

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Teorinės fizikos ir astronomijos institutas

Vilius Bagdonas

**NEUTRONŲ PAGAVIMO REAKCIJŲ CHEMINIŲ ELEMENTŲ GAUSOS ŠIAURINIO
DANGAUS LAUKO ŽVAIGŽDĖSE**

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Teorinės fizikos ir astrofizikos studijų programa

Studentas

Vilius Bagdonas

Leista ginti

2023-05-25

Darbo vadovas

habil. dr. Gražina Tautvaišienė

Instituto direktorius

prof. Egidijus Anisimovas

Recenzentas

dr. Vidas Dobrovolskas

Vilnius 2023

Turinys

Įvadas	4
1 Teorinė apžvalga	6
1.1 Neutronų pagavimo reakcijos	6
1.1.1 <i>s</i> -procesas	6
1.1.2 <i>r</i> -procesas	8
1.2 Darbe tirtų elementų kilmės šaltiniai	8
1.2.1 Pirmojo <i>s</i> -proceso gūbrio elementai Y ir Zr	8
1.2.2 Antrojo <i>s</i> -proceso gūbrio elementai Ba, La ir Ce	11
1.2.3 Mišria <i>s</i> -/ <i>r</i> - procesų kilme pasižymintys elementai Nd ir Pr	13
1.2.4 <i>r</i> - proceso dominuojamas Eu	14
1.3 Plonasis ir storasis diskas	15
1.3.1 Pagrindinės plonojo ir storojo diskų charakteristikos	15
1.3.2 Plonojo ir storojo disko neutronų reakcijų pagavimo elementų gausos	16
2 Stebėjimo programa ir darbe naudoti duomenys	18
2.1 TESS misija	18
2.2 Stebėjimo programa	18
2.3 Objektų stebėjimai	19
2.4 Žvaigždžių atmosferos parametrai ir magnio gausos	19
3 Darbe naudota metodika	21
3.1 Kinematinų parametrų nustatymas	21
3.2 Amžių nustatymas	22
3.3 Gausų analizė	22
3.4 Paklaidų įvertinimas ir jautrumas atmosferos parametrams	23
3.5 Gausų analizei ir atvaizdavimui naudotos programos	24
4 Rezultatai	26
4.1 Pagrindiniai chemiškai tirtų žvaigždžių parametrai	26
4.2 Žvaigždžių priskyrimas Galaktikos struktūroms	27
4.3 Žvaigždžių kinematiniai parametrai	29
4.4 Tirtų elementų gausų priklausomybės nuo [Fe/H]	30
4.4.1 Y ir Zr	30
4.4.2 Ba, La ir Ce	34
4.4.3 Nd ir Pr	35
4.4.4 Eu	36
4.5 Gausų priklausomybės nuo amžiaus Saulės aplinkoje	37
Išvados	43

Literatūra	44
Priedas 1. Darbe naudoti žvaigždžių atmosferos parametrai	51
Priedas 2. Darbe nustatyti žvaigždžių kinematiniai parametrai	55
Priedas 3. Darbe nustatyti žvaigždžių amžiai ir gausos	59

Įvadas

Šiuolaikiniai Paukščių Tako galaktikos tyrimai pasižymi plačiomis tyrimų galimybėmis. Ištiriamas vis didesnis kiekis žvaigždžių sistemų – nustatomi tų žvaigždžių atmosferos bei kinematiniai parametrai, fotometrija, amžiai, taip pat atrandama vis daugiau egzoplanetų. Dėl statomų antžeminių observatorijų ir paleidžiamų kosminių teleskopų tokių kaip TESS ar JWST, tikėtina, jog gaunamos vertingos informacijos kiekis tik didės. Turbūt vienas geriausių to pavyzdžių yra Gaia kosminė misija, kurios metu tirtų žvaigždžių skaičius jau artėja prie dviejų milijardų. Gaia duomenų išleidimo etapais DR1, DR2, EDR3, DR3 (Gaia Collaboration ir kt. 2016, 2018a, 2021, 2022) milžiniškam žvaigždžių kiekiui išpublikuojamos koordinatės, paralaksai, savieji judėjimai, radialiniai greičiai, fotometrija, temperatūra ir kiti parametrai, o šių duomenų kiekiai dar padidės planuojamuose DR4 ir DR5 etapuose (Gaia internetinis puslapis [Žr. 2023-05-13]). Iš šių gautų duomenų mokslininkai vėliau atlieka ir tolimesnius tyrimus – nustato žvaigždžių kinematiką, amžius, atstumus, randa naujus padrikuosius spiečius (pvz., Gaia Collaboration ir kt. (2018b); Bailer-Jones ir kt. (2018, 2021); Anders ir kt. (2019); Bossini ir kt. (2019); Monteiro ir Dias (2019); Kordopatis ir kt. (2023); Qin ir kt. (2023) ir nuorodos juose).

Nepaisant tokio spartaus astronominių duomenų kiekio didėjimo, astrofotroskopiniais metodais ištirtų objektų skaičius taip sparčiai neauga. Taip yra todėl, kad vieno kosminio objekto spektro gavimui, apdirbimui ir rezultatų suskaičiavimui dažnai reikia daug laiko. Net platesni aukštos skiriamosios gebos spektroskopiniai tyrimai dažnai atmosferų parametrus ar įvairių cheminių elementų gausas nustato šimtams ar kiek daugiau nei tūkstančiui žvaigždžių (Battistini ir Bensby 2016; Delgado Mena ir kt. 2017; Tautvaišienė ir kt. 2021 ir nuorodos jose), tačiau ir šie skaičiai yra palyginti maži. Netgi nemažai ryškių, Saulės aplinkos žvaigždžių neturi detalesnių spektroskopinių tyrimų. Tai ypač būdinga šiauriniam dangaus pusrutuliui, nes dauguma didžiausių pasaulio teleskopų yra pietiniame pusrutulyje.

Spektroskopiniais metodais gaunama informacija yra tiksli ir atskleidžianti daug vertingos informacijos. Iš aukštos skiriamosios gebos spektrų suskaičiuojami žvaigždžių atmosferos parametrai yra itin tikslūs, o iš spektrinių linijų gaunamos įvairių cheminių elementų gausos daug parodo apie žvaigždę ar žvaigždžių spiečių ir prisideda prie Galaktikos chemodinaminių modelių kūrimo. Kad astrofotroskopiniais metodais gaunama informacija pasitarnauja sprendžiant pačias įvairiausias astrofizikos problemas puikiai iliustruoja keletas pavyzdžių. Maišymuisi jautrių cheminių elementų, tokių kaip anglis, azotas ar natrias, gausos, o taip pat $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ir C/N santykiai gali būti naudojami identifikuoti žvaigždžių evoliucijos stadijas ir vidinius jose vykstančius procesus (Tautvaišienė ir kt. 2000, 2005, 2013, 2015, 2016). α -elementų, ypač magnio, gausos naudojamos žvaigždžių priskyrimui Galaktikos substruktūroms (Mikolaitis ir kt. 2014, 2017, 2019; Recio-Blanco ir kt. 2014; Masseron ir Gilmore 2015; Rojas-Arriagada ir kt. 2016; Mashonkina ir kt. 2019; Tautvaišienė ir kt. 2020).

Visgi, labai plati cheminių elementų grupė, vadinamieji neutronų pagavimų reakcijų cheminiai elementai, nėra pakankamai ištirti. Nors pasižymi tuo pačiu fizikiniu principu, neutronų pagavimu, sąlygos, kuriomis vyksta šios reakcijos, labai skirtingos. Laikoma, kad už šių elementų gamybą atsakingos tiek mažos masės, tiek itin masyvios žvaigždės, šiais elementais praturtinusios tarpžvaigždinę erdvę įvairiais laikotarpiais (pvz. Kobayashi ir kt. 2020). Tai lemia, kad elementų kilmės mechanizmai

yra sunkiai apibrėžiami. Taip pat, kai kurių elementų izotopai gali būti gaunami įvairiomis sąlygomis, todėl modeliavimo darbais gaunamos išvados dėl šių elementų kilmės smarkiai skiriasi (pvz. Maiorca ir kt. 2012; Prantzos ir kt. 2018; Kobayashi ir kt. 2020).

Dėl šios priežasties labai svarbūs yra didelės apimties žvaigždžių šių elementų spektroskopiniai tyrimai. Nustatant įvairius šios grupės cheminius elementus ir siejant juos su modeliais, galima išsiaiškinti detalią šių elementų kilmę. Visgi, tarp skirtingų praktinių tyrimų bei teorinių modelių įvairaus amžiaus ir metalingumo žvaigždėse matomi neatitikimai (pvz., Tautvaišienė ir kt. (2021) 5 lentelė).

Tiriant šių elementų kilmę bei bandant iš šių gausų išgauti informaciją apie Galaktikos evoliuciją susiduriama ir su kita, dar labiau tyrimus apsunkinančia problema – įvairiose Galaktikos vietose esančios žvaigždės pasižymėjo skirtinga formavimosi istorija (Viscasillas Vázquez ir kt. 2022). Pavyzdžiui, laikinės konkrečiame Galaktikos spindulyje esančių žvaigždžių gausų priklausomybės nėra vienodos visame diske (Casali ir kt. 2020; Viscasillas Vázquez ir kt. 2022).

Šių elementų tyrimai svarbūs ne tik jų kilmės išsiaiškinimui. Dėl didelės šių elementų įvairovės jie yra puikūs Galaktikos evoliucijos indikatoriai. Kai kurių elementų gamyba iš didelės masės žvaigždžių buvo ryškesnė ankstyvojoje Galaktikoje arba struktūrose, kurios pasižymėjo didesniu žvaigždžių formavimosi greičiu, pavyzdžiui storajame diske ar hale (pvz., Bisterzo ir kt. (2014); Kobayashi ir kt. (2020)). Ištiriant įvairių Galaktikos substruktūrų žvaigždžių gausas, galima detaliau išsiaiškinti jų, o kartu ir visos Galaktikos evoliuciją.

Taip pat visai neseniai pastebėta, kad įvairių elementų gausų santykiai juose panaudojant ir neutronų reakcijų pagavimo elementus, pavyzdžiui, itrio su magniu, stroncio su magniu, itrio ar bario su α -elementais, gali veikti kaip amžių indikatoriai, vadinamieji cheminiai laikrodžiai (angl. chemical clocks), įvairių evoliucijos stadijų plonojo disko žvaigždėms (da Silva ir kt. 2012; Nissen 2015; Spina ir kt. 2016; Tucci Maia ir kt. 2016; Feltzing ir kt. 2017; Nissen ir kt. 2017, 2020; Slumstrup ir kt. 2017; Titarenko ir kt. 2019; Delgado Mena ir kt. 2019; Casali ir kt. 2020; Casamiquela ir kt. 2021; Tautvaišienė ir kt. 2021; Viscasillas Vázquez ir kt. 2022).

Šio **darbo tikslas** – ištirti neutronų pagavimo reakcijų metu gaminamų cheminių elementų itrio, cirkonio, bario, lantano, cerio, neodimio, praeodimio ir europio gausas Saulės aplinkos šiaurinio dangaus pusrutulio žvaigždėse, patenkančiose į 12 laipsnių pločio dangaus plotą aplink NASA TESS kosminio teleskopo nuolatinių stebėjimų zoną ir esančiose $8 \pm 0,5$ kpc vidutinių galaktocentrinių atstumų intervale. Taip pat nustatyti žvaigždžių amžius ir kinematinis parametras, gautas cheminių elementų gausas palyginti su Galaktikos evoliucijos modeliais, išnagrinėti, ką skirtingų elementų gausos rodo apie Galaktikos evoliuciją.

1 Teorinė apžvalga

1.1 Neutronų pagavimo reakcijos

Dauguma lengvesnių cheminių elementų iki geležies gaunami branduolių susijungimo (angl. nuclear fusion) reakcijų metu, tačiau sunkesnių cheminių elementų gamybai reikia specifinių sąlygų. Taip yra dėl to, jog branduolio ryšio energija (angl. nuclear binding energy) pasiekia didžiausią vertę ties geležies gūbrio elementais, tad sunkesnių elementų gamyba energijos nebeišskiria, o jos reikalauja.

Pagrindinis mechanizmas, leidžiantis sukurti sunkesnius už geležį cheminius elementus ($Z > 30$) yra vadinamosios neutronų pagavimo reakcijos (Burbidge ir kt. 1957). Neutronų pagavimo reakcijos, tai branduolinės reakcijos, kurių metu cheminio elemento branduolys yra smūgiuojamas laisvo neutrono ir yra gaunamas sunkesnis izotopas. Vėliau įvyksta β skilimas – reakcija, kurios metu atomo branduolys išspinduliuoja elektroną (β^-) arba pozitroną (β^+) – ir taip gaunamas sunkesnis elementas. Kadangi šiomis reakcijomis gaminama itin didelė cheminių elementų grupė, šie cheminiai elementai gaunami įvairiomis sąlygomis (žr. žemiau). Pagal neutronų srautą išskiriamos pagrindinės dvi neutronų pagavimo reakcijų komponentės s - ir r -, kurios pagamina po maždaug pusę už geležį sunkesnių elementų.

Kai kurių izotopų gamyboje dalyvauja vadinamasis protonų pagavimo procesas (p -procesas), tačiau, kaip apžvelgta, pavyzdžiui, Kusakabe ir kt. (2011), bendras jo indėlis į elementų gamybą yra menkas, o jo šaltiniai tiksliai nėra žinomi.

Prie šių elementų gamybos gali prisidėti ir vadinamasis i -procesas, kurio metu neutronų srautas yra tarpinis tarp s - ir r - procesų – 10^{23} – 10^{25} $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Cowan ir Rose 1977). Visgi, šio proceso indėlis bei galimi jo šaltiniai vis dar diskutuoti (Goriely ir kt. 2021).

1.1.1 s -procesas

s - (angl. slow) komponentės arba s -procesu metu tarp dviejų sėkmingų neutronų pagavimų yra ilgas tarpas, tad β skilimas vyksta tarp neutronų pagavimų. Kitaip tariant, prieš skilimą, nėra pagaunama daugiau neutronų. Dėl šios priežasties, nuklidų diagramoje (angl. chart of nuclides), s -procesas seka stabilumo slėnį (Käppeler ir kt. 2011). s -procesas paprastai trunka ilgai, tačiau įvairiomis sąlygomis. Neutronų srautas šių reakcijų metu yra 10^5 – 10^{11} $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Pagal tai, kokiomis sąlygomis vyksta šis procesas ir už kokius elementus atsakingas, išskiriamos trys pagrindinės šio proceso komponentės – silpnoji (angl. weak), pagrindinė (angl. main) ir stiprioji (angl. strong) (Käppeler ir kt. 2011).

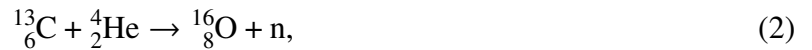
Už silpnąją komponentę atsakingos didelės masės žvaigždės ($>8M_{\odot}$, kai kur $>10M_{\odot}$) (Käppeler ir kt. 1989; Pignatari ir kt. 2010). Šiose žvaigždėse pagrindinis laisvųjų neutronų šaltinis yra reakcija:



Ši reakcija aktyvuojama vėlesnėje žvaigždės stadijoje, konvekcinio helio branduolio stadijos pabaigoje, pasiekus aukštesnę nei $2,5 \cdot 10^8$ K temperatūrą (Pignatari ir kt. 2010), tai pat ir vėlesniame etape, anglies degimo metu konvekciniame sluoksnyje (angl. convective C-burning shell). Laikoma, kad silpnosios s -procesu komponentės gaminami elementai tarp geležies ir stroncio, t. y. pirmojo s -procesu

gūbrio elementai (Prantzos ir kt. 2018). Prantzos ir kt. (2018) darbe taip pat teigiama, jog pagrindinės *s*-proceso komponentės įtaka šiems elementams yra 20%–50%. Darbe pateikta, jog masyvių žvaigždžių indėlis už šio gūbrio krenta žemyn.

Pagrindinė *s*-proceso komponentė vyksta asimptotinės šakos žvaigždėse (AGB), o laisvieji neutronai gaunami reakcija (Käppeler ir kt. 2011):



Pagrindinės šios komponentės kilmės šaltinis yra mažos masės AGB žvaigždės, esančios termiškai pulsuojančioje stadijoje (TP-AGB). Šios žvaigždės struktūrą sudaro anglies-deguonies branduolys, jį supantis helio sluoksnis, virš jo esantis heliu praturtintas tarp sluoksnis (angl. He-rich intershell), pastarąjį juosiantis vandenilio sluoksnis bei virš jo esantis žvaigždės konvekcinis apvalkalas. Kaip detaliai aprašyta Lugaro ir kt. (2003b), žvaigždės energija gaunama vandenilio degimo sluoksnyje, gaminant helį, kuriam kaupiantis helio tarp sluoksnyje šis spaudžia žemiau esančius sluoksnius. Pasiėkus pakankamai aukštą temperatūrą užsidega giliau esantis helis sukurdamas terminį pulsą (TP) – helio žybsnį. Jo sukurta, staigiai išleidžiama energija lemia, jog helio tarp sluoksnis tampa pilnai konvekcinis, vandenilio sluoksnis vėsta, o apvalkalas plečiasi. Po kiek laiko helio tarp sluoksnyje konvekcija nuslopsta, tačiau helio degimas dar kurį laiką tęsiasi, o vandenilis tuo metu nedega. Vėliau apvalkalas susitraukia ir vėl prasideda vandenilio degimas. Priklausomai nuo įvairių žvaigždės parametrų, šis ciklas gali kartotis iki 100 kartų. Po tam tikro skaičiaus terminių pulsų konvekcinis sluoksnis prasišverbia į viršutinę helio tarp sluoksnio ribą ir į žvaigždės viršutinius sluoksnius išmeta pagamintus elementus, tarp jų ir neutronų pagavimo proceso. Šis procesas vadinamas trečiaja drumstimi (third dredge up).

s-proceso mechanizmas 2 reakcijai vykti nėra tiksliai ištirtas. Helio tarp sluoksnio sudėtį sudaro maždaug 75% ${}^4\text{He}$, 22% ${}^{12}\text{C}$, 4% ${}^{22}\text{Ne}$ ir <1% ${}^{16}\text{O}$ (Karakas ir kt. 2002). Pakankamam ${}^{13}\text{C}$ kiekiui gauti, laikoma, jog reikalingas pakankamas protonų skaičiaus įsimašymas į helio tarp sluoksnį iš apvalkalo. Apvalkale esant dideliame kiekiui ${}^{12}\text{C}$, pagavus protonus, pakankamas ${}^{13}\text{C}$ kiekis gaunamas lokaliai, trečiosios drumsties pabaigoje, esant didžiausiam konvekcinio sluoksnio įsiskverbimui į helio tarp sluoksnį (Lugaro ir kt. 2003b; Buntain ir kt. 2017). Šie lokalūs, ploni, ${}^{13}\text{C}$ sluoksniai vadinami ${}^{13}\text{C}$ kišenėmis ir yra svarbus modeliavimo parametras, tiriant neutronų reakcijų pagavimo elementų kilmės šaltinius. Praturtinto ${}^{13}\text{C}$ sluoksnio susiformavimui protonų ir ${}^{12}\text{C}$ santykis turėtų būti <0,5 – aukštesnė šio santykio vertė salygotų ${}^{14}\text{N}$ susiformavimą.

Neutronų reakcijų cheminių elementų gamybai reikia ne tik laisvųjų neutronų gaunamų 2 reakcija, o ir branduolių-taikinių (angl. seed), pagaunančių laisvuosius neutronus, kurie paprastai būna geležies izotopai. Kadangi ${}^{13}\text{C}$ kilmė beveik nepriklauso nuo metalingumo, o Fe gausos priklauso, mažo žvaigždžių metalingumo atveju gaunami didesni laisvųjų neutronų kiekiai lyginant su taikinių skaičiumi ir pagaminami sunkesni antrojo ir trečiojo *s*-proceso gūbrio elementai, pavyzdžiui baris ir švinas (Lugaro ir kt. 2003b; Buntain ir kt. 2017).

Išskiriama stiprioji *s*-proceso komponentė, vykstanti mažos masės ir mažo metalingumo AGB žvaigždėse ir atsakinga už maždaug pusę pagaminto trečiajam *s*-proceso gūbriui priklausančio elemento švino gausos (Käppeler ir kt. 2011).

2 reakcija efektyviai vyksta mažesnės masės žvaigždėse ($M < 4-5M_{\odot}$), temperatūrai siekiant 100 mln. K ir yra dominuojanti. Vidutinės masės žvaigždėse ($5-8M_{\odot}$) TP metu temperatūra viršija 300 mln. K., reikalingą vyksti 1 reakcijai, todėl dominuoti ima pastaroji (Busso ir kt. 2001; Cseh ir kt. 2018).

1.1.2 *r*-procesas

r- (angl. rapid) komponentė, vadinamasis *r*-procesas, vyksta esant daug didesniai neutronų srautui – $4 \cdot 10^{32} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Burbidge ir kt. 1957). Šio proceso metu yra pagaunamas didelis kiekis neutronų prieš įvykstant β skilimui. Šis procesas yra atsakingas už maždaug pusę sunkesnių už geležį cheminių elementų (Kajino ir kt. 2019), o jo metu daugiausia gaminami elementų 3 gūbriai yra pasislinkę į lengvesnių elementų pusę nuo *s*-proceso gūbrių ir yra ties Se-Kr, Te-Xe, ir Os-Ir-Pt (Seeger ir kt. 1965; Cowan ir kt. 2021). Norint gauti didelius neutronų srautus *r*-procesui, reikalingos ypatingos sąlygos, tačiau šios iki galo nėra žinomos.

Dabartiniai tyrimai išskiria ne vieną galimą *r*-proceso šaltinį – neutrinių vėjus (angl. neutrino driven winds, NUW), neutroninių žvaigždžių (angl. neutron star mergers, NS-NS) ar neutroninės žvaigždės su juodąja skylė (angl. neutron star - black hole mergers, NS-BH) susijungimus, branduolio kolapso supernovas (angl. core collapse supernovae, CCSNe) magneto-rotacines supernovas (MRS-Ne), elektronų pagavimo supernovas (angl. electron capture supernovae, ECSNe) ir kitus (Haynes ir Kobayashi 2019; Kajino ir kt. 2019; Cowan ir kt. 2021).

Kaip ir *s*-proceso atveju, tikėtina, jog egzistuoja keli *r*-proceso šaltiniai kuriantys sunkiųjų elementų gausas – kaip išskiriama Cowan ir kt. (2021), stiprioji *r*-proceso (angl. strong *r*-process) komponentė atsakinga už elementų gamybą iki aktinidų, o silpnoji (angl. weak *r*-process) – iki Eu ir pasižyminti ryškesniu įtakos silpimu link sunkesnių elementų. Kaip aptarta Cowan ir kt. (2021) darbe, labiausiai tikėtini stipriosios komponentės šaltiniai yra MRSNe, NS-NS, NS-BH bei materijos nutekėjimas iš kolapsarų akrecinio disko, o silpnosios – ECSNe ir CCSNe.

1.2 Darbe tirtų elementų kilmės šaltiniai

1.2.1 Pirmojo *s*-proceso gūbrio elementai Y ir Zr

Šiame darbe tirtų pirmajam *s*-proceso gūbriui priklausančių itrio (Y) ir cirkonio (Zr) kilmė yra gana plati ir vis dar diskutuotina. Nors žinoma, jog šie elementai pasižymi dominuojančia *s*-proceso įtaka jų gausoms – atitinkamai 72–92% ir 66–83% (Tautvaišienė ir kt. (2021), 4 lentelė) – reikšminga dalis gausų gaunama *r*-proceso metu. Nėra tiksliai žinomi ir tikslesni *s*-proceso komponentių indėliai.

Y gausą Saulėje sudaro tik vienas stabilus izotopas ^{89}Y (Lugaro ir kt. 2003a), su dominuojančia *s*-proceso komponente (pvz., Travaglio ir kt. (2004); Prantzos ir kt. (2020)), tačiau potenciali Y kilmė detaliau aptarta apačioje. Natūraliai Zr turi 5 stabilus izotopus – ^{90}Zr , ^{91}Zr , ^{92}Zr , ^{94}Zr ir ^{96}Zr , kurių gausos atitinkamai sudaro 51,5%, 11,2%, 17,2%, 17,4% ir 2,8% Saulės Zr gausos (Lugaro ir kt. 2003a). Nors ir nėra aiškūs tikslūs Zr kilmės šaltiniai, panašu, jog nei vienas iš Zr izotopų nepasižymi visiškai *s*-proceso kilme – išvardintų pirmųjų keturių gamyboje dominuoja *s*-, o paskutiniojo, tikėtina, *r*-procesas (pvz., Lugaro ir kt. (2003a); Travaglio ir kt. (2004); Prantzos ir kt. (2020)). Galimas šių izotopų

kilmės mechanizmas aptartas Lugaro ir kt. (2003a).

Be kitų tyrimų bandant paaiškinti dalį Y ir Zr kilmės galima išskirti lengvesniųjų elementų pirminį procesą (angl. lighter element primary process, LEPP), iškeltą Travaglio ir kt. (2004) darbe. Palyginę teorinius skaičiavimus su r -procesu praturtinimu pasižyminčia žvaigžde, Travaglio ir kt. (2004) nustatė, kad 69% itrio ir 65% cirkonio yra gaminama AGB žvaigždžių pagrindinės s -procesu komponentės. Darbe laikyta, jog kaip nustatė Raiteri ir kt. (1992), maždaug 4% ir 2% procentai itrio ir cirkonio atitinkamai yra gaunami iš masyvių žvaigždžių dėl silpnosios s -procesu komponentės. Tačiau visa likusi procentinė dalis nebuvo priskirta vien r -procesui, o buvo iškelta idėja, jog 18% itrio ir cirkonio pagaminama LEPP masyviose žvaigždėse. Visgi, darbe detalesnė potenciali LEPP kilmė nepateikta.

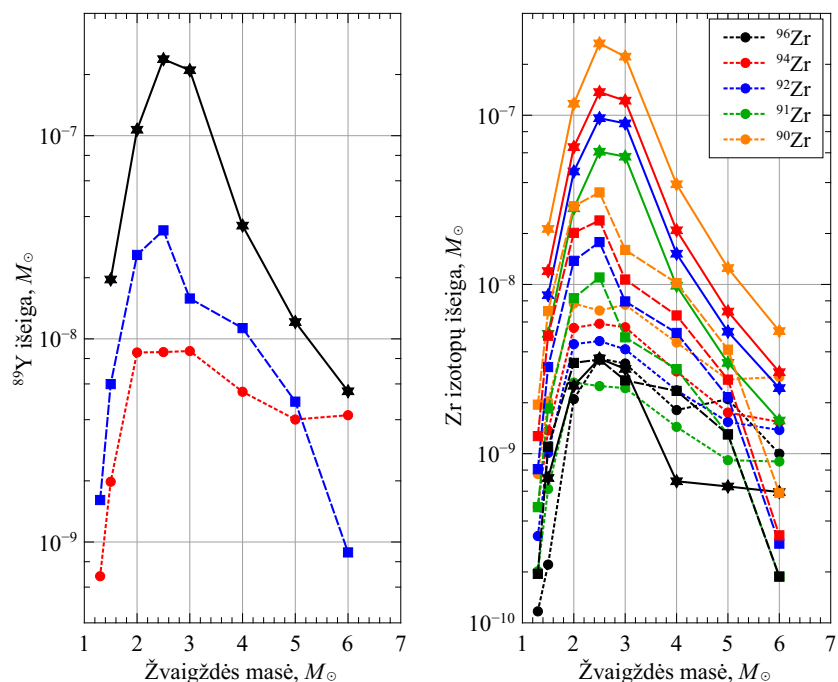
LEPP poreikį Y ir Zr gamyboje patvirtino Bisterzo ir kt. (2014) modeliavimo darbas, kai keičiant ^{13}C kišenės parametrus, jie gavo tik kiek kitokį s -procesu indėlio persiskirstymą tarp mažos ir vidutinės masės žvaigždžių nei Travaglio ir kt. (2004), tačiau bendra komponentės įtaka liko panaši. Bisterzo ir kt. (2017) atnaujino modelį pritaikę išėigą iš greitai besisukančių masyvių žvaigždžių, o tai lėmė didesnę silpnosios s -procesu komponentės indėlį – 10% Y ir 5% Zr. Vis tik šis darbas paliko LEPP poreikį, tačiau pabrėžė, jog jo labiausiai tikėtina kilmė yra s -/ r - procesai.

Visgi nemažai darbų atmeta LEPP poreikį. Maiorca ir kt. (2012) modelyje nustačius, kad mažos masės ($M < 1,5M_{\odot}$) AGB žvaigždės $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reakcijos metu paleistų 4 kartus didesnę skaičių neutronų negu masyvesnės ($M > 1,5M_{\odot}$) AGB žvaigždės, gaunama daug didesnė pagrindinės s -procesu komponentės įtaka. Šis modelis lemia, jog net 84% Y ir 80% Zr gausų yra gaunama mažos masės žvaigždžių, palyginus su atitinkamai 62% ir 55% gautomis Travaglio ir kt. (2004). Gana ryškus mažos masės AGB žvaigždžių indėlis modelyje padidintas atsižvelgiant į jaunų padrikųjų spiečių tyrimus, rodančius ryškų šių procesų metu gaunamų elementų padidėjimą.

Prantzos ir kt. (2018) modelis, įtraukiantis platų masių ir metalingumų tinklą, bei masyvių žvaigždžių sukimosi indėlį, trūkstamą šių elementų gamybą gauna iš silpnosios s -procesu įtakos (Prantzos ir kt. (2018), 11 pav.). Iš Prantzos ir kt. (2018) gauto modelio tikslios procentinės įtakos Y ir Zr gamybai, neišskirstant s -procesu į jo silpnąją ir pagrindinę komponentes, pateikiamos Prantzos ir kt. (2020) darbe – iš s -procesu Y ir Zr gaminama atitinkamai 78% ir 82%, o iš r - procesu likusi 22% ir 18% dalis.

Kobayashi ir kt. (2020) yra kitas darbas atmetantis LEPP poreikį, tik dėl kitos priežasties negu Prantzos ir kt. (2018). Prantzos ir kt. (2018) r -procesui priskirta visa likusi dalis iš Saulės gausų atėmus suskaičiuotą s -procesu indėlį bei laikant, jog už r -procesą atsakingos antrojo tipo supernovos. Kobayashi ir kt. (2020) darbe r -procesu indėlis suskaičiuotas iš skirtingų potencialių šio procesu šaltinių – ECSNe, neįvykusių supernovų (angl. failed supernovae), NUW, NS-NS ir MRSNe. Modelyje būtent ECSN šaltinis leidžia pagaminti pakankamai Y ir Zr taip pašalindamas LEPP poreikį – iš ECSNe gaunama net 22% Y ir 44% Zr. Likusi dalis gaunama iš AGB žvaigždžių s -procesu metu.

Pagrindinės s -procesu komponentės įtaka iš mažos ir vidutinės masės žvaigždžių taip pat nėra aiškiai iširta. Egzistuoja įvairūs AGB žvaigždžių išėigos skaičiavimo darbai, pavyzdžiui MONASH (Karakas ir Lugaro 2016), FRUITY (Fruity internetinis puslapis ([Žr. 2023-05-08])); Cristallo ir kt. (2011, 2015b)), NuGrid (NuGrid internetinis puslapis ([Žr. 2023-05-08]), Battino ir kt. (2021) ir nuorodos jame). Pavyzdžiui, Cristallo ir kt. (2015a) darbe, panaudojus modelius su FRUITY išėigomis



1 pav. Y ir Zr izotopų išeigos priklausomybės nuo žvaigždžių masės prie trijų skirtingų metalingumų. Žvaigždžių simboliais ir ištisinėmis linijomis žymimas Saulės ($Z = 0,014$) metalingumas, kvadratais ir brūkšniuotomis linijomis – $Z = 0,003$ metalingumas, o skrituliais ir punktyrinėmis linijomis – $Z = 0,001$ metalingumas. Kairys grafikas žymi vienintelio ^{89}Y izotopo išeigų pasiskirstymą, dešinys – Zr izotopų pasiskirstymą.

nustatyta, jog LEPP taip pat nėra būtinas.

