniškai daug sudėtingiau pastebėti mažos masės planetas. Taigi iš paveikslo nr. 22 galima daryti išvadą, kad prie nykštukių žvaigždžių mažos masės planetas aptikti lengviau nei prie milžinių, tačiau efektinės temperatūros ar laisvojo kritimo pagreičio atžvilgiu iš šios imties prielaidų priimti negalima.

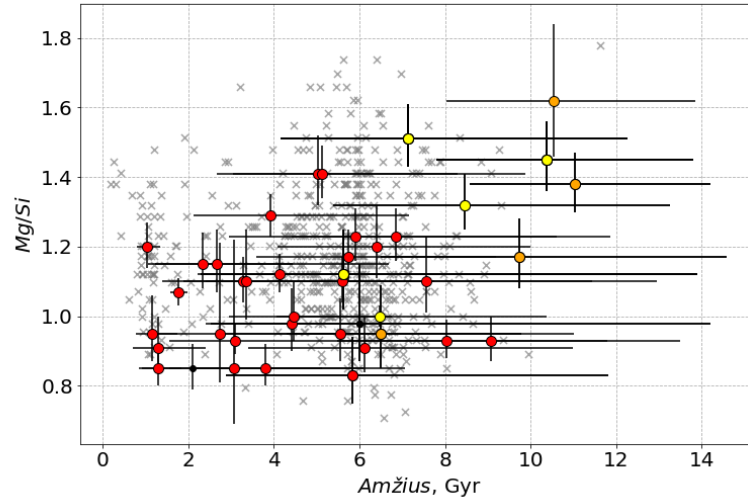
Pavaiksle nr. 23 matoma Mg/Si priklausomybė nuo amžiaus bei išskirstymas pagal lengviausios planetos masę. Matosi, kad prie jaunesnių nei 3 milijardai metų žvaigždžių Mg/Si vertė nepakyla aukščiau 1,2, o 4 mlrd. metų ir senesnės žvaigždės turi Mg/Si santykį iki maždaug 1,6. Aukštesnis Mg/Si santykis ypač pastebimas prie senesnių nei 9 milijardai metų žvaigždžių ir svyruoja tarp 1,2 ir 1,6. Taip pat didėjant Mg/Si ir amžiui, spalviškai matomas ir lengviausios planetos masės mažėjimas. Taigi prie seniausių žvaigždžių ir didžiausio Mg/Si santykio matoma lengviausias planetas turinčių žvaigždžių koncentracija. Įdomu, jog jauniausia žvaigždė, prie kurios matoma lengvesnė nei $116 M_{\oplus}$ planeta, yra maždaug 6 milijardų metų amžiaus, kai amžių vidurkis imtyje yra apie 5,4 milijardo metų.

Moksliniame darbe II [8] buvo pastebėta, kad didėjant planetos masei žvaigždės Mg/Si santykis mažėja. Tikėtina, kad prie aukštą Mg/Si santykį turinčių žvaigždžių susiformavę planetos savo kompozicija yra panašios į Žemę, jose dominuoja O, Fe, Mg, Si, taip pat yra nedaug Ca ir Al. Ši savybė koreliuoja ir su mažesne nei kitų planetų mase [41]. Amžiaus ir Mg/Si santykio ryšys gali būti paaiškinamas alfa elementų gausos priklausomybe nuo žvaigždės amžiaus. N. C. Santos ir kiti autoriai 2015 metų publikacijoje [47] parodė, jog didėjant žvaigždės Si/Fe santykiui (natūralu, ir α /Fe) didėja jų Mg/Si santykis. Kadangi alfa elementų kiekis glaudžiai susijęs su žvaigždės amžiumi dėl Galaktikos evoliucijos, suprantama, jog Mg/Si santykis didėja kartu su žvaigždės amžiumi. N. C. Santos ir kiti šią tendenciją nustatė naudodami V. Zh. Adibekyan ir kitų autorių 2012 darbo duomenis [48].

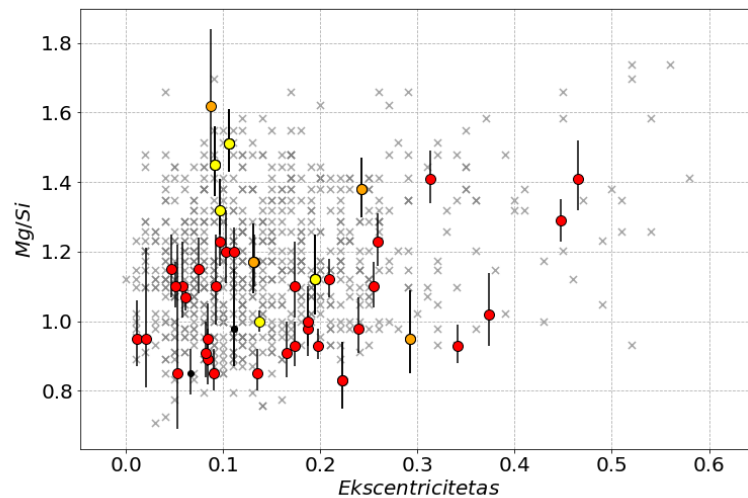
Vėlgi, būtina pastebėti, kad matomos didelės amžiaus nustatymo paklaidos, tačiau netgi paklaidų ribų kraštuose atsiradę taškai atspindėtų darbe pateiktas tendencijas. Nors amžiaus, kaip konkrečios vertės, su dideliu užtikrintumu teigti negalima, akivaizdžiai matoma, kad Mg/Si santykis su amžiumi didėja, o dauguma lengviausių planetų yra aptiktos prie seniausių šio darbo imties žvaigždžių.

Paveiksle nr. 24 matoma Mg/Si priklausomybė nuo orbitos ekscentriciteto, žvaigždės išskirtos pagal lengviausios planetos masę. Nukrypimų nuo palyginimo žvaigždžių nepastebima.

Moksliniame darbe II [8] pastebėta ir lengvesnių planetų prie didesnį Mg/Si santykį turinčių žvaigždžių priežastis: prie aukštą Mg/Si turinčių žvaigždžių dažniau formuojasi Žemės tipo planetos, kurios yra lengvesnės ir chemine sudėtimi panašios į Žemę. Nepaisant to, stebimas ir naujas dėsningumas - dauguma mažos masės planetas turinčių žvaigždžių išsidėstę ties 0,1 orbitos ekscentriciteto, viena prie 0,2 ekscentriciteto. Vidutinės masės planetas turinčios žvaigždės jau plačiau



23 pav. Mg/Si priklausomybė nuo amžiaus bei spalvinis išskirstymas pagal lengviausios planetos masę. Geltona - lengviausios planetos masė iki $16 M_{\oplus}$, oranžinė - lengviausios planetos masė tarp 16 ir $116 M_{\oplus}$, raudona - lengviausios planetos masė virš $116 M_{\oplus}$. 'x' žymi Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 metų darbe nagrinėtas žvaigždes. [10].



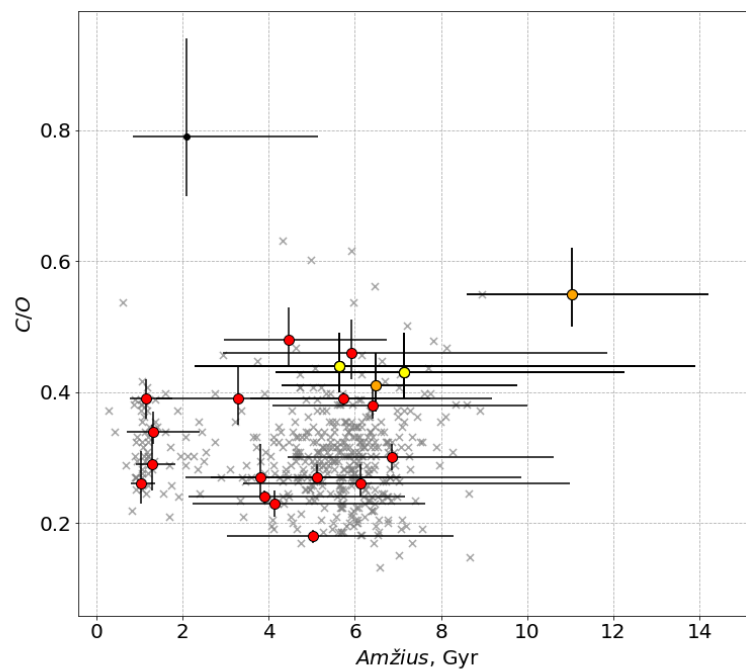
24 pav. Mg/Si priklausomybė nuo orbitos ekscentriciteto bei spalvinis išskirstymas pagal lengviausios planetos masę. Geltona - lengviausios planetos masė iki $16 M_{\oplus}$, oranžinė - lengviausios planetos masė tarp 16 ir $116 M_{\oplus}$, raudona - lengviausios planetos masė virš $116 M_{\oplus}$. 'x' žymi Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 metų darbe nagrinėtas žvaigždes. [10].

išsidėstę ekscentriciteto erdvėje (nuo 0,1 iki 0,3), o imties orbitų ekscentricitetai svyruoja nuo 0 iki 0,60. Tankiau imties žvaigždės su planetomis yra išsidėstę iki 0,30 ekscentriciteto vertės.

Paveikslas nr. 25 vaizduoja C/O priklausomybę nuo žvaigždės masės, taškai nuspalvinti pagal planetos masę. Matoma, kad duomenys sutampa su [10] darbe nagrinėtomis žvaigždėmis, tačiau pastebimi keli neženklūs skirtumai. Statistiškai nemaža dalis tyrimo žvaigždžių yra išsidėstę ties 4 - 8 milijardais metų ir $C/O \sim 0,4 - 0,5$, kai palyginimo žvaigždžių imtyje ten didesnės koncentracijos nematoma, tad galima įžvelgti šiek tiek didesnį žvaigždžių su planetomis C/O santykį. Toks

reiškinyms galimas dėl nedidelio žvaigždžių, su išmatuotu C/O santykiu bei nustatytu amžiumi darbo imtyje (21/49). Tokiu būdu imtis sumažinama iki gerokai mažiau reprezentatyvios. Taip pat matoma viena atsiskyrusi žvaigždė su C/O lygiu 0,79. Šios žvaigždės planeta yra kandidačių sąraše ir jos masė nėra nustatyta. Toks C/O santykis žvaigždėse nėra itin dažnas, tačiau literatūroje sutinkamas. Nissen 2013 metų darbe teigia, kad žvaigždžių su planetomis C/O santykis gali viršyti ir 1 [49].

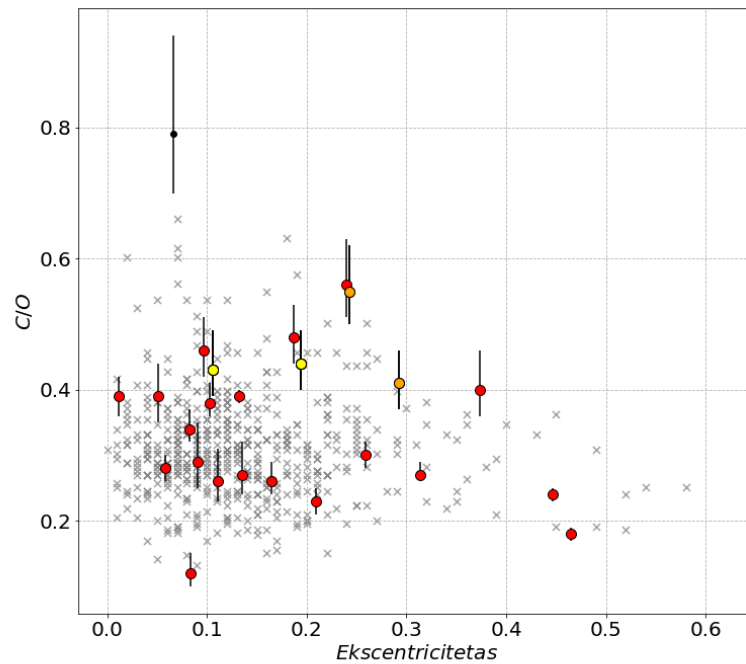
Aptariamame paveiksle taip pat matomas aiškus žvaigždžių pasiskirstymas pagal lengviausios planetos masę: visos lengvos ir vidutinės masės planetos yra dešiniajame viršutiniame grafiko kampe, kur $C/O > 0,4$, o amžius - maždaug 6 milijardai metų ir daugiau. Kaip žinoma iš Mokslinis darbas II [8], C/O santykis stipriai didėja augant žvaigždės metalingumui. Kadangi dauguma mažos masės planetų aptiktos prie metalingų žvaigždžių ($[Fe/H] > -0,3$), šių žvaigždžių C/O yra didesnis. Moksliniame darbe II [8] buvo aptiktas stiprus $[O/Fe]$ mažėjimas didėjant metalingumui. Bendrai žvaigždės paveiksle pasiskirstę nuo daugiau nei 600 milijonų metų iki kiek 11 milijardų metų, o C/O santykis svyruoja nuo 0,1 iki 0,6, kai viena žvaigždė išsiskiria itin didelio C/O = 0,79. Žvaigždžių amžiaus ryšys su planetų mase, kaip ir amžiaus nustatymo paklaidos, jau aptartas diskusijoje apie paveikslą nr. 23.



