

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

RENATA ŽENOVIENĖ

CHEMINĖS SUDĖTIES TYRIMAS GALAKTIKOS ŽVAIGŽDŽIŲ  
SUBSTRUKTŪROSE

Daktaro disertacija  
Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2015

Daktaro disertacija rengta 2010–2015 metais Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institute

Mokslinis vadovas – habil. dr. Gražina Tautvaišienė (Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

VILNIUS UNIVERSITY  
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

RENATA ŽENOVIENĖ

CHEMICAL COMPOSITION STUDY OF GALACTIC STELLAR  
SUBSTRUCTURES

Doctoral Dissertation  
Physical Sciences, Physics (02 P)

Vilnius, 2015

Doctoral Dissertation was completed during 2010–2015 at Institute of Theoretical Physics and Astronomy of Vilnius University.

Scientific supervisor – Dr. Habil. Gražina Tautvaišienė (Vilnius University, Institute of Theoretical Physics and Astronomy, Physical sciences, Physics – 02 P)

# Turinys

<b>Vartojamų santrumpų sąrašas</b>	<b>7</b>
<b>Įvadas</b>	<b>9</b>
Darbo tikslai . . . . .	11
Uždaviniai . . . . .	11
Mokslinis naujumas . . . . .	12
Ginamieji teiginiai ir rezultatai . . . . .	12
Asmeninis indėlis . . . . .	13
Publikacijos disertacijos tema . . . . .	14
Pranešimai tarptautinėse konferencijose . . . . .	15
Disertacijos struktūra . . . . .	17
<b>1. Kinematinės žvaigždžių grupės</b>	<b>18</b>
1.1. Kinematinės žvaigždžių grupės Saulės aplinkoje . . . . .	18
1.2. Ženevos-Kopenhagos apžvalgos katalogas . . . . .	21
1.3. 1-oji ir 2-oji ŽKA kinematinės žvaigždžių grupės . . . . .	23
<b>2. Stebėjimų duomenys ir analizės metodai</b>	<b>34</b>
2.1. Stebėjimų duomenys . . . . .	34
2.2. Diferencialinė analizė . . . . .	36
2.3. Žvaigždžių atmosferų modeliai . . . . .	37
2.4. Programiniai paketai . . . . .	38
2.5. Linijų profiliai ir ekvivalentiniai pločiai . . . . .	39
2.6. Atominiai duomenys . . . . .	40
2.7. Nukrypimai nuo lokalios termodinaminės pusiausvyros . . . . .	41
2.8. Pagrindinių atmosferos parametrų nustatymas . . . . .	41
2.8.1. Efektinė temperatūra . . . . .	41
2.8.2. Gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje . . . . .	43
2.8.3. Mikroturbulencija . . . . .	46

2.8.4. Metalingumas . . . . .	48
2.9. Sintetiniai spektrai . . . . .	48
2.10. Paklaidų įvertinimas . . . . .	53
<b>3. Rezultatai ir jų aptarimas</b>	<b>57</b>
3.1. Žvaigždžių atmosferų parametrai ir cheminių elementų gausos .	57
3.2. Palyginimas su ankstesniais rezultatais . . . . .	61
3.3. Lengvieji ir geležies grupės cheminiai elementai . . . . .	63
3.3.1. Deguonis . . . . .	66
3.3.2. Natris ir aliuminis . . . . .	66
3.3.3. $\alpha$ -elementai: Mg, Si, Ca, Ti . . . . .	68
3.3.4. Geležies grupės elementai . . . . .	71
3.4. Sunkieji cheminiai elementai . . . . .	72
3.4.1. s–proceso elementai . . . . .	74
3.4.2. r–proceso elementai . . . . .	78
3.5. Palyginimas su storuoju Galaktikos disku . . . . .	79
3.6. Amžiaus pasiskirstymas . . . . .	83
3.7. Palyginimas su kitais kinematiniais srautais . . . . .	88
3.8. ŽKA kinematinų žvaigždžių grupių kilmė . . . . .	92
<b>4. Pagrindiniai rezultatai ir išvados</b>	<b>96</b>
<b>Literatūros sąrašas</b>	<b>98</b>
<b>Priedas A. Stebėjimų suvestinės</b>	<b>107</b>
<b>Priedas B. Cheminių elementų gausos</b>	<b>111</b>
<b>Padėka</b>	<b>133</b>