Panagrinėjus detaliau Y ir Zr izotopų FRUITY modelių išeigas prie 3 skirtingų metalingumų $Z = 0,014$, $Z = 0,003$ bei $Z = 0,001$ (žr. 1 pav.) matomas kitimas prie įvairių masių. Itrio izotopo ^{89}Y esant $Z = 0,014$ metalingumui išeigos maksimumas išreikštas ties 2–3 M_{\odot} . Ties mažesniu metalingumu $Z = 0,001$ išeigos maksimumas matomas ties tomis pačiomis masėmis, bet išeiga maždaug pusantros eilės mažesnė. Taip pat ties $Z = 0,001$ metalingumu nėra matomas išreikštas kritimas prie didesnių žvaigždžių masių. Tarpinio metalingumo $Z = 0,003$ atveju matoma, jog ^{89}Y izotopo išeiga maždaug eile mažesnė negu $Z = 0,014$ metalingumo atveju bei matomas ryškus maksimumas ties 2,5 M_{\odot} , bei kritimas ties 3 M_{\odot} .

Zr atveju, 4 šio elemento gausai reikšmingų viršuje aptartų izotopų ^{90}Zr , ^{91}Zr , ^{92}Zr ir ^{94}Zr išeigos ties $Z = 0,014$ ir $Z = 0,001$ metalingumais rodo panašų kitimą į ^{89}Y – atitinkamų izotopų išeigos skirtumas ties maksimumu yra maždaug pusantros eilės didesnis ties $Z = 0,014$ metalingumais, o $Z = 0,001$ metalingumais kritimas link didesnių masių nėra toks ryškus. Šių 4 izotopų išeiga ties $Z = 0,003$ metalingumu yra eile žemesnė nei $Z = 0,014$ atveju, tačiau, kaip ir ^{89}Y atveju labiau išreikštas maksimumas ties žemesnėmis 2,5 M_{\odot} masėmis ir matomas kritimas ties 3 M_{\odot} . Mažiausią gausa Saulėje pasižymintis ^{96}Zr izotopas visų trijų metalingumų atveju pasižymi panašia išeiga ties maksimumu.

Kaip dar vieną šaltinį šių elementų gausoms galima išskirti ir *i*-procesą. Côté ir kt. (2018a) darbe ištirtas galimas *i*-proceso indėlis iš greitos akrecijos baltųjų nykštukių, galintis stipriai prisidėti prie pirmojo *s*-proceso gūbrio elementų gausų. Galimas indėlis į itrį gausas pateikiamas 3–21%, o į cirkonio – 3–20% bei išskiriama, kad šis šaltinis galėtų pašalinti LEPP poreikį.

1.2.2 Antrojo *s*-procesu gūbrio elementai Ba, La ir Ce

Už pirmojo *s*-procesu gūbrio, silpnoji *s*-procesu komponentė įtaka staigiai slobsta (Raiteri ir kt. 1991; Pignatari ir kt. 2010). Bario (Ba), lantano (La), cerio (Ce), prazeodimio (Pr) ir neodimio (Nd) gausos gaunamos iš pagrindinės *s*-procesu komponentės, todėl pagrindinį skirtumą tarp šių elementų lemia kiek kiekvienas jų yra pagaminamas *s*-procesu, o kiek *r*-procesu, bei kokia *s*-procesu pagrindinės komponentė dalis gaunama iš mažos, o kuri iš vidutinės masės žvaigždžių.

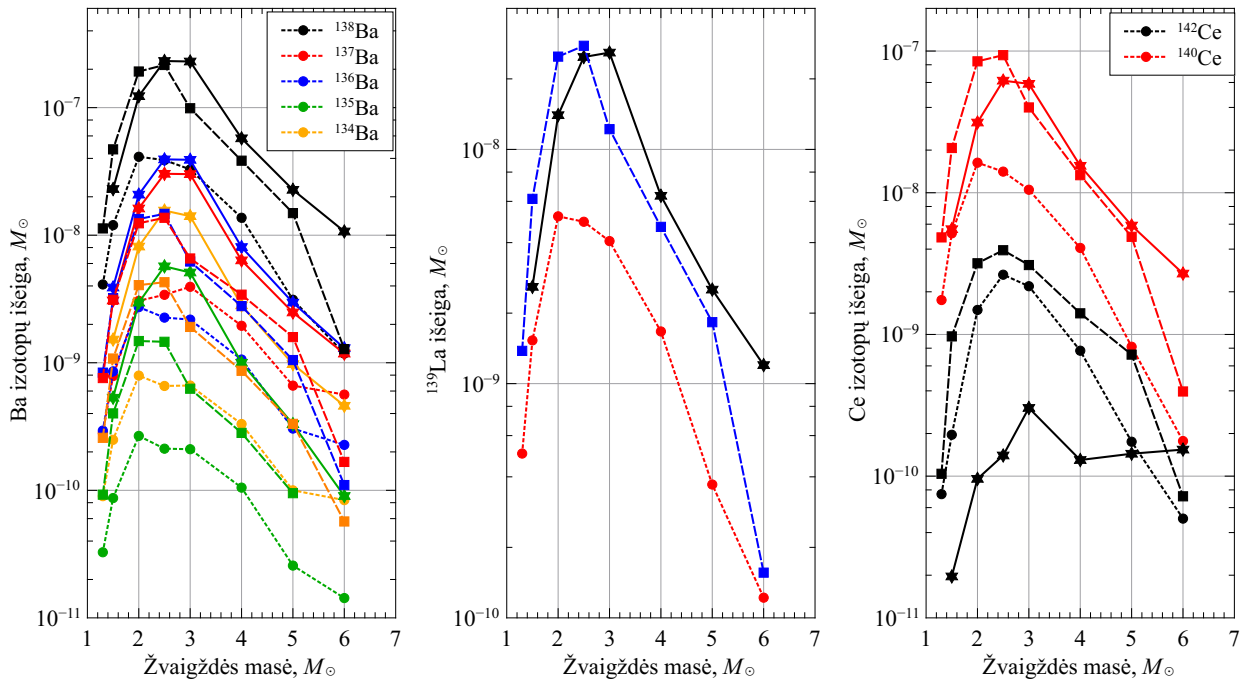
Baris turi 7 stabilūs izotopus. Du iš jų – ^{130}Ba ir ^{132}Ba yra gaunami tik *p*-procesu metu, tačiau jų gausos yra itin žemos (Lugaro ir kt. 2003a; Prantzos ir kt. 2020). Kaip nustatyta Prantzos ir kt. (2020), *p*-procesu indėlis yra tik 0,2% visam pagaminam bariui ir gaunamas iš šių dviejų izotopų. Visiškai *s*-procesu metu gaunami kiti du Ba izotopai – ^{134}Ba ir ^{136}Ba (Lugaro ir kt. 2003a; Prantzos ir kt. 2020), kartu sukuriantys kiek daugiau negu 10% Saulės Ba gausos (Lugaro ir kt. 2003a; Loddors 2019). Likę trys izotopai – ^{135}Ba , ^{137}Ba , ^{138}Ba , pasižymi mišria *s*-/*r*- kilme (Lugaro ir kt. 2003a; Prantzos ir kt. 2020) su atitinkamai maždaug 6,6%, 11,2% ir dominuojančios 71,7% Saulės Ba gausos (Lugaro ir kt. 2003a; Loddors 2019). Pirmasis yra dominuojamas *r*-procesu (> 70%), kiti *s*-procesu – atitinkamai (> 56%) ir (> 85%) (Lugaro ir kt. (2003a); Bisterzo ir kt. (2014); Prantzos ir kt. (2020) ir šaltiniai juose). Detaliau kiekvieno izotopų kilmė aprašyta Lugaro ir kt. (2003a).

Dėl didelio *s*-procesu indėlio į bario gausas (81-89%, Tautvaišienė ir kt. (2021), 4 lentelė), jis laikomas tipiniu *s*-procesu nusakančiu elementu. Kaip pateikiama Bisterzo ir kt. (2014), 5 aukščiau minėti Ba *s*-/*r*- izotopai pasižymi tik nežymia (<1%) vidutinės masės žvaigždžių ($4 \leq M/M_{\odot} < 8$) įtaka bario gausoms. Kiek didesnė pateikiama Travaglio ir kt. (2004) darbe, kuriame šių žvaigždžių įtaka bario izotopams <10%.

Panagrinėjus bario izotopų išėigą pagal skirtingas žvaigždžių masės FRUITY modelių atveju, galima matyti, jog visi *s*-/*r*- bario izotopai ^{134}Ba , ^{135}Ba , ^{136}Ba , ^{137}Ba ir ^{138}Ba pasižymi didžiausia išėiga prie 2,5–3 M_{\odot} žvaigždžių ties $Z = 0,014$ metalingumu, 2–2,5 M_{\odot} – ties $Z = 0,003$ metalingumu, o esant $Z = 0,001$ metalingumui išėiga 2–3 M_{\odot} intervale panaši. Visų metalingumų atveju už 2–3 M_{\odot} intervalo ribų išėigos krenta. Didėjant metalingumui, išėigos maksimumas masių intervale 2–3 M_{\odot} didėja visiems izotopams, išskyrus gausiausio ^{138}Ba izotopo atveju, kuris $Z = 0,014$ ir $Z = 0,003$ gaminamas gana artimai. ^{134}Ba ir ^{135}Ba išėigos tarp gretimų analizuotų metalingumų skiriasi maždaug puse eilės.

Lantanas pasižymi tik vienu stabilium izotopu ^{139}La , sudarančiu arti 100% Saulės lantano gausos, kai kitas, ilgo gyvavimo izotopas ^{138}La sudaro mažiau negu 1% lantano gausos (Loddors 2019) ir gaunamas *p*-procesu metu (Prantzos ir kt. 2018). ^{139}La izotopas daugiausia gaminamas *s*-procesu metu (Bisterzo ir kt. (2014); Prantzos ir kt. (2020)).

Lantanas taip pat pasižymi aukšta bendra *s*-procesu frakcija (62–80%, Tautvaišienė ir kt. (2021), 4 lentelė), gaunama iš pagrindinės *s*-procesu komponentės, vienintelio La gausoms įtaką turinčio izotopo ^{139}La . Bisterzo ir kt. (2014) darbe pateikta, jog izotopo kilmė iš vidutinės masės žvaigždžių yra menka (0,07%), o Travaglio ir kt. (2004) – darbe 1,68%. FRUITY išėigos (žr. 2 pav.) taip pat rodo šio elemento gamybos maksimumą ties 2–3 M_{\odot} . Kaip ir Ba izotopo ^{138}Ba atveju (71,7% Saulės gausos), ^{139}La izotopo išėigos maksimumas panašus ties $Z = 0,014$ ir $Z = 0,003$ metalingumais, tačiau pastarojo atveju maksimumas pasiekiamas 2–2,5 M_{\odot} žvaigždėse, o ties $Z = 0,014$ metalingumu –



2 pav. Bario (kairėje), lantano (centre) ir cerio (dešinėje) izotopų išėigos priklausomybės nuo žvaigždžių masės. Žymėjimai analogiški 1 pav.

2,5–3,0 M_{\odot} . Išėigos maksimumas ties $Z = 0,001$ nuo kitų dviejų metalingumų skiriasi maždaug eile kaip ir ^{138}Ba atveju.

Ceris turi 4 stabilūs izotopus ^{136}Ce , ^{138}Ce , ^{140}Ce , ^{142}Ce , tačiau pirmieji du kartu sudaro $<0,5\%$ visos Ce Saulės gausos (Lodders 2019) ir yra gaminami p -proceso metu (Prantzos ir kt. 2020). Izotopas ^{140}Ce sudaro didžiausią dalį, 88,5% cerio gausos (Lodders 2019) ir yra didžiaja dalimi gaminamas s -proceso (daugumoje tyrimų $> 90\%$) (Bisterzo ir kt. 2014; Prantzos ir kt. 2020). Virš 11% cerio gausos sudaro izotopas ^{142}Ce (Lodders 2019), daugiausia ($> 80\%$) gaunamas r -proceso metu (Bisterzo ir kt. 2014; Prantzos ir kt. 2020).

Dėl dominuojančio ^{140}Ce izotopo s -proceso kilmės, cerio gausa taip pat daugiausia gaunama s -proceso (77–85%, Tautvaišienė ir kt. (2021), 4 lentelė). Kaip teigiama Bisterzo ir kt. (2014) bei Travaglio ir kt. (2004), ^{140}Ce kilmė iš vidutinės masės žvaigždžių yra menka – atitinkamai 0,05% ir 1,49%, o visas s -proceso indėlis gaunamas iš mažos masės žvaigždžių. ^{142}Ce izotopo iš vidutinės masės žvaigždžių tik nežymiai didesnės – 0,07% ir 2,77%. Abiejų izotopų FRUITY išėigos (žr. 2 pav.) ties trimis skirtingais metalingumais taip pat didžiausios 2–3 M_{\odot} intervale. Kaip ir Ba bei La atveju, ties $Z = 0,003$ metalingumu labiau dominuoja 2–2,5 M_{\odot} žvaigždės, o ties $Z = 0,014$ – 2,5–3,0 M_{\odot} žvaigždės. Esant $Z = 0,003$ metalingumui, ^{140}Ce izotopas labiau gaminamas 2 M_{\odot} žvaigždžių, o ^{142}Ce – 2,5–3 M_{\odot} žvaigždžių. Skirtingai negu Y, Zr, La ir Ba atvejais, abu Ce izotopai labiausiai gaminami ties $Z = 0,003$ metalingumu. ^{140}Ce atveju gamyba esant $Z = 0,014$ metalingumui artima $Z = 0,003$ atvejui, o ties $Z = 0,001$ esant maksimumui net eile mažesnė. ^{142}Ce izotopo atveju, išėiga ties maksimumu esant $Z = 0,001$ metalingumui artima $Z = 0,003$ metalingumui, o ties didžiausiu $Z = 0,014$ metalingumu matoma eile mažesnė išėiga ties maksimumu. Už 2–3 M_{\odot} intervalo ribų išėigos abiem izotopams ir visiems metalingumams mažėja, išskyrus mažiausios išėigos ^{142}Ce izotopą, kai plačiame masių diapazone ji išlieka gana pastovi.

Visgi, tikslaus mechanizmo paaiškinančio antrojo s -proceso gūbrio elementus nėra. Pavyzdžiui, Maiorca ir kt. (2012) modelyje, norint paaiškinti dideles padrikųjų spiečių gausas ties jaunais amžiais ir, padidinus $M < 1,5M_{\odot}$ masės žvaigždžių neutronų indėlių, ties Saulės metalingumais šių žvaigždžių įtaka tampa daug didesnė nei masyvesnių žvaigždžių abiems s -proceso gūbriams. Prie žemesnių metalingumų $M < 1,5M_{\odot}$ įtaka taip pat ryškesnė, tačiau tik antrojo s -proceso gūbrio elementams.

Šių elementų kilmės scenarijų paiešką apsunkina didelis neapibrėžtumas modeliavimo parametruose. Pavyzdžiui, Prantzos ir kt. (2020) teigiama, jog metalingesnių žvaigždžių sukimosi greitis turi būti apribotas norint negauti šio gūbrio elementų perviršio. Šiame darbe taip pastebėta, jog paklaidų ribose keičiant modelių įvesties parametrus visiškai s -proceso metu gaunamų bario izotopų ^{134}Ba ir ^{136}Ba gausas galima sumažinti per atitinkamai 15% ir 12%. Kobayashi ir kt. (2020) darbe, nors ir patvirtinta jog AGB žvaigždės yra atsakingos už šio gūbrio elementų gausas, panaudota koreguota ^{13}C kišenė, nes kitu atveju gaunamos padidintos šio gūbrio elementų gausos.

1.2.3 Mišria s -/ r - procesų kilme pasižymintys elementai Nd ir Pr

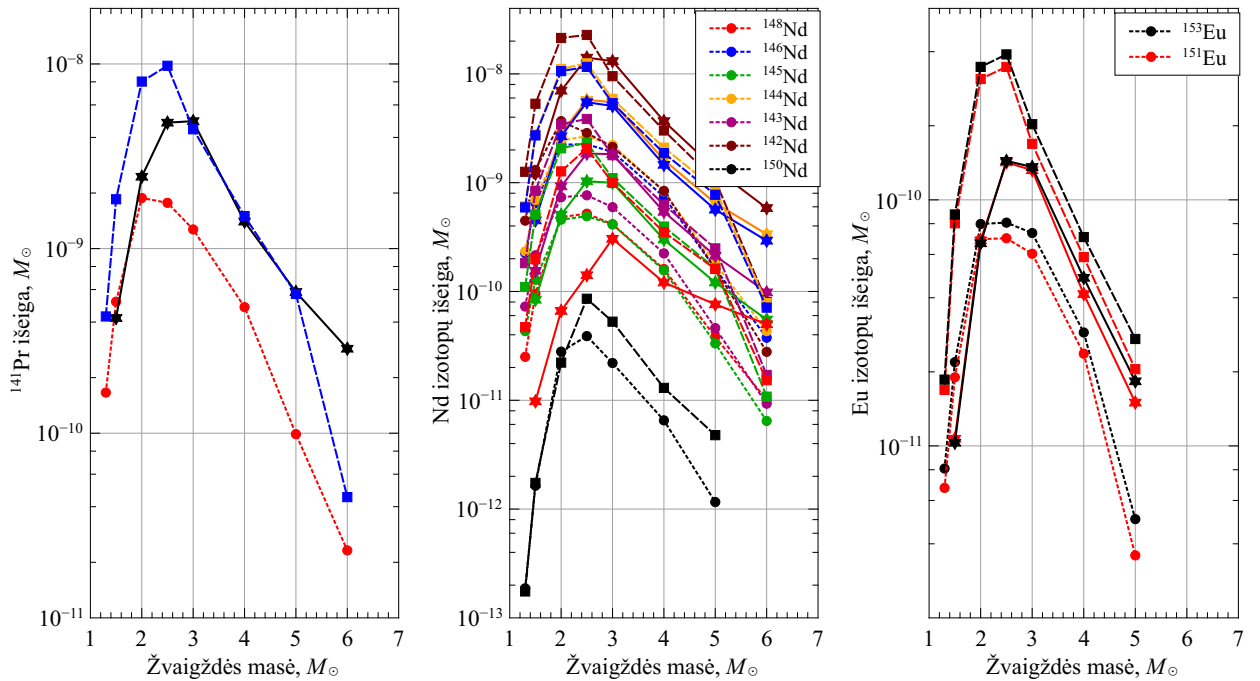
Nors tiek prazeodimis (Pr), tiek neodimis (Nd) taip pat priskiriami antrajam s -proceso gūbriui, šių elementų produkcijoje kiek didesnė r -proceso frakcija (Prantzos ir kt. (2020) ir nuorodos jame).

Prazeodimis turi tik vieną stabilų izotopą – ^{141}Pr , sudarantį visą Saulės prazeodimio gausą. Kaip ir kitų elementų izotopų, ^{141}Pr kilmės šaltiniai irgi nėra visiškai apibrėžti, tačiau laikoma, jog maždaug po pusę jo pagaminama s - bei r - komponentų, o rezultatai nežymiai kinta tarp darbų (Prantzos ir kt. (2020) ir šaltiniai jame). Visa šio izotopo kuriama Pr gausa 49–54% gaunama iš s -proceso (Tautvaišienė ir kt. (2021), 4 lentelė).

Prazeodimio izotopo ^{141}Pr gamyboje taip pat dominuoja mažos masės žvaigždės, o iš vidutinės masės žvaigždžių gaunamas nedidelis indėlis – 0,03% Bisterzo ir kt. (2014), 0,89% (Travaglio ir kt. 2004). Panaši tendencija matoma ir FRUITY išeigoje (žr. 3 pav.), kai išeigos maksimumas pasiekiamas ties 2–3 M_{\odot} . Tarp trijų metalingumų, didžiausia išeiga gaunama esant $Z = 0,003$ metalingumui ir maksimumui esant ties 2–2,5 M_{\odot} . Maždaug trečdaliu eilės žemesnis išeigos maksimumas gaunamas ties $Z = 0,014$ taip pat pasislinkęs į 2–2,5 M_{\odot} intervalą. Mažiausia išeiga gaunama ties $Z = 0,001$ metalingumu, jos maksimumui esant ties 2 M_{\odot} . Už 2–3 M_{\odot} intervalo ties visais metalingumais gaunamas gana staigus išeigų mažėjimas.

Neodimio gausos taip pat pagaminamos gana didele tiek r -, tiek s - procesų dalimi, tačiau pastarosios indėlis kiek didesnis – 56–62% (Tautvaišienė ir kt. (2021), 4 lentelė). Nd turi 5 stabilus izotopus ^{142}Nd (27% Nd gausos Saulėje), ^{143}Nd (12%), ^{145}Nd (8,8%), ^{146}Nd (17,1%), ^{148}Nd (5,7%) bei 2 itin ilgo gyvavimo ($>10^{12}$ metų) izotopus ^{144}Nd (23,7%) ir ^{150}Nd (5,6%) (Lodders 2019). ^{142}Nd izotopas yra maždaug 100% s -proceso kilmės, o ^{150}Nd – r -proceso kilmės, kai likusieji izotopai gaminami abiejų s -/ r - komponentų – ^{146}Nd izotopas pasižymi dominuojančia ($>60\%$) s -proceso, ^{143}Nd , ^{145}Nd , ^{148}Nd – r -proceso kilmėmis, o ^{144}Nd gaminamas abiejų procesų panašiu indėliu (Prantzos ir kt. (2020) ir šaltiniai jame).

Visų izotopų gamybos indėlis iš vidutinės masės žvaigždžių nežymus – $<1,19\%$ (Travaglio ir kt. 2004), 0,04% (Bisterzo ir kt. 2014). Ta pati tendencija matoma ir FRUITY modeliuose (žr. 3 pav), kai visų izotopų trijuose metalingumuose išeigos maksimumas yra 2–3 M_{\odot} intervale. Didžiausia r -



3 pav. Prazeodimio (kairėje), neodimio (centre) ir europio (dešinėje) izotopų išeigos priklausomybė nuo žvaigždžių masės. Žymėjimai analogiški 1 pav.

proceso frakcija gaminamo izotopo ^{150}Nd išeiga yra menka ir matoma tik $Z = 0,001$ ir, kiek didesnė, $Z = 0,003$ metalingumų atveju, o ties $Z = 0,014$ išeiga nematoma. Likusių 6 izotopų išeigos pasiskirsto pagal metalingumus – didžiausia kiekvieno izotopo išeiga gaunama ties $Z = 0,003$ metalingumu, kiek mažesnė ties didesniu $Z = 0,014$ metalingumu ir mažiausia ties mažiausiu $Z = 0,001$ metalingumu. $Z = 0,003$ metalingumų atveju išeigos maksimumas yra $2\text{--}2,5 M_{\odot}$ intervale, ties $Z = 0,014$ metalingumais – $2,5\text{--}3 M_{\odot}$ intervale, o ties mažiausiais $Z = 0,001$ maksimumas kinta $2\text{--}3 M_{\odot}$ intervale priklausomai nuo izotopo.

Šių elementų gamybos mechanizmai artimi kitiems antrojo s -proceso gūbrio elementams, tačiau yra ir skirtumų. Pavyzdžiui, skirtingai nei Ba, La ir Ce atveju, Kobayashi ir kt. (2020) darbe panaudojus standartinę ^{13}C kišenę, nėra gaunamas Pr ir Nd perviršis.

1.2.4 r - proceso dominuojamas Eu

Europis (Eu) sudarytas iš 2 izotopų – ilgo gyvavimo ^{151}Eu ($>10^{12}$ metų) bei stabilus ^{153}Eu , pirmajam sudarant maždaug 48%, o antrajam – maždaug 52% Saulės Eu gausos (Lodders 2019). Abiejų izotopų kilmėje dominuoja r -procesas ($\sim 95\%$) (Prantzos ir kt. (2020) ir šaltiniai jame).

Europio gamyba yra visiškai dominuojama r -proceso, todėl šis elementas gali būti naudojamas, pavyzdžiui, r -proceso evoliucijos tyrimams (Côté ir kt. 2019). Likusi s -proceso gaminama Eu gausos dalis ($2\text{--}6\%$) (Tautvaišienė ir kt. (2021) 4 lentelė) yra gaunama iš proceso pagrindinės komponentės, mažos masės žvaigždžių, beveik nesant ($<0,15\%$) vidutinės masės žvaigždžių indėlio (Travaglio ir kt. 2004; Bisterzo ir kt. 2014). FRUITY modeliai rodo panašius rezultatus, kai didžiausias indėlis abiem izotopams ties trimis metalingumais matomas iš mažos masės žvaigždžių $2\text{--}3 M_{\odot}$ intervale, o už šio intervalo išeiga greitai krenta. Didžiausia išeiga matoma ties $Z = 0,003$ metalingumais ir maksimumu ties $2\text{--}2,5 M_{\odot}$, o esant $Z = 0,014$ metalingumui išeiga maždaug pusę eilės mažesnė su maksimumu

ties $2-2,5 M_{\odot}$. Kiek dar mažesnė išėiga ties $Z = 0,001$ metalingumais, tačiau $2-3 M_{\odot}$ intervale gana stabili.

Kaip rašyta viršuje, r -proceso šaltiniai nėra tiksliai žinomi – galbūt kažkurio elemento produkcijoje dalyvavo vienas, o gal keli šaltiniai. Pavyzdžiui, Kobayashi ir kt. (2020) teigia, jog vien tik neutroninių žvaigždžių susijungimo neužtektų paaiškinti europio gausų ir yra reikalingas MRSNe indėlis. Kita vertus, Côté ir kt. (2018b) tyrimas, pasinaudodamas gravitacinių bangų dėka užfiksuoto neutroninių žvaigždžių susijungimo duomenimis, nustatė, jog šis procesas galėtų pagaminti pakankamai Eu kaip pagrindinis r -proceso šaltinis. Visgi NS-NS susijungimo scenarijus lemia ir daug neatitikimų įvairiuose metalingumų intervaluose, todėl iškelta įdėja, jog apie 50% Eu ankstyvuoju visatos laikotarpiu galėjo būti sukurta kito r -proceso šaltinio (Côté ir kt. 2019). Matteucci ir kt. (2014) darbe teigiama, jog NS-NS ar NS-BH susijungimai galėtų būti visiškai atsakingi už europio gausas, tačiau priklausomai nuo parametrų realistiškesniu europio kilmės šaltiniu darbas išskiria tiek susijungimų, tiek SNeII indėlių.

1.3 Plonasis ir storasis diskas

Laikoma, jog Paukščių Tako galaktika susideda iš kelių pagrindinių dalių – halo, centrinio telkinio (angl. Bulge) bei plonojo (angl. thin) ir storjo (angl. thick) diskų. Halas yra Galaktiką supanti, maždaug $1,3 \cdot 10^9 M_{\odot}$ struktūra, susidedanti iš itin nemetalingų senų žvaigždžių (Helmi 2020). Centrinis telkinys – Galaktikos centre esanti elipsės ar riešuto formos struktūra, sudaranti iki 8% disko masės ir susidedanti tiek iš senų ir metalingų, tiek iš kitas Galaktikos dalis primenančių žvaigždžių (Helmi 2020). Visgi, šiame darbe tiriamos žvaigždės priklauso plonajam ir storajam diskams, tad detalesnė apžvalga skirta būtent šioms Galaktikos substrukūroms.

1.3.1 Pagrindinės plonojo ir storjo diskų charakteristikos

Kaip aprašyta Nykytyuk ir Mishenina (2006), Gilmore ir Reid (1983) pagal žvaigždžių tankio pasiskirstymą statmenai Galaktikos diskui identifikavo dvi skirtingas Galaktikos diską sudarančias žvaigždžių populiacijas – platesniu žvaigždžių pasiskirstymu vertikaliaja kryptimi pasižymintį storąjį diską ir jame esantį plonąjį diską. Žvaigždžių amžiaus ribos plonajame ir storajame diskuose taip pat skirtingos. Kaip apžvelgta Park ir kt. (2021), nuo to laiko nagrinėta keletas pagrindinių storjo disko atsiradimo scenarijų, pavyzdžiui, egzistuojančio plonojo disko storėjimo dėl galima įvairių reiškinų sukuriančių kinematinį įkaitinimą (kinematic heating), radialinės migracijos ar žvaigždžių akrecijos iš satelitinių galaktikų.

Kaip apžvelgta Nykytyuk ir Mishenina (2006), plonojo disko žvaigždės paprastai yra ne senesnės negu 8–9 mlrd. m. su 4,9–6,1 mlrd. m. amžiaus vidurkiu. Storjo disko žvaigždės identifiukuotos kaip žymiai senesnės (>10 mlrd. m.) ir pasižyminčios 11,2–12,1 mlrd. m. amžiaus vidurkiu. Laikoma, kad abu diskai susiformavo skirtingu metu. Kilic ir kt. (2017) iš vietinių žvaigždžių imties plonojo disko amžių nustatė esant 6,8–7 mlrd. m., o iš baltųjų nykštukių rastas amžius siekė 7,4–8,2 mlrd. m. Naujas tyrimas (Xiang ir Rix 2022) teigia, jog storjo disko amžius yra net maždaug 13 mlrd. m, t. y. jis susiformavo vos 0,8 mlrd. m. po Didžiojo Sprogimo. Kaip teigia Chiappini (2009), storajame diske

žvaigždžių formavimasis jau nebevyksta, o plonajame jos vis dar formuojasi.

Plonasis ir storasis diskai pasižymi ir kinematiniais skirtumais. Vieira ir kt. (2022) iš Saulės aplinkos žvaigždžių nustatė, kad plonojo disko žvaigždžių greičių komponentės cilindrinėje koordinatinių sistemoje – radialinis greitis V_R , azimutinis greitis V_ϕ , vertikalus greitis V_Z – ir jų dispersijos atitinkamai yra $(-1, -239, 0)$ km/s ir $(31, 20, 11)$ km/s. Storojo disko žvaigždžių greičiai ir jų dispersijos atitinkamai yra $(+1, 225, 0)$ km/s ir $(49, 35, 22)$ km/s. Bensby ir kt. (2003) ir Soubiran ir kt. (2003) taip pat teigiama, kad storasis diskas pasižymi didesne greičių dispersija ir juda lėčiau vietinio rimties standarto (angl. local standard of rest, LSR) – greičio, kuriuo juda Saulės aplinkos žvaigždės aplink Galaktikos centrą – atžvilgiu.

Plonojo ir storojo diskų žvaigždžių cheminė sudėtis taip pat skiriasi. Kaip teigiama Nykytyuk ir Mishenina (2006) apžvelgtuose darbuose, plonojo disko $[Fe/H]$ vidurkis yra tarp $-0,17$ dex ir $-0,25$ dex, o storojo disko tarp $-0,5$ dex ir $-0,7$ dex. Nykytyuk ir Mishenina (2006) darbų apžvalga rodo, kad, lyginant su Saule, storojo disko žvaigždės pasižymi α elementų praturtinimu ne tik prie $-0,5$ dex metalingumų, bet prie gerokai aukštesnių. Kaip aptarta Li ir kt. (2018), plonojo ir storojo diskų metalingumo ir $[\alpha/Fe]$ kitimas skersai Galaktikos disko taip pat skiriasi. Plonajame diske tolsiant nuo Galaktikos centro metalingumas mažėja, o praturtinimas α gausomis išlieka pastovus, storojo disko atveju metalingumas išlieka pastovus, o praturtinimas α gausomis mažėja.