25 pav. C/O priklausomybė nuo žvaigždės masės bei spalvinis išskirstymas pagal lengviausios planetos masę. Geltona - lengviausios planetos masė iki $16 M_{\oplus}$, oranžinė - lengviausios planetos masė tarp 16 ir $116 M_{\oplus}$, raudona - lengviausios planetos masė virš $116 M_{\oplus}$. 'x' žymi Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 metų darbe nagrinėtas žvaigždes. [10].

Paveiksle nr. 26 matoma C/O priklausomybė nuo orbitos ekscentriciteto, kur spalvomis atskirtos žvaigždės pagal savo lengviausios planetos masę. Vėlgi, matoma, kad žvaigždžių su planetomis C/O vidutiniškai yra kiek didesnis nei žvaigždžių be planetų (Tautvaišienė ir kiti [10]), tačiau

žvaigždžių su planetomis imtis yra per maža, kad tokią tendenciją galima būtų teigti su pakankamu užtikrintumu. Šiam teiginiui patvirtinti reikėtų tyrimo su didesne žvaigždžių imtimi. Taip pat stebimas ir anksčiau aptartas didesnis C/O žvaigždėse su lengvesnėmis planetomis. Be to, daugiau priklausomybių nepastebima; didžiausia žvaigždžių koncentracija pastebima ties $0,2 < C/O < 0,5$ bei $0,0 < \text{ekscentricitetas} < 0,2$, o visos žvaigždės išsidėstę nuo 0 iki 0,6 ekscentriciteto ašyje bei nuo 0,1 iki kiek mažiau nei 0,6 C/O ašyje su viena žvaigžde prie 0,79 C/O .



26 pav. C/O priklausomybė nuo orbitos ekscentriciteto bei spalvinis išskirstymas pagal lengviausios planetos masę. Geltona - lengviausios planetos masė iki $16 M_{\oplus}$, oranžinė - lengviausios planetos masė tarp 16 ir $116 M_{\oplus}$, raudona - lengviausios planetos masė virš $116 M_{\oplus}$. 'x' žymi Tautvaišienės ir kitų autorių 2022 metų darbe nagrinėtas žvaigždes. [10].

Rezultatų apibendrinimas ir išvados

Šiame darbe aptariamos 49 žvaigždės su planetomis, kurioms buvo nustatytos 8 cheminių elementų gausos (C, N, O, Mg, Si, S, Y, Eu), kinematiniai parametrai ir amžiai. Išnagrinėti ryšiai ir priklausomybės tarp nustatytų parametrų, žvaigždės priskirtos Galaktikos diskams ir padalintos į grupes pagal jų lengviausios planetos masę. Rezultatai palyginti su kitų autorių nustatytais tendencijomis tarp žvaigždžių kinematikos, chemijos ar amžiaus. Darbo metu buvo įgyvendinti šie uždaviniai:

1. Iširtos 49 žvaigždės su planetomis, kurios nuo Saulės vidutiniškai nutolę per 58 parsekus ir jų amžiaus vidurkis yra 5,4 milijardo metų. Pastebėta, kad šių žvaigždžių *alfa*-elementų – Mg, Si, S ir *r*-proceso elemento Eu gausos santykiyje su geležimi yra padidėjusios nei palyginimo žvaigždžių be planetų.
2. Paskirsčius žvaigždes pagal jų lengviausios planetos masę pastebėta, kad mažos masės planetas (iki $16 M_{\oplus}$) turinčios žvaigždės turi ir didžiausią Mg/Si santykį ($\langle \text{Mg/Si} \rangle = 1,29$, o visos žvaigždžių su planetomis imties - 1,09) iš visos imties. Tokie rezultatai koreliuoja su literatūroje nagrinėjama duomenimis ir patvirtina, kad šios mažos masės planetos, tikėtina, yra chemine sudėtimi panašios į Žemę.
3. Žvaigždės paskirstytos į plonąjį (28 imties žvaigždės) ir storąjį (9 žvaigždės) Galaktikos diskus pagal savituosius greičius. Pastebėta, kad daugeliui žvaigždžių toks skirstymas atitinka ir skirstymus remiantis žvaigždžių chemija bei amžiais. Kita vertus, žvaigždžių skirstymas į Galaktikos diskus, vertinant tiek cheminius, tiek kinematinius parametrus bei amžius, būtų dar tikslesnis.
4. Visos imtyje nagrinėtos mažos masės (iki $16 M_{\oplus}$) ir visos, išskyrus vieną, mažesnės nei $116 M_{\oplus}$ masės planetos aptiktos prie nykštukių žvaigždžių, kas veikiausiai yra planetų aptikimo techninių ribojimų pasekmė. Tokia statistika parodo, jog lyginant planetų savybes reikia nykštukes ir milžines žvaigždes nagrinėti atskirai.
5. Nagrinėtas neutronų pagavimo reakcijos elemento ir *alfa*-elemento gausų santykis kartu su žvaigždžių amžiumi. Šiam palyginimui naudotas [Y/Mg] santykis, literatūroje minimas kaip kosminis laikrodys. Pastebėta plonojo Galaktikos disko ir nepriskirtų nei vienam diskui (su savitojo greičio vertėmis, didesnėmis už plonojo disko ribą ir mažesnėmis nei storąjo disko riba) žvaigždžių rinkinio [Y/Mg] priklausomybė nuo amžiaus: $[Y/Mg]_{\text{plonasis*}} = 0.09 - 0.05 \times \text{Amzius}[Gyr]$. Ši priklausomybė savo kryptimi gerai sutampa su mokslinėje literatūroje nurodytomis priklausomybėmis, tačiau patikimai išraiškai gauti reikia tirti didesnę žvaigždžių imtį.

Summary

Stars with exoplanets: star-planet connection

Tomas Narbuntas

The objective of this study was to analyze the relationships between chemical abundances, kinematic parameters, and ages in representative dwarf and giant stars with planets in the solar vicinity. The main goals of the research were to review relevant scientific publications that discuss the connections between the aforementioned topics, measure the abundances of C, N, O, Mg, Si, S, Y and Eu (C, N, O, Mg, Si abundances for 25 stars were taken from Scientific Research Work II [8]). The study was aimed at exploring the relationships between the kinematic parameters, age (used from Scientific Research Work III [9] and provided by supervisor), and chemical abundances of the stars. This involved categorizing the stars into Galactic disks and analyzing the phenomenon known as cosmic clocks and identifying differences among stars with planets of different sizes.

The 49 stars with planets, which are on average located 58 parsecs away from the Sun and have an average age of 5.4 billion years, were thoroughly examined. It was noted that these stars exhibit slightly higher abundances of Mg, Si, S, and Eu compared to stars without planets. It was found that stars with low mass planets (weighing up to $16 M_{\oplus}$) have the highest Mg/Si ratio. The mean Mg/Si ratio for these stars was determined to be 1,29, whereas the overall mean for the entire sample of stars with planets was 1,09. These findings align with previous research and suggest that these low-mass planets likely have chemical compositions similar to that of Earth. The stars were further classified into thin (28 stars) and thick (9 stars) Galactic disks based on their peculiar velocities. Remarkably, this distribution not only statistically correlated with the literature-reported [Mg/Fe] abundances and age values but also revealed some discrepancies in both parameters. This indicates that when categorizing stars into Galactic disks, it is crucial to consider both chemical and kinematic parameters, as well as age, to obtain the most accurate results. When analyzing the properties of the planets, it was observed that all low-mass (up to $16 M_{\oplus}$) planets and all but one mid-mass (more than 16 and less than $116 M_{\oplus}$), were found orbiting dwarf stars. This suggests that the detection of planets is influenced by technical limitations, emphasizing the importance of separately examining properties of planets around dwarf and giant stars. The study also explored the ratio of neutron-capture reaction elements to alpha elements in relation to stellar ages. The [Y/Mg] ratio, known as a cosmic clock, was employed for this analysis. Notably, a correlation between [Y/Mg] and age was observed for the thin Galactic disk and stars not assigned to any specific disk (all stars with peculiar velocity lower than threshold for thick disk). The relationship was expressed as $[Y/Mg]_{thin*} = 0.09 - 0.05 \times Age[Gyr]$. This finding aligns with existing scientific literature but exact numeric values of the equation slightly differ. A larger sample of stars should be investigated to establish a more precise expression. In summary, this study provides valuable insights into the relationships between stellar kinematics, chemistry, and the presence of planets. The results align with existing literature trends and highlight the importance of considering multiple parameters for accurate characterization of stars with planets.