## Vartojamų santrumpų sąrašas

- CCD – Charge Coupled Device (krūvio sąsajos įtaisas)
- FIES – FIBre-fed Echelle Spectrograph (Šviesolaidinis ešelinis spektrografas)
- Gaia – Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (Globalus astrometrinis interferometras astronomijai, ESA orbitinė observatorija)
- HIPPARCOS – High Precision Parallax Collecting Satellite (Didelio tikslumo trigonometrinių paralaksų orbitinė observatorija)
- IMF – Initial Mass Function (Pradinė masės funkcija)
- IRFM – InfraRed Flux Method (infraraudonųjų spindulių srauto metodas)
- LSR – Local Standard of Rest (vietinis rimties standartas)
- LTE – Local Thermodynamical Equilibrium (lokali termodinaminė pusiausvyra)
- MARCS – Model Atmospheres with Radiative and Convective Scheme (spindulinės ir konvekinės struktūros žvaigždžių atmosferų modeliai)
- NOT – Nordic Optical Telescope (Šiaurės optinis teleskopas)
- RAVE – RAdial Velocity Experiment (Radialinio greičio eksperimentas)
- SDSS – Sloan Digital Sky Survey (Sloan skaitmeninė dangaus apžvalga)
- SEGUE – Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration (Sloan Galaktikos tyrinėjimų ir supratimo apžvalga)
- SFR – Star-Formation Rate (Žvaigždžių formavimosi greitis)
- VALD – Vienna Atomic Line Data (Vienos atominių duomenų bazė)
- ŽKA – Ženevos-Kopenhagos apžvalga (Geneva-Copenhagen Survey)





# Įvadas

Paukščių Tako galaktikos formavimasis ir evoliucija yra viena iš didžiausių neišspręstų problemų astronomijoje. Anot standartinio Didžiojo sproginio kosmologinio modelio (angl.: Lambda cold dark matter ( $\Lambda$ CDM) cosmological model) (Mo ir kt. 1998; Silk ir Bouwens 2001), didžiosios galaktikos, tokios kaip mūsų Galaktika, formuojasi hierarchiškai jungiantis ir susiliejant mažesnėms galaktikoms. Bet mums vis dar trūksta detalaus fizikinio vaizdo, kaip atskiros žvaigždžių populiacijos gali būti susietos su pirminio debesies elementais, kaip formuojasi ir vystosi skirtingos Galaktikos komponentės.

Netgi storasis diskas, kaip atskira Galaktikos komponentė atrastas daugiau nei prieš trisdešimt metų (Gilmore ir Reid 1983), vis dar neturi patvirtinto formavimosi scenarijaus. Galaktikos disko suskirstymas į „storojo“ ir „plonojo“ diskų populiacijas reiškia, kad diske yra du skirtingi žvaigždžių tipai. Storojo disko žvaigždės yra žymiai senesnės ir labiau praturtintos  $\alpha$ -elementais, nei plonojo disko žvaigždės (Soubiran ir Girard 2005). Praturtinimas  $\alpha$ -elementais rodo, kad storojo disko žvaigždės susiformavo per santykinai trumpą laiko tarpą ( $\sim 1$  mlrd. m.), tokiu būdu mums duodama užuomina apie mūsų Galaktikos formavimosi istoriją (Kordopatis ir kt. 2013a). Nykštukinių palydovinių galaktikų įsiliejimas Paukščių Tako galaktikos evoliucijos pradžioje yra laikomas vienu iš galimų storojo disko formavimosi scenarijų. Skaitmeninės įsiliejimo įvykių simuliacijos parodė, kad po susiliejimo išlikę žvaigždžių srautai išgyvena kaip koherentiškos struktūros per milijardus metų (Helmi 2004; Law ir kt. 2005; Peñarrubia ir kt. 2005).