Amžiaus, kinematiniai ir įvairių cheminių elementų gausų skirtumai plonajame ir storajame diske lemia ir pagrindinius kriterijus, pagal kuriuos žvaigždės gali būti išskiriamos į šias Galaktikos dalis. Kaip aprašyta Tautvaišienė ir kt. (2022) pagrindiniai žvaigždžių atskyrimo būdai į plonąjį ir storąjį diskus yra kinematinis ir cheminis.

1.3.2 Plonojo ir storojo disko neutronų reakcijų pagavimo elementų gausos

Kaip aptarta praeituose skyreliuose, neutronų reakcijų pagavimo elementai gaminami s - bei r -procesų metu, kurių kilmės šaltiniai įvairūs ir tiksliai neapibrėžti. Šie elementai gaunami tiek iš mažiausios masės žvaigždžių ($<1M_\odot$), kurių gyvavimo trukmė gali siekti dešimtis milijardų metų, tiek iš itin masyvių žvaigždžių ($>8M_\odot$), kurių gyvenimo trukmė tik dešimčių ar vienetų milijonų metų eilės. Įvairūs cheminiai elementai randami žvaigždėje yra ne tik dabartinės žvaigždės, bet ir prieš tai egzistavusių žvaigždžių pasekmė. Prieš tai gyvavusios įvairios masės žvaigždės praturtino tarpžvaigždinę erdvę cheminiais elementais, kurie tapo dabar egzistuojančių žvaigždžių dalimi. Bendrai suskirstyti galima, kaip teigiama pavyzdžiui, Matteucci (2016), jog $<0,8M_\odot$ žvaigždės dėl ilgo gyvavimo dar nepraturtino tarpžvaigždinės terpės, $0,8-8M_\odot$ žvaigždės praturtina tarpžvaigždinę terpę įvairiais elementais, tarp jų ir s -proceso, o $>8M_\odot$ žvaigždės, baigdamos gyvenimą kaip CCSNe, sukuria α -, s -, r - bei kitus cheminius elementus. Kaip r -proceso šaltinį, NS-NS ar NS-BH susijungimus reikėtų nagrinėti atskirai.

Be kitų parametrų, lemiančių kaip vyksta Galaktikos cheminė evoliucija, svarbu išskirti ir žvaigždžių formavimosi greičio (angl. star formation rate, SFR) ir pradinės masių funkcijos (angl. initial mass function, IMF) parametrus. SFR apibrėžia, kiek per metus pagaminama žvaigždžių skaičiuojant Saulės masėmis, o IMF – kiek gimimo metu gimsta skirtingos masės žvaigždžių. Kaip teigiama Matteucci (2016), supaprastinus galima teigti, jog SFR yra laiko, o IMF – masės funkcija. Susiejus šias

funkcijas gaunama žvaigždžių gimimo greičio funkcija (angl. stellar birthrate function), rodanti kokių greičių gimsta konkrečios masės žvaigždės. Žinant įvairių žvaigždžių cheminių elementų išėigas, SFT, IMF bei kitus parametrus, kuriami Galaktikos cheminės evoliucijos modeliai.

Iš viršuje aptartų plonojo ir storio diskų skirtumų bei storio disko kilmės paieškos tyrimų, akivaizdu, jog šios Galaktikos struktūros dalys pasižymi skirtinga evoliucija. Pavyzdžiui, Bisterzo ir kt. (2014) modelyje naudotas SFR storajam diskui pasižymi greita evoliucija ir per <0,5 mlrd. m. pasiekia $[Fe/H] \sim -1,5$ bei greičiau nei per 2 mlrd. m. pasiekiamas $[Fe/H] \sim -1,0$. Plonojo disko evoliucija modelyje prasideda ties maždaug 1 mlrd. m. ir $[Fe/H] \sim -1,5$. Kobayashi ir kt. (2020) modelyje, teigiama, jog jeigu storio disko žvaigždės susiformavo greičiau negu Saulės aplinkoje, storajame diske mažos ir vidutinės masės AGB žvaigždės pradėjo turtinti aplinką ties aukštesniais metalingumais.

Literatūroje spektroskopinių plonojo ir storio disko žvaigždžių praturtinimo neutronų reakcijų pagavimo cheminiais elementais tyrimų rezultatai priklauso ir nuo žvaigždžių priskyrimo plonajam ar storajam diskui būdo (Battistini ir Bensby (2016); Spina ir kt. (2018); Tautvaišienė ir kt. (2021) bei kiti tyrimai). Battistini ir Bensby (2016) darbe žvaigždės atskirtos į plonąjį ir storąjį diskus pagal amžių – jaunesnės nei 8 mlrd. m. amžiaus žvaigždės laikytos plonojo, o senesnės – storio disko žvaigždėmis. Ties seniausiomis storio disko žvaigždėmis, matomas ryškus r -proceso dominuojamų cheminių elementų – Sm ir Eu – padidėjimas, kuris ties jaunesniais storio disko objektais mažėja. Kiti neutronų reakcijų cheminiai elementai rodo panašią ar kiek mažiau ryškią priklausomybę. Plonajame diske link jaunesnių amžių priklausomybė neryški arba didėjanti.

Spina ir kt. (2018) darbe tirtų Saulės dvynių tyrimas parodė ryškias s -proceso dominuojamų elementų didėjimo tendencijas plonajame diske link jauniausių objektų. Darbe tirtų r -proceso cheminių elementų gausos tokios ryškios priklausomybės plonajame diske nerodo. Darbe žvaigždžių atskyrimas į plonąjį ir storąjį diskus buvo atliktas panaudojant α -elementų gausas. Storio disko žvaigždės siaurame amžių diapazone ($\sim 8-9$ Gyr) pasižymėjo ryškiai didesnėmis r -proceso dominuojamų elementų gausomis negu panašaus amžiaus plonojo disko žvaigždės. Pirmojo ir antrojo s -proceso gūbrio elementų gausų storajame diske padidėjimas taip pat pastebėtas, tačiau mažiau ryškus.

Tautvaišienė ir kt. (2021) darbe žvaigždžių atskyrimas buvo atliktas pagal α -elemento magnio gausas. Priklausomybėse nuo $[Fe/H]$ matyti, jog elementų su didžiausia r -proceso frakcija – Pr, Sm ir Eu – santykis su geležimi $[El/Fe]$ plonajame diske didėja link mažesnių metalingumų. Kitų elementų priklausomybė plonajame diske ne tokia ryški. Storajame diske daugumos elementų gausos pasižymi plonojo disko tendencijomis, tačiau ryškesnis sumažėjimas matomas Ba gausose. Antrojo s -proceso gūbrio elementų $[El/Fe]$ priklausomybės nuo amžiaus plonajame diske neįžymios, pirmojo s -proceso gūbrio elementų – Sr ir Y – stipresnės, sąlygojančios didėjimą link jaunesnių objektų, o elementų su didesne r -proceso frakcija rodo mažėjimą link jaunesnių amžių. Darbe gautos storio disko priklausomybės nuo amžiaus neįžymios.

2 Stebėjimo programa ir darbe naudoti duomenys

2.1 TESS misija

Šiame darbe tirti objektai susiję su vykstančia TESS kosmine misija, tad svarbu ją trumpai aptarti.

TESS (angl. Transiting Exoplanet Survey Satellite) – tai 2018 metais paleistas kosminis teleskopas, kurio pagrindinis tikslas – ieškoti egzoplanetų tranzitų aplink ryškiausias viso dangaus žvaigždes (Ricker ir kt. 2014). TESS pagrindinės misijos metu – tarp 2018 ir 2020 metų – stebėjo 85% procentus viso dangaus ploto. TESS stebėjimams dangaus plotas suskirstytas į 26 stačiakampius sektorius, esančius 24° pločio ir 96° ilgio. Kuo arčiau ekliptikos polių – šiaurinio (RA = 18val 0min 0,0sek, DEC = $+66^\circ 33' 38,55''$) ar pietinio (RA = 6val 0min 0,0sek, DEC = $-66^\circ 33' 38,55''$) – tuo labiau šie sektoriai persikloja. Šis sektorių persiklojimas lemia, jog suformuojami dangaus ploteliai, kurie stebimi ilgesnius laiko tarpus. Nepersiklojantys sektoriai pagrindinės TESS misijos metu gavo 27 dienas stebėjimo laiko. Du persiklojantys sektoriai suformavo dangaus plotelius, gavusius 54 dienas stebėjimo laiko, trys – 81 dienas ir t.t. Daugiausia stebėjo laiko, 351 dieną, TESS teleskopu gavo aplink ekliptikos polių esantys regionai – šiuose ploteliuose persiklojo visi pietinio ar šiaurinio dangaus sektoriai. Šie suformuoti regionai, buvo apskritimo formos, kurio spindulys – 12° ir vadinami nuolatinio stebėjimo zonomis (angl. Continuous viewing zones). 2020 metais baigus pagrindinę stebėjimo programą, TESS misija buvo jau dukart pratęsta (TESS internetinis puslapis [Žr. 2023-04-24]).

2.2 Stebėjimo programa

Šiame darbe naudotų žvaigždžių spektrų stebėjimo programa vykdyta Vilniaus universiteto, Teorinės fizikos ir astronomijos instituto, Astrospektroskopijos ir egzoplanetų grupės mokslininkų, įgyvendinant Europos Sąjungos struktūrinių fondų projektą „Žvaigždžių ir egzoplanetų tyrimai kosminių misijų TESS ir JWST kontekste“. Objektai stebėjimams šiam projektui buvo parinkti taip, jog apimtų TESS kosminio teleskopo pagrindinės misijos metu daugiausiai stebėtas šiaurinio dangaus sritis – nuolatinio stebėjimo zoną ir sritį aplink ją. Ši pasirinkta stebėjimo zona yra 24° spindulio, t. y., dvigubai didesnio ploto už nuolatinio stebėjimo zoną. Minėto projekto tikslas – spektroskopiškai ištirti ryškiausias ($V < 8$ mag) bei F5 tipo ir vėsesnes pasirinktos stebėjimo zonos žvaigždes ir taip prisidėti prie žvaigždžių su potencialiomis egzoplanetomis charakterizavimo.

Pirmuoju projekto etapu vykdyti stebėjimai apėmė nuolatinę stebėjimo zoną. Šioje zonoje buvo rastos 302 žvaigždės, atitinkančios jau minėtus ryškumo ir temperatūros kriterijus. Iš šių 302 objektų, 277 žvaigždėms Astrospektroskopijos ir egzoplanetų grupė išpublikavo atmosferos parametrus ir 24 cheminių elementų gausas (Tautvaišienė ir kt. 2020). Kitame straipsnyje (Tautvaišienė ir kt. 2021) buvo nustatytos 10 neutronų pagavimo proceso metu gaunamų cheminių elementų – Sr, Y, Zr, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm ir Eu – gausos. Kaip nustatyta Tautvaišienė ir kt. (2020), likusios 25 žvaigždės buvo atmestos iš tolesnės analizės – jos buvo arba greitai besisukančios, arba dvigubų linijų dvinarės, arba pernelyg vėsios žvaigždės. Ši aptarta TESS nuolatinė stebėjimo zona taip pat šiek tiek perkloja ir dvi artėjančios PLATO misijos preliminaras maždaug 20° spindulio stebėjimo sritis (Rauer ir kt. 2014; Miglio ir kt. 2017). Šių dviejų sričių ryškioms ($V < 8$ mag) F, G, K tipo nykštukėms ir submilžinėms

Astrospektroskopijos ir egzoplanetų grupė yra išpublikavusi atmosferos parametrus ir gausas dideliame skaičiui cheminių elementų, įskaitant ir neutronų pagavimo reakcijų (Mikolaitis ir kt. 2018, 2019; Tautvaišienė ir kt. 2021). Kadangi stebint TESS lauką buvo pasirinktos tiek nykštukės, tiek milžinės, o PLATO laukus – tik nykštukės ir submilžinės, laukų persiklojimas lėmė tik 16 sutampančių žvaigždžių (Tautvaišienė ir kt. 2021).

Antrajame etape stebėtos jau minėtos ryškumo ir temperatūros kriterijus atitinkančios nykštukės ir milžinės, patenkančios į 24° spindulio lauką, tačiau esančios už 12° spindulio lauko – nuolatinės stebėjimo zonos – ribų (Tautvaišienė ir kt. 2022). Padidinus stebėjimo lauko spindulį nuo 12° iki 24° , išsiplėtė ir su minėtais PLATO laukais persidengiančios zonos. Dėl šios priežasties buvo svarbu atskirti žvaigždes su publikuotais atmosferos parametrais ir gausomis ir priklausančias minėtiems PLATO laukams ir TESS nuolatinei stebėjimo zonai nuo likusių. Į visą 24° lauką pateko 1183 žvaigždžių, įskaitant ir 302, patenkančias į nuolatinę stebėjimo zoną. Iš likusių 881 žvaigždžių buvo atmestos 74 žvaigždės, patenkančios į PLATO laukus, taip gaunant 807 žvaigždžių sąrašą. Astrospektroskopijos grupė identifikavo greitai besisukančias, o taip pat dvinares ir šaltas M klasės žvaigždes, kurios taip pat buvo atmestos iš tolimesnės spektroskopinės analizės, tad likęs tinkamas spektroskopinei analizei žvaigždžių sąrašas sudaro 740 žvaigždžių. Šioms žvaigždėms Tautvaišienė ir kt. (2022) darbe buvo publikuotos iki 24 cheminių elementų gausos, tačiau neutronų pagavimo reakcijų cheminių elementų gausos tirtos nebuvo.

2.3 Objektų stebėjimai

Patenkančių į minėtus TESS laukus žvaigždžių stebėjimai buvo atlikti 2019-2021 metais Astrospektroskopijos ir egzoplanetų grupės narių su Molėtų astronomijos observatorijos 1,65 m teleskope sumontuotu Vilniaus universiteto ešele spektrografu (VUES) (Jurgenson ir kt. 2014; Jurgenson ir kt. 2016). VUES stebimas bangos ilgis – 4000-8000 Å. Spektrografas pasižymi trimis skirtingomis skiriamosiomis gebomis – 30000, 45000 ir 60000, tačiau pasirinktiems objektams naudotos tik dvi skiriamosios gebos – 30000 ir 60000. Visos šiame darbe tirtos žvaigždės buvo stebėtos 30000 skiriamąja geba. Objektų ekspozicijos trukmės buvo tarp 900 ir 2400 sekundžių, o gautas signalo ir triukšmo santykis buvo tarp 75 ir 200, kuris įvertintas iš kelių spektro regionų turinčių sąlyginai mažai spektrinių linijų (Tautvaišienė ir kt. 2022).

2.4 Žvaigždžių atmosferos parametrai ir magnio gausos

Darbe panaudoti atmosferos parametrai buvo paimti iš Tautvaišienė ir kt. (2022). Šie duomenys yra reikalingi norint gauti neutronų pagavimo reakcijų cheminių elementų gausas ir tolimesnei gausų analizei, tad svarbu paminėti, koku būdu jie buvo nustatyti.

Norint nustatyti žvaigždžių atmosferos parametrus – efektingą temperatūrą T_{eff} , gravitacijos pagreitį $\log g$, metalingumą $[\text{Fe}/\text{H}]$ ir mikroturbulencijos greitį v_t – Tautvaišienė ir kt. (2022) darbe buvo panaudota programiniai paketai DAOSPEC ir MOOG. DAOSPEC programinis paketas (Stetson ir Pancino 2008) buvo pasitelktas išmatuoti neutralių (Fe I) ir jonizuotų (Fe II) geležies spektroskopinių linijų gausas. Matavimo metu skirtingose žvaigždėse programa automatiškai atmesdavo neišmatuojama-

mas linijas, tad galutinis išmatuotų linijų sąrašas skirdavosi nuo pradinio. MOOG programinis paketas (Snedden 1973) buvo panaudotas pritaikyti standartinį spektroskopinį atmosferos parametrų matavimo principą. Programa T_{eff} nustatė siekdama, kad Fe I linijų gausos nepriklausytų nuo tų linijų apatinio lygmens sužadavimo potencialo. $\log g$ nustatymui programa ieškojo jonizacijos pusiausvyros principo – siekė, jog Fe I ir Fe II linijų duodamos gausos sutaptų. v_t vertės buvo nustatytos siekiant, jog Fe I linijų duodamos gausos nepriklausytų nuo tų linijų ekvivalentinių plokčių. Galutinė metalingumo vertė buvo gauta priskiriant jai Fe I linijų duodamą gausą, programai atlikus iteracijas keičiant visus atmosferos parametrus.

3 Darbe naudota metodika

3.1 Kinematinių parametru nustatymas

Šiame darbe kinematiniai parametrai nustatyti visoms žvaigždėms patenkančioms į išplėstinį TE-SS lauką. Šių parametru nustatymui pasinaudota „Python“ programavimo kalba parašyta galaktikos dinamikos programa „galpy“ (Bovy 2015). Programos skaičiavimams reikalingi įvesties duomenys – žvaigždžių koordinatės, paralaksai, savieji judėjimai ir jų paklaidos – buvo paimti iš Gaia DR3 katalogo (Gaia Collaboration ir kt. 2021), o fotogeometriniai atstumai ir jų paklaidos iš Bailer-Jones ir kt. (2021).

Programos skaičiavimams taip pat reikalingi Saulės atstumas nuo Galaktikos centro ir Saulės judėjimo greitis aplink Galaktikos centrą. Atstumas nuo Galaktikos centro nėra tiksliai nustatytas dydis ir skiriasi tarp darbų – naujausi tyrimai pateikia $8,27 \pm 0,29$ kpc (Schönrich 2012), 7,971 kpc bei 7,959 kpc (Do ir kt. 2019), 8,178 kpc (Gravity Collaboration ir kt. 2019), $8,23 \pm 0,12$ kpc (Leung ir kt. 2022). Visgi, šiame darbe tirtos žvaigždės yra lyginamos su žvaigždėmis tirtomis Mikolaitis ir kt. (2019), Tautvaišienė ir kt. (2020) bei Tautvaišienė ir kt. (2021), kur kinematinių parametru skaičiavimams buvo panaudotas 8 kpc Saulės Galaktocentrinis atstumas. Taip pat, „galpy“ pakete Paukščių Tako gravitacijos potencialas („MWPotential2014“) buvo suskaičiuotas su 8 kpc (Bovy 2015). Dėl šių priežasčių kinematiniai parametrai buvo suskaičiuoti su 8 kpc. Kaip ir minėtuose darbuose, šiame darbe naudotas ir 0,2 kpc Saulės pakilimas virš Galaktikos plokštumos (Joshi 2007).

Saulės judėjimo greitis aplink Galaktikos centrą literatūroje taip pat pateikiamas įvairus – nuo 218 ± 6 km/s (Bovy ir kt. 2012) ir 221 ± 18 km/s (Koposov ir kt. 2010) iki 238 ± 9 km/s (Schönrich 2012), 240 km/s (Reid ir Dame 2016) ir dar aukštesnių (žr. Bovy ir kt. 2012). Kadangi minėtas „galpy“ potencialas taip pat skaičiuotas su 220 km/s (Bovy 2015), o šis dydis taip pat naudotas ir minėtuose Mikolaitis ir kt. (2019), Tautvaišienė ir kt. (2020) ir Tautvaišienė ir kt. (2021) darbuose, kinematinių parametru skaičiavime taip pat panaudota 220 km/s vertė. Minėtuose darbuose naudoti LSR Saulės greičiai $(U, V, W) = (11, 1, 12, 24, 7, 25)$ km/s naudoti ir šiame darbe skaičiuojant žvaigždžių U, V, W greičius (Schönrich ir kt. 2010).

„galpy“ programa iš failo imdama minėtus įvesties parametrus suskaičiuoja apogalakčius R_{apo} , perigalakčius R_{peri} , ekscentricitetus e , maksimalius pakilimus virš Galaktikos plokštumos Z_{max} ir erdvines žvaigždžių greičių komponentes U, V, W . Žvaigždžių vidutinis atstumas nuo Galaktikos centro R_{mean} buvo gautas suvidurkinant R_{apo} ir R_{peri} .

Norint gauti patikimesnius kinematinis parametrus, „Python“ kalba buvo parašyta programa, kuri „galpy“ paketą paleisdavo 1000 kartų kiekvienai žvaigždei, kiekvieną įvesties parametru keisdama pagal Gauso skirstinį to parametro įvesties paklaidą laikant paklaida reikalinga Gauso skirstiniui. Iš gautų 1000 matavimų, atmesti tie, kurie būdavo nukrypę nuo vidurkio per 3 standartinius nuokrypius, o likusieji rezultatai suvidurkinti.

3.2 Amžių nustatymas

Amžių nustatymai visoms išplėstinio lauko žvaigždėms buvo gauti pasinaudojant programa UniDAM (Mints ir Hekker 2017). Ši programa naudoja Bajeso metodą ir PARSEC isochronas ir nustato žvaigždžių amžius, mases ir atstumus nuo Saulės.

Programai skaičiavimams atlikti reikalingi žvaigždžių atmosferos parametrai panaudoti iš Tautvaišienė ir kt. (2022), kurių nustatymas detaliam aprašytas 2.4 skyrelyje. Kiti programai reikalingi įvesties parametrai – fotometrinių ryškiai – surinkti šio darbo metu. Fotometrinių J , H ir K ryškiai ir jų paklaidos buvo paimti iš 2MASS katalogo (Skrutskie ir kt. 2006), o $W1$ ir $W2$ ryškiai ir jų paklaidos – iš AllWISE katalogo (Cutri ir kt. 2021).

Norint palikti tik patikimiausius darbe gautų žvaigždžių amžių rezultatus, buvo atmesti matavimai su trimis žemiausiais kokybės įverčiais („Quality flag“) ir su „uspdf_priority“ įverčiais nelygiais nuliui (Žr. Mints ir Hekker 2017). Atlikus šiuos veiksmus, patikimi amžiai buvo nustatyti 626 žvaigždėms.

3.3 Gausų analizė

Darbe išmatuotų 8 neutronų reakcijų cheminių elementų – itrio, cirkonio, bario, lantano, cerio, prazeodimio, neodimio ir europio – matavimai atlikti sintetinių spektrų metodu pasinaudojant programiniu paketu TURBOSPECTRUM (Plez 2012). Šiame darbe kiekviena tirta linija buvo įvertinta individualiai, vizualiai įvertinant jos gausas iš palyginimo su sintetiniais spektrais.

Sintetinių spektrų metodas yra ypač tinkamas matuoti mažesnę linijų skaičių spektre turintiems elementams, kas ir yra būdinga neutronų pagavimo reakcijų cheminiams elementams. Skirtingai negu ekvivalentinių pločių metodas, sintetinių spektrų metodas leidžia tiksliai išmatuoti silpnas, tarpusavyje susiliejusias (blenduotas) linijas, o taip pat matavimams įsivesti vadinamąją hipersmulkiąją struktūrą – spektrinės linijos išsiskyrimą į keletą komponentų, atsirandantį dėl atomo branduolio sukimosi aplink savo ašį ir lemiantį spektrinės linijos išplatėjimą.

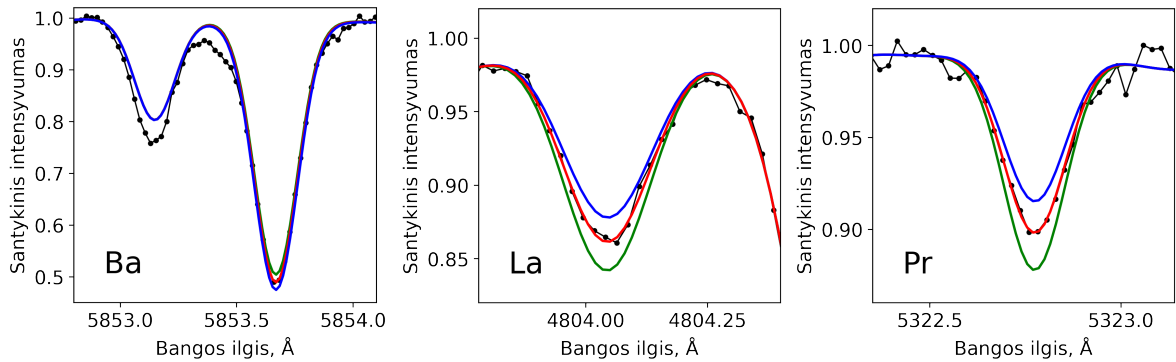
Visų elementų gausos buvo nustatytos diferencialiai atskaitingos žvaigždės – Saulės – atžvilgiu. Absoliutinės Saulės gausos buvo paimtos iš Grevesse ir kt. (2007). Naudotas atominių linijų sąrašas iš Heiter ir kt. (2015). Naudotų molekulinė linijų sąrašų šaltiniai pateikti Tautvaišienė ir kt. (2022). Gausų suskaičiavimui buvo pasinaudota vienmačiais, hidrostatiniais, pastovaus srauto, lokalsios termodinaminės pusiausvyros (angl. LTE) modeliais MARCS (Gustafsson ir kt. 2008).

1 lentelė. Darbe naudoti VUES gauto Saulės spektro atmosferos parametrai

T_{eff} (K)	$\log g$	[Fe/H] (dex)	v_t (km/s)
5716 ± 26	$4,37 \pm 0,13$	$-0,04 \pm 0,05$	$0,81 \pm 0,15$

Darbe naudota linijų duomenų bazė, kurioje matuotų linijų osciliatorių stipriai $\log gf$ Astrospektroskopijos ir egzoplanetų grupės narių buvo sukalibruoti Kurucz Saulės spektre. Šiame darbe dėl didesnio tikslumo diferencialinei analizei taip pat buvo įvertintos ir Molėtų astronomijos observatorijoje VUES spektrografu stebėto Saulės spektro tirtų linijų gausos. Visos linijos buvo išmatuotos Saulės spektre, gautame tuo pačiu spektrografu ir rezoliucija, kuria stebėtos ir tirtos žvaigždės. Naudoti Saulės

parametrai (1 lentelė.) gauti Astrospektroskopijos ir egzoplanetų grupės narių 2.4 skyrelyje aprašyta metodika. Kelių linijų matavimų pavyzdžiai pateikti 4 pav.



4 pav. Darbe tirtų linijų matavimų sintetinių spektrų metodu pavyzdžiai – Ba II linija 5853,68 Å kairėje, La II linija 4804,04 Å centre, Pr II linija 5322,77 Å dešinėje. Juoda kreivė žymi tikrąjį žvaigždės spektrą, raudona – išmatuotą vertę, žalia ir mėlyna – atitinkamai $\pm 0,1$ dex nuo išmatuotos vertės.

Darbe itrio gausos nustatymui buvo panaudotos 3 itrio Y II linijos, 2 cirkonio Zr I linijos, 2 bario Ba II linijos, 2 lantano La II linijos, 3 cerio Ce II linijos, 2 praeodimio Pr II linijos, 2 neodimio Nd II linijos ir 1 europio Eu II linija. Naudotų linijų sąrašas ir jų gausos VUES spektrografu gautame Saulės spektre pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Darbe naudotų linijų sąrašas ir jų absoliutinės gausos VUES gautame Saulės spektre

Y II (Å)	A_Y	Zr I (Å)	A_{Zr}	Ba II (Å)	A_{Ba}	La II (Å)	A_{La}
4883,69	2,26	6127,47	2,68	5853,68	2,17	4748,73	1,07
5087,43	2,26	6134,57	2,78	6496,90	2,17	4804,04	1,22
5200,42	2,26						
Ce II (Å)	A_{Ce}	Pr II (Å)	A_{Pr}	Nd II (Å)	A_{Nd}	Eu II (Å)	A_{Eu}
4523,08	1,74	5259,74	0,6	5092,81	1,46	6645,11	0,57
4572,28	1,67	5322,77	0,63	5740,86	1,55		
5330,56	1,74						

3.4 Paklaidų įvertinimas ir jautrumas atmosferos parametrams

Darbe paklaidų įvertinimas susidėjo iš dviejų pagrindinių šaltinių – paklaidų atsirandančių dėl pačios linijos įvertinimo, bei paklaidų, atsirandančių dėl atmosferos parametru paklaidų.

Pačios linijos tikslumo įvertinimas būdavo atliekamas matavimo metu, priskiriant paklaidas 0,05 dex, 0,1 dex, 0,15 dex ar 0,2 dex, įvertinus pačios linijos ir ištisinės spektro dalies kokybę.

Stengiantis kiek įmanoma labiau atsižvelgti į gana skirtingas turimas žvaigždės imtyje, atmosferos paklaidų įvertinimas atliktas suskirčius žvaigždės į tris grupes pagal temperatūras – turinčias mažesnes už 4400 K, patenkančias į 4400 K – 5500 K intervalą ir pasižyminčiomis didesnėmis už 5500 K. Atsižvelgus į HR diagramą (6 pav.), galime matyti, jog žvaigždės su didesne temperatūra vidutiniškai pasižymėjo ir didesne log g verte. Iš kiekvieno šio intervalo parinkta žvaigždė artimai

atitinkanti jo vidurkį ir jai nustatyta, kaip kiekviena linija reaguoja į atmosferos parametrų pokyčius – T_{eff} per ± 100 K, $\log g$ per $\pm 0,3$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ per $\pm 0,1$ dex ir v_t per $\pm 0,3$ km/s.

Gautos kiekvienos linijos paklaidos (3 lentelė) atitinkamame regione ($T_{\text{eff}} < 4400$ K, $4400 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 5500$ K ar $T_{\text{eff}} > 5500$ K) buvo padaugintos iš to regiono žvaigždžių linijų kiekvieno parametro paklaidų, taip įvertinant visų linijų tikslumą priklausomai nuo žvaigždės atmosferos parametrų tikslumo. Pavyzdžiui, itrio linijai $4883,69 \text{ \AA}$, kurios gausos paklaida temperatūros intervale mažesniame už 4400 K pakeitus temperatūrą per 100 K yra $0,05$ dex, šią paklaidą pritaikius žvaigždei, kurios temperatūros paklaida yra 40 K, gaunama $0,02$ dex gausos paklaida. Pabaigoje, paklaidos gautos dėl atmosferos paklaidų ir iš rankinio matavimo susietos tarpusavyje, gaunant bendrą kiekvienos linijos paklaidą. Elementų, kuriems matuota ne viena linija tikslumas didesnis, nes naudota vidutinė kvadratinė paklaida. 3 lentelėje pateikiamose paklaidose ryškesnis nesutapimas tarp kai kurių to paties linijų tam pačiam temperatūrų intervalui galimas dėl to, kad matuojant modelio pasikeitimą pakeitus bet kurį atmosferos parametą, kinta ir gretimos sintetinį spektrą formuojančios linijos. Prie skirtingų atmosferos parametrų, greta pagrindinės matuojamos linijos esančios linijos gali reaguoti silpniau ar stipriau, taip veikdamos matuojamos linijos įvertį. Pačios linijos paklaidos įvertinimui daug įtakos turi ištisinio spektro vietos parinkimas, tačiau aplink šias linijas esantys spektro regionai yra smarkiai paveikti kitų linijų, todėl teisingas ištisinio spektro parinkimas nėra paprastas ir taip pat sukelia paklaidas.

3.5 Gausų analizei ir atvaizdavimui naudotos programos

Darbo rezultatų analizei, duomenų paruošimui bei grafikų brėžimui buvo naudotasi „Python“ programavimo kalba ir jos bibliotekomis „Matplotlib“, „NumPy“, „Pandas“, „SciPy“. Norint grafikuose gauti tiesines aproksimacijas bei pasikliautinumo intervalus (angl. confidence intervals) buvo pasinaudota MIT licenzijuotu programiniu paketu „emcee“ (Foreman-Mackey ir kt. 2013), naudojančiu Markovo grandinės Monte Karlo metodą (angl. Markov chain Monte Carlo, MCMC). Kiekvienam grafikui 4 vaikščiotojai (angl. walkers) surasdavo po 3000 tiesės koeficientų k ir b verčių. Atmetus pirmas 300 kiekvieno vaikščiotjojo verčių, reikalingų vertėms nusistovėti (angl. burn-in steps), iš likusių po 2700 verčių iš kiekvieno vaikščiotjojo būdavo sukuriami 95% atitinkantys pasikliautinumo intervalai.