Priedas

A1 lentelė. Tiriamų žvaigždžių sąrašas su planetomis ir jų parametrais

Žvaigždė (TYC)	Planeta	Planetos masė, M_{\oplus}	Orbitos period., dienos	Didysis pusašis, au	Planetos tipas	Šalt.
TYC1133-1258-1	HN Peg b	6991.57 ^{+2996.39} _{2996.39}		773.00 ^{+13.00} _{13.00}	Dujų milžinė	[50]
TYC1681-1751-1	HD 210702 b	574.60 ^{+30.80} _{30.80}	354.10 ^{+0.70} _{0.70}	1.15 ^{+0.06} _{0.06}	Dujų milžinė	[51]
TYC2031-1389-1	omi CrB b	477.00	187.83 ^{+0.54} _{0.54}	0.83	Dujų milžinė	[52]
TYC2038-1873-1	HD 145457 b	709.00 ^{+133.00} _{133.00}	176.30 ^{+0.39} _{0.39}	0.76 ^{+0.04} _{0.04}	Dujų milžinė	[53]
TYC2103-1620-1	HD 164595 b	16.14 ^{+2.72} _{2.72}	40.00 ^{+0.24} _{0.24}	0.23	Neptūninė	[54]
TYC2126-1196-1	HD 177830 b	537.00 ^{+64.00} _{64.00}	410.10 ^{+2.20} _{2.20}	1.14 ^{+0.03} _{0.03}	Dujų milžinė	[53]
	HD 177830 c	47.67 ^{+6.36} _{6.36}	110.90 ^{+0.10} _{0.10}	0.51 ^{+0.00} _{0.00}	Dujų milžinė	[55]
TYC2153-2883-1	HD 190360 b	489.00 ^{+25.00} _{25.00}	2915.04 ^{+29.00} _{29.00}	3.97 ^{+0.07} _{0.07}	Dujų milžinė	[53]
	HD 190360 c	19.07 ^{+2.42} _{2.42}	17.11 ^{+0.00} _{0.00}	0.13 ^{+0.01} _{0.01}	Neptūninė	[56]
TYC2576-2228-1	rho CrB b	332.10 ^{+7.50} _{7.50}	39.85 ^{+0.00} _{0.00}	0.22 ^{+0.00} _{0.00}	Dujų milžinė	[57]
	rho CrB c	25.00 ^{+2.00} _{2.00}	102.54 ^{+0.17} _{0.17}	0.41 ^{+0.00} _{0.00}	Neptūninė	[57]
TYC2653-91-1	HD 180314 b	6398.00 ^{+528.00} _{528.00}	396.03 ^{+0.62} _{0.62}	1.46 ^{+0.06} _{0.06}	Dujų milžinė	[53]
TYC3048-172-1	HD 136418 b	680.00 ^{+48.00} _{48.00}	464.30 ^{+3.20} _{3.20}	1.29 ^{+0.03} _{0.03}	Dujų milžinė	[53]
TYC3161-126-1	HD 197037 b	251.00 ^{+16.00} _{16.00}	1035.70 ^{+13.00} _{13.00}	2.07 ^{+0.05} _{0.05}	Dujų milžinė	[58]
TYC3231-323-1	14 And b	1525.50	185.84 ^{+0.23} _{0.23}	0.83	Dujų milžinė	[59]
TYC3475-1198-1	24 Boo b	289.00 ^{+41.00} _{41.00}	30.35 ^{+0.01} _{0.01}	0.19 ^{+0.01} _{0.01}	Dujų milžinė	[60]
TYC3658-583-1	HD 2952 b	435.00 ^{+83.00} _{83.00}	311.60 ^{+1.80} _{1.80}	1.23 ^{+0.02} _{0.02}	Dujų milžinė	[53]
TYC3869-494-1	HD 139357 b	3101.89 ^{+683.31} _{683.31}	1125.70 ^{+9.00} _{9.00}	2.36 ^{+0.20} _{0.20}	Dujų milžinė	[61]
TYC3888-1886-1	HD 158259 b	2.22 ^{+0.39} _{0.45}	2.18 ^{+0.00} _{0.00}		Žemės tipo	[62]
	HD 158259 c	5.60 ^{+0.60} _{0.59}	3.43 ^{+0.00} _{0.00}		Neptūninė	[62]
	HD 158259 d	5.41 ^{+0.74} _{0.71}	5.20 ^{+0.00} _{0.00}		Neptūninė	[62]
	HD 158259 e	6.08 ^{+0.94} _{1.03}	7.95 ^{+0.00} _{0.00}		Neptūninė	[62]
	HD 158259 f	6.14 ^{+1.31} _{1.37}	12.03 ^{+0.01} _{0.01}		Neptūninė	[62]
TYC3903-2143-1	HD 167042 b	540.29 ^{+28.60} _{38.14}	420.77 ^{+3.48} _{3.11}	1.32 ^{+0.03} _{0.04}	Dujų milžinė	[63]
TYC4078-428-1	HD 29021 b	763.00 ^{+64.00} _{64.00}	1362.00 ^{+4.60} _{4.00}	2.28 ^{+0.07} _{0.08}	Dujų milžinė	[64]
TYC4166-541-1	HD 113337 b	899.42 ^{+76.28} _{76.28}	324.00 ^{+1.70} _{3.30}	0.92 ^{+0.09} _{0.09}	Dujų milžinė	[65]
TYC4222-2311-1	42 Dra b	1233.13 ^{+270.14} _{270.14}	479.10 ^{+6.20} _{6.20}	1.19 ^{+0.01} _{0.01}	Dujų milžinė	[61]
TYC4244-964-1	HD 191939 b	10.40 ^{+0.90} _{0.90}	8.88 ^{+0.00} _{0.00}	0.08 ^{+0.00} _{0.00}	Neptūninė	[66]
	HD 191939 c	7.20 ^{+1.40} _{1.40}	28.58 ^{+0.00} _{0.00}	0.17 ^{+0.00} _{0.00}	Neptūninė	[66]
	HD 191939 d	5.80	38.35 ^{+0.00} _{0.00}	0.21 ^{+0.00} _{0.00}	Neptūninė	[66]
	HD 191939 e	108.00 ^{+3.00} _{3.00}	101.50 ^{+0.40} _{0.40}	0.40 ^{+0.01} _{0.01}	Dujų milžinė	[66]
	HD 191939 f	2065.00 ^{+1435.00} _{1435.00}	4450.00 ^{+2750.00} _{2750.00}	4.80 ^{+2.20} _{2.20}	Dujų milžinė	[66]
TYC4284-1402-1	HD 221585 b	512.00 ^{+44.00} _{44.00}	1173.00 ^{+16.00} _{16.00}	2.31 ^{+0.08} _{0.08}	Dujų milžinė	[67]
TYC4417-267-1	8 UMi b	416.00 ^{+51.00} _{51.00}	93.40 ^{+4.50} _{4.50}	0.49 ^{+0.02} _{0.02}	Dujų milžinė	[53]
TYC4561-2319-1	HD 120084 b	1430.20	2082.00 ^{+24.00} _{35.00}	4.30	Dujų milžinė	[68]
TYC4650-917-1	HD 216520 b	10.26 ^{+0.99} _{0.99}	35.45 ^{+0.01} _{0.01}	0.20 ^{+0.00} _{0.00}	Neptūninė	[69]
	HD 216520 c	9.44 ^{+1.63} _{1.63}	154.43 ^{+0.44} _{0.44}	0.53 ^{+0.01} _{0.01}	Neptūninė	[69]
TYC1092-1778-1	HD 196885 A b	947.00 ^{+16.00} _{16.00}	1325.86 ^{+3.65} _{3.65}	2.60 ^{+0.10} _{0.10}	Dujų milžinė	[70]
TYC1107-2709-1	18 Del b	3127.30 ^{+95.30} _{95.30}		2.54 ^{+0.04} _{0.04}	Dujų milžinė	[71]
TYC1193-2072-1	HD 3651 b	69.99 ^{+2.48} _{2.42}	62.24 ^{+0.00} _{0.00}	0.30 ^{+0.00} _{0.00}	Dujų milžinė	[72]
TYC1211-1730-1	HD 10697 b	1914.59 ^{+229.74} _{180.71}	1075.38 ^{+0.82} _{0.75}	2.05 ^{+0.08} _{0.09}	Dujų milžinė	[73]
TYC1445-2560-1	11 Com b	5434.70 ^{+540.30} _{413.20}		1.21 ^{+0.06} _{0.05}	Dujų milžinė	[71]
TYC1601-1129-1	HD 231701 b	359.00 ^{+79.00} _{79.00}	141.63 ^{+0.07} _{0.07}	0.57 ^{+0.05} _{0.05}	Dujų milžinė	[74]
TYC1688-1821-1	HD 209458 b	211.00 ^{+7.00} _{7.00}	3.52 ^{+0.00} _{0.00}	0.05 ^{+0.00} _{0.00}	Dujų milžinė	[72]
TYC1717-2193-1	51 Peg b	147.00 ^{+4.00} _{4.00}	4.23 ^{+0.00} _{0.00}	0.05 ^{+0.00} _{0.00}	Dujų milžinė	[72]
TYC1761-192-1	HD 12661 b	725.60 ^{+19.40} _{19.70}	262.36 ^{+0.02} _{0.02}	0.82 ^{+0.01} _{0.01}	Dujų milžinė	[72]
	HD 12661 c	589.60 ^{+17.20} _{17.20}	1696.70 ^{+2.30} _{2.40}	2.86 ^{+0.04} _{0.04}	Dujų milžinė	[72]
TYC1765-1369-1	HD 14067 b	5001.78 ^{+2234.79} _{1697.36}	2721.23 ^{+611.31} _{229.98}	5.25 ^{+0.75} _{0.37}	Dujų milžinė	[73]
TYC1853-1187-1	HD 32963 b	231.00 ^{+11.00} _{11.00}	2328.00 ^{+24.00} _{24.00}	3.42 ^{+0.06} _{0.06}	Dujų milžinė	[72]
TYC1894-1961-1	HD 50554 b	1383.00 ^{+60.00} _{57.00}	1222.80 ^{+1.90} _{1.80}	2.27 ^{+0.04} _{0.04}	Dujų milžinė	[72]
TYC1920-2194-1	HD 62509 b	835.90 ^{+31.80} _{0.00}		1.61 ^{+0.03} _{0.00}	Dujų milžinė	[71]
TYC1933-747-1	HD 63433 b		7.11 ^{+0.00} _{0.00}	0.07 ^{+0.00} _{0.00}	Neptūninė	[75]
	HD 63433 c		20.55 ^{+0.00} _{0.00}	0.15 ^{+0.01} _{0.01}	Neptūninė	[75]

Tęsinys sekančiame puslapyje

lentelė A1 – tęsinys

Žvaigždė (TYC)	Planeta	Planetos masė, M_{\oplus}	Orbitos period., dienos	Didysis pusiašis, au	Planetos tipas	Šalt.
TYC1942-1827-1	EPIC 212178066.01		15.61			[76]
TYC2037-1826-1	eps CrB b	$2129.00^{+95.00}_{-95.00}$	$417.90^{+0.50}_{-0.50}$	1.30	Dujų milžinė	[77]
TYC2099-2717-1	HD 164922 b	$109.00^{+4.00}_{-4.00}$	$1198.50^{+3.20}_{-3.10}$	$2.15^{+0.03}_{-0.03}$	Dujų milžinė	[72]
	HD 164922 c	$14.30^{+1.10}_{-1.10}$	$75.82^{+0.04}_{-0.04}$	$0.34^{+0.00}_{-0.00}$	Neptūninė	[72]
	HD 164922 d	$4.74^{+0.67}_{-0.67}$	$12.46^{+0.00}_{-0.00}$	$0.10^{+0.00}_{-0.00}$	Žemės tipo	[72]
	HD 164922 e	$10.50^{+1.00}_{-1.00}$	$41.76^{+0.01}_{-0.01}$	$0.23^{+0.00}_{-0.00}$	Neptūninė	[72]
TYC2488-663-1	HD 75898 b	$861.00^{+114.00}_{-114.00}$	$422.90^{+0.29}_{-0.29}$	$1.19^{+0.07}_{-0.07}$	Dujų milžinė	[74]
TYC2595-1464-1	HD 155358 b	$315.00^{+25.00}_{-25.00}$	$194.30^{+0.30}_{-0.30}$	$0.63^{+0.02}_{-0.02}$	Dujų milžinė	[53]
	HD 155358 c	$261.00^{+22.00}_{-22.00}$	$391.90^{+1.00}_{-1.00}$	$1.02^{+0.02}_{-0.02}$	Dujų milžinė	[58]
TYC2648-2151-1	HD 178911 B b	$2247.00^{+70.00}_{-73.00}$	$71.48^{+0.00}_{-0.00}$	$0.34^{+0.01}_{-0.01}$	Dujų milžinė	[72]
TYC2842-200-1	HD 13931 b	$607.40^{+24.50}_{-24.20}$	$4449.00^{+54.00}_{-50.00}$	$5.32^{+0.09}_{-0.09}$	Dujų milžinė	[72]
TYC2867-1318-1	HD 23596 b	$3674.94^{+426.14}_{-450.33}$	$1535.12^{+7.76}_{-9.26}$	$2.69^{+0.11}_{-0.12}$	Dujų milžinė	[73]
TYC364-1224-1	HD 141004 b	$13.60^{+1.50}_{-1.50}$	$15.51^{+0.00}_{-0.00}$	$0.12^{+0.00}_{-0.00}$	Neptūninė	[72]
TYC4006-1866-1	HD 219134 b	$4.13^{+0.32}_{-0.35}$	$3.09^{+0.00}_{-0.00}$	$0.04^{+0.00}_{-0.00}$	Žemės tipo	[72]
	HD 219134 c	$3.56^{+0.44}_{-0.44}$	$6.76^{+0.00}_{-0.00}$	$0.06^{+0.00}_{-0.00}$	Žemės tipo	[72]
	HD 219134 d	$16.40^{+1.00}_{-1.00}$	$46.73^{+0.01}_{-0.01}$	$0.23^{+0.00}_{-0.00}$	Žemės tipo	[72]
	HD 219134 f	$7.72^{+0.73}_{-0.70}$	$22.79^{+0.00}_{-0.01}$	$0.15^{+0.00}_{-0.00}$	Žemės tipo	[72]
	HD 219134 g	$11.00^{+1.00}_{-1.00}$	$94.20^{+0.20}_{-0.20}$	$0.38^{+0.00}_{-0.00}$	Neptūninė	[78]
	HD 219134 h	$97.90^{+4.40}_{-4.40}$	$2104.00^{+16.00}_{-17.00}$	$2.97^{+0.04}_{-0.04}$	Dujų milžinė	[72]

A2 lentelė. Atmosferos parametrų rezultatai. Žvaigždute pažymėtų žvaigždžių atmosferų parametrai pateikti darbo vadovės