Tikimybę, kad galaktikų susiliejimai galėjo palikti pastebimų ženklų, sustiprino atradimai, kad ir šiuo metu į mūsų Galaktiką įsilieja jos palydovės. Žymiausias pavyzdys būtų irstančios Šaulio nykštukinės netaisyklingosios galaktikos žvaigždžių srautas (Ibata ir kt. 1994). Didžiojo Šuns bei Didžiųjų Grįžulo Ratų II sferoidinės nykštukinės galaktikos taip pat yra ardomos mūsų Galaktikos potvyninių jėgų, ir kaip šio poveikio įrodymai yra identifikuojami

atitinkamai Vienaragio žvaigždžių srautas aukštosiose Galaktikos platumose (Yanny ir kt. 2003; Ibata ir kt. 2003) bei Našlaičių žvaigždžių srautas (Peñarrubia ir kt. 2005; Fellhauer ir kt. 2007). Johnston ir kt. (1995) atlikę keletą simuliacijų su Šaulio galaktika, numatė, kad panašių galaktikų, kurias per pastaruosius mlrd. m. suardė mūsų Galaktika, liekanos dabar gali būti aptinkamos kaip judančios grupės. Helmi ir kt. (2003) netgi apskaičiavo, jog turėtų būti šimtai silpnų žvaigždžių srautų Saulės aplinkoje. Manoma, kad patekęs į vidinius Galaktikos sluoksnius, įkritęs palydovas yra suardomas į daugybę žvaigždžių srautų per gana trumpą laiko tarpą (Gómez ir Helmi 2010).

Žvaigždžių srautai gali būti identifikuoti kaip Saulės aplinkos žvaigždžių pasiskirstymo sutankėjimai fazinėje erdvėje. Pasitelkę Ženevos-Kopenhagos apžvalgos (Nordström ir kt. 2004, ŽKA) katalogą, Helmi ir kt. (2006) ieškojo žvaigždžių srautų orbitinių parametrų erdvėje, sudarytoje iš apocentro (A), pericentro (P) ir kampinio judesio kiekio momento  $z$  krypties dedamosios ( $L_z$ ), taip vadinamoje APL erdvėje. Šioje erdvėje žvaigždžių srautai grupuojasi aplink pastovaus ekscentriciteto liniją. Mokslininkų grupė rado tris naujas koherentiškas žvaigždžių grupes su savitu amžiaus, metalingumo ir kinematinių savybių pasiskirstymu, ir padarė prielaidą, kad šios grupės gali būti susietos su iširusių palydovinių galaktikų liekanomis.

Kompleksinis žvaigždžių kinematikos ir cheminės sudėties tyrimas yra vienas iš perspektyviausių Galaktikos formavimosi nagrinėjimo įrankių. Pagrindinis šios tyrimų srities tikslas yra atkurti Paukščių Tako galaktikos formavimosi istoriją, atskleisti Galaktikos storojo disko kilmę bei rasti anksčiau vykusių įsiliejimų į mūsų Galaktiką liekanas. Globalios apžvalgos, tokios kaip Ženevos-Kopenhagos apžvalga (Nordström ir kt. 2004), radialinio greičio eksperimentas RAVE (Steinmetz ir kt. 2006; Zwitter ir kt. 2008; Siebert ir kt. 2011) ir SEGUE projektas (Yanny ir kt. 2009) yra labai tinkamos duomenų bazės tokiems tyrimams. Daug tikimasi iš plačios apimties tyrimo *Gaia* (Perryman ir kt. 2001). Šios orbitinės observatorijos gauti duomenys padės daug tiksliau charakterizuoti Galaktiką ir testuoti skirtingus jos formavimosi scenarijus, o taip pat ir kinematinių grupių identifikavimo metodus.