3 lentelė. Matuotų linijų (\AA) gausų pokyčiai (dex) dėl atmosferos parametrų pokyčių trijuose skirtinguose temperatūros intervaluose.

$T_{\text{eff}} < 4400 \text{ K}$									
Δ	Y II			Zr I		Ba II		La II	
	4883	5087	5200	6127	6134	5853	6496	4748	4804
$T_{\text{eff}} = \pm 100$	$\pm 0,05$	$\mp 0,13$	$\pm 0,13$	$\pm 0,14$	$\pm 0,12$	$\pm 0,01$	$\mp 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$
$\log g = \pm 0,3$	$\pm 0,13$	$\pm 0,24$	$\pm 0,06$	$\pm 0,06$	$\pm 0,05$	$\pm 0,11$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,13$
$[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0,1$	$\mp 0,01$	$\pm 0,05$	$\mp 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$	$\pm 0,04$	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$
$\nu_t = \pm 0,3$	$\mp 0,13$	$\mp 0,16$	$\mp 0,04$	$\mp 0,15$	$\mp 0,12$	$\mp 0,3$	$\mp 0,35$	$\mp 0,01$	$\mp 0,01$
Δ	Ce II			Pr II		Nd II		Eu II	
	4523	5330	4572	5259	5322	5092	5740	6645	
$T_{\text{eff}} = \pm 100$	$\pm 0,08$	$\mp 0,03$	$\pm 0,06$	$\mp 0,03$	$\pm 0,04$	$\pm 0,08$	$\pm 0,02$	$\mp 0,02$	
$\log g = \pm 0,3$	$\pm 0,26$	$\pm 0,13$	$\pm 0,13$	$\pm 0,11$	$\pm 0,12$	$\pm 0,1$	$\pm 0,14$	$\mp 0,24$	
$[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0,1$	$\mp 0,04$	$\pm 0,05$	$\mp 0,05$	$\pm 0,09$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	
$\nu_t = \pm 0,3$	$\mp 0,03$	$\mp 0,01$	$\mp 0,03$	$\pm 0,01$	$\mp 0,01$	$\mp 0,03$	$\pm 0,01$	$\mp 0,01$	
$4400 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 5500 \text{ K}$									
Δ	Y II			Zr I		Ba II		La II	
	4883	5087	5200	6127	6134	5853	6496	4748	4804
$T_{\text{eff}} = \pm 100$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	$\pm 0,06$	$\pm 0,18$	$\pm 0,18$	$\pm 0,03$	$\pm 0,06$	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$
$\log g = \pm 0,3$	$\pm 0,12$	$\pm 0,16$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,12$	$\pm 0,14$
$[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,04$	$\pm 0,03$	$\pm 0,05$
$\nu_t = \pm 0,3$	$\mp 0,21$	$\mp 0,17$	$\mp 0,13$	$\mp 0,03$	$\mp 0,02$	$\mp 0,28$	$\mp 0,33$	$\mp 0,02$	$\mp 0,01$
Δ	Ce II			Pr II		Nd II		Eu II	
	4523	5330	4572	5259	5322	5092	5740	6645	
$T_{\text{eff}} = \pm 100$	$\pm 0,04$	$\pm 0,01$	$\pm 0,05$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,04$	$\pm 0,03$	$\mp 0,02$	
$\log g = \pm 0,3$	$\pm 0,21$	$\pm 0,13$	$\pm 0,13$	$\pm 0,11$	$\pm 0,12$	$\pm 0,12$	$\pm 0,15$	$\pm 0,12$	
$[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0,1$	$\mp 0,02$	$\pm 0,03$	$\mp 0,03$	$\pm 0,06$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	$\pm 0,04$	$\pm 0,01$	
$\nu_t = \pm 0,3$	$\mp 0,05$	$\mp 0,01$	$\mp 0,06$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\mp 0,02$	$\mp 0,01$	$\mp 0,01$	
$T_{\text{eff}} > 5500 \text{ K}$									
Δ	Y II			Zr I		Ba II		La II	
	4883	5087	5200	6127	6134	5853	6496	4748	4804
$T_{\text{eff}} = \pm 100$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$	$\pm 0,13$	$\pm 0,12$	$\pm 0,03$	$\pm 0,04$	$\pm 0,01$	$\pm 0,07$
$\log g = \pm 0,3$	$\pm 0,12$	$\pm 0,12$	$\pm 0,11$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,11$	$\pm 0,07$	$\pm 0,13$	$\pm 0,12$
$[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0,1$	$\pm 0,03$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	$\mp 0,06$	$\mp 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	$\pm 0,05$
$\nu_t = \pm 0,3$	$\mp 0,12$	$\mp 0,1$	$\mp 0,06$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\mp 0,17$	$\mp 0,22$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$
Δ	Ce II			Pr II		Nd II		Eu II	
	4523	5330	4572	5259	5322	5092	5740	6645	
$T_{\text{eff}} = \pm 100$	$\pm 0,04$	$\pm 0,01$	$\pm 0,05$	$\mp 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,04$	$\pm 0,04$	$\pm 0,01$	
$\log g = \pm 0,3$	$\pm 0,19$	$\pm 0,14$	$\pm 0,12$	$\pm 0,12$	$\pm 0,12$	$\pm 0,13$	$\pm 0,12$	$\mp 0,11$	
$[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0,1$	$\mp 0,01$	$\pm 0,03$	$\mp 0,03$	$\pm 0,09$	$\pm 0,03$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	
$\nu_t = \pm 0,3$	$\pm 0,01$	$\mp 0,01$	$\mp 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	

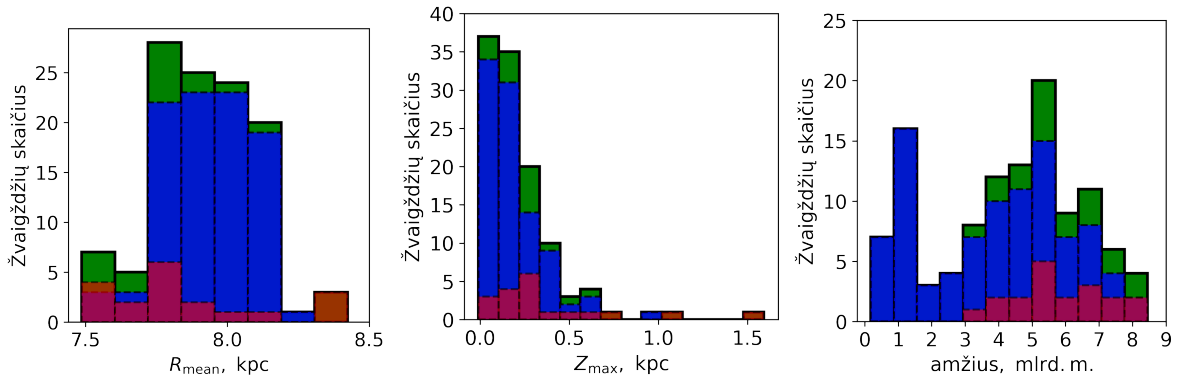
4 Rezultatai

4.1 Pagrindiniai chemiškai tirtų žvaigždžių parametrai

Kaip minėta įvade, įvairios Galaktikos vietos galėjo pasižymėti skirtinga evoliucija (Casali ir kt. 2020; Viscasillas Vázquez ir kt. 2022). Į tai atsižvelgus ir bandant kiek labiau apriboti dėl erdvinio Galaktikos išsidėstymo atsirandančius efektus, iš 626 žvaigždžių su nustatytais amžiais 3.2 skyrelyje aprašyta metodika, buvo atrinktos žvaigždės patenkančios į 7,5–8,5 kpc R_{mean} intervalą. Žvaigždžių R_{mean} nustatymas atliktas pagal 3.1 skyrelyje aprašytą metodiką laikant Saulės galaktocentrinį atstumą $R_{\text{gc}} = 8$ kpc.

Iš šio intervalo buvo atmestos žvaigždės su $\log g < 1,5$. Žvaigždžių su žemais $\log g$ atsargus vertinimas akcentuotas ir Magrini ir kt. (2023) darbe. Įvertinta, jog jaunų, su mažomis $\log g$ vertėmis milžinių atveju galimas mikroturbulencijos greičio v_t pervertinimas dėl didesnio magnetinio aktyvumo. Kaip įvertinta 3.4 skyrelyje, bario gausų įvertinimas ypač jautrus v_t pokyčiams.

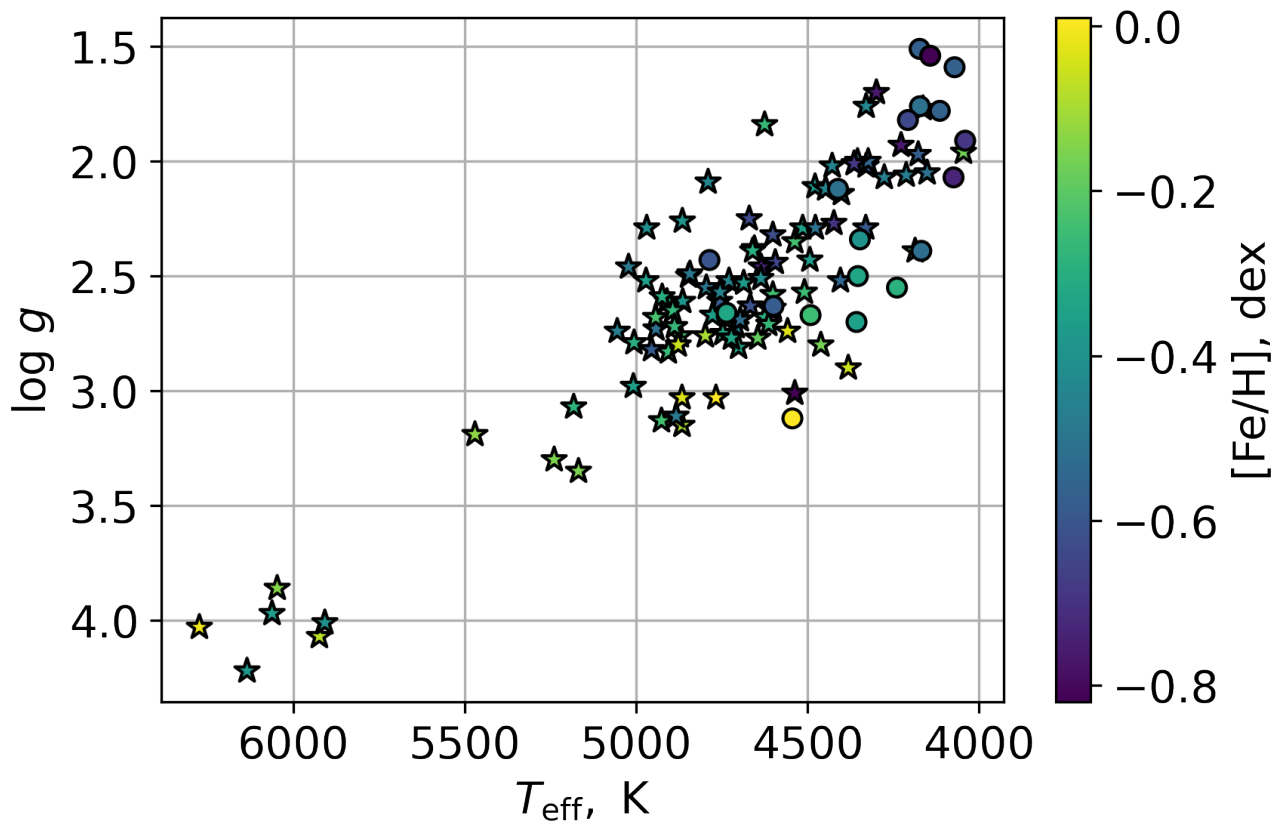
Nors visos tirtos žvaigždės patenka į 7,5–8,5 kpc, stengiantis kiek susiaurinti tiriamą aplinką, 94 žvaigždės parinktos patenkančios į dar siauresnį 7,8–8,2 kpc R_{mean} regioną (5 pav.). Nors spektroskopiškai tirtų žvaigždžių buvo kiek daugiau, tačiau tolimesniuose grafikuose bus pateikiamos tik tos, kurioms buvo gauta bent vieno cheminio elemento gausa.



5 pav. Darbe tirtų žvaigždžių pasiskirstymas pagal darbe nustatytus R_{mean} (kairėje), Z_{max} (centre) ir amžių (dešinėje). Žaliai pažymėtos visos – plonojo ir storjo diskų – darbe spektroskopiškai ištirtos žvaigždės su nustatyta bent vieno cheminio elemento gausa. Mėlynais stulpeliais žymimos plonojo, o violetiniais – storjo disko žvaigždės. Kiekvieno amžiaus stulpelio plonojo ir storjo diskų žvaigždžių stulpelių suma yra žalias stulpelis. Rusvi stulpeliai lemia, jog visos to amžiaus žvaigždės yra storjo disko.

Iš viso bent vieno elemento gausa buvo nustatyta 113 žvaigždžių, iš kurių 94 priklauso plonajam, o 19 – storajam Galaktikos diskui pagal išskirstymą atliką Tautvaišienė ir kt. (2022) (detaliau 4.2 skyrelyje). 6 pav. pateikta žvaigždžių Hercšprungo-Raselo (HR) diagrama, kurioje matoma jog dauguma plonojo disko žvaigždžių yra milžinės ir tik kelios nykštukės, o visos storjo disko žvaigždės yra milžinės. Kaip matoma 5 pav., tirtos storjo disko žvaigždės yra išsidėsčiusios kiek platesniame R_{mean} diapazone – šių žvaigždžių yra ties didžiausiu $R_{\text{mean}} > 8,4$ kpc ruožu, taip pat daugiau ties mažiausiu $R_{\text{mean}} < 7,6$ kpc ruožu. Plonojo disko žvaigždžių su $R_{\text{mean}} > 8,4$ kpc nėra. Dauguma tirtų žvaigždžių nepakyla aukštai virš Galaktikos plokštumos (5 pav.). 5 pav. taip pat matoma, jog plonojo disko žvaigždžių yra visuose amžiuose, tačiau daugiausia 1–2 mlrd. m. ir 5–6 mlrd. m. amžių ribose.

Jauniausia tirta plonojo disko žvaigždė – 0,18 mlrd. m., seniausia – 8,45 mlrd. m. Jauniausia tirta storjo disko žvaigždė 2,97 mlrd. m., o seniausia – 8,12 mlrd. m. Tarp šių amžiaus ribų tirtos storjo disko žvaigždės pasižymi gana tolygiu pasiskirstymu pagal amžius.



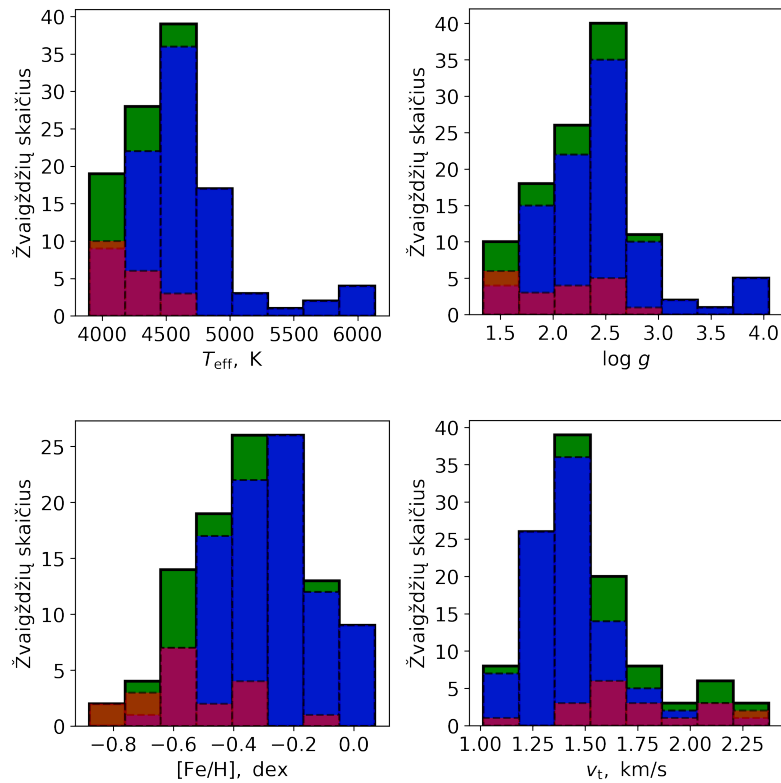
6 pav. Tirtų žvaigždžių Hercsprungo-Raselo (HR) diagrama su žvaigždžių spalvine koduote pagal jų metalingumus $[Fe/H]$. Žvaigždžių simboliais žymimos plonojo disko, o skrituliais – storjo disko žvaigždės.

7 pav. parodyta tirtų žvaigždžių pasiskirstymą pagal atmosferos parametrus nustatytus Tautvaišienė ir kt. (2021). Dauguma tirtų plonojo disko žvaigždžių pasižymi $T_{\text{eff}} < 5000$ K bei $\log g < 3,0$, tačiau yra ir pasižyminčiomis aukštesne temperatūra bei $\log g$. Didžiausia storjo disko žvaigždės $T_{\text{eff}} = 4786$ K, o aukščiausias $\log g = 3,12$. Iš tirtų plonojo disko žvaigždžių mažiausia ir didžiausia $[Fe/H]$ vertės yra atitinkamai $-0,63$ dex ir $0,13$ dex, o iš storjo – atitinkamai $-0,82$ dex ir $0,01$ dex. Dauguma plonojo disko žvaigždžių patenka į kiek žemesnio nei Saulės metalingumo (nuo $-0,5$ iki $0,0$ dex) intervalą, storjo – į nuo $-0,6$ iki $-0,3$ dex intervalą. Dauguma tirtų plonojo disko žvaigždžių pasižymi vidutiniškai kiek žemesne v_t verte už storjo disko žvaigždes.

4.2 Žvaigždžių priskyrimas Galaktikos struktūroms

Šiame darbe darbe išskyrimas į plonąjį ir storąjį diskus panaudotas iš Tautvaišienė ir kt. (2022), kuriame plonojo ir storjo disko žvaigždės buvo atskirtos pagal α - elementų gausas pasinaudojant metodika iš Lagarde ir kt. (2021).

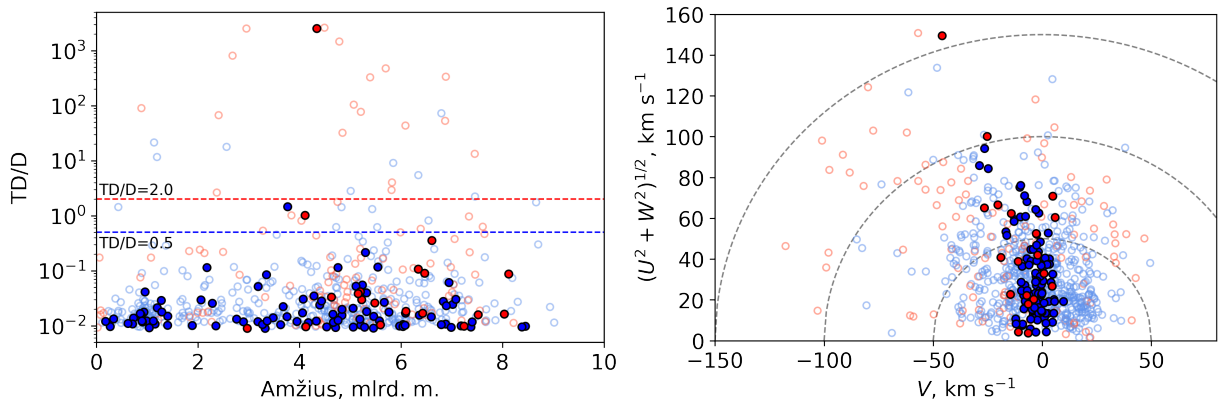
Kadangi šiame darbe buvo suskaičiuoti kinematiniai parametrai, palyginimui buvo įvertintos ir kinematinės žvaigždžių priklausomybės plonajam ar storajam diskui. Iš šiame darbe suskaičiuotų



7 pav. Darbe tirtų žvaigždžių pasiskirstymas pagal atmosferos parametrus iš Tautvaišienė ir kt. (2022). Žymėjimai analogiški 5 pav.

erdvinių žvaigždžių greičių komponentių U , V , W pagal metodiką iš Bensby ir kt. (2003) jos buvo panaudotos suskaičiuoti santykinės tikimybes TD/D žvaigždėms priklausyti plonajam ar storajam diskui. TD/D apibrėžiamas kaip žvaigždės tikimybių priklausyti plonajam (D) ir storajam (TD) diskams santykis padaugintas iš Saulės aplinkos žvaigždžių frakcijų, nusakančių kiek žvaigždžių priklauso plonajam (X_D) ar storajam (X_{TD}) diskui, santykio. Bensby ir kt. (2003) darbe naudoti $X_D = 0,94$ ir $X_{TD} = 0,06$, tačiau literatūroje yra randamos X_{TD} vertės nuo 2% iki ~15% (žr. Bensby ir kt. (2005) A priedą). Kaip ir Bensby ir kt. (2005), šiame darbe naudotos $X_D = 0,9$ ir $X_{TD} = 0,10$ vertės.

TD/D vertės, nusakančios ar žvaigždė priklauso plonajam ar storajam diskui pateikiamos įvairios. Bensby ir kt. (2003) teigiama, jog jų siūlomos vertės TD/D > 10 storajam diskui ir TD/D < 0,1 plonajam diskui yra orientacinės. Tame pačiame darbe storjo disko žvaigždžių riba naudota kiek žemesnė – TD/D > 1. 8 pav. pateikta tirtų žvaigždžių TD/D verčių priklausomybė nuo amžiaus ir pažymėtos orientacinės plonojo ir storjo diskų priklausomybių ribos iš Bensby ir kt. (2014), kuriame plonojo disko žvaigždžių TD/D < 0,5, storjo – TD/D > 2, o tarpinių – 0,5 < TD/D < 2. Kaip matoma iš 8 pav, pagal šiuos kinematinus kriterijus, tik 2 žvaigždės patenka į tarpinį intervalą. Viena iš jų pagal cheminį priskyrimą laikyta storjo disko žvaigžde (TYC4183-1378-1), o viena plonojo disko žvaigžde (TYC3943-2200-1). Viena pagal kinematiką storajam diskui priskiriama ir itin aukšta TD/D = ~ 2518 pasižyminti žvaigždė TYC3873-1890-1 pagal cheminį išskirstimą taip pat priskiriama storajam diskui. Taigi, iš 19 pagal cheminį išskirstymą identifikuotų žvaigždžių, tik 2 žvaigždės pasižymi storjo disko kinematika pagal Bensby ir kt. (2014) pasiūlytą išskirstymą. Kaip matoma 8 pav, dauguma storjo disko žvaigždžių pasižymi artimomis TD/D tikimybėmis į plonojo disko žvaigždžių. Tai matoma ir Toomre diagramoje (8 pav), kai tiek plonojo tiek storjo disko žvaigždės pasižymi ryškiau neišsiskiri-



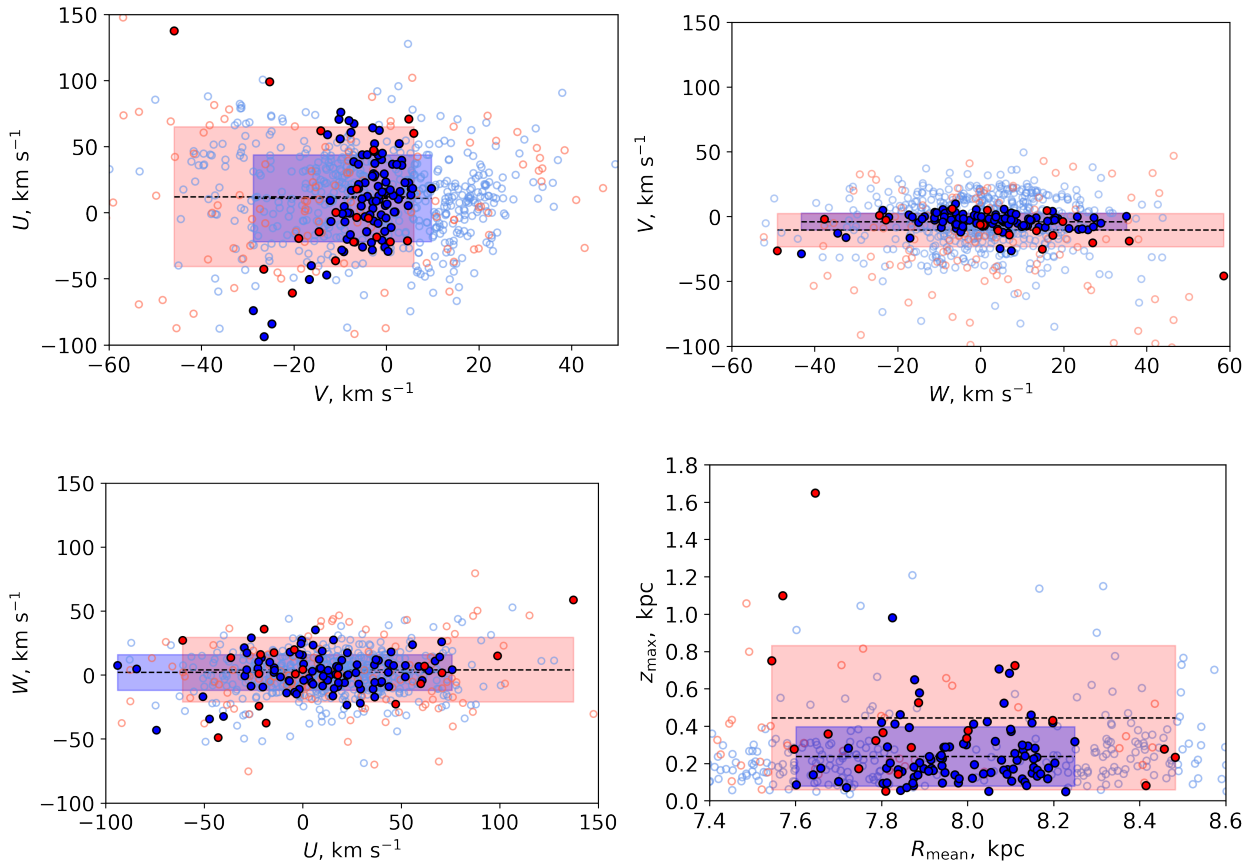
8 pav. Žvaigždžių pasiskirstymas pagal kinematinės tikimybės nuo amžiaus (kairėje) ir žvaigždžių Toomre diagrama (dešinėje).

riančia kinematika. Literatūroje galima rasti pavyzdžių, kai žvaigždės Toomre diagramoje su didesniu bendru judėjimo greičiu (8 pav punktyrinės linijos) negu 85 km/s priskiriamos storajam, o mažesniu negu 85 km/s – plonajam diskui (pvz., Bensby ir kt. (2010)).

4.3 Žvaigždžių kinematiniai parametrai

Didelių skirtumų tarp darbe nustatytų žvaigždžių greičių komponentių U , V , W plonajame ir storajame diske nėra. Darbe ištirtų storajo disko žvaigždžių imtis nėra didelė todėl vidurkį ir standartinį nuokrypį reikėtų vertinti tik orientaciškai. Visgi, palyginimui greičių grafikuose (9 pav) atidėtos ir žvaigždės iš Tautvaišienė ir kt. (2022). U greičio komponentė nusako žvaigždžių judėjimą skersai Galaktikos plokštumai ir teigiama jos vertė rodo objekto judėjimą link Galaktikos centro, o neigiama – nuo Galaktikos centro. Darbe tirtų plonojo disko žvaigždžių šios komponentės vidurkis $U_{\text{pmean}} = \sim 11$, o standartinis nuokrypis $\sigma_{\text{pmean}} = \sim 33$. Storajo disko žvaigždės pasižymi itin artimu vidurkiu $U_{\text{smean}} = \sim 12$, tačiau didesniu $\sigma_{\text{usmean}} = \sim 53$. Greičių komponentė V rodo žvaigždžių judėjimą išilgai Galaktikos disko, o jos teigiama vertė rodo jos sukimaši ta pačia kryptimi, o neigiama – priešinga kryptimi Galaktikos diskui. Tirtų plonojo disko žvaigždžių šios komponentės vidurkis $V_{\text{pmean}} = \sim -4$, standartinis nuokrypis $\sigma_{\text{vpmean}} = \sim 6,5$, o storajo disko žvaigždžių – atitinkamai $V_{\text{smean}} = \sim -10,5$ ir $\sigma_{\text{vsmean}} = \sim 13$. W greičių komponentė rodo žvaigždžių judėjimą statmenai Galaktikos disko, o jos teigiama vertė rodo judėjimą link Šiaurinio Galaktikos poliaus, o neigiama – nuo. Šios komponentės vidurkis plonojo disko žvaigždės $W_{\text{pmean}} = \sim 2$, standartinis nuokrypis $\sigma_{\text{wpmean}} = \sim 14$, o storajo – atitinkamai $W_{\text{pmean}} = \sim 4$ ir $\sigma_{\text{wsmean}} = \sim 25$. Vieira ir kt. (2022) Saulės aplinkos plonojo ir storajo žvaigždžių tyrimas vidutinius šių struktūrų greičius pateikia gana artimus tarpusavyje, su kiek labiau besiskiriančia azimutine komponente bei didesne dispersija storajam diskui. Panaši tendencija gauta ir šio tyrimo žvaigždėms.

Maksimalaus pakilimo virš Galaktikos plokštumos vidurkis bei standartinis nuokrypis gautas aukštesnis tirtoms storajo disko nei plonojo disko žvaigždėms (9 pav), tačiau gana maža storajo disko žvaigždžių imtis apriboja detalesnį palyginimą. Visgi gana didelis tiek plonojo, tiek storajo disko žvaigždžių skaičius $Z_{\text{max}} < 0,5$ kpc riboje neprieštarauja Vieira ir kt. (2022) minčiai, jog iki 0,5 kpc storasis diskas sudaro maždaug pusę disko žvaigždžių.