Žvaigždės nr.	T_{eff} , K	$\lg g$	[Fe/H]	v_t , km/s	[FeI/H]	N(FeI)	[FeII/H]	N(FeII)
TYC1133-1258-1	6055 ± 65	4.50 ± 0.16	-0.06 ± 0.06	1.43 ± 0.46	-0.06	50	-0.07	9
TYC1681-1751-1	4862 ± 45	3.06 ± 0.14	-0.05 ± 0.07	0.95 ± 0.19	-0.05	61	-0.05	7
TYC2031-1389-1	4785 ± 35	2.35 ± 0.13	-0.25 ± 0.07	1.39 ± 0.13	-0.25	64	-0.25	8
TYC2038-1873-1	4777 ± 40	2.46 ± 0.14	-0.28 ± 0.07	1.24 ± 0.14	-0.28	61	-0.28	8
TYC2103-1620-1	5575 ± 50	4.06 ± 0.15	-0.23 ± 0.06	0.68 ± 0.28	-0.23	57	-0.23	6
TYC2126-1196-1	4795 ± 50	3.27 ± 0.13	0.09 ± 0.07	1.25 ± 0.17	0.09	60	0.10	6
TYC2153-2883-1	5541 ± 50	4.18 ± 0.16	0.21 ± 0.07	0.96 ± 0.23	0.21	63	0.22	8
TYC2576-2228-1	5740 ± 48	4.10 ± 0.15	-0.22 ± 0.06	1.05 ± 0.28	-0.22	58	-0.21	7
TYC2653-91-1	4862 ± 45	2.75 ± 0.13	0.12 ± 0.07	1.12 ± 0.14	0.12	57	0.11	7
TYC3048-172-1	4925 ± 50	3.55 ± 0.14	-0.21 ± 0.07	0.68 ± 0.25	-0.21	58	-0.22	7
TYC3161-126-1	6030 ± 68	4.15 ± 0.18	-0.37 ± 0.07	0.83 ± 0.62	-0.38	49	-0.37	9
TYC3231-323-1	4740 ± 40	2.44 ± 0.13	-0.29 ± 0.07	1.48 ± 0.14	-0.29	64	-0.29	8
TYC3475-1198-1	4990 ± 38	2.40 ± 0.15	-0.68 ± 0.07	1.43 ± 0.18	-0.68	61	-0.67	9
TYC3658-583-1	4780 ± 40	2.50 ± 0.13	-0.07 ± 0.07	1.34 ± 0.13	-0.08	65	-0.08	8
TYC3869-494-1	4524 ± 52	2.14 ± 0.12	0.13 ± 0.07	1.26 ± 0.14	0.13	56	0.11	6
TYC3888-1886-1	5860 ± 55	4.20 ± 0.18	-0.08 ± 0.07	0.94 ± 0.30	-0.08	62	-0.09	8
TYC3903-2143-1	4950 ± 45	3.20 ± 0.13	0.01 ± 0.07	1.04 ± 0.16	0.01	62	-0.00	9
TYC4078-428-1	4572 ± 50	2.36 ± 0.13	-0.21 ± 0.07	1.14 ± 0.14	-0.21	58	-0.20	8
TYC4166-541-1	6675 ± 90	3.99 ± 0.09	0.09 ± 0.06	1.78 ± 0.06	0.09	48	0.08	9
TYC4222-2311-1	4450 ± 45	1.90 ± 0.13	-0.43 ± 0.07	1.37 ± 0.12	-0.43	64	-0.43	8
TYC4244-964-1	5230 ± 52	4.08 ± 0.16	-0.45 ± 0.07	0.69 ± 0.36	-0.45	55	-0.45	6
TYC4284-1402-1	5507 ± 48	3.86 ± 0.16	0.19 ± 0.07	1.09 ± 0.20	0.19	64	0.20	9
TYC4417-267-1	4860 ± 40	2.55 ± 0.14	-0.06 ± 0.07	1.20 ± 0.14	-0.06	62	-0.07	9
TYC4561-2319-1	4865 ± 45	2.60 ± 0.14	0.03 ± 0.07	1.20 ± 0.14	0.03	60	0.03	9
TYC4650-917-1	5049 ± 50	4.25 ± 0.15	-0.30 ± 0.07	0.78 ± 0.32	-0.30	61	-0.29	7
TYC1092-1778-1*	6218 ± 51	4.23 ± 0.23	0.14 ± 0.09	1.25 ± 0.24	-	78	-	7
TYC1107-2709-1*	5078 ± 47	3.19 ± 0.24	0.01 ± 0.11	0.97 ± 0.21	-	86	-	7
TYC1193-2072-1*	5226 ± 60	4.63 ± 0.22	-0.01 ± 0.10	0.81 ± 0.36	-	73	-	6
TYC1211-1730-1*	5605 ± 42	4.01 ± 0.22	0.09 ± 0.09	0.84 ± 0.23	-	86	-	7
TYC1445-2560-1*	4739 ± 31	2.41 ± 0.15	-0.35 ± 0.08	1.31 ± 0.12	-	84	-	7
TYC1601-1129-1*	6171 ± 56	4.29 ± 0.26	-0.04 ± 0.10	1.15 ± 0.31	-	79	-	7
TYC1688-1821-1*	6194 ± 75	4.50 ± 0.35	-0.04 ± 0.13	0.79 ± 0.35	-	77	-	7
TYC1717-2193-1*	5764 ± 43	4.29 ± 0.22	0.17 ± 0.09	0.75 ± 0.26	-	86	-	7
TYC1761-192-1*	5663 ± 59	4.29 ± 0.24	0.23 ± 0.09	0.71 ± 0.32	-	74	-	7
TYC1765-1369-1*	4815 ± 40	2.72 ± 0.19	-0.17 ± 0.10	1.28 ± 0.18	-	84	-	7
TYC1853-1187-1*	5759 ± 61	4.48 ± 0.32	-0.02 ± 0.12	0.58 ± 0.33	-	86	-	7
TYC1894-1961-1*	6057 ± 44	4.48 ± 0.21	-0.06 ± 0.08	1.07 ± 0.27	-	80	-	7
TYC1920-2194-1*	4862 ± 48	3.04 ± 0.21	0.04 ± 0.11	1.16 ± 0.21	-	84	-	7
TYC1933-747-1*	5654 ± 54	4.49 ± 0.27	-0.09 ± 0.11	0.78 ± 0.33	-	84	-	7
TYC1942-1827-1*	6161 ± 39	4.44 ± 0.18	0.10 ± 0.07	1.13 ± 0.20	-	79	-	7
TYC2037-1826-1*	4357 ± 54	2.08 ± 0.15	-0.32 ± 0.09	1.58 ± 0.18	-	69	-	6
TYC2099-2717-1*	5231 ± 51	4.26 ± 0.19	0.01 ± 0.09	0.72 ± 0.34	-	75	-	7
TYC2488-663-1*	6027 ± 55	4.14 ± 0.27	0.18 ± 0.10	0.95 ± 0.28	-	84	-	7
TYC2595-1464-1*	5953 ± 29	4.24 ± 0.13	-0.68 ± 0.05	1.32 ± 0.21	-	60	-	7
TYC2648-2151-1*	5536 ± 49	4.33 ± 0.24	0.19 ± 0.10	0.69 ± 0.32	-	86	-	7
TYC2842-200-1*	5855 ± 53	4.28 ± 0.27	-0.04 ± 0.10	0.80 ± 0.32	-	85	-	7
TYC2867-1318-1*	6042 ± 67	4.27 ± 0.27	0.16 ± 0.10	0.99 ± 0.31	-	72	-	7
TYC364-1224-1*	5891 ± 38	4.25 ± 0.19	-0.04 ± 0.07	1.08 ± 0.20	-	82	-	7
TYC4006-1866-1*	4898 ± 62	4.63 ± 0.24	-0.14 ± 0.12	0.45 ± 0.40	-	72	-	5

A3 lentelė. Tiriamų žvaigždžių cheminių elementų gausų analizės rezultatai.

Žvaigždė (TYC)	[Fe/H]	[C/H]	[N/H]	[O/H]
[Li/H]	12C/13C	[Mg/H]	[Si/H]	[S/H]
[Y/H]	[Eu/H]	[Mg/Si]	[C/O]	S/N
TYC1133-1258-1	-0.06 ± 0.06			
1.90 ± 0.05		0.05 ± 0.05	0.01 ± 0.05	0.00 ± 0.10
-0.11 ± 0.09	0.13 ± 0.10	1.15 ^{+0.10} _{-0.08}		
TYC1681-1751-1	-0.05 ± 0.07	-0.19 ± 0.02	0.10 ± 0.07	-0.05 ± 0.02
		0.20 ± 0.02	0.15 ± 0.06	0.27 ± 0.10
0.06 ± 0.03	0.07 ± 0.10	1.17 ^{+0.08} _{-0.07}	0.39 ^{+0.01} _{-0.01}	0.34 ^{+0.05} _{-0.04}
TYC2031-1389-1	-0.25 ± 0.07	-0.26 ± 0.01	-0.05 ± 0.10	0.00 ± 0.07
		0.01 ± 0.04	-0.06 ± 0.04	0.03 ± 0.10
-0.34 ± 0.04	-0.04 ± 0.10	1.23 ^{+0.08} _{-0.07}	0.30 ^{+0.02} _{-0.02}	0.28 ^{+0.05} _{-0.03}
TYC2038-1873-1	-0.28 ± 0.07	-0.31 ± 0.04	-0.27 ± 0.09	-0.15 ± 0.05
1.11 ± 0.05		-0.15 ± 0.05	-0.21 ± 0.06	0.19 ± 0.05
-0.50 ± 0.18	0.06 ± 0.10	1.20 ^{+0.12} _{-0.09}	0.37 ^{+0.03} _{-0.02}	0.66 ^{+0.08} _{-0.06}
TYC2103-1620-1	-0.23 ± 0.06			
		-0.03 ± 0.08	-0.22 ± 0.07	0.07 ± 0.10
-0.13 ± 0.16	-0.18 ± 0.10	1.62 ^{+0.22} _{-0.16}		
TYC2126-1196-1	0.09 ± 0.07	0.07 ± 0.05	0.41 ± 0.09	0.20 ± 0.10
		0.25 ± 0.06	0.29 ± 0.10	0.45 ± 0.10
0.18 ± 0.01	0.17 ± 0.10	0.95 ^{+0.14} _{-0.10}	0.40 ^{+0.05} _{-0.04}	0.25 ^{+0.05} _{-0.03}
TYC2153-2883-1	0.21 ± 0.07			
		0.37 ± 0.05	0.32 ± 0.06	0.35 ± 0.10
0.04 ± 0.08	0.39 ± 0.10	1.17 ^{+0.11} _{-0.09}		
TYC2576-2228-1	-0.22 ± 0.06	-0.10 ± 0.05		-0.10 ± 0.10
		0.03 ± 0.05	-0.09 ± 0.03	-0.06 ± 0.10
-0.30 ± 0.03	0.03 ± 0.10	1.38 ^{+0.09} _{-0.08}	0.54 ^{+0.07} _{-0.05}	
TYC2653-91-1	0.12 ± 0.07	-0.10 ± 0.05	0.30 ± 0.08	-0.10 ± 0.10
		0.17 ± 0.05	0.20 ± 0.06	0.48 ± 0.10
-0.11 ± 0.11	0.16 ± 0.10	0.98 ^{+0.09} _{-0.07}	0.54 ^{+0.07} _{-0.05}	0.35 ^{+0.06} _{-0.04}
TYC3048-172-1	-0.21 ± 0.07	-0.10 ± 0.07	-0.12 ± 0.05	0.05 ± 0.10
		-0.03 ± 0.03	-0.02 ± 0.10	
-0.28 ± 0.02		1.02 ^{+0.12} _{-0.09}	0.38 ^{+0.06} _{-0.04}	
TYC3161-126-1	-0.37 ± 0.07			
1.41 ± 0.10		-0.15 ± 0.07	-0.17 ± 0.06	-0.15 ± 0.10
-0.51 ± 0.12	0.20 ± 0.10	1.10 ^{+0.13} _{-0.09}		
TYC3231-323-1	-0.29 ± 0.07	-0.20 ± 0.03	-0.07 ± 0.09	0.15 ± 0.03
	9.00 ± 2.00	0.10 ± 0.02	0.01 ± 0.04	0.07 ± 0.10
-0.60 ± 0.11	0.07 ± 0.10	1.29 ^{+0.06} _{-0.06}	0.24 ^{+0.01} _{-0.01}	0.32 ^{+0.06} _{-0.04}
TYC3475-1198-1	-0.68 ± 0.07	-0.67 ± 0.03	-0.33 ± 0.11	-0.20 ± 0.05
	3.00 ± 2.00	-0.22 ± 0.03	-0.35 ± 0.06	-0.20 ± 0.10
-0.67 ± 0.02	-0.27 ± 0.10	1.41 ^{+0.11} _{-0.09}	0.18 ^{+0.01} _{-0.01}	0.31 ^{+0.06} _{-0.04}
TYC3658-583-1	-0.07 ± 0.07			
		0.10 ± 0.07	0.13 ± 0.05	0.20 ± 0.10
-0.13 ± 0.07	0.13 ± 0.10	0.98 ^{+0.10} _{-0.08}		
TYC3869-494-1	0.13 ± 0.07	-0.20 ± 0.07	0.37 ± 0.07	-0.05 ± 0.03
	12.00 ± 3.00	0.32 ± 0.04	0.36 ± 0.09	0.39 ± 0.10
-0.07 ± 0.18		0.95 ^{+0.11} _{-0.08}	0.38 ^{+0.03} _{-0.03}	0.24 ^{+0.04} _{-0.03}
TYC3888-1886-1	-0.08 ± 0.07	-0.16 ± 0.06		-0.05 ± 0.10
0.75 ± 0.10		0.11 ± 0.04	-0.05 ± 0.04	-0.06 ± 0.10
Tęsinys sekančiame puslapyje				