Nepakeičiama įvairių kinematinių srautų kilmės nustatymo metodų sude-

damoji dalis yra jų cheminės sudėties tyrimas. Šiame disertacijos darbe pristatoma detali dviejų Helmi ir kt. (2006) identifikuotų ŽKA kinematinų grupių, 1-osios ir 2-osios, cheminės sudėties analizė. Nepaisant to, kad šių grupių, kurių kilmė siejama su akreciniais įvykiais Galaktikoje, nariai bėgant laikui išsisklaidė Galaktikos diske, jų cheminė sudėtis turėtų likti nepakitusi. Aukštos skiriamosios gebos spektroskopinė analizė yra labai svarbi papildant ŽKA žvaigždžių grupių kilmės ir istorijos tyrimus.

## Darbo tikslai

Pagrindinis darbo tikslas yra ištirti žvaigždžių, kurios priklauso dviem Ženevos-Kopenhagos apžvalgos kinematinėms grupėms, cheminę sudėtį, rezultatus palyginti su Galaktikos plonojo ir storio disko žvaigždžių chemine sudėtimi bei Galaktikos evoliucijos modeliais.

Išsiaiškinti, ar ŽKA kinematinės grupės yra homogeniškos, ar jų cheminė sudėtis patvirtina prielaidą, kad šios kinematinės žvaigždžių grupės galėtų būti įkritisusių nykštukinių galaktikų liekanos.

## Uždaviniai

- Nustatyti pagrindinius fizikinius parametrus (efektinę temperatūrą  $T_{\text{eff}}$ , gravitacijos pagreitį žvaigždės paviršiuje  $\lg g$ , metalingumą  $[\text{Fe}/\text{H}]$  bei mikroturbulencijos greitį  $v_t$ ) kinematiškai identifikuotoms žvaigždžių grupėms ir palyginamosioms Galaktikos plonojo ir storio disko žvaigždėms.
- Nustatyti detalią deguonies,  $\alpha$ -elementų, geležies grupės bei  $r$ - ir  $s$ -procesų elementų gausas iš didelės skiriamosios gebos spektrų kinematinų grupių žvaigždėms ir palyginamosioms Galaktikos plonojo bei storio disko žvaigždėms.
- Interpretuoti gautus rezultatus, palyginant su plonuoju ir storuoju Galaktikos disku bei cheminės evoliucijos modeliais Saulės aplinkoje.
- Gautus rezultatus palyginti su kitų kinematinų substruktūrų chemine sudėtimi.

## Mokslinis naujumas

- Pirmą kartą iš aukštos skiriamosios gebos spektrų ištirta detali dviejų šiauriniame dangaus pusrutulyje esančių Ženevos-Kopenhagos apžvalgoje identifikuotų ir galimai įsiliejusių į Paukščių Tako galaktiką akrecinio įvykio metu kinematinų grupių žvaigždžių cheminė sudėtis.
- Detalus kinematinų žvaigždžių grupių cheminės sudėties tyrimas parodė, kad pagal gausų pasiskirstymą žvaigždžių grupių cheminė sudėtis yra panaši į storojo Galaktikos disko žvaigždžių cheminę sudėtį. Tai reiškia, kad kinematinų žvaigždžių grupių ir storojo Galaktikos disko žvaigždžių formavimasis yra galimai susijęs.
- Cheminės sudėties ir kinematinų parametrų palyginimas parodė, kad ŽKA kinematinės grupės skiriasi nuo Galaktikos žvaigždžių srautų, kurių kilmė siejama su dinaminėmis Galaktikos skersės perturbacijomis.
- Patikslintas vienos iš tirtų kinematinų grupių žvaigždžių amžius.