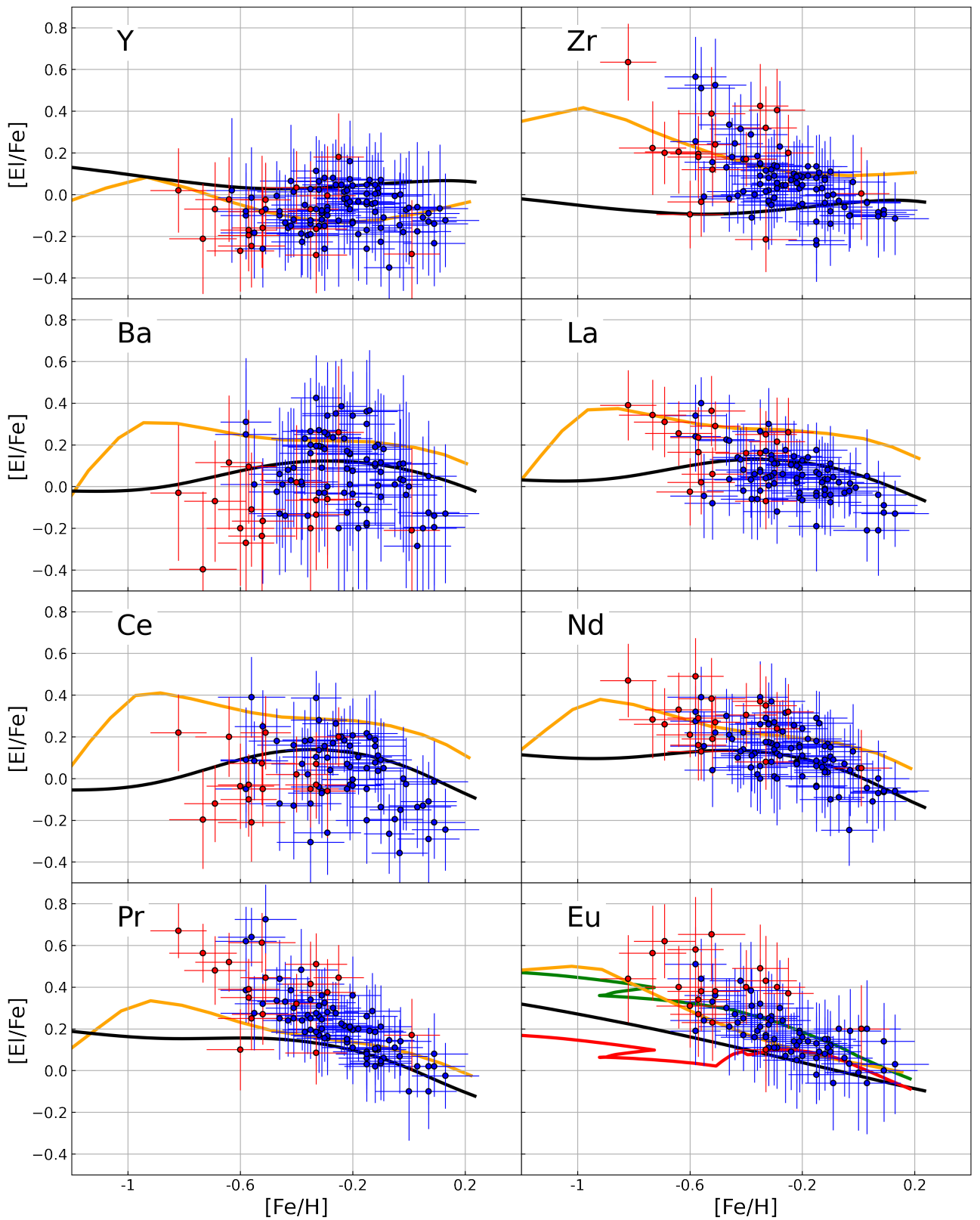
9 pav. Žvaigždžių pasiskirstymas pagal greičių komponentes U , V , W ir pagal maksimalų pakilimą virš Galaktikos plokštumos pagal jų vidutinį galaktocentrinį atstumą (dešinėje apačioje). Punktyrinėmis linijomis žymimi vidurkiai, o mėlynomis ir raudonomis sritimis – atitinkamai plonojo ir storąjo diskų tirtų žvaigždžių greičių standartiniai nuokrypiai.

4.4 Tirtų elementų gausų gausų priklausomybės nuo $[\text{Fe}/\text{H}]$

Darbe gauta 113 žvaigždžių su bent vienu neutronų pagavimo reakcijų cheminio elemento gausos įverčiu, iš kurių 94 priklausė plonajam, o 19 storajam diskui. Dėl linijų kokybės, gautų įverčių skaičius tarp elementų buvo skirtingas. Daugiausia gauta itrio gausų įverčių – 109 žvaigždėms, iš kurių 91 priklausė plonajam ir 18 – storajam diskui. Gauti 99 žvaigždžių cirkonio gausų įverčiai – 81 plonajam, 18 storajam diskui, 96 bario gausų įverčiai – 79 plonajam, 17 storajam diskui, 93 lantano įverčiai – 76 plonajam, 17 storajam diskui, 83 cerio įverčiai – 66 plonajam ir 18 storajam, 95 praeodimio įverčiai – 77 plonajam, 18 storajam, 100 neodimio įverčių – 81 plonajam, 19 storajam, 84 europio įverčiai – 65 plonajam, 19 storajam diskui. Visos elementų gausos tirtose žvaigždėse bei nustatyti amžiai pateikti 3 priede.

4.4.1 Y ir Zr

10 pav pateikti cheminių elementų pasiskirstymai nuo metalingumo $[\text{Fe}/\text{H}]$. Šiame darbe tirtų žvaigždžių pasiskirstymas Y ir Zr atveju gautas gana skirtingas, ypač link mažesnių metalingumų. Y atveju plonojo disko žvaigždės visame tirtame metalingumo intervale rodo žemesnes už Saulės gausas ($[\text{Y}/\text{Fe}] < 0,0$). Kaip ir sunkesnių s -proceso cheminių elementų – Ba, La, bei Ce – atveju matomas augimas nuo mažiausių metalingumų link didesnių, o, pasiekus maksimumą ties $[\text{Fe}/\text{H}] = \sim 0,2$, matomas



10 pav. Darbe tirtų žvaigždžių gausų priklausomybė nuo $[Fe/H]$. Mėlyni taškai žymi plonojo disko žvaigždes, raudoni – storjo disko žvaigždes. Juodos kreivės žymi modelį iš Prantzos ir kt. (2018), oranžinės – modelį iš Kobayashi ir kt. (2020). Žalia kreivė žymi C modelį iš Van der Swaelmen ir kt. (2023), rodantį europio kilmę iš MRSNe, o raudona kreivė – D modelį iš Van der Swaelmen ir kt. (2023), žyminti europio kilmę iš MRSNe (50%) ir NS-NS susijungimų (50%).

mažėjimas. $[Y/Fe]$ gausų išsibarstymas gana nežymus ir pastovus visame tirtų metalingumų diapazone – maždaug 0,2 dex pločio. Nors Zr yra to paties s -proceso gūbrio elementas (žr. 1.2.1 skyrelį), šio darbo rezultatai, ypač nuo $-0,6$ dex iki $-0,2$ dex intervale, rodo gana skirtingą jo galimą kilmę. Plonojo disko žvaigždės, išskyrus ties aukščiausiais imties metalingumais $[Fe/H] > -0,2$, rodo didesnę nei Saulės $[Zr/Fe]$ gausą ($[Zr/Fe] > 0,0$). $[Zr/Fe]$ didėjimas, nors ir su gana ryškiu išsibarstymu, link žemesnių metalingumų rodo skirtingą tendenciją negu Y. Šio elemento gausų kitimas prie skirtingų $[Fe/H]$ artimesnis didesne r -proceso frakcija pasižyminčių Pr ir Eu gausų kitimui. Storojo disko žvaigždės, kurių dauguma pasižymi metalingumais $[Fe/H] < -0,3$, tiek Y ir Zr atveju neišsiskiria iš plonojo disko žvaigždžių, tik Zr atveju rodo kiek stipresnį išsibarstymą.

Šio darbo duomenis lyginant su modeliu iš Prantzos ir kt. (2018) (10 pav), matoma, jog modelis nenumato augimo-maksimumo-kritimo $[Y/Fe]$ tendencijos, o nuo maždaug $-0,5$ dex nežymiai kyla link mažesnių metalingumų. Visgi, grafike pateikiamas suminis modelis įtraukia mažų ir vidutinių masių indėlių, masyvių besisukančių žvaigždžių indėlių ir r -proceso indėlių laikant, jog jis gaunamas iš CCSNe. Panagrinėjus modelį detaliau Prantzos ir kt. (2018) darbe, neįskaičius r -proceso komponentės (10 pav nepateikta), modelis daug artimiau atitinka šio darbo rezultatus. Visgi, kaip pateikiama nemažai darbų, tikėtina pakankamai žymi r -proceso komponentės įtaka šiam elementui, todėl bandant susieti Prantzos ir kt. (2018) modelį su šiuo darbu, tikėtina, jog tirtame metalingumų intervale realesnis kitų indėlių pervertinimas, kitas r -proceso šaltinis arba, labiau tikėtinas, variantas, visų šių komponentių indėlių persiskirstymas.

Prantzos ir kt. (2018) darbe gana nemaža dalis indėlio į šių elementų produkciją gaunama į silpnosios s -proceso komponentės dėl besisukančių žvaigždžių indėlio ir taip pašalinamas literatūroje iškeltas LEPP poreikis (žr. 1.2.1 skyrelį). $[Y/Fe]$ atveju, silpnosios komponentės indėlio skirtumas su ir be masyvių žvaigždžių sukimosi įskaitymo didėja link žemesnių metalingumų ir pasiekia maksimumą intervale nuo maždaug -1 iki $-1,5$ dex. Šio darbo tyrimo metalingumo rėmuose, skirtumas tarp šių dviejų modelių yra iki $\Delta[Y/Fe] = 0,25$ prie $[Fe/H] = -0,6$. Naudojant kiek mažesnę šių besisukančių žvaigždžių indėlių, modelis kiek artimiau atitiktų darbo rezultatus, taip pat atkartotų kiek ryškesnę kilmę link aukštesnių metalingumų. Visgi modelis nenumato galimo $[Y/Fe]$ mažėjimo prie $[Fe/H] > -0,2$, kas galimai rodo šio elemento artimesnę prigimtį sunkesniems s -proceso elementams Ba, La, Ce ir Nd.

$[Zr/Fe]$ atveju, modelio iš Prantzos ir kt. (2018) kitimo tendencija itin skiriasi nuo rezultatų, o verčių sutapimas matomas tik ties maždaug $[Fe/H] \sim -0,2$. Prie žemesnių metalingumų žvaigždės pasižymi $[Zr/Fe]$ didėjimu, o prie aukštesnių metalingumų, nors ir nežymi žvaigždžių imtis rodo mažėjimą. Grafike pavaizduoto suminio modelio kitimas visame tirtų žvaigždžių intervale nežymus ir, tikėtina, reikalinga daug didesnė r -proceso komponentės įtaka.

Daug ryškesnis sutapimas su $[Y/Fe]$ ir $[Zr/Fe]$ kitimo tendencijomis nustatytomis šiame darbe, gautas Kobayashi ir kt. (2020) modelyje, kuriame s -proceso indėlis gaunamas iš AGB žvaigždžių, o r -procesas – iš ECSNe, neįvykusių supernovų (failed supernovae), NUW, NS-NS ir MRSNe. Modelyje įtraukiant s -procesą, neįvykusių supernovų (angl. failed supernovae), NS-NS ir MRSNe indėlius gaunamas $[Zr/Fe]$ mažėjimas nuo maždaug $[Zr/Fe] = 0,4$ prie $[Fe/H] = -1$ ir pasiekiamas $[Zr/Fe] = 0,1$ gausa ties $[Fe/H] = 0,0$. Tai daug artimesnis $[Zr/Fe]$ įvertinimas šiame darbe gautiems rezultatams,

ypač ties žemesniais metalingumais. Ties Saulės metalingumais modelis kiek pervertina numatomas gausas lyginant su šio darbo rezultatais. Dėl per didelės išėigos Kobayashi ir kt. (2020) modelyje at- mestas NUW indėlis.

Modelyje gautas $[Y/Fe]$ mažėjimas nuo maždaug $[Y/Fe] = 0,1$ prie $[Fe/H] = -0,9$ iki $[Y/Fe] = -0,1$ prie $[Fe/H] = -0,3$, o augant metalingumui gautas augimas iki $[Y/Fe] = 0,0$ prie Saulės metalingumo. Toks kitimas neatkartoja šiame darbe gautos augimo-maksimumo-kritimo $[Y/Fe]$ charakteristikos dar- be tirtame metalingumo intervale, tačiau modeliu gautos daug artimesnės $[Y/Fe]$ vertės negu Prantzos ir kt. (2018) modeliu.

Kaip teigiama Kobayashi ir kt. (2020), r -proceso metu iš ECSNe galima gauti 22% itrio ir 44% cirkonio, likusią gausos dalį gaunant iš AGB žvaigždžių. Tokia jų darbo išvada yra artima šio darbo rezultatams, kai $[Y/Fe]$ nuo $[Fe/H]$ kitimo tendencija artimesnė sunkesniems s -proceso elementams, o darbe gautas $[Zr/Fe]$ kitimas labai artimas kitiems didesniu r -proceso indėliu pasižymintiems elemen- tams. Net 44% cirkonio kilmės iš r -proceso lemtų, jog šis elementas yra itin mišrios s -/ r - kilmės. Šios išvados prieštarauja, pavyzdžiui, Prantzos ir kt. (2020) darbe pasiūlytiems s - ir r - procesų indėliams Zr produkcijai – atitinkamai 82% ir 18%. Visgi, Y gausos produkcija tikėtina, jog didelė dalimi gau- nama s -proceso metu – kaip pasiūlyta Prantzos ir kt. (2020) – 78% ir 22% atitinkamai s - ir r - procesų metu. Verta atkreipti dėmesį, jog tiek Prantzos ir kt. (2020), tiek Kobayashi ir kt. (2020) Y produkcija pateikiama iš s -proceso, tačiau jų modelių kitimas skirtingas. Be jau išvardintų skirtumų, jog Prantzos ir kt. (2018) pridedama ir silpnoji s - proceso komponentė iš masyvių besisukančių žvaigždžių, nau- doti pavyzdžiui ir kiti išėitų šaltiniai. Prantzos ir kt. (2018) darbe naudotos FRUITY išėigos, detaliau kiekvienam šiame darbe tirtam elementui aptartos 1.2 skyriuje. Kobayashi ir kt. (2020) naudotos MO- NASH (Mt Stromlo group) išėigos (šaltiniai 1.2 skyriuje). Detalesni šių išėigų palyginimai pateikti Cristallo ir kt. (2011); Prantzos ir kt. (2020) darbuose.

ECSN, kaip Zr kilmės šaltinis, patvirtina literatūroje keliamą įdėją (žr. 1.1.2 skyrelį), jog lengvesnių ir sunkesnių neutronų pagavimo reakcijų cheminių elementų gausos gali turėti skirtingus r -proceso šaltinius. Cowan ir kt. (2021) darbe ECSNe ir išskiriama kaip vienas pagrindinių galimų silpnosios r -proceso komponentės šaltinių.

Mažesnis $[Y/Fe]$ rezultatų išsibarstymas lyginant su $[Zr/Fe]$ gali būti nulemtas tiek tikslesnių matavimų, tiek ir tai, kas sudaro šiuos elementus. Kaip minėta 1.2.1 skyrelyje, Y sudaro vienas, o Zr net 5 stabilūs izotopai, iš kurių nei vienas nėra gaminamas tik vieno proceso. Dėl šios priežas- ties Zr išsibarstymas gali būti tiesiog nulemtas Galaktikoje vykusių atsitiktinių procesų. Modeliavimo darbų ryškesni rezultatų skirtumai Zr nei Y atveju tą rodo.

Apibendrinus galime teigti, jog modeliai iš skirtingų darbų numato skirtingas Y ir Zr kitimo cha- rakteristikas. Lyginant su šiame darbe gautais rezultatais, matoma, jog modelis iš Kobayashi ir kt. (2020) gana artimai numato pirmojo s -proceso gūbrio elemento Y gausos išsidėstymą nuo metalingu- mo. Prie žemesnių metalingumų matomas artimesnis sutapimas ir Zr, tačiau prie Saulės metalingumų modelis kiek pervertina numatomas gausas. Visgi, tikėtina, kad šio modeliavimo darbo siūlomi šių cheminių elementų kilmės šaltiniai yra realiausi – r -proceso metu iš ECSN gaunama 22% itrio ir 44% cirkonio, o likusi dalis gaunama iš AGB žvaigždžių s -proceso metu.

4.4.2 Ba, La ir Ce

Bario, lantano ir cerio gausos didžiaja dalimi gaminamos pagrindinės s -proceso komponentės (žr. 1.2.2 skyrelį). 10 pav pateiktoje $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ priklausomybėje nuo $[\text{Fe}/\text{H}]$ matomas gana ryškus gausų išsibarstymas su maksimumu $[\text{Ba}/\text{Fe}] = 0,40$ ties $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,30$. Link labiau teigiamų metalingumų matomas kelių žvaigždžių formuojamas gausos kritimas iki $[\text{Ba}/\text{Fe}] = \sim -0,20$. Nuo maksimumo į žemesnių metalingumų pusę tai pat matomas plonojo disko žvaigždžių gausos kritimas, tačiau su gana ryškiu žvaigždžių išsibarstymu. Dauguma storjo disko žvaigždžių rodo Saulės arba žemesnę už Saulės $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ gausą, pratęsdamos plonojo disko gausų išsibarstymą prie žemesnių metalingumų.

Kiek mažesnė žvaigždžių imtis $[\text{Ce}/\text{Fe}]$ atveju rodo panašią tendenciją kaip ir $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ atveju – ties $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,30$ pasiekiamas maksimumas, tik dauguma žvaigždžių pasižymi kiek mažesnėmis gausomis nei $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ atveju ir dauguma šiame metalingume pasižymi $[\text{Ce}/\text{Fe}] = \sim 0,20$. Link didesnių metalingumų taip pat matomas kritimas, tik su didesniu žvaigždžių išsibarstymu ir mažesnėmis minimaliomis $[\text{Ce}/\text{Fe}] = \sim -0,30$ gausomis. Link mažesnių metalingumų nuo maksimumo ryškesnis kritimas kaip $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ atveju nematomas – kelios plonojo disko žvaigždės stipriai išsibarsčiusios. Storjo disko žvaigždės taip pat pasižymi dideliu išsibarstymu, tačiau rodo kiek didesnes gausas negu $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ atveju, bei pratęsia plonojo disko kitimo tendenciją.

Skirtingai negu $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ ir $[\text{Ce}/\text{Fe}]$, $[\text{La}/\text{Fe}]$ gausos rodo mažiausią išsibarstymą ir ties $[\text{Fe}/\text{H}] = \sim -0,30$ pasižymi žvaigždžių koncentracija nuo maždaug $[\text{La}/\text{Fe}] = -0,00$ iki $[\text{La}/\text{Fe}] = -0,20$ riboje. Link aukštesnių metalingumų matomas $[\text{La}/\text{Fe}]$ kritimas, o ties žemesniais metalingumais matomas kelių plonojo disko žvaigždžių išsibarstymas. Skirtingai negu $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ ir $[\text{Ce}/\text{Fe}]$ atvejais, daugumos storjo disko žvaigždžių $[\text{La}/\text{Fe}]$ gausos yra padidėjusios lyginant su plonojo disko žvaigždėmis.

Suminis Prantzos ir kt. (2018) modelis visiems trimis elementams tirtame metalingumų intervale numato augimo-maksimumo-kritimo tendenciją, kai maksimumas pasiekiamas ties maždaug $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,30$. Nors ir su gana ryškiu išsibarstymu, darbe gauti rezultatai rodo maksimumą ties panašiu metalingumu. Dėl didelio išsibarstymo $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ ir $[\text{Ce}/\text{Fe}]$ atvejais, sunku tiksliau įvertinti, ar modelis nėra sistematiškai pakilęs lyginant su rezultatais. Visgi, nors ir iš mažos žvaigždžių imties ties Saulės metalingumais $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$, galima spręsti apie modelio numatomas per dideles šių elementų gausas per $\sim 0,20$ dex šiame intervale. $[\text{La}/\text{Fe}]$ atveju modelis visame tirtame plonojo žvaigždžių intervale geriau atitiktų rezultatus jeigu būtų sistematiškai žemiau per $\sim 0,10$ dex. Panagrinėjus detaliau Prantzos ir kt. (2018) modelio dedamąsias jų darbe, matoma, jog didelio skirtumo tarp modelio su ir be masyvių žvaigždžių sukimosi nėra. Kaip aprašyta 1.2.2 skyrelyje, šių elementų gamyba gaunama iš pagrindinės s -proceso komponentės – mažos ir vidutinės masės AGB žvaigždžių – todėl šių elementų gamybai masyvios žvaigždės ryškesnės įtakos neturi. Prantzos ir kt. (2018) modelyje naudotos AGB žvaigždžių FRUITY išeigos, detaliau šiems elementams aprašytos 1.2.2 skyrelyje, lemia šių elementų kilmės skirtumus.

Kobayashi ir kt. (2020) nustatyta, jog su jų naudojamomis išeigomis, modelyje gaunamas gana ryškus Ba, La ir Ce perviršis ties Saulės metalingumais, tačiau koreguojant modelio parametrus, ties $[\text{Fe}/\text{H}] = 0,0$ santykis sumažintas nuo $[\text{Ba}/\text{Fe}] = 0,37$ iki $[\text{Ba}/\text{Fe}] = 0,20$. Visgi, atsižvelgiant į šiuo darbu gautus rezultatus, ši vertė irgi per aukšta. Kobayashi ir kt. (2020) teigiama, jog šių elementų gamyba iš r -proceso gaunama tiek iš NS-NS ir NS-BH susijungimų, tiek iš MRSNe, tačiau šio darbo meta-

lingumo rėmuose nėra ryškesnio skirtumo tarp jų modelių variantų, įvertinančių įvairias r -proceso kilmes.

Dauguma plonojo disko žvaigždžių, pasižyminčių aukščiausiomis $[Ba/Fe]$ vertėmis yra jauni objektai. Visgi, tame pačiame metalingumų intervale matomas gana ryškus tiek $[Ba/Fe]$, tiek $[Ce/Fe]$ išsibarstymas. Kaip aptarta, baris turi 5 ne p -proceso metu gaminamus izotopus, kurių išėigos maksimumas prie to paties metalingumo gali skirtis arti 2 eilių. Tokia sudėtinga šio elemento gausą sudaranti izotopų kilmė, gali lemti gana ryškų išsibarstymą, ypač, atsižvelgiant jog šio elemento kilmė ryškiai dominuojama AGB žvaigždžių. Panaši bario gausos sklaida randama ir nemažai kitų darbų (pvz., Delgado Mena ir kt. (2017), Magrini ir kt. (2018)). 2 stabilūs ne p -proceso cerio izotopai, iš kurių dominuojantis gausa yra gaminamas s -proceso ($> 90\%$), neturėtų būti pagrindinė gausų išsibarstymo priežastis. Gana mažas gautas $[La/Fe]$ išsibarstymas atitinka, jog šis elementas pasižymi tik vienu izotopu. Magrini ir kt. (2018) darbe, kaip ir šiame tyrime, gautas ryškesnis $[Ce/Fe]$ ir žymiai mažesnis $[La/Fe]$ išsibarstymas šiame metalingumų diapazone.

Artimiausiai darbe gautų plonojo disko žvaigždžių bario, lantano ir cerio gausas atitinka modelis iš Prantzos ir kt. (2018), nors ir pasižymintis nedideliu sistematiniu poslinkiu į didesnių gausų pusę bei kiek pervertinantis gausas Saulės ir aukštesniuose metalingumuose. Tikėtina, jog kai kurių metalingumų, ypač aukštesnių, žvaigždės modelyje turėtų pasižymėti kiek mažesne šių elementų išėiga. Visgi, Prantzos ir kt. (2020) siūlomos s -proceso išėigos bariui, lantanui ir ceriui atitinkamai 89%, 80% ir 85% yra tikėtinos.

4.4.3 Nd ir Pr

Kaip aptarta 1.2.3 skyrelyje, neodimis ir prazeodimis pasižymi gana mišria s -/ r - kilme. 10 pav. pateiktoje $[Nd/Fe]$ priklausomybėje nuo $[Fe/H]$ plonojo disko žvaigždėse ties $[Fe/H] = -0,30$ dex matoma žvaigždžių sancaupa, kai dauguma žvaigždžių gausų apribotos intervale nuo $[Nd/Fe] = \sim 0,0$ iki $[Nd/Fe] = \sim -0,30$. Link aukštesnių metalingumų, kaip ir kitų s -proceso elementų atveju, matomas gausų kritimas, o ties Saulės metalingumais žvaigždės rodo neigiamas gausas $[Nd/Fe] < 0,0$ dex. Link žemesnių metalingumų nuo $[Fe/H] = \sim -0,30$ dex matomas itin nežymus kilimas plonojo disko žvaigždėse. Storojo disko žvaigždės tęsia plonojo disko žvaigždžių gausų kitimo tendenciją link žemesnių metalingumų.

$[Pr/Fe]$ gauta priklausomybė plonojo disko žvaigždėms kiek ryškesnė. Ties $[Fe/H] = \sim -0,30$ dauguma plonojo disko žvaigždžių gausų patenka į siauresnį $[Pr/Fe] = \sim -0,20$ - $[Pr/Fe] = \sim -0,40$ gausų intervalą. Link aukštesnių metalingumų taip pat matomas mažėjimas, o ties Saulės metalingumu pasiekiamas maždaug $[Pr/Fe] = -0,00$ gausa. Nuo $[Fe/H] = \sim -0,30$ link mažesnių metalingumų, skirtingai negu s -proceso dominuojamuose elementuose, gaunamas ryškesnis $[Pr/Fe]$ augimas, tęsiamas ir storojo disko žvaigždžių link mažesnių metalingumų.

Darbe gautus rezultatus lyginant su sudėtinu Prantzos ir kt. (2018) modeliu galima matyti, jog nuo maždaug $[Fe/H] = -0,30$ link aukštesnių metalingumų modelis gana gerai atitinka plonojo disko žvaigždžių gausų $[Nd/Fe]$ išsidėstymą. Link žemesnių metalingumų nuo $[Fe/H] = -0,30$, modelis neberodo augimo, o darbe tirtos plonojo bei storojo žvaigždžių gausos toliau auga. Prantzos ir kt. (2018) darbe gauto modelio kritimą lemia s -proceso indėlio mažėjimas iš stipriosios ir silpnosios s -proceso

komponenčių. Prantzos ir kt. (2020) pateikiamos Nd procentinės išraiškos s - ir r - procesui atitinkamai 61,5% ir 38,5% rodo apie gana ryškią šio elemento produkciją iš s -procesu. Visgi, šio darbo rezultatų augimas link žemesnių metalingumų rodo, jog, tikėtina, reikalingas didesnis r -procesu indėlis. Kaip paminėta 1.2.3 skyrelyje, darbuose gauta ir kiek aukštesnė šio elemento kilmė iš r -procesu.

[Pr/Fe] atveju Prantzos ir kt. (2018) modelis prie mažesnių nei [Fe/H] = -0,30 metalingumų pasižymi tik nežymiai aukštesne numatoma [Pr/Fe] gausa negu [Nd/Fe] atveju, tačiau šiuo darbu gausos rodo ryškesnę augimo tendenciją, labiau primenančią r -procesu dominuojamo Eu kitimą. Matomas nepakankamas augimas nulemtas s -procesu šaltinių sąlygoto gausos kritimo prie žemesnių metalingumų. Prantzos ir kt. (2020) pateiktos s - ir r - frakcijos prazeodimiui atitinkamai 53,5% ir 46,5%, tačiau Pr augimas prie žemesnių metalingumų, tikėtina, numato stipresnę r -procesu įtaką. Kaip pateikta 1.2.3 skyrelyje, kai kuriuose darbuose gauta didesnė Pr frakcija iš r -procesu.

Kobayashi ir kt. (2020) modelis, skirtingai negu Ba, La ir Ce atveju numato Saulės [Nd/Fe] ir [Pr/Fe] ties Saulės metalingumu bei rodo šių santykių augimą iki daug žemesnių metalingumų ([Fe/H] = -1,00), o tai labiau atitinka šiuo darbu gautus rezultatus negu Prantzos ir kt. (2020) atveju. Visgi, Kobayashi ir kt. (2020) modelyje kiek pervertinama [Nd/Fe] gausa ties Saulės ir aukštesniais metalingumais. [Pr/Fe] atveju, modelis numato kiek aukštesnes gausas prie žemesnių metalingumų nei modelis iš Prantzos ir kt. (2020), tačiau šiuo darbu gautų rezultatų neatkartoja. Kobayashi ir kt. (2020) teigiama, jog NS-NS ir NS-BH susijungimai prisideda prie šių elementų gamybos, tačiau būtinas MRSNe indėlis. Tai matoma jų modeliuose, kai šio darbo metalingumo rėmuose matomas reikiamas papildomas indėlis gaunamas iš MRSNe.

Pr turi tik vieną, o Nd 5 stabilus izotopus (1.2.3 skyrelis). Nd atveju, vienas izotopas yra visiškai s -, kitas – visiškai r -procesu kilmės, kai likę trys gaunami abiejų procesų. Sudėtingesnė Nd sudėtis gali turėti įtakos kiek didesniai išsibarstymui. Galima matyti, jog trys elementai – Y, La ir Pr – pasižymintys tik vienu stabilium izotopu, rodo aiškiausias kitimo tendencijas.

Apibendrinus galima teigti, kad neodimio atveju Prantzos ir kt. (2018) modelis prie aukščiausių metalingumų gana artimai atitinka šiuo darbu gautus rezultatus, tačiau prie žemesnių metalingumų geresnis sutapimas matomas su modeliu iš Kobayashi ir kt. (2020). Prantzos ir kt. (2020) pasiūlyta 62% iš s -procesu vertė yra tikėtina, tačiau nežymiai padidinus r -procesu indėlį būtų gaunamas geresnis sutapimas prie žemesnių metalingumų. Prazeodimio atveju, abiem modeliams gana artimai atitinkant Saulės metalingumo intervalo šio darbo žvaigždes, matomas ryškus modelių gausų neįvertinimas prie mažiau metalingų objektų. Darbe gauti Pr rezultatai rodo panašią kitimo tendenciją į Eu ir, tikėtina, didesnę r -procesu frakciją, negu pasiūlyta 47% Prantzos ir kt. (2020) darbe.

4.4.4 Eu

Kaip aptarta 1.2.4 skyrelyje, europis yra r -procesu dominuojamas elementas. Darbe gautų plonojo disko žvaigždžių [Eu/Fe] kitimo tendencija yra mažėjanti didėjant metalingumui. Ties [Fe/H] = -0,50 dauguma darbe nustatytų plonojo disko europio gausų yra 0,2–0,4 [Eu/Fe] intervale ir pasiekia [Eu/Fe] = 0,0 ties Saulės metalingumais. Plonojo disko žvaigždėse Eu išsibarstymas artimas Pr. Storojo disko žvaigždės tęsia plonojo disko žvaigždžių didėjimo tendenciją link mažesnių metalingumu, tik rodo kiek ryškesnę išsibarstymą.

Suminiame Prantzos ir kt. (2018) modelyje matomas maždaug tiesinis mažėjimas didėjant metalingumui, tačiau, lyginant su šiame darbe gautais rezultatais, modelis nenumato tokių aukštų [Eu/Fe] šiame darbe gautų plonojo disko santykių – ties [Fe/H] = -0,5 matomas $\Delta[\text{Eu/Fe}] = 0,2$ skirtumas. Prantzos ir kt. (2018) modelio duodamos gausos dar žemesnės jeigu naudojamas nesisukančių masyvių žvaigždžių indėlis. Kaip ir Pr atveju, šiame modelyje nėra pakankamai įvertinamas r -proceso indėlis.

Daug tiksliau [Eu/Fe] kitimas įvertinamas Kobayashi ir kt. (2020) modelyje, kuriame nuo [Eu/Fe] = 0,5 ties [Fe/H] = -1,0 gaunamas mažėjimas iki [Eu/Fe] = 0,04 ties [Fe/H] = 0,0. Jų darbe pateikti ir modelių variantai be MRSNe, tik, pavyzdžiui, su indėliu iš NS-NS ir NS-BH susijungimų ir ECSNs. Be MRSNe indėlio modelis nuo -1,0 iki 0,0 [Fe/H] intervale maždaug per 1,0 dex žemiau negu modelis su MRSNe, todėl MRSNe įtaka Eu produkcijai būtina.

10 pav. pateikti ir du modeliai europiui iš Van der Swaelmen ir kt. (2023). Žalia linija pažymėtas modelis (jų darbe – C modelis), numato Eu kitimą, jeigu šis elementas gaunamas tik iš MRSNe, o raudona linija pažymėtas modelis (jų darbe – D modelis), rodo situaciją kai MRSNe ir NS-NS pagamina po 50% europio. Kaip ir Kobayashi ir kt. (2020) modelio atveju, MRSNe įtaka yra būtina nusakyti Eu gamybai. Van der Swaelmen ir kt. (2023) modelis su 100% europio indėliu iš MRSNe plonojo disko žvaigždėms gana artimai atitinka šio darbo rezultatus. Dėl šios priežasties realiausias pagrindinis Eu kilmės šaltinis yra MRSNe.