lentelė A3 – tęsinys

Žvaigždė (TYC)	[Fe/H]	[C/H]	[N/H]	[O/H]
[Li/H]	12C/13C	[Mg/H]	[Si/H]	[S/H]
[Y/H]	[Eu/H]	[Mg/Si]	[C/O]	S/N
-0.22 ± 0.13	-0.16 ± 0.10	1.51 ^{+0.10} _{-0.08}	0.42 ^{+0.06} _{-0.04}	
TYC3903-2143-1	0.01 ± 0.07	-0.28 ± 0.05	0.13 ± 0.10	-0.22 ± 0.07
		0.13 ± 0.03	0.15 ± 0.08	0.16 ± 0.10
-0.03 ± 0.10	0.10 ± 0.10	1.00 ^{+0.10} _{-0.07}	0.47 ^{+0.05} _{-0.04}	0.25 ^{+0.05} _{-0.03}
TYC4078-428-1	-0.21 ± 0.07	-0.34 ± 0.05	0.01 ± 0.09	-0.05 ± 0.05
	11.00 ± 1.00	0.01 ± 0.07	-0.01 ± 0.06	0.08 ± 0.10
-0.18 ± 0.11	0.05 ± 0.10	1.10 ^{+0.13} _{-0.09}	0.28 ^{+0.02} _{-0.02}	0.27 ^{+0.05} _{-0.03}
TYC4166-541-1	0.09 ± 0.06			
		0.09 ± 0.01	0.08 ± 0.04	0.11 ± 0.10
-0.01 ± 0.11		1.07 ^{+0.04} _{-0.04}		
TYC4222-2311-1	-0.43 ± 0.07	-0.48 ± 0.02	-0.21 ± 0.14	-0.17 ± 0.05
	17.00 ± 2.00	-0.11 ± 0.03	-0.24 ± 0.04	-0.07 ± 0.10
-0.60 ± 0.07	-0.15 ± 0.10	1.41 ^{+0.08} _{-0.07}	0.26 ^{+0.02} _{-0.01}	0.32 ^{+0.08} _{-0.04}
TYC4244-964-1	-0.45 ± 0.07			
		-0.07 ± 0.01	-0.21 ± 0.08	
-0.84 ± 0.03		1.45 ^{+0.11} _{-0.09}		
TYC4284-1402-1	0.19 ± 0.07			
0.48 ± 0.10		0.28 ± 0.02	0.33 ± 0.06	0.28 ± 0.10
0.06 ± 0.19	0.20 ± 0.10	0.93 ^{+0.06} _{-0.05}		
TYC4417-267-1	-0.06 ± 0.07	-0.70 ± 0.15	0.49 ± 0.14	0.00 ± 0.10
0.89 ± 0.06	5.00 ± 1.00	0.03 ± 0.03	0.10 ± 0.08	0.05 ± 0.10
0.04 ± 0.02	0.11 ± 0.10	0.89 ^{+0.09} _{-0.07}	0.11 ^{+0.03} _{-0.02}	0.08 ^{+0.02} _{-0.01}
TYC4561-2319-1	0.03 ± 0.07	-0.31 ± 0.01	0.33 ± 0.10	-0.10 ± 0.10
		0.13 ± 0.02	0.19 ± 0.09	0.14 ± 0.10
-0.03 ± 0.16	0.14 ± 0.10	0.91 ^{+0.09} _{-0.07}	0.33 ^{+0.03} _{-0.02}	0.15 ^{+0.03} _{-0.02}
TYC4650-917-1	-0.30 ± 0.07			
		-0.07 ± 0.02	-0.17 ± 0.06	
-0.43 ± 0.18		1.32 ^{+0.09} _{-0.07}		
TYC1092-1778-1	0.14 ± 0.09			
1.64 ± 0.03		0.22 ± 0.06	0.18 ± 0.03	0.30 ± 0.05
0.16 ± 0.04		1.15 ^{+0.09} _{-0.07}		
TYC1107-2709-1	0.01 ± 0.11	-0.23 ± 0.10	0.18 ± 0.06	0.08 ± 0.10
		0.07 ± 0.04	0.01 ± 0.03	0.20 ± 0.10
0.22 ± 0.05	0.13 ± 0.03	1.20 ^{+0.07} _{-0.06}	0.26 ^{+0.05} _{-0.03}	0.24 ^{+0.04} _{-0.02}
TYC1193-2072-1	-0.01 ± 0.10			
TYC1211-1730-1	0.09 ± 0.09			
0.88 ± 0.05		0.13 ± 0.06	0.18 ± 0.03	0.14 ± 0.10
0.11 ± 0.07	0.08 ± 0.10	0.93 ^{+0.07} _{-0.06}		
TYC1445-2560-1	-0.35 ± 0.08	-0.43 ± 0.05	-0.17 ± 0.09	-0.07 ± 0.05
-0.68 ± 0.07		-0.08 ± 0.03	-0.11 ± 0.03	-0.07 ± 0.10
-0.25 ± 0.05	-0.08 ± 0.10	1.12 ^{+0.06} _{-0.05}	0.23 ^{+0.02} _{-0.02}	0.29 ^{+0.05} _{-0.03}
TYC1601-1129-1	-0.04 ± 0.10			
1.68 ± 0.10		-0.01 ± 0.02	0.04 ± 0.04	0.15 ± 0.10
0.08 ± 0.04		0.93 ^{+0.05} _{-0.04}		
TYC1688-1821-1	-0.04 ± 0.13			
1.66 ± 0.10		-0.02 ± 0.22	0.02 ± 0.04	
Tęsinys sekančiame puslapyje				

lentelė A3 – tęsinys

Žvaigždė (TYC)	[Fe/H]	[C/H]	[N/H]	[O/H]
[Li/H]	12C/13C	[Mg/H]	[Si/H]	[S/H]
[Y/H]	[Eu/H]	[Mg/Si]	[C/O]	S/N
0.01 ± 0.14		0.95 ^{+0.26} _{-0.14}		
TYC1717-2193-1	0.17 ± 0.09			
0.30 ± 0.20		0.24 ± 0.09	0.28 ± 0.03	0.23 ± 0.10
0.15 ± 0.02	0.40 ± 0.10	0.95 ^{+0.10} _{-0.08}		
TYC1761-192-1	0.23 ± 0.09			
		0.35 ± 0.09	0.45 ± 0.05	0.47 ± 0.10
0.19 ± 0.08	0.27 ± 0.10	0.83 ^{+0.11} _{-0.08}		
TYC1765-1369-1	-0.17 ± 0.10	-0.35 ± 0.10	0.17 ± 0.07	-0.05 ± 0.10
		-0.06 ± 0.04	0.03 ± 0.05	0.12 ± 0.10
-0.11 ± 0.06	0.05 ± 0.05	0.85 ^{+0.07} _{-0.05}	0.27 ^{+0.05} _{-0.03}	0.20 ^{+0.03} _{-0.02}
TYC1853-1187-1	-0.02 ± 0.12			0.00 ± 0.10
		0.12 ± 0.04	0.10 ± 0.04	0.18 ± 0.10
-0.09 ± 0.07	0.12 ± 0.10	1.10 ^{+0.07} _{-0.06}		
TYC1894-1961-1	-0.06 ± 0.08	0.06 ± 0.04	0.31 ± 0.09	0.20 ± 0.10
1.48 ± 0.05		0.05 ± 0.05	0.03 ± 0.03	0.07 ± 0.10
-0.01 ± 0.10	0.06 ± 0.10	1.10 ^{+0.07} _{-0.06}	0.39 ^{+0.05} _{-0.04}	0.13 ^{+0.02} _{-0.02}
TYC1920-2194-1	0.04 ± 0.11	-0.22 ± 0.10	0.41 ± 0.16	0.05 ± 0.10
	80.00 ± 20.00	0.15 ± 0.03	0.24 ± 0.06	0.33 ± 0.10
0.22 ± 0.05	0.21 ± 0.10	0.85 ^{+0.07} _{-0.05}	0.29 ^{+0.06} _{-0.04}	0.19 ^{+0.05} _{-0.03}
TYC1933-747-1	-0.09 ± 0.11			
1.35 ± 0.10		-0.07 ± 0.14	-0.04 ± 0.04	0.12 ± 0.10
0.05 ± 0.05		0.98 ^{+0.17} _{-0.11}		
TYC1942-1827-1	0.10 ± 0.07	0.17 ± 0.04		0.00 ± 0.15
1.74 ± 0.05		0.10 ± 0.05	0.19 ± 0.05	0.20 ± 0.10
0.14 ± 0.04	0.08 ± 0.10	0.85 ^{+0.07} _{-0.06}	0.79 ^{+0.15} _{-0.09}	
TYC2037-1826-1	-0.32 ± 0.09	-0.34 ± 0.02	0.10 ± 0.19	-0.03 ± 0.10
		0.04 ± 0.05	0.10 ± 0.06	0.21 ± 0.10
-0.05 ± 0.05	0.07 ± 0.10	0.91 ^{+0.09} _{-0.07}	0.26 ^{+0.03} _{-0.02}	0.30 ^{+0.09} _{-0.05}
TYC2099-2717-1	0.01 ± 0.09			
TYC2488-663-1	0.18 ± 0.10			
1.69 ± 0.10		0.33 ± 0.08	0.31 ± 0.07	0.26 ± 0.10
0.12 ± 0.10		1.10 ^{+0.15} _{-0.11}		
TYC2595-1464-1	-0.68 ± 0.05			
TYC2648-2151-1	0.19 ± 0.10			
TYC2842-200-1	-0.04 ± 0.10	0.03 ± 0.03		0.10 ± 0.10
0.67 ± 0.10		0.17 ± 0.03	0.10 ± 0.05	0.13 ± 0.10
-0.02 ± 0.06	0.26 ± 0.10	1.23 ^{+0.08} _{-0.07}	0.46 ^{+0.05} _{-0.04}	
TYC2867-1318-1	0.16 ± 0.10			
1.64 ± 0.10		0.12 ± 0.27	0.21 ± 0.09	0.26 ± 0.10
0.02 ± 0.10		0.85 ^{+0.37} _{-0.16}		
TYC364-1224-1	-0.04 ± 0.07			
0.74 ± 0.10		0.08 ± 0.01	0.10 ± 0.03	
Tęsinys sekančiame puslapyje				

lentelė A3 – tęsinys

Žvaigždė (TYC)	[Fe/H]	[C/H]	[N/H]	[O/H]
[Li/H]	12C/13C	[Mg/H]	[Si/H]	[S/H]
[Y/H]	[Eu/H]	[Mg/Si]	[C/O]	S/N
0.05 ± 0.07	0.20 ± 0.10	$1.00^{+0.03}_{-0.03}$		
TYC4006-1866-1	-0.14 ± 0.12	0.03 ± 0.02	-0.02 ± 0.19	0.12 ± 0.10
		0.04 ± 0.07	0.01 ± 0.06	0.29 ± 0.10
-0.16 ± 0.02	0.14 ± 0.10	$1.12^{+0.13}_{-0.10}$	$0.44^{+0.05}_{-0.04}$	$0.47^{+0.15}_{-0.08}$