## Ginamieji teiginiai ir rezultatai

- Iš didelės skiriamosios gebos spektrų nustatyti žvaigždžių atmosferų parametrai (efektinė temperatūra, gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje, bei mikroturbulencijos greitis) ir 22 cheminių elementų gausos 37 pirmosios ŽKA kinematinės grupės žvaigždėms, 32 antrosios grupės žvaigždėms, 15 palyginamųjų Galaktikos plonojo disko žvaigždžių ir penkioms palyginamosioms Galaktikos storojo disko žvaigždėms.
- Cheminė kinematinų žvaigždžių grupių sudėtis yra homogeniška. Nustatytas tirtų 1-osios grupės žvaigždžių vidutinis metalingumas yra  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.20 \pm 0.14$ , o 2-osios grupės žvaigždžių vidutinis metalingumas yra  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.42 \pm 0.10$ .
- 1-osios ir 2-osios ŽKA grupės žvaigždžių deguonies,  $\alpha$ -elementų ir elementų, daugiausia gaminamų  $r$ -procesu, gausos yra padidėjusios lyginant

su plonuoju Galaktikos disku ir yra panašios į Galaktikos storojo disko žvaigždžių atmosferų cheminę sudėtį.

- 1-osios ir 2-osios ŽKA grupės žvaigždžių cheminių elementų, daugiausia gaminamų *s*-procesu, ir geležies grupės elementų gausos yra panašios į to paties metalingumo plonojo Galaktikos disko nykštukių cheminių elementų gausas.
- Ties atitinkamais metalingumais cheminė 1-osios, 2-osios ir 3-osios ŽKA kinematinė grupių ir storojo Galaktikos disko žvaigždžių sudėtis yra panaši. Tai rodo, jog šių kinematinė grupių ir storojo Galaktikos disko žvaigždžių formavimasis yra galimai susijęs.
- Dauguma tirtų žvaigždžių priklauso dviem amžiaus populiacijoms: 8 ir 12 mlrd. m.
- Savo chemine sudėtimi ir kinematinėmis savybėmis 1-osios, 2-osios ir 3-iosios ŽKA grupių žvaigždės skiriasi nuo Heraklio, Arktūro ir AF06 srautų žvaigždžių.
- Tirtų 1-osios, 2-osios ir 3-iosios Ženevos-Kopenhagos apžvalgos grupių žvaigždžių cheminė sudėtis kartu su kinematinėmis savybėmis ir amžiumi palaiko praturtintų dujomis nykštukinių galaktikų įsiliejimų scenarijų, kaip labiausiai tikėtiną šių kinematinė grupių kilmei.

## Asmeninis indėlis

Autorė kartu su bendraautorais paruošė stebėjimų programas, vykdė dalies žvaigždžių stebėjimus su Šiaurės optiniu teleskopu. Taip pat apdorojo dalį spektrų, nustatė pagrindinius fizikinius atmosferų parametrus (efektingą temperatūrą, metalingumą, gravitacijos pagreitį žvaigždės paviršiuje, mikroturbulencijos greitį) bei cheminę žvaigždžių atmosferų sudėtį. Darbo autorė atliko rezultatų analizę, suformulavo išvadas ir kartu su bendraautorais parengė mokslines publikacijas.

## Publikacijos disertacijos tema

Su disertacijos medžiaga susijusios 9 publikacijos, iš jų 7 yra įtrauktos į *Thomson Reuters Web of Science* duomenų bazę.