4.5 Gausų priklausomybės nuo amžiaus Saulės aplinkoje

Galaktikos disko vidinė ir išorinė dalys skiriasi – tą patvirtina ir 4.2 skyrelyje aptarti plonojo ir storojo disko gausų kitimai skersai Galaktikos disko. Naujausi darbai, pavyzdžiui, Casali ir kt. (2020), Viscasillas Vázquez ir kt. (2022) ar Magrini ir kt. (2023) patvirtina, jog objektai skirtingais galaktocentriniais atstumais pasižymi skirtingu cheminių elementų praturtinimu ir skirtingomis cheminėmis kitimo tendencijomis prie įvairaus amžiaus žvaigždžių. Kuriami modeliai taip pat taikomi prie skirtingų galaktocentrinių atstumų (Magrini ir kt. 2021; Van der Swaelmen ir kt. 2023).

Kadangi šiame darbe siekiama ir iš turimos žvaigždžių imties patikrinti jų gausų kitimą nuo amžiaus, sumažinant efektus atsirandančius dėl padėties Galaktikoje, svarbu patikrinti, ar nėra matomas ryškus kitimas pasirinktame gana siaurame vidutinių Galaktocentrinių atstumų intervale. Iš 11 pav. galime matyti, jog paklaidų ribose visi darbe tirti elementai tiek plonajame, tiek storajame diske nerodo ryškesnės priklausomybės nuo R_{mean} . Tą patvirtina ir Pirsono (Pearson) koreliacijos koeficientų vertės (4 lentelė).

12 pav. pateikti visų darbe tirtų žvaigždžių elementų gausų išsidėstymai nuo žvaigždžių amžiaus. Svarbu pabrėžti, jog darbe nebuvo įvertinti galimi žvaigždžių pasiskirstymo pokyčiai dėl žvaigždžių amžių paklaidų. Žvaigždžių amžių paklaidos pateiktos 3 priede. Kaip aprašyta 3.2 skyrelyje, paliktos tik žvaigždės su patikimiausiais žvaigždžių amžiais. Visgi, amžių paklaidos didelės – vidutinė amžiaus paklaida plonajame diske į mažesnę pusę – 1,7 mlrd. m, į didesnę – 3,1 mlrd. m., o storajame diske – į mažesnę pusę – 2,5 mlrd. m., į didesnę – 4,4 mlrd. m. Tiksliesniam ir detalesniam gradientų įvertinimui lauko žvaigždėse svarbu pasitelkti daug tikslesnius amžiaus įvertinimus, pvz. astroseismologinius, ar kelių metodų kombinaciją.

Y ir Zr gausų nuo amžiaus grafikuose, kaip ir priklausomybėse nuo metalingumo (10 pav.) mato-

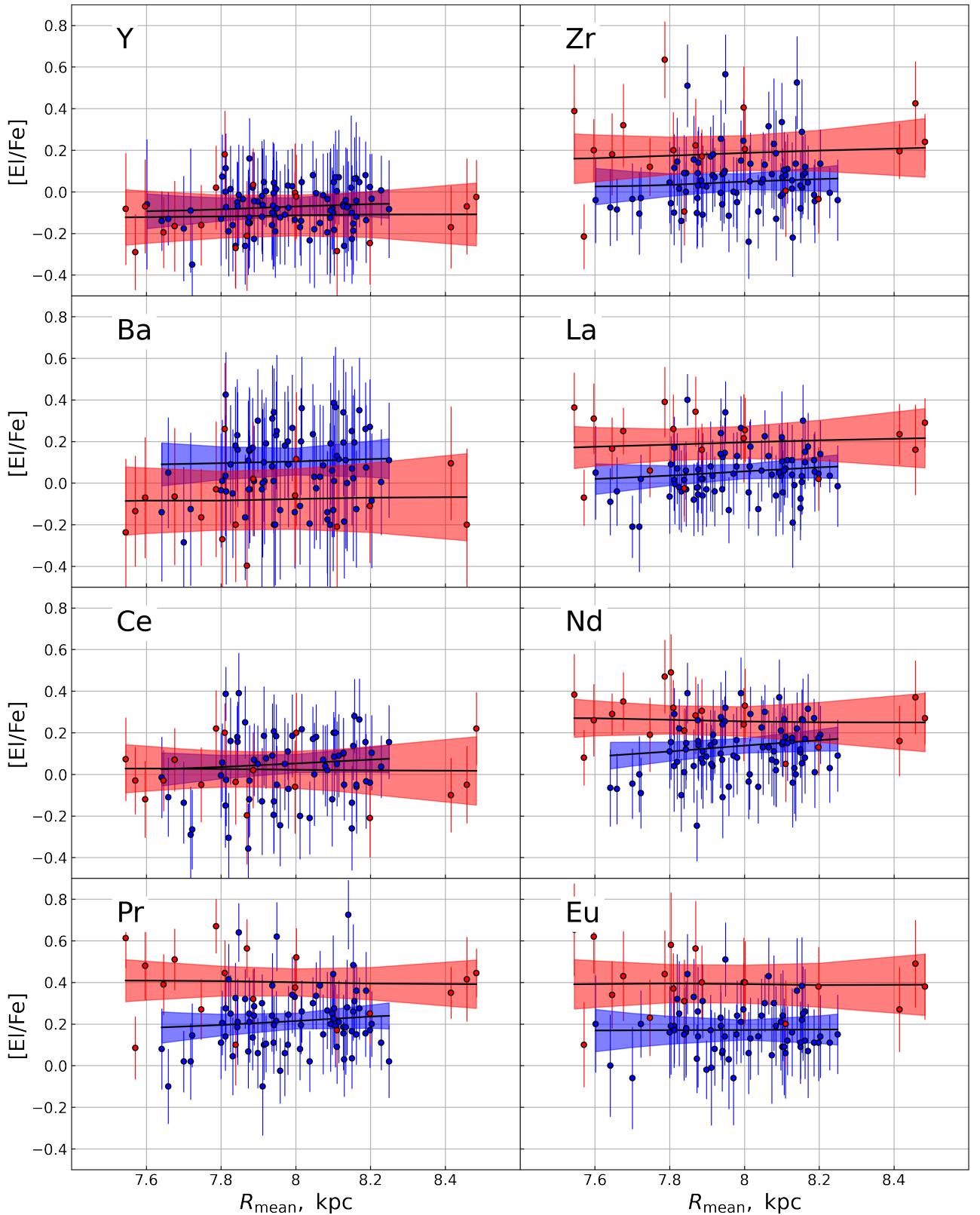
4 lentelė. Pirsono koreliacijos koeficientų ir atitinkamos p vertės R_{mean} ir amžiaus priklausomybėse darbe tirtiems elementams

El	R_{mean}				Amžius			
	Plonasis diskas		Storasis diskas		Plonasis diskas		Storasis diskas	
	PKK	p vertė	PKK	p vertė	PKK	p vertė	PKK	p vertė
Y	0,16	0,12	0,05	0,85	-0,47	0,00	0,36	0,14
Zr	0,14	0,2	0,08	0,75	-0,1	0,38	0,37	0,13
Ba	0,16	0,16	0,13	0,63	-0,63	0,00	0,07	0,79
La	0,23	0,05	0,00	0,99	-0,28	0,02	0,47	0,06
Ce	0,21	0,09	-0,02	0,93	-0,61	0,00	-0,01	0,96
Nd	0,27	0,01	-0,19	0,44	-0,41	0,00	0,07	0,77
Pr	0,19	0,1	-0,1	0,69	0,08	0,49	0,26	0,3
Eu	0,04	0,74	-0,15	0,53	0,31	0,01	0,32	0,18

mos skirtingos tendencijos. Y, pasižymintis didesne s -proceso frakcija, plonojo disko objektuose rodo didėjimą link jaunesnių amžių. Atsižvelgus į gana dideles paklaidas, galima matyti maždaug 0,2 dex padidėjimą 8 – < 1 mlrd. m. intervale. Taip pat matoma, jog plonojo disko, Saulės amžiaus žvaigždės vidutiniškai pasižymi –0,1 dex mažesne gausa negu Saulė. Šio elemento didėjimas rodo mažos masės, ilgo gyvavimo žvaigždžių įtaką, joms praturtinant tarpžvaigždinę erdvę vis vėlesniais amžiais. Kaip aptarta 1.2.1 skyrelyje, šio elemento didžiausia kilmė gaunama iš s -proceso, o didžiausios šio elemento FRUITY išeigos gaunamos 2–3 M_{\odot} intervale. Palyginimui atidėti modeliai iš Maiorca ir kt. (2012) bei Prantzos ir kt. (2018) numato gana stabilias, artimas Saulės gausas minėtame amžių intervale ir ryškesnio augimo nerodo. Kaip aptarta 4.4 skyrelyje, Prantzos ir kt. (2020) pateikiama 78% itrio gausos kilmė iš s -proceso, tačiau ryškesnis didėjimas link jaunesnių amžių rodo, jog, tikėtina, ši dalis turėtų būti didesnė. Aukštesnė gausa prie mažiausių amžių modelyje gali būti ir dėl masyvių, besisukančių žvaigždžių indėlio. Maiorca ir kt. (2012) modelyje, kuriame padidintos išeigos iš mažiausios masės ($M < 1,5M_{\odot}$) žvaigždžių, matomas tik nežymus augimas prie jauniausių amžių.

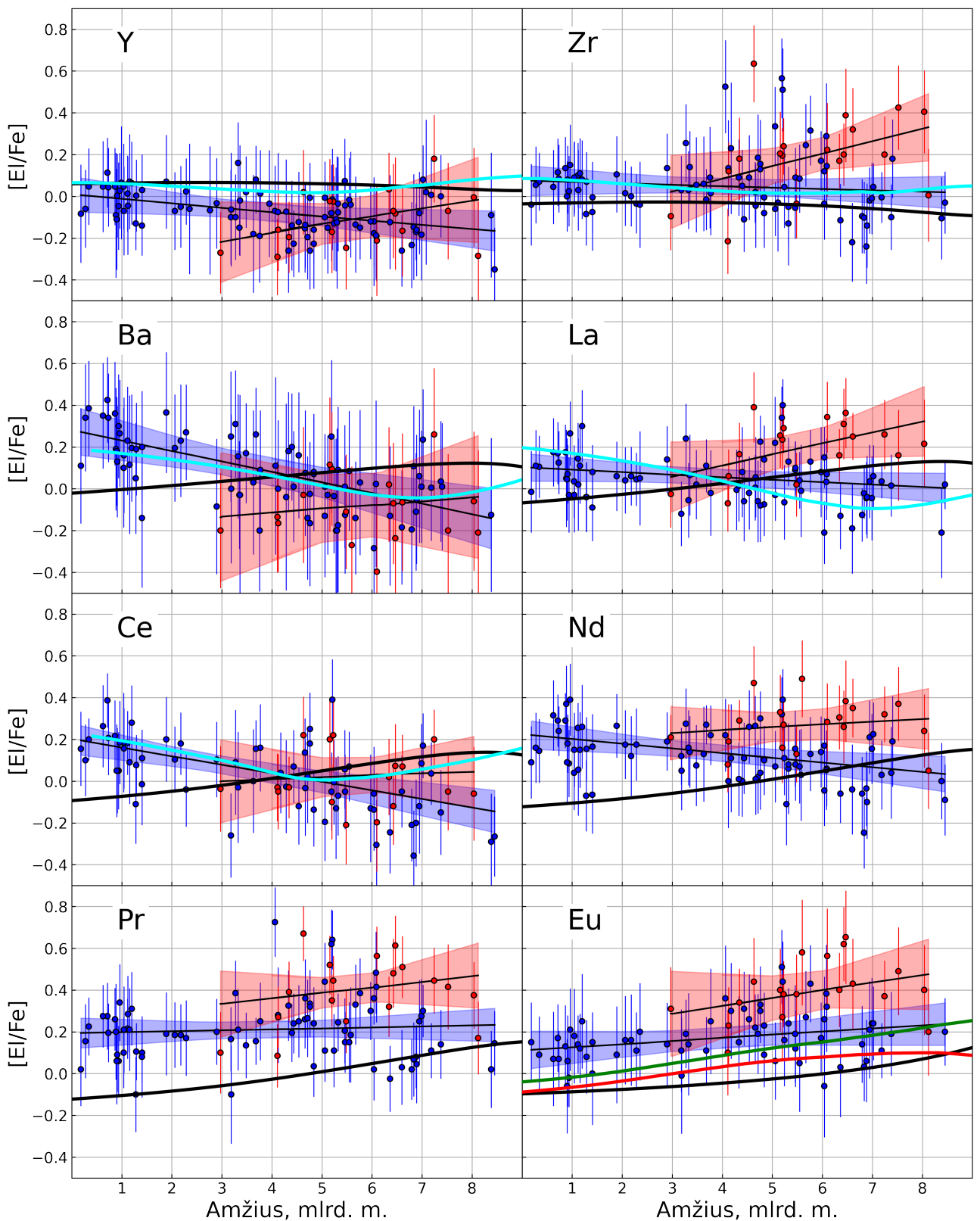
Zr, kaip aptarta 4.4 skyrelyje, pasižymi aukštesne r -proceso frakcija. Plonojo disko žvaigždėse matomas tik nežymus [Zr/Fe] didėjimas 8 – 1 mlrd. m. amžių intervale. Tai labiau patvirtina Kobayashi ir kt. (2020) išvadą, jog 44% Zr gaunama iš r -proceso. Prantzos ir kt. (2020) pasiūlyti 82% pagal darbe gautus rezultatus yra per didelė vertė. Prantzos ir kt. (2018) Zr modelio kitimo tendencija artima Y, tačiau rodo sistematiškai žemesnes vertes. Lyginant su darbe gautais rezultatais tai irgi matoma – visame amžių intervale modelio kitimo tendencija panaši, tačiau su sistematiškai žemesnėmis vertėmis. Prie žemesnių amžių taip gali būti dėl to, jog, kaip pateikta Prantzos ir kt. (2020), tik 18% Zr kilmės gaunama iš r -proceso. Prie jaunesnių amžių, tikėtina, nėra pakankamai įvertinama mažiausios masės žvaigždžių įtaka šio elemento produkcijai. Maiorca ir kt. (2012) modelis gana artimai atitinka šiame darbe gautų šio elemento gausų kitimą visame amžių intervale.

Darbe gautas [Ba/Fe] plonojo disko žvaigždžių kitimas ryškus. 8 – 1 mlrd. m. amžių intervale matomas > 0,3 [Ba/Fe] augimas link jaunausių amžių. Nors ir matomos nemažos paklaidos, dauguma jaunesnių už Saulę žvaigždžių rodo [Ba/Fe] > 0 gausas, o ypač tai išsiskiria jauniausiuose, < 2 mlrd. m. objektuose. Šis kitimas plonojo disko objektuose patvirtina, jog Ba gausos pasižymi žymia s -proceso įtaka, gaunama iš pagrindinės komponentės, mažos masės žvaigždžių (1.2.2 skyrelis). Prantzos ir kt.



11 pav. Darbe tirtų žvaigždžių gausų priklausomybė nuo R_{mean} . Žymėjimai analogiški 10 pav. Juodos linijos žymi abiejų diskų tiesines aproksimacijas. Mėlynos ir raudonos sritys – plonojo ir storojo disko žvaigždžių 95% pasikliautinumo intervalus.

(2018) modelis, nors ir numato net 88% Ba kilmės iš s -proceso (Prantzos ir kt. 2020), rodo mažėjimą link jauniausių objektų. Tikėtina, jog nemaža s -proceso indėlio modelyje gaunama ir iš masyvių, besisukančių žvaigždžių, lemia šio elemento padidėjimą prie mažesnių amžių, o mažiausios masės



12 pav. Darbe tirtų žvaigždžių gausų priklausomybė nuo amžiaus. Žydros kreivės žymi modelį iš Maiorca ir kt. (2012). Kiti žymėjimai analogiški 10-11 pav.

žvaigždės tokiu indėliu prie žemiausių amžių nepasižymi. Maiorca ir kt. (2012) modelio kitimas gana artimas darbe gautiems rezultatams ir patvirtina, jog šio elemento kilmė ir mažos masės žvaigždžių yra ryški.

Svarbu akcentuoti ir [Ba/Fe] paklaidas. Iš visų tirtų elementų, Ba suminės paklaidos gautos didžiausios. Taip yra dėl itin didelio Ba linijų jautrumo mikroturbulencijos greičiui (3.4 skyrelis). Kai kurie spektroskopiniai tyrimai yra pastebėję gana žymų Ba gausos padidėjimą, vadinamąją bario mįslę (angl. barium puzzle), ties jauniausiais objektais, gerokai ryškesnį negu kitiems *s*-proceso dominuojamiems elementams (žr. aptarimą Reddy ir Lambert (2017)). Visgi, Reddy ir Lambert (2017) pasiūlytas atsakymas teigia, jog Ba ryškus padidėjimas atsiranda dėl literatūroje naudojamos metodikos. Ba gausos dažniausiai nustatomos iš Ba II linijų, kurios susiformuoja viršutiniuose fotosferos sluoksniuose. Pavyzdžiui, darbe tirtų Ba II linijų 5853,68 Å ir 6496,90 Å optinis gylis gali būti atitinkamai $-1,9$ ir $-2,8$ ar net $-2,9$ ir $-4,9$, priklausomai nuo modelių (Reddy ir Lambert (2017) ir nuorodos jame). Reddy ir Lambert (2017) darbe taip pat pateikiama, jog atmosferos parametrų, reikalingų Ba gausos įvertinimui, suskaičiavimui naudojamos geležies linijos pasižymi didesniu, $-1,5$ optiniu gyliu, o kitų *s*-proceso cheminių elementų linijos – maždaug $-1,0$ optiniu gyliu. Kaip teigiama minėtame darbe, jaunos žvaigždės pasižymi aktyviomis fotosferomis ir tai lemia, jog nustatytas mikroturbulencijos greitis per žemas būtent Ba II linijoms. Šiame darbe nėra ištirta pačių jauniausių objektų ($< 0,1$ mlrd. m.), todėl šis reiškinys nėra tiek stipriai išreikštas. Visgi, tarp pačių jauniausių darbe tirtų žvaigždžių matomas Ba gausos padidėjimas nėra stipriai išsiskiriantis iš kitų antrojo *s*-proceso gūbrio elementų. Šiuo atveju bario gausos padidėjimas labiau atitinka astrofizikinius procesus, tai yra mažos masės žvaigždžių įtaką.

[La/Fe] kitimas plonojo disko žvaigždėse artimas [Zr/Fe]. Prie jauniausių objektų matoma $\sim 0,1$ dex, o prie seniausių – $\sim 0,0$ dex gausa. Taip pat, abiejuose elementuose senesnėse nei Saulės amžiaus žvaigždėse matomas nemažas žvaigždžių išsibarstymas. [La/Fe] gausos prie seniausių objektų rodo, jog *r*-proceso įtaka šiam elementui yra didesnė negu kituose *s*-proceso elementuose. Prie jauniausių amžių nematomas ryškus šio elementų praturtinimas. Rezultatai rodo, jog šio elemento kilmei didelę įtaką turėjo *r*-procesas, o indėlis iš mažiausios masės žvaigždžių nėra toks didelis kaip, pavyzdžiui, Ba ar Ce atveju. Prantzos ir kt. (2018) modelyje, kaip ir [Ba/Fe] atveju matomas mažėjimas link jaunesnių amžių, labiau tikėtinas dėl masyvesnių, besisukančių žvaigždžių įtakos prie senesnių amžių, o Prantzos ir kt. (2020) pasiūlyta 80% *s*-proceso kilmė šiam elementui neatitinka darbe gautų rezultatų ir labiau tikėtinas žemesnis *s*-proceso indėlis (Tautvaišienė ir kt. (2021), 4 lentelė). Maiorca ir kt. (2012) modelis kiek pervertina [La/Fe] gausas iš mažiausios masės žvaigždžių prie jauniausių objektų ir nepakankamai įvertina šio elemento produkciją prie seniausių objektų.

[Ce/Fe] kitimo tendencija tirtose plonojo disko žvaigždėse artimiausia [Ba/Fe]. Ties jauniausiais objektais pasiekiami $\sim 0,2$ dex vertė, o prie seniausių objektų matoma žemesnė negu Saulės gausa. Ši kitimo tendencija atitinka ryškia šio elemento kilmę iš *s*-proceso – $\geq 77\%$ (Tautvaišienė ir kt. (2021), 4 lentelė). Prantzos ir kt. (2018) modelyje [Ce/Fe] rodo mažėjimą link jaunesnių objektų ir, nors Prantzos ir kt. (2020) pateikta 85% *s*-proceso kilmė, tikėtina, jog modelyje nėra pakankamai įvertinama mažiausios masės žvaigždžių įtaka. Matomas gana artimas rezultatų atitikimas su Maiorca ir kt. (2012) modeliu ties jauniausiais objektais, tačiau modelis numato kiek aukštesnes gausas ties seniausiais objektais.

[Nd/Fe] atveju taip pat matomas padidėjimas ties jauniausiais amžiais, kaip ir [Ce/Fe] siekiantis $\sim 0,2$ dex. Visgi, ties seniausiais objektais dauguma žvaigždžių rodo artimas ar aukštesnes nei Saulės

gausas. Tai patvirtina gana nemažą šio elemento dalies kilmę iš r -proceso – ~40% (Tautvaišienė ir kt. (2021), 4 lentelė). Gautas padidėjimas prie jauniausių amžių galimas dėl mažos masės žvaigždžių indėlio. Galbūt dėl šios priežasties Prantzos ir kt. (2018) modelyje matomas gana stiprus neatitikimas su darbe gautais rezultatais prie jauniausių objektų.

[Pr/Fe] atveju gautas artimas praturtinimas prie jauniausių objektų kaip ir [Nd/Fe] atveju, tačiau nėra pastebimas mažėjimas prie senesnių objektų, tikėtina, dėl didesnės r -proceso įtakos šiam elementui – ~50% (Tautvaišienė ir kt. (2021), 4 lentelė). Visgi, [Pr/Fe] gausų kitimas daug artimesnis r -proceso dominuojamam europiui, kaip matoma ir grafikuose nuo metalingumo (10 pav.). Prantzos ir kt. (2018) modelis, artimas [Nd/Fe] modeliui, numato ryškesnę šio elemento mažėjimą link jauniausių objektų. [Pr/Fe] išsibarstymas tarp senesnių nei Saulės amžiaus objektų artimas [Zr/Fe]. [Pr/Fe] ~0,2 padidėjimas prie jauniausių objektų randamas ir Tautvaišienė ir kt. (2021) darbe.

[Eu/Fe] mažėjimas link jauniausių objektų atspindi šio elementų r -proceso kilmę – 2–6% (Tautvaišienė ir kt. (2021) 4 lentelė). ~0,1 dex padidėjimas prie jauniausių objektų yra didesnis, bet nežymiai, nei gautas, pavyzdžiui, Tautvaišienė ir kt. (2021), kur randamas kiek didesnis negu Saulės ([Eu/Fe] > 0) santykis. Gana aukštos gausos prie jauniausių objektų nesant didelio s -proceso indėlio į šio elemento gausas rodo apie potencialų papildomą, r -proceso šaltinį ar šaltinius prie MRSNe jaunesniuose amžiuose. Visi palyginamieji modeliai 12 pav. rodo ~0,2 dex mažesnę gausą ties jauniausiais objektais negu darbe gauti duomenys. Ties seniausiais amžiais, artimiausias sutapimas su modeliu iš Van der Swaelmen ir kt. (2023), 100% gausą numatančiu iš MRSNe. Modelis iš Van der Swaelmen ir kt. (2023) suskaičiuotas gaunant po 50% Eu gausos iš MRSNe ir NS-NS rodo sistematiškai žemesnes gausas negu šio darbo rezultatai.

Atsižvelgiant į gana dideles žvaigždžių amžiaus ir bei gausų paklaidas iš gana mažos storio disko žvaigždžių imties galima daryti tik orientacines išvadas. Didesne r -proceso frakcija pasižymintys elementų Zr, La, Nd, Pr ir Eu gausų santykiai [El/Fe] rodo padidėjimą prie seniausių objektų lyginant su plonojo disko objektais ir greitesnę storio disko evoliuciją. Iš šių elementų, Zr ir La pasižymi kiek mažesne r -proceso frakcija bei matomas šių elementų [El/Fe] santykio kritimas link jaunųjų objektų. Nd, Pr ir Eu santykiai [El/Fe] pasižymintys didesne r -proceso frakcija, rodo tik nežymų kritimą ir platesniame amžių intervale rodo vidutiniškai aukštesnes gausas negu plonojo disko žvaigždės. Likusių trijų, s -proceso dominuojamų elementų – Y, Ba ir Ce – [El/Fe] santykis prie senesnių objektų artimesnis plonojo disko žvaigždėms, o ypač tai matoma labiausiai s -proceso metu gaminamo bario atveju. Link jaunesnių objektų matomas nežymus gausos kritimas storajame diske.

Išvados

Spektroskopiškai ištyrus 113 Saulės aplinkos žvaigždžių nustatyta:

1. Darbu gauti pirmojo s -proceso gūbrio elementų Y ir Zr rezultatai artimi modeliui iš Kobayashi ir kt. (2020) ir patvirtina šių elementų atitinkamai $\sim 22\%$ ir $\sim 44\%$ gausų indėlius iš r -proceso, likusią gausą gaunant iš s -proceso asimptotinės milžinių sekos žvaigždžių.
2. Darbu nustatytos antrojo s -proceso gūbrio elementų Ba, La ir Ce gausos artimos Prantzos ir kt. (2018) modeliui ir patvirtina $\sim 89\%$ bario, 80% lantano ir $\sim 85\%$ cerio kilmę iš s -proceso.
3. Mišrios kilmės neodimio darbu gautos gausos artimos Prantzos ir kt. (2018) modeliui ties didesniais metalingumais, tačiau gausų padidėjimas prie žemesnių metalingumų rodo, kad galima ir kiek aukštesnė šio elemento kilmė iš r -proceso nei 38% . Gauti praeodimio rezultatai prie mažesnių metalingumų rodo aukštesnes gausas nei siūlomos modelių ir numato didesnę šio elemento r -proceso frakciją negu 46% .
4. Darbe gauti europio rezultatai patvirtina aiškia r -proceso kilmę bei palaiko modelius, numatančius, kad pagrindinė šio elemento r -proceso kilmė yra magnetorotacinės supernovos.
5. Plonajame diske gaunamos neigiamos priklausomybės nuo amžiaus visiems s -proceso dominuojamiems elementams, ypač bariui. r -proceso dominuojamo europio gausos kitimas nuo amžiaus teigiamas. Nors darbe tirtų storjo disko žvaigždžių imtis nėra didelė, visiems tirtiems elementams gradientas galimai nežymiai teigiamas.

Literatūra

- Anders, F., Khalatyan, A., Chiappini, C., ir kt. 2019, A&A, 628, A94
- Bailer-Jones, C., Rybizki, J., Fouesneau, M., Demleitner, M., ir Andrae, R. 2021, AJ, 161, 147
- Bailer-Jones, C., Rybizki, J., Fouesneau, M., Mantelet, G., ir Andrae, R. 2018, AJ, 156, 58
- Battino, U., Lederer-Woods, C., Cseh, B., Denissenkov, P., ir Herwig, F. 2021, Universe, 7
- Battistini, C. ir Bensby, T. 2016, A&A, 586, A49
- Bensby, T., Alves-Brito, A., Oey, M., Yong, D., ir Meléndez, J. 2010, A&A, 516, L13
- Bensby, T., Feltzing, S., ir Lundström, I. 2003, A&A, 410, 527
- Bensby, T., Feltzing, S., Lundström, I., ir Ilyin, I. 2005, A&A, 433, 185
- Bensby, T., Feltzing, S., ir Oey, M. 2014, A&A, 562, A71
- Bisterzo, S., Travaglio, C., Gallino, R., Wiescher, M., ir Käppeler, F. 2014, ApJ, 787, 10
- Bisterzo, S., Travaglio, C., Wiescher, M., Käppeler, F., ir Gallino, R. 2017, ApJ, 835, 97
- Bossini, D., Vallenari, A., Bragaglia, A., ir kt. 2019, A&A, 623, A108
- Bovy, J. 2015, ApJS, 216, 29
- Bovy, J., Allende Prieto, C., Beers, T. C., ir kt. 2012, ApJ, 759, 131
- Buntain, J. F., Doherty, C. L., Lugaro, M., ir kt. 2017, MNRAS, 471, 824
- Burbidge, E. M., Burbidge, G., Fowler, W. A., ir Hoyle, F. 1957, Rev. Mod. Phys., 29, 547
- Busso, M., Gallino, R., Lambert, D. L., Travaglio, C., ir Smith, V. V. 2001, ApJ, 557, 802
- Casali, G., Spina, L., Magrini, L., ir kt. 2020, A&A, 639, A127
- Casamiquela, L., Soubiran, C., Jofré, P., ir kt. 2021, A&A, 652, A25
- Chiappini, C. 2009, in *The Galaxy Disk in Cosmological Context*, ed. J. Andersen, Nordströara, B. M., ir J. Bland-Hawthorn, Vol. 254, 191–196
- Côté, B., Denissenkov, P., Herwig, F., ir kt. 2018a, ApJ, 854, 105
- Côté, B., Eichler, M., Arcones, A., ir kt. 2019, ApJ, 875, 106
- Côté, B., Fryer, C. L., Belczynski, K., ir kt. 2018b, ApJ, 855, 99
- Cowan, J. J. ir Rose, W. K. 1977, ApJ, 212, 149
- Cowan, J. J., Sneden, C., Lawler, J. E., ir kt. 2021, Rev. Mod. Phys., 93, 15002

Cristallo, S., Abia, C., Straniero, O., ir Piersanti, L. 2015a, ApJ, 801, 53

Cristallo, S., Piersanti, L., Straniero, O., ir kt. 2011, ApJS, 197, 17

Cristallo, S., Straniero, O., Piersanti, L., ir Gobrecht, D. 2015b, ApJS, 219, 40

Cseh, B., Lugaro, M., D'Orazi, V., ir kt. 2018, A&A, 620, A146

Cutri, R. M., Wright, E. L., Conrow, T., ir kt. 2021, VizieR Online Data Catalog, II/328

da Silva, R., Porto de Mello, G., Milone, A., ir kt. 2012, A&A, 542, A84

Delgado Mena, E., Moya, A., Adibekyan, V., ir kt. 2019, A&A, 624, A78

Delgado Mena, E., Tsantaki, M., Adibekyan, V. Z., ir kt. 2017, A&A, 606, A94

Do, T., Hees, A., Ghez, A., ir kt. 2019, Science, 365, 664

Feltzing, S., Howes, L. M., McMillan, P. J., ir Stonkutė, E. 2017, MNRAS, 465, L109

Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D., ir Goodman, J. 2013, PASP, 125, 306

Fruity internetinis puslapis. [Žr. 2023-05-08], Full-Network Repository of Updated Isotopic Tables & Yields, <http://fruity.oa-teramo.inaf.it/>

Gaia Collaboration, Brown, A., Vallenari, A., ir kt. 2021, A&A, 649, A1

Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., ir kt. 2018a, A&A, 616, A1

Gaia Collaboration, Katz, D., Antoja, T., ir kt. 2018b, A&A, 616, A11

Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J., ir kt. 2016, A&A, 595, A1

Gaia Collaboration, Vallenari, A., Brown, A. G. A., ir kt. 2022, arXiv e-prints, arXiv:2208.00211

Gaia internetinis puslapis. [Žr. 2023-05-13], Expected Science Performance for the nominal and the extended mission based on GAIA (E)DR3, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/science-performance>