A4 lentelė. Tiriamų žvaigždžių kinematinės analizės rezultatai. Žvaigždute pažymėtų žvaigždžių rezultatus pateikė darbo vadovė

Žvaigždė (TYC)	R_{apo} , kpc	R_{peri} , kpc	Ekscentricitetas	$ Z_{max} $, kpc	X, kpc
	Y, kpc	Z, kpc	U, km/s	V, km/s	W, km/s
TYC1133-1258-1	8.01 ± 0.00	7.30 ± 0.07	0.05 ± 0.00	0.05 ± 0.01	0.01 ± 0.00
	0.01 ± 0.00	-0.01 ± 0.00	25.60 ± 0.34	-8.81 ± 0.92	-3.51 ± 0.53
TYC1681-1751-1	10.31 ± 0.06	7.90 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.06 ± 0.01	0.01 ± 0.00
	0.04 ± 0.00	-0.03 ± 0.00	4.54 ± 0.14	23.72 ± 0.58	-3.89 ± 0.37
TYC2031-1389-1	8.06 ± 0.00	4.74 ± 0.02	0.26 ± 0.00	0.22 ± 0.01	0.03 ± 0.00
	0.03 ± 0.00	0.07 ± 0.00	42.42 ± 0.26	-50.60 ± 0.35	-13.70 ± 0.58
TYC2038-1873-1	9.63 ± 0.03	7.83 ± 0.01	0.10 ± 0.00	0.31 ± 0.01	0.07 ± 0.00
	0.07 ± 0.00	0.10 ± 0.00	35.15 ± 0.40	17.49 ± 0.39	16.90 ± 0.58
TYC2103-1620-1	9.48 ± 0.06	7.96 ± 0.00	0.09 ± 0.00	0.57 ± 0.01	0.01 ± 0.00
	0.02 ± 0.00	0.01 ± 0.00	28.54 ± 0.44	14.93 ± 0.64	31.32 ± 0.34
TYC2126-1196-1	7.99 ± 0.00	4.38 ± 0.04	0.29 ± 0.00	0.03 ± 0.00	0.03 ± 0.00
	0.05 ± 0.00	0.01 ± 0.00	33.15 ± 0.57	-58.44 ± 0.89	0.43 ± 0.16
TYC2153-2883-1	8.01 ± 0.00	6.15 ± 0.04	0.13 ± 0.00	1.19 ± 0.00	0.01 ± 0.00
	0.01 ± 0.00	0.00 ± 0.00	23.03 ± 0.25	-32.16 ± 0.60	-57.34 ± 0.04
TYC2576-2228-1	9.33 ± 0.02	5.69 ± 0.01	0.24 ± 0.00	0.52 ± 0.01	0.01 ± 0.00
	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	-43.29 ± 0.26	-23.75 ± 0.35	28.88 ± 0.50
TYC2653-91-1	8.37 ± 0.00	5.14 ± 0.05	0.24 ± 0.00	0.38 ± 0.00	0.05 ± 0.00
	0.11 ± 0.00	0.02 ± 0.00	61.80 ± 0.44	-39.64 ± 0.90	-23.77 ± 0.18
TYC3048-172-1	8.87 ± 0.01	4.05 ± 0.02	0.37 ± 0.00	0.13 ± 0.00	0.02 ± 0.00
	0.05 ± 0.00	0.09 ± 0.00	-51.59 ± 0.21	-61.05 ± 0.44	-4.01 ± 0.69
TYC3161-126-1	10.46 ± 0.09	7.36 ± 0.02	0.17 ± 0.00	0.10 ± 0.00	0.00 ± 0.00
	0.03 ± 0.00	0.00 ± 0.00	-23.47 ± 0.15	16.26 ± 1.03	-6.07 ± 0.01
TYC3231-323-1	8.39 ± 0.01	3.20 ± 0.03	0.45 ± 0.00	0.51 ± 0.01	-0.02 ± 0.00
	0.07 ± 0.00	-0.03 ± 0.00	73.33 ± 0.54	-87.08 ± 0.73	-29.48 ± 0.47
TYC3475-1198-1	8.58 ± 0.00	3.14 ± 0.02	0.46 ± 0.00	1.37 ± 0.02	0.00 ± 0.00
	0.05 ± 0.00	0.08 ± 0.00	85.54 ± 0.30	-92.38 ± 0.51	56.79 ± 0.60
TYC3658-583-1	8.06 ± 0.00	5.51 ± 0.03	0.19 ± 0.00	0.15 ± 0.00	-0.05 ± 0.00
	0.09 ± 0.00	-0.02 ± 0.00	22.50 ± 0.36	-37.61 ± 0.59	-10.62 ± 0.12
TYC3869-494-1	8.13 ± 0.04	7.94 ± 0.02	0.01 ± 0.00	0.14 ± 0.01	0.00 ± 0.00
	0.07 ± 0.00	0.09 ± 0.00	17.23 ± 0.06	0.78 ± 0.67	6.67 ± 0.80
TYC3888-1886-1	9.72 ± 0.05	7.85 ± 0.00	0.11 ± 0.00	0.43 ± 0.01	0.00 ± 0.00
	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.00	3.75 ± 0.09	16.09 ± 0.51	24.56 ± 0.35
TYC3903-2143-1	10.39 ± 0.04	7.11 ± 0.02	0.19 ± 0.00	0.27 ± 0.01	0.01 ± 0.00
	0.04 ± 0.00	0.02 ± 0.00	73.09 ± 0.12	11.86 ± 0.61	-15.27 ± 0.32
TYC4078-428-1	8.93 ± 0.02	7.95 ± 0.01	0.06 ± 0.00	0.25 ± 0.00	-0.03 ± 0.00
	0.02 ± 0.00	0.00 ± 0.00	12.47 ± 0.59	9.07 ± 0.38	16.36 ± 0.11
TYC4166-541-1	8.12 ± 0.01	7.19 ± 0.03	0.06 ± 0.00	0.10 ± 0.01	-0.01 ± 0.00
	0.02 ± 0.00	0.03 ± 0.00	32.98 ± 0.38	-9.46 ± 0.64	-6.48 ± 1.00
TYC4222-2311-1	15.30 ± 0.10	8.00 ± 0.00	0.31 ± 0.00	0.47 ± 0.01	-0.01 ± 0.00
	0.08 ± 0.00	0.04 ± 0.00	9.29 ± 0.11	62.19 ± 0.65	-19.43 ± 0.46
TYC4244-964-1	9.60 ± 0.08	7.99 ± 0.00	0.09 ± 0.00	0.66 ± 0.00	-0.01 ± 0.00
	0.05 ± 0.00	0.02 ± 0.00	15.26 ± 0.15	15.47 ± 0.88	-34.77 ± 0.29
TYC4284-1402-1	10.39 ± 0.03	5.11 ± 0.02	0.34 ± 0.00	0.35 ± 0.00	-0.02 ± 0.00
	0.05 ± 0.00	0.00 ± 0.00	117.39 ± 0.29	-27.03 ± 0.61	-19.59 ± 0.04

Tęsinys sekančiame puslapyje

lentelė A4 – tęsinys

Žvaigždė (TYC)	R_{apo} , kpc Y, kpc	R_{peri} , kpc Z, kpc	Ekscentricitetas U, km/s	$ Z_{\text{max}} $, kpc V, km/s	X, kpc W, km/s
TYC4417-267-1	9.38 ± 0.03 0.12 ± 0.00	7.93 ± 0.01 0.10 ± 0.00	0.08 ± 0.00 4.35 ± 0.19	0.16 ± 0.00 12.82 ± 0.45	-0.05 ± 0.00 -5.23 ± 0.40
TYC4561-2319-1	8.57 ± 0.03 0.07 ± 0.00	7.27 ± 0.02 0.06 ± 0.00	0.08 ± 0.00 43.81 ± 0.30	0.16 ± 0.01 -4.20 ± 0.51	-0.04 ± 0.00 -9.15 ± 0.47
TYC4650-917-1	8.68 ± 0.01 0.02 ± 0.00	7.14 ± 0.03 0.01 ± 0.00	0.10 ± 0.00 -6.26 ± 0.33	0.24 ± 0.00 -4.59 ± 0.59	-0.01 ± 0.00 15.63 ± 0.27
TYC1092-1778-1*	8.51 ± 0.01 -	7.33 ± 0.05 -	0.07 ± 0.00 -20.98 ± 0.53	0.23 ± 0.00 -2.75 ± 0.79	- 15.30 ± 0.31
TYC1107-2709-1*	9.31 ± 0.04 -	7.45 ± 0.01 -	0.11 ± 0.00 32.03 ± 0.34	0.19 ± 0.00 7.62 ± 0.50	- 12.43 ± 0.24
TYC1193-2072-1*	9.34 ± 0.01 -	6.57 ± 0.03 -	0.17 ± 0.00 51.00 ± 0.31	0.24 ± 0.01 -6.95 ± 0.56	- 15.41 ± 0.56
TYC1211-1730-1*	8.96 ± 0.01 -	6.30 ± 0.02 -	0.17 ± 0.00 47.43 ± 0.42	0.39 ± 0.01 -15.91 ± 0.36	- 23.75 ± 0.48
TYC1445-2560-1*	11.02 ± 0.09 -	7.21 ± 0.03 -	0.21 ± 0.01 -54.47 ± 1.58	1.26 ± 0.03 13.64 ± 0.32	- 51.12 ± 0.78
TYC1601-1129-1*	8.67 ± 0.00 -	5.81 ± 0.06 -	0.20 ± 0.00 -45.49 ± 0.75	0.24 ± 0.00 -23.73 ± 0.97	- -16.09 ± 0.09
TYC1688-1821-1*	8.04 ± 0.02 -	7.71 ± 0.07 -	0.02 ± 0.00 5.25 ± 0.25	0.10 ± 0.01 -3.01 ± 1.06	- 7.39 ± 0.59
TYC1717-2193-1*	8.01 ± 0.00 -	6.77 ± 0.04 -	0.08 ± 0.00 -4.25 ± 0.04	0.34 ± 0.01 -17.16 ± 0.68	- 22.72 ± 0.48
TYC1761-192-1*	9.41 ± 0.01 -	5.98 ± 0.03 -	0.22 ± 0.00 62.76 ± 0.56	0.07 ± 0.01 -17.01 ± 0.42	- 4.46 ± 0.49
TYC1765-1369-1*	9.55 ± 0.01 -	7.27 ± 0.02 -	0.14 ± 0.00 41.11 ± 0.58	0.22 ± 0.01 3.39 ± 0.37	- -12.52 ± 0.51
TYC1853-1187-1*	11.11 ± 0.03 -	6.59 ± 0.01 -	0.25 ± 0.00 74.81 ± 0.74	0.02 ± 0.00 7.23 ± 0.04	- -0.80 ± 0.11
TYC1894-1961-1*	8.55 ± 0.03 -	7.72 ± 0.01 -	0.05 ± 0.00 14.48 ± 0.74	0.06 ± 0.00 2.00 ± 0.15	- -3.97 ± 0.15
TYC1920-2194-1*	9.59 -	7.99 -	0.09 -5.61	0.31 16.93	- -18.63
TYC1933-747-1*	9.69 ± 0.05 -	7.74 ± 0.02 -	0.11 ± 0.00 24.36 ± 1.00	0.03 ± 0.00 14.58 ± 0.24	- -0.33 ± 0.46
TYC1942-1827-1*	8.05 ± 0.01 -	7.06 ± 0.01 -	0.07 ± 0.00 5.70 ± 0.56	0.05 ± 0.00 -12.55 ± 0.22	- -1.65 ± 0.40
TYC2037-1826-1*	7.97 ± 0.00 -	5.71 ± 0.03 -	0.17 ± 0.00 1.92 ± 0.47	0.08 ± 0.00 -32.88 ± 0.59	- -1.78 ± 0.75
TYC2099-2717-1*	11.92 ± 0.07 -	6.93 ± 0.00 -	0.26 ± 0.00 71.69 ± 0.45	0.97 ± 0.01 17.79 ± 0.58	- -40.78 ± 0.30
TYC2488-663-1*	8.90 ± 0.02 -	7.40 ± 0.02 -	0.09 ± 0.00 -27.47 ± 0.73	0.13 ± 0.01 0.42 ± 0.15	- -7.08 ± 0.61
TYC2595-1464-1*	8.37 ± 0.01 -	5.24 ± 0.03 -	0.23 ± 0.00 40.12 ± 0.36	0.55 ± 0.01 -40.03 ± 0.55	- 31.65 ± 0.45
TYC2648-2151-1*	8.93 ± 0.02	6.63 ± 0.04	0.15 ± 0.00	0.08 ± 0.00	-

Tęsinys sekančiame puslapyje

lentelė A4 – tęsinys

Žvaigždė (TYC)	R_{apo} , kpc Y, kpc	R_{peri} , kpc Z, kpc	Ekscentricitetas U, km/s	$ Z_{\text{max}} $, kpc V, km/s	X, kpc W, km/s
	-	-	-41.08 ± 0.38	-8.77 ± 0.85	5.03 ± 0.19
TYC2842-200-1*	8.97 ± 0.05 -	7.38 ± 0.00 -	0.10 ± 0.00 -27.43 ± 0.61	0.55 ± 0.01 0.03 ± 0.53	- -31.39 ± 0.25
TYC2867-1318-1*	8.67 ± 0.00 -	7.79 ± 0.04 -	0.05 ± 0.00 15.01 ± 1.14	0.33 ± 0.00 3.16 ± 0.52	- 21.16 ± 0.25
TYC364-1224-1*	8.78 ± 0.02 -	6.67 ± 0.02 -	0.14 ± 0.00 -37.73 ± 0.57	0.57 ± 0.01 -11.76 ± 0.30	- -32.34 ± 0.57
TYC4006-1866-1*	8.55 ± 0.01 -	5.77 ± 0.03 -	0.19 ± 0.00 -41.70 ± 0.25	0.10 ± 0.00 -27.38 ± 0.68	- -7.01 ± 0.06

A5 lentelė. Tiriamų žvaigždžių amžių ir masių analizės rezultatai

Žvaigždė	USPDF svoris	Kokybės žymuo	Tikimybė	log(amžius)	Masė, M_{\odot}
TYC1133-1258-1	1.00	1	0.88	9.42 ± 0.40	1.05 ± 0.04
TYC1681-1751-1	0.93	A	1.00	9.76 ± 0.20	1.20 ± 0.17
TYC2031-1389-1	0.81	B	1.00	9.84 ± 0.19	1.05 ± 0.18
TYC2038-1873-1	0.58	B	0.97	9.81 ± 0.19	1.08 ± 0.18
TYC2103-1620-1	0.99	1	0.99	10.02 ± 0.12	0.94 ± 0.08
TYC2126-1196-1	1.00	1	0.46	9.81 ± 0.18	1.18 ± 0.14
TYC2153-2883-1	1.00	1	1.00	9.99 ± 0.18	0.97 ± 0.05
TYC2576-2228-1	1.00	1	0.93	10.04 ± 0.11	0.91 ± 0.06
TYC3161-126-1	1.00	1	0.63	9.88 ± 0.18	0.94 ± 0.06
TYC3231-323-1	0.68	B	1.00	9.59 ± 0.26	1.30 ± 0.26
TYC3475-1198-1	0.50	C	1.00	9.70 ± 0.22	1.10 ± 0.21
TYC3658-583-1	0.95	A	1.00	9.65 ± 0.26	1.29 ± 0.32
TYC3869-494-1	0.36	D	1.00	9.07 ± 0.18	2.23 ± 0.34
TYC3888-1886-1	1.00	1	0.95	9.85 ± 0.24	0.98 ± 0.06
TYC3903-2143-1	0.85	B	1.00	9.65 ± 0.18	1.29 ± 0.17
TYC4166-541-1	1.00	1	0.92	9.25 ± 0.05	1.54 ± 0.08
TYC4222-2311-1	0.77	B	1.00	9.71 ± 0.28	1.18 ± 0.26
TYC4244-964-1	0.97	A	0.31	10.02 ± 0.12	0.90 ± 0.09
TYC4284-1402-1	1.00	1	0.99	9.90 ± 0.17	1.10 ± 0.13
TYC4561-2319-1	0.98	1	1.00	9.12 ± 0.27	2.07 ± 0.50
TYC4650-917-1	0.94	A	0.45	9.93 ± 0.20	0.72 ± 0.02
TYC1092-1778-1	1.00	1	0.51	9.37 ± 0.28	1.27 ± 0.12
TYC1107-2709-1	0.72	B	0.86	9.02 ± 0.11	2.14 ± 0.21
TYC1193-2072-1	1.00	1	0.91	9.70 ± 0.41	0.83 ± 0.04
TYC1211-1730-1	1.00	1	0.91	9.96 ± 0.17	1.00 ± 0.09
TYC1445-2560-1	0.80	B	1.00	9.62 ± 0.27	1.27 ± 0.26
TYC1601-1129-1	1.00	1	0.88	9.49 ± 0.30	1.17 ± 0.11
TYC1688-1821-1	1.00	1	0.37	9.44 ± 0.34	1.17 ± 0.12
TYC1717-2193-1	1.00	1	1.00	9.74 ± 0.30	1.04 ± 0.06
TYC1761-192-1	1.00	1	0.36	9.77 ± 0.31	1.04 ± 0.07
TYC1765-1369-1	0.64	B	0.83	9.58 ± 0.27	1.35 ± 0.34
TYC1853-1187-1	1.00	1	0.99	9.75 ± 0.36	0.97 ± 0.06
TYC1894-1961-1	1.00	1	0.71	9.52 ± 0.37	1.05 ± 0.05
TYC1920-2194-1	0.55	B	0.98	9.11 ± 0.15	2.07 ± 0.28
TYC1933-747-1	1.00	1	0.55	9.78 ± 0.37	0.91 ± 0.05
TYC1942-1827-1	1.00	1	0.42	9.32 ± 0.39	1.17 ± 0.05
TYC2037-1826-1	0.90	A	0.98	9.79 ± 0.25	1.14 ± 0.23
TYC2099-2717-1	0.99	1	0.36	9.87 ± 0.27	0.86 ± 0.07
TYC2488-663-1	1.00	1	0.61	9.53 ± 0.25	1.25 ± 0.15
TYC2595-1464-1	1.00	1	0.53	10.02 ± 0.13	0.80 ± 0.03
TYC2842-200-1	1.00	1	0.48	9.77 ± 0.30	1.00 ± 0.07
TYC2867-1318-1	1.00	1	0.48	9.49 ± 0.30	1.22 ± 0.13
TYC364-1224-1	0.99	1	1.00	9.81 ± 0.20	1.00 ± 0.05
TYC4006-1866-1	1.00	1	1.00	9.75 ± 0.39	0.74 ± 0.03

A6 lentelė. Sintetinių spektrų generavimui naudotų linijų sąrašas

Elementas	$\lambda, \text{\AA}$
C(C ₂)	5135.7
C(C ₂)	5635.2
N(CN)	6477.2
N(CN)	6478.66
N(CN)	6480.95
N(CN)	7992.25
N(CN)	7995.05
N(CN)	7995.62
N(CN)	8000.27
N(CN)	8003.18
N(CN)	8003.53
N(CN)	8003.92
O([O I])	6300.3
Mg I	5528.4
Mg I	5711.09
Mg I	6318.7
Mg I	6319.25
Si I	5465.61
Si I	5665.55
Si I	5690.42
Si I	5701.1
Si I	5708.4
Si I	5772.15
Si I	5780.38
Si I	5793.07
Si I	5948.54
Si I	6299.6
Si I	6555.46
Si I	6721.85
Si I	6741.63
S I	6757.17
Y II	4883.687
Y II	4900.121
Y II	4982.133
Y II	5087.418
Y II	5402.77
Y II	5728.87
Eu II	6645.098

Literatūra

- [1] A. Wolszczan and D. A. Frail, A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12, *Nature*, Jan. 1992, **355**, 145–147.
- [2] Nasa exoplanet archive, <<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>>, 2023. [žiūr. 2023-05-09].
- [3] W. Zhu and S. Dong, Exoplanet Statistics and Theoretical Implications, , Sept. 2021, **59**, 291–336.
- [4] M. L. Hill, K. Bott, P. A. Dalba, *et al.*, A Catalog of Habitable Zone Exoplanets, in *LPI Contributions*, vol. 2687 of *LPI Contributions*, 3046, Nov. 2022.
- [5] R. J. Spaargaren, H. S. Wang, S. J. Mojzsis, M. D. Ballmer, and P. J. Tackley, Plausible constraints on the range of bulk terrestrial exoplanet compositions in the Solar neighbourhood, *arXiv e-prints*, Nov. 2022, arXiv:2211.01800.
- [6] Transiting exoplanet survey satellite (tess), <<https://exoplanets.nasa.gov/tess/>>, 2023. [žiūr. 2022-06-27].
- [7] T. Narbuntas, Detali cheminės sudėties analizė žvaigždžių su planetomis. Žvaigždžių pagrindiniai atmosferų parametrai, mokslo tiriamasis darbas, Vilniaus Universitetas, Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, 2022.
- [8] T. Narbuntas, Žvaigždžių su patvirtintomis planetomis ir be planetų detali cheminės sudėties analizė, mokslo tiriamasis darbas, Vilniaus Universitetas, Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, 2022.
- [9] T. Narbuntas, Žvaigždžių su patvirtintomis planetomis kinematinį parametrų ir amžių analizė, mokslo tiriamasis darbas, Vilniaus Universitetas, Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, 2023.
- [10] G. Tautvaišienė, Š. Mikolaitis, A. Drazdauskas, *et al.*, Chemical Composition of Bright Stars in the Northern Hemisphere: Star-Planet Connection, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Apr. 2022, **259**, 45.
- [11] G. Tautvaišienė, C. Viscasillas Vázquez, Š. Mikolaitis, E. Stonkutė, R. Minkevičiūtė, A. Drazdauskas, and V. Bagdonas, Abundances of neutron-capture elements in thin- and thick-disc stars in the solar neighbourhood, , May 2021, **649**, A126.
- [12] Š. Mikolaitis, A. Drazdauskas, R. Minkevičiūtė, *et al.*, High-resolution spectroscopic study of dwarf stars in the northern sky. Na to Zn abundances in two fields with radii of 20 degrees, *Astronomy Astrophysics*, Aug. 2019, **628**, A49.
- [13] S. Buder, K. Lind, M. K. Ness, *et al.*, The GALAH survey: An abundance, age, and kinematic inventory of the solar neighbourhood made with TGAS, , Apr. 2019, **624**, A19.

- [14] L. Magrini, C. Danielski, D. Bossini, *et al.*, Ariel stellar characterisation. I. Homogeneous stellar parameters of 187 FGK planet host stars: Description and validation of the method, , July 2022, **663**, A161.
- [15] J. A. Sellwood and J. J. Binney, Radial mixing in galactic discs, , Nov. 2002, **336**, 785–796.
- [16] S. Feltzing, J. B. Bowers, and O. Agertz, Constraining churning and blurring in the Milky Way using large spectroscopic surveys - an exploratory study, , Feb. 2020, **493**, 1419–1433.
- [17] J. Perdigon, P. de Laverny, A. Recio-Blanco, E. Fernandez-Alvar, P. Santos-Peral, G. Kordopatis, and M. A. Álvarez, The AMBRE Project: Origin and evolution of sulfur in the Milky Way, , Mar. 2021, **647**, A162.
- [18] J. T. Mendel, R. N. Proctor, and D. A. Forbes, The age, metallicity and α -element abundance of Galactic globular clusters from single stellar population models, , Aug. 2007, **379**, 1618–1636.
- [19] E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, and F. Hoyle, Synthesis of the Elements in Stars, *Reviews of Modern Physics*, Jan. 1957, **29**, 547–650.
- [20] F. Käppeler, R. Gallino, S. Bisterzo, and W. Aoki, The s process: Nuclear physics, stellar models, and observations, *Reviews of Modern Physics*, Jan. 2011, **83**, 157–194.
- [21] R. da Silva, G. F. Porto de Mello, A. C. Milone, L. da Silva, L. S. Ribeiro, and H. J. Rocha-Pinto, Accurate and homogeneous abundance patterns in solar-type stars of the solar neighbourhood: a chemo-chronological analysis, , June 2012, **542**, A84.
- [22] J. Bovy, galpy: A python Library for Galactic Dynamics, , Feb. 2015, **216**, 29.
- [23] A. Mints and S. Hekker, A Unified tool to estimate Distances, Ages, and Masses (UniDAM) from spectrophotometric data, , Aug. 2017, **604**, A108.
- [24] C. Jurgenson, D. Fischer, T. McCracken, *et al.*, Design and construction of vues: The vilnius university echelle spectrograph, *Journal of Astronomical Instrumentation*, Mar. 2016, **05**.
- [25] P. B. Stetson and E. Pancino, DAOSPEC: An Automatic Code for Measuring Equivalent Widths in High-Resolution Stellar Spectra, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Dec. 2008, **120**, 1332.
- [26] P. Škoda, P. W. Draper, M. C. Neves, D. Andrešič, and T. Jenness, Spectroscopic analysis in the virtual observatory environment with SPLAT-VO, *Astronomy and Computing*, Nov. 2014, **7**, 108–120.
- [27] C. Sneden, J. Bean, I. Ivans, S. Lucatello, and J. Sobeck, “MOOG: LTE line analysis and spectrum synthesis.” Astrophysics Source Code Library, record ascl:1202.009, Feb. 2012.