Gilmore, G. ir Reid, N. 1983, MNRAS, 202, 1025

Goriely, S., Siess, L., ir Choplin, A. 2021, A&A, 654, A129

Gravity Collaboration, Abuter, R., Amorim, A., ir kt. 2019, A&A, 625, L10

Grevesse, N., Asplund, M., ir Sauval, A. 2007, Space Sci. Rev., 130, 105

Gustafsson, B., Edvardsson, B., Eriksson, K., ir kt. 2008, A&A, 486, 951

Haynes, C. J. ir Kobayashi, C. 2019, MNRAS, 483, 5123

Heiter, U., Lind, K., Asplund, M., ir kt. 2015, Phys. Scr., 90, 54010

Helmi, A. 2020, ARAA, 58, 205

Joshi, Y. 2007, MNRAS, 378, 768

Jurgenson, C., Fischer, D., McCracken, T., ir kt. 2016, JAI, 5, 1650003

Jurgenson, C. A., Fischer, D. A., McCracken, T. M., ir kt. 2014, Proc. SPIE, 9147, 91477F

Kajino, T., Aoki, W., Balantekin, A., ir kt. 2019, PrPNP, 107, 109

Kappeler, F., Beer, H., ir Wisshak, K. 1989, Rep. Prog. Phys., 52, 945

Käppeler, F., Gallino, R., Bisterzo, S., ir Aoki, W. 2011, Rev. Mod. Phys., 83, 157

Karakas, A. I., Lattanzio, J. C., ir Pols, O. R. 2002, PASA, 19, 515

Karakas, A. I. ir Lugaro, M. 2016, ApJ, 825, 26

Kilic, M., Munn, J. A., Harris, H. C., ir kt. 2017, ApJ, 837, 162

Kobayashi, C., Karakas, A. I., ir Lugaro, M. 2020, ApJ, 900, 179

Koposov, S. E., Rix, H.-W., ir Hogg, D. W. 2010, ApJ, 712, 260

Kordopatis, G., Schultheis, M., McMillan, P. J., ir kt. 2023, A&A, 669, A104

Kusakabe, M., Iwamoto, N., ir Nomoto, K. 2011, ApJ, 726, 25

Lagarde, N., Reylé, C., Chiappini, C., ir kt. 2021, A&A, 654, A13

Leung, H. W., Bovy, J., Mackereth, J. T., ir kt. 2022, arXiv e-prints, arXiv:2204.12551

Li, C., Zhao, G., Zhai, M., ir Jia, Y. 2018, ApJ, 860, 53

Lodders, K. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1912.00844

Lugaro, M., Davis, A. M., Gallino, R., ir kt. 2003a, ApJ, 593, 486

Lugaro, M., Herwig, F., Lattanzio, J. C., Gallino, R., ir Straniero, O. 2003b, ApJ, 586, 1305

Magrini, L., Spina, L., Randich, S., ir kt. 2018, A&A, 617, A106

Magrini, L., Vescovi, D., Casali, G., ir kt. 2021, A&A, 646, L2

Magrini, L., Viscasillas Vázquez, C., Spina, L., ir kt. 2023, A&A, 669, A119

Maiorca, E., Magrini, L., Busso, M., ir kt. 2012, ApJ, 747, 53

Mashonkina, L., Neretina, M., Sitnova, T., ir Pakhomov, Y. V. 2019, Astron. Rep., 63, 726

Masseron, T. ir Gilmore, G. 2015, MNRAS, 453, 1855

Matteucci, F. 2016, in Journal of Physics: Conference Series, Vol. 703, Journal of Physics Conference Series, 012004

Matteucci, F., Romano, D., Arcones, A., Korobkin, O., ir Rosswog, S. 2014, MNRAS, 438, 2177

Miglio, A., Chiappini, C., Mosser, B., ir kt. 2017, Astron. Nachr., 338, 644

Mikolaitis, Drazdauskas, A., Minkevičiūtė, R., ir kt. 2019, Astronomy and Astrophysics, 628, 1

Mikolaitis, Š., de Laverny, P., Recio-Blanco, A., ir kt. 2017, A&A, 600, A22

Mikolaitis, Š., Hill, V., Recio-Blanco, A., ir kt. 2014, A&A, 572, A33

Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Drazdauskas, A., ir kt. 2018, PASP, 130, 1

Mints, A. ir Hekker, S. 2017, A&A, 604, A108

Monteiro, H. ir Dias, W. 2019, MNRAS, 487, 2385

Nissen, P. 2015, A&A, 579, A52

Nissen, P., Christensen-Dalsgaard, J., Mosumgaard, J., ir kt. 2020, A&A, 640, A81

Nissen, P., Silva Aguirre, V., Christensen-Dalsgaard, J., ir kt. 2017, A&A, 608, A112

NuGrid internetinis puslapis. [Žr. 2023-05-08], NuGrid Data Releases, <https://nugrid.github.io/content/data.html>

Nykytyuk, T. ir Mishenina, T. 2006, A&A, 456, 969

Park, M. J., Yi, S. K., Peirani, S., ir kt. 2021, ApJS, 254, 2

Pignatari, M., Gallino, R., Heil, M., ir kt. 2010, ApJ, 710, 1557

Plez, B. 2012, Turbospectrum: Code for spectral synthesis, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1205.004

Prantzos, N., Abia, C., Cristallo, S., Limongi, M., ir Chieffi, A. 2020, MNRAS, 491, 1832

Prantzos, N., Abia, C., Limongi, M., Chieffi, A., ir Cristallo, S. 2018, MNRAS, 476, 3432

Qin, S., Zhong, J., Tang, T., ir Chen, L. 2023, ApJS, 265, 12

Raiteri, C., Gallino, R., ir Busso, M. 1992, ApJ, 387, 263

Raiteri, C. M., Busso, M., Gallino, R., Picchio, G., ir Pulone, L. 1991, ApJ, 367, 228

Rauer, H., Catala, C., Aerts, C., ir kt. 2014, ExA, 38, 249

Recio-Blanco, A., de Laverny, P., Kordopatis, G., ir kt. 2014, A&A, 567, A5

Reddy, A. B. S. ir Lambert, D. L. 2017, ApJ, 845, 151

Reid, M. ir Dame, T. 2016, ApJ, 832, 159

Ricker, G. R., Winn, J. N., Vanderspek, R., ir kt. 2014, JATIS, 1, 014003

Rojas-Arriagada, A., Recio-Blanco, A., de Laverny, P., ir kt. 2016, A&A, 586, A39

Schönrich, R. 2012, MNRAS, 427, 274

Schönrich, R., Binney, J., ir Dehnen, W. 2010, MNRAS, 403, 1829

Seeger, P. A., Fowler, W. A., ir Clayton, D. D. 1965, ApJS, 11, 121

Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., ir kt. 2006, AJ, 131, 1163

Slumstrup, D., Grundahl, F., Brogaard, K., ir kt. 2017, A&A, 604, L8

Snedden, C. A. 1973, PhD thesis, THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN.

Soubiran, C., Bienaymé, O., ir Siebert, A. 2003, A&A, 398, 141

Spina, L., Meléndez, J., Karakas, A., ir kt. 2016, A&A, 593, A125

Spina, L., Meléndez, J., Karakas, A. I., ir kt. 2018, MNRAS, 474, 2580

Stetson, P. B. ir Pancino, E. 2008, PASP, 120, 1332

Tautvaišienė, G., Barisevičius, G., Chorniy, Y., Ilyin, I., ir Puzeras, E. 2013, MNRAS, 430, 621

Tautvaišienė, G., Drazdauskas, A., Bragaglia, A., Randich, S., ir Ženovienė, R. 2016, A&A, 595, A16

Tautvaišienė, G., Drazdauskas, A., Mikolaitis, Š., ir kt. 2015, A&A, 573, A55

Tautvaišienė, G., Edvardsson, B., Puzeras, E., ir Ilyin, I. 2005, A&A, 431, 933

Tautvaišienė, G., Edvardsson, B., Tuominen, I., ir Ilyin, I. 2000, A&A, 360, 499

Tautvaišienė, G., Mikolaitis, Š., Drazdauskas, A., ir kt. 2020, ApJS, 248, 19

Tautvaišienė, G., Mikolaitis, Š., Drazdauskas, A., ir kt. 2022, ApJS, 259, 45

Tautvaišienė, G., Viscasillas Vázquez, C., Mikolaitis, Š., ir kt. 2021, A&A, 649, A126

TESS internetinis puslapis. [Žr. 2023-04-24], TESS begins its second extended mission, <https://tess.mit.edu/news/tess-begins-its-second-extended-mission/>

Titarenko, A., Recio-Blanco, A., de Laverny, P., Hayden, M., ir Guiglion, G. 2019, A&A, 622, A59

Travaglio, C., Gallino, R., Arnone, E., ir kt. 2004, ApJ, 601, 864

Tucci Maia, M., Ramirez, I., Meléndez, J., ir kt. 2016, A&A, 590, A32

Van der Swaelmen, M., Viscasillas Vázquez, C., Cescutti, G., ir kt. 2023, A&A, 670, A129

Vieira, K., Carraro, G., Korchagin, V., ir kt. 2022, ApJ, 932, 28

Viscasillas Vázquez, C., Magrini, L., Casali, G., ir kt. 2022, A&A, 660, A135

Xiang, M. ir Rix, H.-W. 2022, Nature, 603, 599

Neutron capture chemical element abundances in field stars of the northern sky

Vilius Bagdonas

Summary

New astronomical data is constantly being released. New Gaia data releases have already provided us with information for almost 2 billion stars and more new data will reach us in upcoming years. On the other hand, spectroscopic investigations are available for much smaller samples. Thus, spectroscopic investigations are needed in order to gain better insight into the evolution of stars and the Galaxy. A chemical element group beyond iron, the so-called neutron-capture chemical elements, are even less studied. As this group of elements is very wide and elements are made in very diverse conditions, these elements can provide new perspectives to better understand the Galaxy. However, theoretical modeling and spectroscopic investigations of these elements in many cases do not come to the same conclusions.

In this study, 113 stars in the Solar neighbourhood, 94 of which belong to the thin and 19 – to the thick disc, were spectroscopically studied and abundances of 8 neutron capture chemical elements – yttrium, zirconium, barium, lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium and europium – were determined. In addition, ages and kinematical parameters were derived as well.

Comparing abundances results of this work with models from Prantzos *et al.* (2018); Kobayashi *et al.* (2020); Van der Swaelmen *et al.* (2023), it was concluded that elements belonging to the first *s*-process peak, Y and Zr, have *r*-process origin of ~22% and ~44%, respectively with the remaining part produced from *s*-process in asymptotic giant branch stars. A large *s*-process contribution of ~89%, ~80% and ~85% is confirmed for Ba, La and Ce, elements from the second *s*-process peak. Higher *r*-process contribution than suggested in literature (38% and 46%) is also proposed for Nd and Pr. Especially Pr shows europium-like behaviour. Results from this work support the models which suggest that the Eu origins primarily from magneto-rotational supernova.

In the thin disc, negative tendencies with age are found for all *s*-process dominated elements, especially for barium, while *r*-process dominated europium shows a positive trend. The thick disc star sample is rather small, however for all investigated elements positive gradients with age can be inferred.

Priedas 1. Darbe naudoti žvaigždžių atmosferos parametrai

5 lentelė. Darbe naudoti atmosferos parametrai iš Tautvaišienė ir kt. (2022)

ID	T_{eff} (K)	$\log g$	[Fe/H] (dex)	v_t (km/s)
Plonasis diskas				
TYC4230-423-1	4163±92	1,77±0,2	-0,56±0,12	2,11±0,29
TYC3891-872-1	4537±65	2,35±0,19	-0,1±0,11	1,46±0,21
TYC3928-1045-1	4871±49	2,76±0,2	-0,11±0,1	1,54±0,19
TYC3903-116-1	4747±61	2,75±0,23	-0,18±0,12	1,61±0,25
TYC4244-602-1	4594±49	2,44±0,18	-0,47±0,1	1,49±0,17
TYC4415-613-1	4864±45	2,61±0,2	-0,23±0,1	1,48±0,18
TYC3884-1083-1	4186±72	2,39±0,14	-0,07±0,09	1,61±0,22
TYC3903-1856-1	4461±72	2,8±0,18	-0,03±0,11	1,38±0,24
TYC3882-1349-1	4645±59	2,77±0,17	-0,05±0,1	1,45±0,19
TYC4245-76-1	5006±47	2,79±0,22	-0,15±0,1	1,36±0,18
TYC3882-2598-1	4708±60	2,72±0,22	-0,32±0,12	1,58±0,23
TYC4231-408-1	4971±40	2,52±0,2	-0,2±0,09	1,6±0,17
TYC4591-1121-1	4926±55	3,13±0,22	-0,1±0,11	1,44±0,27
TYC4592-1006-1	4401±60	2,14±0,17	-0,35±0,1	1,48±0,18
TYC3887-1149-1	4865±39	2,26±0,19	-0,24±0,09	1,61±0,16
TYC3522-376-1	4767±65	3,03±0,23	0,13±0,12	1,48±0,27
TYC3883-625-1	4906±51	2,83±0,21	-0,12±0,11	1,34±0,21
TYC4414-2315-1	4212±69	2,06±0,17	-0,31±0,1	1,75±0,25
TYC3925-41-1	4600±63	2,64±0,22	-0,21±0,12	1,44±0,23
TYC4411-1671-1	4877±48	2,8±0,19	0,07±0,1	1,23±0,19
TYC4237-796-1	4612±68	2,64±0,2	-0,46±0,11	1,7±0,22
TYC3886-370-1	4329±53	2,02±0,15	-0,43±0,09	1,56±0,17
TYC4184-1637-1	4847±49	2,5±0,24	-0,37±0,12	1,43±0,2
TYC3537-1830-1	4177±61	1,97±0,17	-0,41±0,1	1,46±0,18
TYC3520-1857-1	4955±57	2,82±0,23	-0,42±0,11	1,46±0,23
TYC3943-2200-1	4756±57	2,61±0,25	-0,41±0,13	1,3±0,22
TYC4187-1365-1	6047±87	3,86±0,3	-0,01±0,11	1,6±0,38
TYC4579-262-1	4729±56	2,52±0,19	-0,3±0,1	1,37±0,18
TYC3879-720-1	4670±54	2,25±0,22	-0,46±0,11	1,32±0,2
TYC4648-1723-1	5055±55	2,74±0,26	-0,31±0,12	1,49±0,23
TYC3532-2085-1	4777±61	2,67±0,24	-0,21±0,12	1,32±0,22
TYC4597-1692-1	4888±47	2,72±0,21	-0,32±0,1	1,47±0,19
TYC4562-2664-1	4866±62	3,15±0,24	0,03±0,12	1,21±0,3
TYC4464-1666-1	4493±61	2,43±0,19	-0,22±0,11	1,53±0,22

5 lentelė. Darbe naudoti atmosferos parametrai iš Tautvaišienė ir kt. (2022)

ID	T_{eff} (K)	$\log g$	[Fe/H] (dex)	v_t (km/s)
TYC3516-967-1	4795±45	2,55±0,19	-0,32±0,1	1,3±0,16
TYC3505-1606-1	4910±54	2,61±0,24	-0,15±0,12	1,6±0,21
TYC3529-1303-1	4655±58	2,38±0,21	-0,15±0,11	1,42±0,2
TYC3504-310-1	4696±64	2,69±0,2	-0,36±0,11	1,5±0,24
TYC4603-349-1	4601±62	2,32±0,18	-0,45±0,1	1,5±0,2
TYC3530-1182-1	4893±45	2,65±0,2	-0,13±0,1	1,28±0,19
TYC3875-1620-1	4509±53	2,57±0,15	-0,11±0,09	1,35±0,18
TYC4559-2247-1	4701±57	2,81±0,2	-0,2±0,11	1,31±0,21
TYC3514-1114-1	4635±58	2,46±0,24	-0,55±0,12	1,26±0,2
TYC3550-1637-1	4514±59	2,29±0,18	-0,2±0,1	1,58±0,23
TYC3935-2415-1	4381±95	2,9±0,18	0,07±0,11	1,53±0,31
TYC4598-1212-1	4660±55	2,39±0,18	-0,15±0,1	1,29±0,18
TYC3962-1323-1	4790±45	2,09±0,18	-0,29±0,09	1,8±0,18
TYC3515-108-1	4477±61	2,29±0,19	-0,35±0,11	1,43±0,23
TYC4180-495-1	4428±64	2,02±0,21	-0,29±0,12	1,49±0,2
TYC3504-1136-1	4667±60	2,63±0,2	-0,44±0,1	1,47±0,21
TYC4246-1083-1	4151±79	2,05±0,19	-0,35±0,12	1,78±0,28
TYC3498-1812-1	4423±75	2,27±0,19	-0,52±0,1	1,56±0,23
TYC4179-1155-1	5924±81	4,07±0,3	0,05±0,12	1,3±0,38
TYC3549-2762-1	4330±78	2,29±0,19	-0,42±0,11	1,62±0,26
TYC4256-2045-1	5008±49	2,98±0,21	-0,21±0,1	1,35±0,2
TYC3874-823-1	4636±48	2,51±0,18	-0,27±0,1	1,37±0,16
TYC4179-1062-1	4323±59	2,0±0,18	-0,38±0,11	1,63±0,19
TYC4634-1355-1	4299±59	1,7±0,16	-0,58±0,09	1,62±0,16
TYC4261-924-1	4537±133	3,01±0,2	-0,63±0,11	2,13±0,37
TYC4256-2394-1	4883±58	3,11±0,19	-0,32±0,09	1,34±0,23
TYC4406-646-1	4942±46	2,73±0,21	-0,35±0,1	1,41±0,19
TYC3526-2653-1	4354±70	2,0±0,2	-0,3±0,11	1,57±0,22
TYC4561-2319-1	4888±42	2,72±0,18	-0,12±0,09	1,41±0,17
TYC4638-1685-1	4866±64	3,03±0,24	0,09±0,12	1,46±0,27
TYC3565-1015-1	4364±68	2,01±0,19	-0,51±0,11	1,7±0,21
TYC3547-765-1	4722±62	2,77±0,18	-0,18±0,09	1,57±0,2
TYC3869-494-1	4558±65	2,74±0,19	0,09±0,11	1,5±0,25
TYC4248-783-1	4624±61	2,68±0,19	-0,15±0,1	1,31±0,22
TYC4475-2118-1	4924±49	2,59±0,21	-0,15±0,11	1,61±0,18
TYC4471-1685-1	5022±39	2,46±0,19	-0,33±0,09	1,69±0,17
TYC3571-1329-1	4798±61	2,76±0,22	0,03±0,12	1,7±0,24
TYC4561-2318-1	5470±62	3,19±0,29	0,0±0,12	1,56±0,28

5 lentelė. Darbe naudoti atmosferos parametrai iš Tautvaišienė ir kt. (2022)

ID	T_{eff} (K)	$\log g$	[Fe/H] (dex)	v_t (km/s)
TYC4173-746-1	4843±49	2,49±0,23	-0,33±0,12	1,44±0,2
TYC4600-64-1	4227±79	1,93±0,18	-0,58±0,11	2,16±0,3
TYC3526-175-1	5908±84	4,01±0,26	-0,25±0,1	1,1±0,4
TYC4654-874-1	4478±57	2,11±0,17	-0,22±0,09	1,36±0,16
TYC4613-728-1	4613±63	2,71±0,2	-0,12±0,11	1,59±0,27
TYC4609-1176-1	4943±47	2,68±0,21	-0,09±0,1	1,29±0,18
TYC4248-1004-1	4329±178	1,76±0,21	-0,28±0,12	2,42±0,32
TYC4650-3036-1	4045±67	1,96±0,16	-0,033±0,1	1,6±0,23
TYC4609-738-1	4601±62	2,58±0,21	-0,1±0,11	1,4±0,22
TYC4467-461-1	5168±70	3,35±0,26	-0,02±0,12	2,28±0,36
TYC4249-597-1	6274±100	4,03±0,27	0,11±0,1	1,6±0,37
TYC4253-2137-1	6135±99	4,22±0,26	-0,23±0,1	1,24±0,4
TYC4633-1787-1	4686±58	2,53±0,22	-0,22±0,12	1,51±0,21
TYC3561-560-1	4404±102	2,52±0,22	-0,383±0,13	2,06±0,33
TYC3585-357-1	4755±48	2,57±0,19	-0,3±0,1	1,31±0,17
TYC3956-817-1	4447±86	2,12±0,2	-0,29±0,11	1,81±0,28
TYC4463-605-1	6062±78	3,97±0,24	-0,21±0,09	1,68±0,4
TYC3561-1329-1	4969±47	2,29±0,25	-0,26±0,12	1,83±0,21
TYC3110-590-1	4625±59	1,84±0,2	-0,12±0,11	1,84±0,2
TYC3965-1025-1	4276±69	2,07±0,2	-0,31±0,12	1,61±0,23
TYC4601-2782-1	5239±61	3,3±0,27	-0,02±0,12	1,2±0,27
TYC3489-1588-1	5182±52	3,07±0,26	-0,14±0,12	1,21±0,22
Storasis diskas				
TYC4241-1593-1	4239±81	2,55±0,16	-0,29±0,1	1,72±0,29
TYC3883-285-1	4168±124	2,39±0,2	-0,523±0,12	2,12±0,31
TYC3925-404-1	4074±91	2,07±0,21	-0,733±0,12	2,31±0,33
TYC4232-3063-1	4071±58	1,59±0,17	-0,57±0,1	1,82±0,2
TYC4460-1974-1	4347±55	2,34±0,18	-0,4±0,11	1,5±0,2
TYC3532-1939-1	4599±94	2,63±0,19	-0,58±0,1	2,46±0,31
TYC4186-421-1	4786±50	2,43±0,24	-0,6±0,12	1,55±0,22
TYC4183-1378-1	4736±50	2,66±0,22	-0,33±0,11	1,24±0,2
TYC3873-1890-1	4173±63	1,51±0,19	-0,57±0,11	1,76±0,2
TYC4561-2317-1	4172±66	1,76±0,15	-0,51±0,09	1,82±0,19
TYC3531-2205-1	4114±66	1,78±0,2	-0,56±0,12	1,72±0,21
TYC4260-2573-1	4357±81	2,7±0,18	-0,35±0,1	1,75±0,3
TYC3958-1062-1	4040±68	1,91±0,18	-0,69±0,11	1,81±0,23
TYC3964-159-1	4207±70	1,82±0,21	-0,64±0,12	2,06±0,26
TYC4564-626-1	4142±78	1,54±0,18	-0,82±0,1	2,23±0,28

5 lentelė. Darbe naudoti atmosferos parametrai iš Tautvaišienė ir kt. (2022)

ID	T_{eff} (K)	$\log g$	[Fe/H] (dex)	v_t (km/s)
TYC4561-393-1	4353±84	2,5±0,19	-0,33±0,11	2,14±0,28
TYC4637-532-1	4411±55	2,12±0,19	-0,52±0,11	1,53±0,18
TYC4480-1543-1	4491±75	2,67±0,17	-0,25±0,09	1,71±0,25
TYC3099-1640-1	4544±96	3,12±0,18	0,01±0,1	1,74±0,33

Priedas 2. Darbe nustatyti žvaigždžių kinematiniai parametrai

6 lentelė. Darbe nustatyti žvaigždžių kinematiniai parametrai

TYC	R_{mean} (kpc)	Z_{max} (kpc)	U (km/s)	V (km/s)	W (km/s)	TD/D
Plonasis diskas						
4230-423-1	7,848±0,005	0,156±0,001	22,68±0,13	-4,62±0,13	-0,31±0,09	0,01
3891-872-1	8,15±0,005	0,148±0,001	39,59±0,09	3,3±0,12	-6,1±0,09	0,02
3928-1045-1	7,979±0,008	0,095±0,002	40,15±0,28	-1,05±0,19	-5,14±0,12	0,01
3903-116-1	8,203±0,006	0,202±0,001	17,94±0,04	5,38±0,14	-9,1±0,09	0,01
4244-602-1	8,055±0,011	0,151±0,001	-84,18±0,38	-24,74±0,17	4,68±0,08	0,11
4415-613-1	7,948±0,004	0,15±0,0	27,05±0,06	-2,69±0,1	1,73±0,09	0,01
3884-1083-1	7,723±0,044	0,281±0,004	16,86±0,14	-7,56±1,18	0,44±1,03	0,01
3903-1856-1	7,812±0,007	0,174±0,001	12,33±0,05	-4,11±0,18	-3,95±0,1	0,01
3882-1349-1	7,941±0,004	0,187±0,001	-14,54±0,09	-4,24±0,11	1,93±0,09	0,01
4245-76-1	7,899±0,005	0,172±0,001	43,76±0,17	-5,23±0,13	8,89±0,06	0,02
3882-2598-1	8,154±0,005	0,179±0,002	35,8±0,19	3,33±0,12	-11,04±0,11	0,02
4231-408-1	7,942±0,006	0,225±0,002	29,48±0,12	-2,8±0,15	-11,06±0,09	0,01
4591-1121-1	8,115±0,005	0,216±0,001	-1,65±0,06	-1,14±0,11	-11,12±0,07	0,01
4592-1006-1	8,014±0,006	0,41±0,003	-29,54±0,16	-9,21±0,15	21,3±0,14	0,02
3887-1149-1	8,101±0,005	0,371±0,003	-20,89±0,22	-0,97±0,14	13,38±0,11	0,01
3522-376-1	7,958±0,011	0,288±0,006	9,97±0,13	-1,57±0,28	18,63±0,32	0,02
3883-625-1	7,915±0,005	0,219±0,002	8,45±0,02	-2,96±0,12	12,21±0,12	0,01
4414-2315-1	8,162±0,005	0,164±0,002	10,18±0,09	2,59±0,12	-8,59±0,12	0,01
3925-41-1	7,803±0,005	0,092±0,0	4,99±0,03	-5,44±0,14	2,86±0,05	0,01
4411-1671-1	7,659±0,006	0,174±0,001	58,96±0,29	-12,72±0,18	6,65±0,13	0,03
4237-796-1	8,1±0,006	0,383±0,002	5,37±0,04	-0,22±0,14	23,3±0,09	0,02
3886-370-1	7,937±0,005	0,237±0,001	52,14±0,21	-2,56±0,13	-1,5±0,11	0,02
4184-1637-1	7,844±0,009	0,461±0,005	70,59±0,21	-10,25±0,22	25,87±0,21	0,11
3537-1830-1	7,91±0,005	0,163±0,001	-14,37±0,11	-4,28±0,12	5,63±0,06	0,01
3520-1857-1	8,161±0,005	0,233±0,001	-26,13±0,14	-0,31±0,11	-8,78±0,08	0,01
3943-2200-1	7,826±0,054	0,98±0,042	-74,14±2,36	-28,76±0,39	-43,17±1,04	1,45
4187-1365-1	7,814±0,004	0,288±0,002	-50,55±0,09	-16,65±0,1	-17,01±0,12	0,03
4579-262-1	7,877±0,006	0,648±0,002	-40,11±0,13	-16,24±0,13	-32,43±0,08	0,08
3879-720-1	8,098±0,008	0,682±0,004	6,52±0,05	0,14±0,18	35,16±0,16	0,06
4648-1723-1	8,093±0,01	0,166±0,001	43,49±0,21	-1,75±0,25	2,02±0,15	0,02
3532-2085-1	7,876±0,004	0,125±0,0	3,17±0,05	-2,92±0,11	-2,71±0,06	0,01
4597-1692-1	8,157±0,005	0,281±0,001	36,62±0,09	1,33±0,12	-17,28±0,08	0,02
4562-2664-1	7,7±0,004	0,102±0,001	4,63±0,05	-9,12±0,11	-5,87±0,09	0,01
4464-1666-1	8,162±0,005	0,131±0,001	36,46±0,08	2,24±0,11	7,83±0,04	0,01

6 lentelė. Darbe nustatyti žvaigždžių kinematiniai parametrai

TYC	R_{mean} (kpc)	Z_{max} (kpc)	U (km/s)	V (km/s)	W (km/s)	TD/D
3516-967-1	8,198±0,006	0,417±0,002	22,51±0,04	4,83±0,14	-23,55±0,11	0,03
3505-1606-1	8,11±0,004	0,253±0,001	16,01±0,03	2,96±0,1	-10,62±0,09	0,01
3529-1303-1	8,011±0,006	0,12±0,001	-22,66±0,07	-3,25±0,15	5,14±0,08	0,01
3504-310-1	8,084±0,004	0,163±0,001	0,56±0,05	1,87±0,11	-4,25±0,09	0,01
4603-349-1	7,916±0,008	0,173±0,001	-20,15±0,11	-8,49±0,22	-9,47±0,09	0,01
3530-1182-1	7,889±0,005	0,203±0,001	19,92±0,04	-1,77±0,12	11,52±0,07	0,01
3875-1620-1	8,228±0,008	0,048±0,001	13,39±0,04	5,28±0,2	-1,05±0,22	0,01
4559-2247-1	7,8±0,004	0,42±0,002	55,82±0,12	-10,0±0,11	23,6±0,09	0,05
3514-1114-1	8,103±0,004	0,105±0,0	-11,2±0,07	1,01±0,1	-1,55±0,06	0,01
3550-1637-1	8,188±0,006	0,175±0,001	-29,28±0,25	0,35±0,15	-0,72±0,07	0,01
3935-2415-1	7,719±0,006	0,07±0,001	-6,91±0,09	-8,96±0,15	-4,28±0,05	0,01
4598-1212-1	8,129±0,005	0,272±0,001	15,39±0,08	-0,33±0,13	-16,46±0,09	0,01
3962-1323-1	8,127±0,005	0,116±0,001	12,97±0,04	1,45±0,13	3,63±0,05	0,01
3515-108-1	7,875±0,008	0,18±0,001	12,75±0,07	-1,63±0,22	-4,14±0,12	0,01
4180-495-1	8,15±0,005	0,417±0,002	-4,02±0,1	-0,1±0,1	-13,52±0,11	0,01
3504-1136-1	7,997±0,005	0,3±0,002	44,94±0,06	-0,88±0,12	17,99±0,1	0,03
4246-1083-1	7,82±0,007	0,202±0,001	38,53±0,19	-7,05±0,17	11,34±0,07	0,02
3498-1812-1	7,865±0,055	0,392±0,015	-3,06±0,46	-4,61±1,45	-14,94±1,43	0,01
4179-1155-1	7,942±0,003	0,094±0,001	8,73±0,03	-2,21±0,09	5,08±0,1	0,01
3549-2762-1	8,065±0,006	0,318±0,002	-28,23±0,18	-3,05±0,14	17,24±0,07	0,02
4256-2045-1	7,844±0,006	0,055±0,0	10,47±0,04	-5,28±0,16	-0,97±0,04	0,01
3874-823-1	8,046±0,003	0,423±0,002	29,31±0,07	-0,47±0,09	-22,12±0,1	0,02
4179-1062-1	7,888±0,005	0,578±0,003	-0,4±0,07	-7,93±0,13	27,16±0,15	0,03
4634-1355-1	7,937±0,004	0,229±0,001	18,22±0,09	-6,01±0,12	6,75±0,08	0,01
4261-924-1	8,148±0,016	0,459±0,006	15,7±0,13	-0,93±0,39	27,32±0,27	0,03
4256-2394-1	7,875±0,006	0,081±0,0	75,96±0,15	-9,85±0,16	4,07±0,04	0,05
4406-646-1	7,991±0,005	0,305±0,002	67,26±0,27	-7,02±0,15	10,89±0,11	0,04
3526-2653-1	7,839±0,005	0,166±0,001	28,52±0,08	-2,47±0,14	-7,09±0,07	0,01
4561-2319-1	7,92±0,004	0,162±0,001	43,83±0,11	-4,16±0,11	-9,12±0,1	0,02
4638-1685-1	7,641±0,005	0,138±0,001	9,23±0,08	-12,13±0,14	5,35±0,1	0,01
3565-1015-1	8,14±0,007	0,293±0,002	22,74±0,09	4,02±0,16	17,31±0,09	0,02
3547-765-1	7,945±0,007	0,286±0,001	-6,35±0,07	-2,73±0,17	17,84±0,07	0,01
3869-494-1	8,037±0,004	0,144±0,001	17,22±0,04	0,83±0,09	6,67±0,11	0,01
4248-783-1	8,085±0,046	0,522±0,016	-26,0±0,81	-5,15±1,1	28,98±0,62	0,04
4475-2118-1	8,016±0,005	0,193±0,001	37,24±0,14	-2,51±0,13	11,96±0,05	0,02
4471-1685-1	7,813±0,005	0,095±0,002	21,34±0,17	-6,0±0,12	-6,05±0,12	0,01
3571-1329-1	7,602±0,006	0,085±0,0	-6,67±0,06	-11,98±0,16	-4,8±0,04	0,01
4561-2318-1	7,911±0,007	0,236±0,002	69,62±0,17	-8,08±0,17	14,03±0,13	0,05