- [28] Turbospectrum, <<https://github.com/bertrandplez/Turbospectrum2019/>>, 2022. [žiūr. 2022-06-27].
- [29] G. Van Rossum and F. L. Drake, *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009.
- [30] Marcs, <<https://marcs.astro.uu.se/>>, 2020. [žiūr. 2022-06-27].
- [31] A. Ažusienis, A. Pučinskas, and V. Straižys, *Astronomija*. Vilnius: Kultūra, 2003.
- [32] M. Briley, Stellar Properties from Spectral Lines: Introduction, *University of Wisconsin*, 2007.
- [33] N. Grevesse, M. Asplund, and A. J. Sauval, The Solar Chemical Composition, *Space Science Reviews*, June 2007, **130**, 105–114.
- [34] C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, M. Demleitner, and R. Andrae, VizieR Online Data Catalog: Distances to 1.47 billion stars in Gaia EDR3 (Bailer-Jones+, 2021), *VizieR Online Data Catalog*, Feb. 2021, I/352.
- [35] Gaia Collaboration, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, *et al.*, The Gaia mission, , Nov. 2016, **595**, A1.
- [36] Gaia Collaboration, A. Vallenari, A. G. A. Brown, *et al.*, Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties, *arXiv e-prints*, July 2022, arXiv:2208.00211.
- [37] C. Babusiaux, C. Fabricius, S. Khanna, *et al.*, Gaia Data Release 3: Catalogue Validation, *arXiv e-prints*, June 2022, arXiv:2206.05989.
- [38] J. Bovy, C. Allende Prieto, T. C. Beers, *et al.*, The Milky Way’s Circular-velocity Curve between 4 and 14 kpc from APOGEE data, , Nov. 2012, **759**, 131.
- [39] Y. C. Joshi, Displacement of the Sun from the Galactic plane, , June 2007, **378**, 768–776.
- [40] R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, *et al.*, VizieR Online Data Catalog: 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources (Cutri+ 2003), *VizieR Online Data Catalog*, June 2003, II/246.
- [41] E. Delgado Mena, G. Israelian, J. I. González Hernández, J. C. Bond, N. C. Santos, S. Udry, and M. Mayor, Chemical clues on the formation of planetary systems, Nov. 2011, **276**, 25–29.
- [42] D. Turrini, E. Schisano, S. Fonte, *et al.*, Tracing the Formation History of Giant Planets in Protoplanetary Disks with Carbon, Oxygen, Nitrogen, and Sulfur, , Mar. 2021, **909**, 40.
- [43] D.-C. Chen, J.-W. Xie, J.-L. Zhou, *et al.*, Planets Across Space and Time (PAST). I. Characterizing the Memberships of Galactic Components and Stellar Ages: Revisiting the Kinematic Methods and Applying to Planet Host Stars, , Mar. 2021, **909**, 115.

- [44] P. Jofré, P. Das, J. Bertranpetit, and R. Foley, Cosmic phylogeny: reconstructing the chemical history of the solar neighbourhood with an evolutionary tree, , May 2017, **467**, 1140–1153.
- [45] D. R. Soderblom, The Ages of Stars, , Sept. 2010, **48**, 581–629.
- [46] P. E. Nissen, V. Silva Aguirre, J. Christensen-Dalsgaard, R. Collet, F. Grundahl, and D. Slumstrup, High-precision abundances of elements in Kepler LEGACY stars. Verification of trends with stellar age, , Dec. 2017, **608**, A112.
- [47] N. C. Santos, V. Adibekyan, C. Mordasini, *et al.*, Constraining planet structure from stellar chemistry: the cases of CoRoT-7, Kepler-10, and Kepler-93, , Aug. 2015, **580**, L13.
- [48] V. Z. Adibekyan, S. G. Sousa, N. C. Santos, *et al.*, Chemical abundances of 1111 FGK stars from the HARPS GTO planet search program. Galactic stellar populations and planets, *Astronomy Astrophysics*.
- [49] P. E. Nissen, The carbon-to-oxygen ratio in stars with planets, , Apr. 2013, **552**, A73.
- [50] K. L. Luhman, B. M. Patten, M. Marengo, *et al.*, Discovery of Two T Dwarf Companions with the Spitzer Space Telescope, *The Astrophysical Journal*, Jan. 2007, **654**, 570–579.
- [51] J. K. Luhn, F. A. Bastien, J. T. Wright, J. A. Johnson, A. W. Howard, and H. Isaacson, Retired A Stars and Their Companions. VIII. 15 New Planetary Signals around Subgiants and Transit Parameters for California Planet Search Planets with Subgiant Hosts, *The Astronomical Journal*, Apr. 2019, **157**, 149.
- [52] B. Sato, M. Omiya, H. Harakawa, *et al.*, Substellar Companions to Seven Evolved Intermediate-Mass Stars, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Dec. 2012, **64**, 135.
- [53] K. G. Stassun, K. A. Collins, and B. S. Gaudi, Accurate Empirical Radii and Masses of Planets and Their Host Stars with Gaia Parallaxes, *The Astronomical Journal*, Mar. 2017, **153**, 136.
- [54] B. Courcol, F. Bouchy, F. Pepe, *et al.*, The SOPHIE search for northern extrasolar planets. VII. A warm Neptune orbiting HD 164595, *Astronomy Astrophysics*, Sept. 2015, **581**, A38.
- [55] S. Meschiari, G. Laughlin, S. S. Vogt, R. P. Butler, E. J. Rivera, N. Haghighipour, and P. Jallowiczor, The Lick-Carnegie Survey: Four New Exoplanet Candidates, *The Astrophysical Journal*, Feb. 2011, **727**, 117.
- [56] J. T. Wright, S. Upadhyay, G. W. Marcy, D. A. Fischer, E. B. Ford, and J. A. Johnson, Ten New and Updated Multiplanet Systems and a Survey of Exoplanetary Systems, *The Astrophysical Journal*, Mar. 2009, **693**, 1084–1099.
- [57] B. J. Fulton, A. W. Howard, L. M. Weiss, *et al.*, Three Temperate Neptunes Orbiting Nearby Stars, *The Astrophysical Journal*, Oct. 2016, **830**, 46.

- [58] P. Robertson, M. Endl, W. D. Cochran, *et al.*, The McDonald Observatory Planet Search: New Long-period Giant Planets and Two Interacting Jupiters in the HD 155358 System, *The Astrophysical Journal*, Apr. 2012, **749**, 39.
- [59] B. Sato, E. Toyota, M. Omiya, *et al.*, Planetary Companions to Evolved Intermediate-Mass Stars: 14 Andromedae, 81 Ceti, 6 Lyncis, and HD167042, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Dec. 2008, **60**, 1317.
- [60] T. Takarada, B. Sato, M. Omiya, *et al.*, Planets around the evolved stars 24 Boötis and γ Libra: A 30 d-period planet and a double giant-planet system in possible 7:3 MMR, *Astronomy and Astrophysics*, Aug. 2018, **70**, 59.
- [61] M. P. Döllinger, A. P. Hatzes, L. Pasquini, E. W. Guenther, M. Hartmann, and L. Girardi, Planetary companion candidates around the K giant stars 42 Draconis and HD 139 357, *Astronomy and Astrophysics*, June 2009, **499**, 935–942.
- [62] N. C. Hara, F. Bouchy, M. Stalport, *et al.*, The SOPHIE search for northern extrasolar planets. XVI. HD 158259: A compact planetary system in a near-3:2 mean motion resonance chain, *Astronomy Astrophysics*, Apr. 2020, **636**, L6.
- [63] B. P. Bowler, J. A. Johnson, G. W. Marcy, *et al.*, Retired A Stars and Their Companions. III. Comparing the Mass-Period Distributions of Planets Around A-Type Stars and Sun-Like Stars, *The Astrophysical Journal*, Jan. 2010, **709**, 396–410.
- [64] J. Rey, G. Hébrard, F. Bouchy, *et al.*, The SOPHIE search for northern extrasolar planets. XII. Three giant planets suitable for astrometric mass determination with Gaia, *Astronomy Astrophysics*, May 2017, **601**, A9.
- [65] S. Borgniet, I. Boisse, A. M. Lagrange, *et al.*, Extrasolar planets and brown dwarfs around A-F type stars. VIII. A giant planet orbiting the young star HD 113337, *Astronomy Astrophysics*, Jan. 2014, **561**, A65.
- [66] J. Lubin, J. Van Zandt, R. Holcomb, *et al.*, TESS-Keck Survey. IX. Masses of Three Sub-Neptunes Orbiting HD 191939 and the Discovery of a Warm Jovian plus a Distant Substellar Companion, *The Astronomical Journal*, Feb. 2022, **163**, 101.
- [67] R. F. Díaz, J. Rey, O. Demangeon, *et al.*, The SOPHIE search for northern extrasolar planets. XI. Three new companions and an orbit update: Giant planets in the habitable zone, *Astronomy Astrophysics*, July 2016, **591**, A146.
- [68] B. Sato, M. Omiya, H. Harakawa, *et al.*, Planetary Companions to Three Evolved Intermediate-Mass Stars: HD 2952, HD 120084, and ω Serpentis, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Aug. 2013, **65**, 85.

- [69] J. Burt, F. Feng, B. Holden, *et al.*, A Collage of Small Planets from the Lick-Carnegie Exoplanet Survey: Exploring the Super-Earth and Sub-Neptune Mass Regime, *The Astronomical Journal*, Jan. 2021, **161**, 10.
- [70] G. Chauvin, H. Beust, A. M. Lagrange, and A. Eggenberger, Planetary systems in close binary stars: the case of HD 196885. Combined astrometric and radial velocity study, , Apr. 2011, **528**, A8.
- [71] M. Kunitomo, M. Ikoma, B. Sato, Y. Katsuta, and S. Ida, Planet Engulfment by $\sim 1.5\text{-}3 M_{\text{sun}}$ Red Giants, , Aug. 2011, **737**, 66.
- [72] L. J. Rosenthal, B. J. Fulton, L. A. Hirsch, *et al.*, The California Legacy Survey. I. A Catalog of 178 Planets from Precision Radial Velocity Monitoring of 719 Nearby Stars over Three Decades, , July 2021, **255**, 8.
- [73] F. Feng, R. P. Butler, S. S. Vogt, *et al.*, 3D Selection of 167 Substellar Companions to Nearby Stars, , Sept. 2022, **262**, 21.
- [74] K. Ment, D. A. Fischer, G. Bakos, A. W. Howard, and H. Isaacson, Radial Velocities from the N2K Project: Six New Cold Gas Giant Planets Orbiting HD 55696, HD 98736, HD 148164, HD 203473, and HD 211810, , Nov. 2018, **156**, 213.
- [75] A. W. Mann, M. C. Johnson, A. Vanderburg, *et al.*, TESS Hunt for Young and Maturing Exoplanets (THYME). III. A Two-planet System in the 400 Myr Ursa Major Group, , Oct. 2020, **160**, 179.
- [76] L. Yu, I. J. M. Crossfield, J. E. Schlieder, *et al.*, Planetary Candidates from K2 Campaign 16, , July 2018, **156**, 22.
- [77] B. C. Lee, I. Han, M. G. Park, D. E. Mkrtichian, and K. M. Kim, A planetary companion around the K giant Corona Borealis, , Oct. 2012, **546**, A5.
- [78] S. S. Vogt, J. Burt, S. Meschiari, *et al.*, Six Planets Orbiting HD 219134, , Nov. 2015, **814**, 12.