6 lentelė. Darbe nustatyti žvaigždžių kinematiniai parametrai

TYC	R_{mean} (kpc)	Z_{max} (kpc)	U (km/s)	V (km/s)	W (km/s)	TD/D
4173-746-1	8,127±0,004	0,298±0,002	62,23±0,24	-1,54±0,1	5,92±0,11	0,03
4600-64-1	7,949±0,009	0,287±0,003	-0,07±0,12	-8,41±0,23	15,57±0,14	0,01
3526-175-1	8,092±0,007	0,142±0,001	-93,86±0,15	-26,42±0,16	7,41±0,07	0,21
4654-874-1	7,885±0,013	0,138±0,007	36,63±1,11	-6,05±0,49	-5,8±0,41	0,01
4613-728-1	8,134±0,006	0,239±0,001	-8,07±0,08	-1,81±0,14	-14,09±0,08	0,01
4609-1176-1	7,971±0,005	0,138±0,001	27,63±0,1	-3,04±0,12	8,0±0,05	0,01
4248-1004-1	8,079±0,013	0,217±0,003	-16,63±0,4	-7,8±0,21	9,92±0,14	0,01
4650-3036-1	7,873±0,008	0,094±0,002	60,73±0,51	-7,65±0,27	-4,31±0,17	0,03
4609-738-1	7,831±0,004	0,411±0,002	-0,79±0,06	-9,5±0,11	24,47±0,12	0,02
4467-461-1	8,134±0,054	0,1±0,002	64,15±0,87	-2,96±1,29	3,33±0,29	0,03
4249-597-1	7,939±0,006	0,243±0,001	-1,56±0,03	-3,56±0,15	16,12±0,03	0,01
4253-2137-1	7,91±0,005	0,158±0,0	-22,26±0,04	-6,84±0,14	10,34±0,02	0,01
4633-1787-1	8,073±0,01	0,706±0,003	-47,19±0,23	-12,9±0,2	-34,42±0,11	0,12
3561-560-1	8,154±0,007	0,224±0,002	5,34±0,1	4,71±0,16	-7,24±0,14	0,01
3585-357-1	8,186±0,006	0,118±0,0	52,2±0,11	2,77±0,14	7,41±0,02	0,02
3956-817-1	8,137±0,005	0,081±0,0	-14,2±0,1	-0,35±0,13	3,7±0,03	0,01
4463-605-1	7,859±0,007	0,07±0,001	-28,34±0,08	-9,64±0,2	4,06±0,04	0,01
3561-1329-1	8,17±0,007	0,144±0,001	18,32±0,06	5,67±0,15	5,66±0,04	0,01
3110-590-1	8,25±0,009	0,316±0,004	18,21±0,1	9,75±0,21	-6,04±0,14	0,01
3965-1025-1	7,981±0,006	0,118±0,0	46,21±0,12	-2,58±0,15	7,35±0,03	0,02
4601-2782-1	8,05±0,005	0,05±0,0	23,18±0,07	-0,11±0,12	0,18±0,04	0,01
3489-1588-1	8,106±0,017	0,17±0,006	0,52±0,32	1,69±0,4	8,54±0,45	0,01
Storasis diskas						
4241-1593-1	7,998±0,006	0,334±0,002	-4,18±0,07	-3,89±0,15	19,8±0,09	0,02
3883-285-1	7,545±0,008	0,749±0,01	-19,49±0,33	-18,95±0,32	35,81±0,34	0,09
3925-404-1	7,869±0,009	0,285±0,002	-36,4±0,31	-11,0±0,23	13,46±0,11	0,02
4232-3063-1	8,415±0,008	0,081±0,0	70,78±0,53	4,85±0,16	1,64±0,08	0,04
4460-1974-1	7,886±0,005	0,525±0,002	-60,82±0,14	-20,32±0,13	27,02±0,08	0,11
3532-1939-1	7,804±0,008	0,365±0,004	-22,13±0,38	-7,08±0,23	0,95±0,12	0,01
4186-421-1	7,839±0,004	0,142±0,001	-3,63±0,05	-6,41±0,1	0,71±0,11	0,01
4183-1378-1	7,571±0,003	1,098±0,003	-42,8±0,1	-26,5±0,09	-48,98±0,1	1,01
3873-1890-1	7,646±0,008	1,648±0,021	137,47±0,86	-45,87±0,38	58,59±0,4	2517,6
4561-2317-1	8,483±0,092	0,232±0,043	59,99±5,7	5,93±2,26	-6,84±2,65	0,03
3531-2205-1	8,198±0,006	0,43±0,003	-22,1±0,15	0,83±0,15	-24,37±0,12	0,03
4260-2573-1	8,457±0,007	0,276±0,001	-21,33±0,13	4,57±0,15	16,0±0,06	0,02
3958-1062-1	7,597±0,038	0,276±0,006	-14,47±0,43	-14,55±1,04	17,4±0,34	0,02
3964-159-1	8,001±0,008	0,375±0,008	47,27±0,53	-2,75±0,17	-22,81±0,39	0,04
4564-626-1	7,787±0,007	0,322±0,003	61,91±0,47	-14,18±0,29	6,92±0,11	0,03

6 lentelė. Darbe nustatyti žvaigždžių kinematiniai parametrai

TYC	R_{mean} (kpc)	Z_{max} (kpc)	U (km/s)	V (km/s)	W (km/s)	TD/D
4561-393-1	$7,676 \pm 0,008$	$0,357 \pm 0,003$	$98,97 \pm 1,0$	$-25,22 \pm 0,59$	$14,88 \pm 0,13$	0,35
4637-532-1	$7,747 \pm 0,08$	$0,171 \pm 0,009$	$0,13 \pm 1,37$	$-10,92 \pm 2,25$	$4,21 \pm 1,68$	0,01
4480-1543-1	$7,81 \pm 0,081$	$0,051 \pm 0,002$	$17,92 \pm 1,09$	$-6,41 \pm 2,13$	$-0,09 \pm 0,55$	0,01
3099-1640-1	$8,11 \pm 0,006$	$0,724 \pm 0,003$	$-18,47 \pm 0,13$	$-2,08 \pm 0,14$	$-37,62 \pm 0,14$	0,09

Priedas 3. Darbe nustatyti žvaigždžių amžiai ir gausos

7 lentelė. Darbe nustatyti žvaigždžių amžiai ir gausos

TYC	Amžius (mlrd. m)	[Y/Fe] (dex)	[Zr/Fe] (dex)	[Ba/Fe] (dex)	[La/Fe] (dex)	[Ce/Fe] (dex)	[Nd/Fe] (dex)	[Pr/Fe] (dex)	[Eu/Fe] (dex)
Plonasis diskas									
4230-423-1	5,21 ^{+4,43} _{-2,39}	-0,02±0,24	0,51±0,2	–	0,4±0,12	0,39±0,19	0,39±0,15	0,64±0,14	0,44±0,19
3891-872-1	4,84 ^{+4,78} _{-2,4}	-0,23±0,21	-0,08±0,17	0,07±0,27	-0,08±0,15	-0,14±0,18	0,1±0,12	0,04±0,15	0,09±0,16
3928-1045-1	1,41 ^{+0,87} _{-0,54}	0,03±0,17	-0,0±0,17	0,2±0,27	0,08±0,13	0,11±0,14	0,16±0,16	0,1±0,14	0,15±0,14
3903-116-1	2,9 ^{+2,45} _{-1,33}	-0,03±0,22	0,14±0,17	-0,08±0,32	0,14±0,16	0,1±0,18	0,19±0,14	0,2±0,16	0,14±0,2
4244-602-1	4,76 ^{+4,2} _{-2,23}	-0,01±0,17	0,13±0,15	-0,02±0,25	0,22±0,12	0,18±0,16	0,3±0,13	0,34±0,16	0,3±0,14
4415-613-1	1,12 ^{+0,95} _{-0,51}	0,01±0,18	0,1±0,16	0,23±0,26	0,14±0,17	0,18±0,15	0,26±0,12	0,22±0,14	0,14±0,14
3884-1083-1	8,45 ^{+4,2} _{-2,8}	-0,35±0,2	-0,03±0,15	–	0,02±0,12	-0,26±0,19	-0,09±0,17	0,14±0,15	0,2±0,16
3903-1856-1	7,38 ^{+4,5} _{-2,79}	0,0±0,2	-0,1±0,16	0,04±0,29	0,02±0,15	-0,15±0,2	0,04±0,22	0,14±0,16	0,19±0,2
3882-1349-1	5,06 ^{+3,68} _{-2,13}	-0,01±0,17	-0,06±0,13	0,01±0,25	-0,03±0,12	-0,2±0,19	0,07±0,17	0,11±0,15	0,06±0,18
4245-76-1	0,94 ^{+0,39} _{-0,28}	-0,05±0,21	0,02±0,17	0,3±0,25	-0,03±0,18	0,05±0,18	0,08±0,16	0,06±0,17	-0,02±0,14
3882-2598-1	4,66 ^{+3,84} _{-2,1}	-0,15±0,21	0,02±0,15	–	0,0±0,16	0,14±0,16	0,26±0,14	0,26±0,14	0,22±0,16
4231-408-1	0,73 ^{+0,41} _{-0,26}	0,04±0,19	0,08±0,16	0,34±0,21	0,12±0,15	0,21±0,18	0,24±0,12	0,2±0,14	0,07±0,13
4591-1121-1	1,16 ^{+0,39} _{-0,29}	0,07±0,23	0,11±0,17	0,12±0,33	0,11±0,18	0,09±0,2	0,15±0,18	0,21±0,2	0,12±0,17
4592-1006-1	4,4 ^{+4,56} _{-2,24}	-0,14±0,22	0,05±0,17	0,2±0,26	0,08±0,22	–	0,0±0,17	0,2±0,14	–
3887-1149-1	0,34 ^{+0,17} _{-0,11}	0,05±0,18	0,07±0,14	0,38±0,23	0,1±0,15	0,2±0,1	0,14±0,15	0,22±0,14	0,09±0,18
3522-376-1	6,36 ^{+4,28} _{-2,56}	-0,12±0,22	-0,12±0,17	-0,13±0,33	-0,13±0,16	-0,24±0,2	-0,06±0,14	-0,02±0,16	0,03±0,24
3883-625-1	1,04 ^{+0,51} _{-0,34}	0,05±0,21	0,08±0,18	0,1±0,29	0,04±0,17	0,18±0,24	0,04±0,18	0,1±0,17	–
4414-2315-1	6,04 ^{+4,94} _{-2,72}	-0,12±0,21	0,12±0,16	–	0,15±0,15	-0,06±0,22	0,17±0,13	0,36±0,13	0,26±0,2
3925-41-1	5,46 ^{+4,35} _{-2,42}	0,07±0,2	-0,06±0,15	0,01±0,29	0,09±0,14	0,06±0,19	0,16±0,18	0,2±0,16	0,19±0,23
4411-1671-1	1,28 ^{+0,67} _{-0,44}	-0,13±0,13	-0,08±0,15	0,05±0,27	-0,04±0,16	-0,11±0,19	-0,07±0,17	-0,1±0,18	–
4237-796-1	5,06 ^{+3,97} _{-2,23}	-0,1±0,2	0,34±0,19	-0,13±0,29	0,22±0,22	–	–	0,44±0,19	–
3886-370-1	4,84 ^{+4,78} _{-2,4}	-0,16±0,17	-0,0±0,13	0,08±0,28	0,14±0,16	–	0,1±0,17	0,24±0,17	0,23±0,16
4184-1637-1	2,18 ^{+0,78} _{-0,57}	-0,05±0,2	0,0±0,14	0,23±0,27	0,06±0,14	0,18±0,15	0,12±0,19	0,18±0,15	0,16±0,22
3537-1830-1	5,97 ^{+4,82} _{-2,67}	-0,12±0,18	0,17±0,14	–	0,08±0,22	-0,13±0,26	0,14±0,17	0,3±0,14	0,17±0,17
3520-1857-1	0,99 ^{+0,47} _{-0,32}	0,06±0,27	–	–	–	–	–	–	–
3943-2200-1	3,77 ^{+3,07} _{-1,69}	0,01±0,21	0,02±0,2	0,09±0,28	-0,02±0,2	0,16±0,21	0,22±0,14	0,25±0,19	0,25±0,25
4187-1365-1	4,29 ^{+3,02} _{-1,77}	-0,07±0,25	–	-0,04±0,45	-0,0±0,19	-0,03±0,22	–	–	–
4579-262-1	3,35 ^{+2,14} _{-1,3}	-0,15±0,13	0,14±0,17	-0,03±0,26	0,06±0,19	–	0,14±0,17	–	–
3879-720-1	6,95 ^{+3,89} _{-2,5}	-0,08±0,2	-0,02±0,16	0,06±0,32	0,04±0,18	-0,12±0,23	0,21±0,18	0,25±0,2	0,21±0,23
4648-1723-1	0,88 ^{+0,35} _{-0,25}	-0,09±0,3	–	0,19±0,29	0,05±0,23	–	0,37±0,18	0,2±0,23	–
3532-2085-1	3,32 ^{+2,41} _{-1,4}	0,16±0,19	0,03±0,19	0,16±0,3	-0,06±0,18	-0,03±0,27	0,16±0,18	0,21±0,19	0,14±0,25
4597-1692-1	1,2 ^{+0,82} _{-0,49}	0,06±0,2	0,08±0,19	0,2±0,26	0,3±0,17	0,28±0,18	0,26±0,2	0,31±0,18	0,25±0,23
4562-2664-1	6,04 ^{+3,79} _{-2,33}	-0,18±0,25	-0,04±0,17	-0,28±0,36	-0,21±0,15	-0,14±0,2	-0,04±0,17	0,02±0,15	-0,06±0,25
4464-1666-1	5,46 ^{+4,99} _{-2,61}	-0,04±0,19	0,09±0,14	-0,12±0,28	0,1±0,13	-0,05±0,18	0,08±0,17	0,15±0,15	0,12±0,18
3516-967-1	2,29 ^{+0,62} _{-0,49}	0,02±0,16	-0,04±0,14	0,27±0,23	0,04±0,13	-0,04±0,18	0,18±0,17	0,17±0,18	0,11±0,18
3505-1606-1	0,91 ^{+0,71} _{-0,4}	0,0±0,2	0,08±0,16	0,13±0,27	0,07±0,14	0,05±0,2	0,18±0,14	0,09±0,18	0,06±0,22
3529-1303-1	6,88 ^{+3,86} _{-2,47}	-0,17±0,14	-0,24±0,18	-0,11±0,28	-0,04±0,17	-0,2±0,21	-0,04±0,18	0,08±0,15	0,06±0,2
3504-310-1	4,71 ^{+3,97} _{-2,15}	-0,2±0,2	0,18±0,21	-0,14±0,29	-0,06±0,2	0,02±0,22	0,02±0,18	0,26±0,19	0,19±0,19
4603-349-1	7,4 ^{+3,88} _{-2,55}	–	0,18±0,19	0,01±0,3	–	–	0,19±0,22	–	–
3530-1182-1	1,12 ^{+0,82} _{-0,47}	-0,04±0,23	0,03±0,19	–	0,02±0,22	–	0,06±0,22	0,28±0,18	–
3875-1620-1	7,18 ^{+4,74} _{-2,86}	0,01±0,17	-0,0±0,12	0,0±0,25	0,04±0,08	0,04±0,15	0,03±0,17	0,11±0,13	0,11±0,13
4559-2247-1	5,24 ^{+3,97} _{-2,26}	-0,13±0,23	0,04±0,2	-0,04±0,27	-0,06±0,18	-0,0±0,2	0,11±0,18	0,11±0,17	0,16±0,22
3514-1114-1	6,99 ^{+3,83} _{-2,47}	-0,18±0,22	-0,01±0,17	0,01±0,27	-0,04±0,2	0,08±0,19	0,16±0,17	0,28±0,18	0,24±0,22
3550-1637-1	4,67 ^{+4,68} _{-2,34}	-0,14±0,21	-0,04±0,2	0,08±0,3	0,06±0,19	-0,03±0,23	0,01±0,17	0,36±0,19	–
3935-2415-1	8,38 ^{+4,29} _{-2,84}	-0,09±0,3	-0,1±0,2	-0,12±0,37	-0,21±0,22	-0,29±0,23	0,0±0,18	0,02±0,18	–
4598-1212-1	6,6 ^{+3,79} _{-2,41}	-0,26±0,17	-0,22±0,19	-0,18±0,27	-0,19±0,22	-0,05±0,17	-0,04±0,22	0,03±0,18	–
3962-1323-1	0,27 ^{+0,11} _{-0,08}	-0,06±0,19	0,06±0,18	0,34±0,26	0,11±0,17	0,1±0,17	0,16±0,17	0,16±0,18	–
3515-108-1	4,54 ^{+4,74} _{-2,32}	-0,12±0,24	0,09±0,2	0,16±0,3	-0,02±0,17	-0,12±0,18	0,26±0,18	0,25±0,17	0,26±0,22
4180-495-1	3,18 ^{+4,41} _{-1,85}	-0,1±0,23	0,03±0,16	0,25±0,31	-0,12±0,15	-0,26±0,2	0,12±0,14	0,16±0,15	0,11±0,2

7 lentelė. Darbe nustatyti žvaigždžių amžiai ir gausos

TYC	Amžius (mlrd. m)	[Y/Fe] (dex)	[Zr/Fe] (dex)	[Ba/Fe] (dex)	[La/Fe] (dex)	[Ce/Fe] (dex)	[Nd/Fe] (dex)	[Pr/Fe] (dex)	[Eu/Fe] (dex)
3504-1136-1	5,67 ^{+4,24} _{-2,43}	-0,14±0,23	0,24±0,2	-0,14±0,27	–	–	–	0,33±0,19	0,27±0,22
4246-1083-1	6,09 ^{+4,92} _{-2,72}	-0,19±0,22	0,14±0,21	–	0,07±0,17	-0,3±0,22	0,06±0,18	0,42±0,17	0,32±0,22
3498-1812-1	4,76 ^{+4,84} _{-2,4}	-0,26±0,19	0,16±0,21	-0,16±0,3	-0,08±0,17	0,25±0,17	0,04±0,18	0,32±0,14	0,33±0,18
4179-1155-1	5,28 ^{+4,66} _{-2,48}	-0,11±0,25	–	-0,2±0,44	–	-0,13±0,24	-0,11±0,2	–	–
3549-2762-1	5,76 ^{+5,03} _{-2,69}	-0,15±0,15	0,32±0,17	0,03±0,35	0,13±0,15	–	0,13±0,18	0,38±0,17	0,43±0,18
4256-2045-1	1,04 ^{+0,37} _{-0,27}	-0,07±0,21	0,09±0,17	0,16±0,28	-0,03±0,18	0,16±0,19	0,15±0,18	0,21±0,21	0,18±0,23
3874-823-1	7,02 ^{+3,76} _{-2,45}	0,08±0,16	0,04±0,11	0,24±0,24	0,06±0,15	0,17±0,16	0,22±0,15	0,3±0,13	0,24±0,18
4179-1062-1	4,43 ^{+4,86} _{-2,32}	-0,23±0,16	-0,11±0,16	0,01±0,27	-0,06±0,19	0,07±0,17	0,11±0,17	0,24±0,14	0,31±0,18
4634-1355-1	3,27 ^{+5,72} _{-2,08}	-0,1±0,2	0,26±0,19	0,31±0,26	0,24±0,17	0,09±0,25	0,28±0,17	0,38±0,16	0,19±0,16
4261-924-1	7,08 ^{+4,48} _{-2,75}	0,02±0,35	–	–	–	–	–	–	–
4256-2394-1	5,11 ^{+3,13} _{-1,94}	-0,15±0,22	-0,03±0,23	-0,03±0,28	–	–	–	–	–
4406-646-1	0,96 ^{+0,5} _{-0,33}	0,03±0,18	0,15±0,19	0,26±0,26	0,26±0,15	0,18±0,2	0,39±0,17	0,34±0,18	0,21±0,2
3526-2653-1	4,33 ^{+4,96} _{-2,31}	-0,26±0,2	0,09±0,18	0,18±0,28	0,02±0,17	–	0,01±0,18	0,32±0,17	0,15±0,22
4561-2319-1	1,29 ^{+0,77} _{-0,48}	0,0±0,17	0,07±0,14	0,19±0,22	-0,04±0,17	0,08±0,14	0,16±0,15	0,1±0,14	0,08±0,18
4638-1685-1	1,4 ^{+0,7} _{-0,47}	-0,14±0,14	-0,08±0,18	-0,14±0,33	-0,09±0,16	-0,02±0,2	-0,06±0,19	0,08±0,2	0,0±0,25
3565-1015-1	4,06 ^{+4,79} _{-2,2}	-0,07±0,22	0,52±0,22	–	–	–	0,22±0,17	0,72±0,17	0,36±0,25
3547-765-1	3,76 ^{+2,92} _{-1,64}	-0,19±0,22	0,09±0,24	-0,2±0,29	–	–	–	–	–
3869-494-1	6,79 ^{+4,6} _{-2,74}	-0,23±0,21	-0,1±0,18	-0,2±0,31	-0,12±0,13	-0,21±0,17	-0,06±0,18	0,02±0,15	0,14±0,18
4248-783-1	5,32 ^{+4,0} _{-2,28}	-0,04±0,22	-0,13±0,2	-0,18±0,32	–	–	0,06±0,22	–	–
4475-2118-1	0,87 ^{+0,63} _{-0,37}	0,05±0,18	0,14±0,15	0,36±0,25	0,18±0,13	0,22±0,17	0,29±0,13	0,26±0,15	0,13±0,2
4471-1685-1	0,71 ^{+0,31} _{-0,22}	0,11±0,17	0,12±0,16	0,42±0,21	0,17±0,15	0,39±0,13	0,29±0,12	0,28±0,16	0,17±0,16
3571-1329-1	2,35 ^{+2,01} _{-1,08}	-0,06±0,31	-0,04±0,21	–	0,05±0,22	–	–	–	0,2±0,23
4561-2318-1	3,19 ^{+4,28} _{-1,83}	-0,06±0,27	–	0,0±0,36	–	–	0,05±0,19	-0,1±0,24	-0,01±0,28
4173-746-1	2,06 ^{+0,65} _{-0,5}	-0,07±0,19	0,02±0,16	0,2±0,26	0,04±0,16	0,1±0,16	0,18±0,16	0,18±0,16	0,16±0,21
4600-64-1	5,19 ^{+4,95} _{-2,53}	-0,08±0,23	0,56±0,19	0,25±0,37	0,34±0,15	-0,05±0,19	0,32±0,18	0,62±0,17	0,51±0,18
3526-175-1	5,3 ^{+3,9} _{-2,25}	-0,12±0,32	–	-0,2±0,49	–	–	–	–	–
4654-874-1	3,48 ^{+4,05} _{-1,87}	0,02±0,17	0,06±0,23	0,17±0,24	0,02±0,17	–	0,08±0,19	0,14±0,16	–
4613-728-1	5,58 ^{+4,16} _{-2,38}	-0,04±0,25	–	–	-0,01±0,22	–	0,03±0,22	0,18±0,23	–
4609-1176-1	0,9 ^{+0,49} _{-0,32}	-0,11±0,24	0,0±0,17	0,18±0,26	0,04±0,2	0,05±0,22	0,09±0,2	0,06±0,21	-0,06±0,23
4248-1004-1	4,18 ^{+5,4} _{-2,35}	–	0,23±0,31	–	–	0,04±0,19	0,11±0,26	–	0,3±0,23
4650-3036-1	6,83 ^{+4,77} _{-2,81}	-0,15±0,25	-0,1±0,17	0,11±0,29	-0,02±0,12	-0,36±0,22	-0,25±0,17	0,07±0,18	0,03±0,16
4609-738-1	6,89 ^{+3,77} _{-2,44}	-0,16±0,22	-0,14±0,2	-0,05±0,31	-0,04±0,2	–	-0,1±0,18	0,04±0,19	–
4467-461-1	4,07 ^{+3,52} _{-1,89}	–	–	0,11±0,42	–	–	–	–	–
4249-597-1	2,76 ^{+1,89} _{-1,12}	-0,07±0,31	–	–	–	–	–	–	–
4253-2137-1	3,36 ^{+3,17} _{-1,63}	-0,02±0,26	–	-0,03±0,48	–	–	–	–	–
4633-1787-1	5,54 ^{+4,06} _{-2,34}	-0,02±0,2	0,08±0,16	0,08±0,29	0,04±0,14	0,07±0,17	0,07±0,18	0,15±0,19	0,05±0,23
3561-560-1	6,08 ^{+5,1} _{-2,77}	-0,19±0,21	0,29±0,25	0,02±0,4	0,03±0,18	–	0,05±0,19	0,48±0,2	0,38±0,23
3585-357-1	3,68 ^{+3,24} _{-1,72}	0,08±0,16	-0,02±0,15	0,26±0,22	0,11±0,13	0,16±0,14	0,27±0,09	0,16±0,11	0,11±0,16
3956-817-1	4,12 ^{+4,74} _{-2,2}	-0,08±0,28	0,14±0,23	0,0±0,33	–	–	0,0±0,22	0,28±0,23	–
4463-605-1	3,95 ^{+1,96} _{-1,31}	-0,04±0,26	–	–	–	–	–	–	–
3561-1329-1	0,62 ^{+0,38} _{-0,24}	0,05±0,22	0,04±0,18	0,35±0,25	0,18±0,16	0,26±0,2	0,32±0,17	0,28±0,15	0,07±0,23
3110-590-1	0,18 ^{+0,08} _{-0,05}	-0,08±0,23	-0,04±0,2	0,11±0,28	-0,02±0,2	0,16±0,18	0,09±0,17	0,02±0,17	0,15±0,19
3965-1025-1	5,32 ^{+5,05} _{-2,59}	-0,08±0,19	-0,05±0,19	0,09±0,3	0,13±0,12	-0,07±0,19	0,08±0,18	0,24±0,14	0,24±0,17
4601-2782-1	3,63 ^{+3,91} _{-1,88}	-0,18±0,28	0,06±0,23	0,03±0,35	–	0,0±0,25	0,13±0,23	–	–
3489-1588-1	1,89 ^{+2,09} _{-0,99}	0,07±0,22	0,1±0,18	0,36±0,29	0,06±0,17	0,2±0,2	0,26±0,15	0,19±0,2	0,09±0,23
Storasis diskas									
4241-1593-1	8,04 ^{+4,54} _{-2,9}	-0,0±0,24	0,4±0,2	-0,06±0,33	0,22±0,21	-0,06±0,22	0,24±0,18	0,38±0,16	0,4±0,21
3883-285-1	6,47 ^{+5,08} _{-2,85}	-0,08±0,27	0,39±0,22	-0,24±0,35	0,36±0,17	0,07±0,2	0,38±0,2	0,61±0,14	0,65±0,22
3925-404-1	6,1 ^{+4,86} _{-2,71}	-0,21±0,26	0,22±0,22	-0,4±0,37	0,34±0,17	-0,2±0,24	0,28±0,19	0,56±0,14	0,56±0,23
4232-3063-1	5,2 ^{+4,39} _{-2,38}	-0,17±0,2	0,2±0,13	0,1±0,27	0,24±0,15	-0,1±0,18	0,16±0,17	0,35±0,12	0,27±0,2
4460-1974-1	6,34 ^{+5,0} _{-2,8}	0,03±0,18	0,17±0,13	0,02±0,27	0,16±0,13	0,02±0,18	0,3±0,15	0,32±0,14	0,4±0,18
3532-1939-1	5,6 ^{+4,43} _{-2,47}	–	–	-0,27±0,38	–	–	0,49±0,18	–	0,58±0,25
4186-421-1	2,97 ^{+1,83} _{-1,13}	-0,27±0,2	-0,1±0,16	-0,2±0,28	-0,02±0,16	-0,04±0,2	0,21±0,11	0,1±0,19	0,31±0,2

7 lentelė. Darbe nustatyti žvaigždžių amžiai ir gausos

TYC	Amžius (mlrd. m)	[Y/Fe] (dex)	[Zr/Fe] (dex)	[Ba/Fe] (dex)	[La/Fe] (dex)	[Ce/Fe] (dex)	[Nd/Fe] (dex)	[Pr/Fe] (dex)	[Eu/Fe] (dex)
4183-1378-1	4,11 ^{+3,61} _{-1,92}	-0,29±0,18	-0,22±0,16	-0,14±0,27	-0,07±0,13	-0,03±0,16	0,08±0,13	0,08±0,15	0,1±0,2
3873-1890-1	4,34 ^{+3,85} _{-2,04}	-0,2±0,17	0,18±0,2	–	0,16±0,15	-0,03±0,15	0,29±0,1	0,39±0,15	0,34±0,16
4561-2317-1	5,23 ^{+4,39} _{-2,39}	-0,02±0,18	0,24±0,13	–	0,29±0,12	0,22±0,18	0,27±0,13	0,44±0,12	0,38±0,16
3531-2205-1	5,48 ^{+4,56} _{-2,49}	-0,25±0,2	-0,04±0,17	-0,11±0,27	0,02±0,15	-0,21±0,19	0,13±0,14	0,25±0,15	0,38±0,19
4260-2573-1	7,52 ^{+4,77} _{-2,92}	-0,07±0,23	0,42±0,2	-0,2±0,37	0,16±0,22	-0,05±0,19	0,37±0,18	0,42±0,2	0,49±0,21
3958-1062-1	6,43 ^{+4,78} _{-2,74}	-0,07±0,23	0,2±0,15	-0,07±0,29	0,31±0,17	-0,12±0,18	0,26±0,17	0,48±0,16	0,62±0,18
3964-159-1	5,16 ^{+4,4} _{-2,37}	-0,02±0,2	0,2±0,2	0,12±0,32	0,26±0,15	0,2±0,19	0,33±0,18	0,52±0,14	0,4±0,2
4564-626-1	4,63 ^{+4,07} _{-2,17}	0,02±0,2	0,64±0,18	-0,03±0,33	0,39±0,17	0,22±0,18	0,47±0,18	0,67±0,13	0,44±0,21
4561-393-1	6,61 ^{+5,03} _{-2,86}	-0,16±0,22	0,32±0,2	-0,06±0,33	0,25±0,11	0,07±0,15	0,35±0,14	0,51±0,15	0,43±0,22
4637-532-1	4,13 ^{+4,61} _{-2,18}	-0,16±0,19	0,12±0,14	-0,16±0,23	0,06±0,13	-0,05±0,18	0,19±0,18	0,27±0,15	0,23±0,18
4480-1543-1	7,24 ^{+4,69} _{-2,85}	0,18±0,21	0,2±0,18	0,26±0,32	0,26±0,17	0,2±0,14	0,32±0,13	0,44±0,16	0,37±0,17
3099-1640-1	8,12 ^{+4,31} _{-2,81}	-0,28±0,26	0,0±0,22	-0,21±0,4	–	–	0,05±0,18	0,17±0,17	0,2±0,21