1. Stonkutė, E., Tautvaišienė, G., Nordström, B. & **Ženovienė, R.**, 2012, *Chemical Composition of a Kinematically Identified Stellar Group in the Milky Way*, in *Star Clusters in the Era of Large Surveys* (eds. A. Moitinho, J. Alves), The Astrophysics and Space Science series, Proceedings of Symposium 5 of JENAM 2010, 223–224.
2. Stonkutė E., **Ženovienė R.**, Tautvaišienė G., Nordström B., 2012, *Chemical analysis of ancient relicts in the Milky Way disk*, in „Assembling the Puzzle of the Milky Way“ (eds. C. Reylé, A. Robin, M. Schultheis), European Physical Journal Web of Conferences, Vol. 19, 05007 1–2.
3. Stonkutė E., Tautvaišienė G., Nordström B., **Ženovienė R.**, 2012, *Stellar substructures in the solar neighbourhood. I. Kinematic group 3 in the Geneva-Copenhagen survey*, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 541, A157, 1–9.
4. Nordström B., Stonkutė E., Tautvaišienė G., **Ženovienė R.**, 2012, *Chemical tagging of kinematic stellar groups in the Milky Way Disk*, in 3rd Subaru International Conference „Galactic Archeology: Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way“ (eds. W. Aoki, N. Arimoto, M. Ishigaki, T. Suda, T. Tsujimoto), *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 458, 235.
5. Stonkutė E., Tautvaišienė G., Nordström B., **Ženovienė R.**, 2013, *Stellar substructures in the solar neighbourhood: II. Abundances of neutron-capture elements in the kinematic Group 3 of the Geneva-Copenhagen survey*, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 555, A6, 1–8.
6. Nordström B., Stonkutė E., **Ženovienė R.**, Tautvaišienė G., 2014, *Traces of the formation history of the Milky Way*, in *Setting the Scene for GAIA and LAMOST* (eds. S. Feltzing, G. Zhao, N. A. Walton, P. Whitelock),

Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Vol. 298, 430.

7. **Ženovienė R.**, Tautvaišienė G., Nordström B., Stonkutė E., 2014, *Stellar substructures in the solar neighbourhood: III. Kinematic group 2 in the Geneva-Copenhagen survey*, Astronomy & Astrophysics, Vol. 563, A53, 1–14.
8. **Ženovienė R.**, Stonkutė E., Tautvaišienė G., Nordström B., 2014, *Abundances of heavy elements in the kinematic stellar substructures*, Memorie della Società Astronomica Italiana, Vol. 85, 608–611.
9. **Ženovienė R.**, Tautvaišienė G., Nordström B., Stonkutė E., Barisečius G., 2015, *Stellar substructures in the solar neighbourhood: IV. Kinematic group 1 in the Geneva-Copenhagen survey*, Astronomy & Astrophysics (spaudoje).

## Pranešimai tarptautinėse konferencijose

1. Stonkutė E., Tautvaišienė G., Nordström B., **Ženovienė R.**, *Chemical composition of a kinematically identified stellar group in the Milky Way*, Symposium 5 „Star Clusters in the Era of Large Surveys” of European Week of Astronomy and Space Science, JENAM 2010, Lisabona (Portugalija), 2010 m. rugsėjo 6–10 d. (stendinis pranešimas).
2. Stonkutė E., Tautvaišienė G., Nordström B., **Ženovienė R.**, *Chemical composition of kinematically identified Galactic stellar groups*, „Seventh International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications”, Vilnius (Lietuva), 2010 m. rugsėjo 21–24 d. (stendinis pranešimas).
3. Stonkutė E., **Ženovienė R.**, Tautvaišienė G., Nordström B., *Chemical analysis of ancient relicts in the Milky Way disk*, International conference „Assembling the Puzzle of the Milky Way”, Le Grand Bornand (Prancūzija), 2011 m. balandžio 17–22 d. (stendinis pranešimas).

4. Nordström B., Stonkutė E., Tautvaišienė G., **Ženovienė R.**, *Chemical tagging of kinematic stellar groups in the Milky Way Disk*, The 3rd Subaru International Conference „Galactic Archaeology: Near – Field Cosmology and the Formation of the Milky Way”, Shuzenji (Japonija), 2011 m. lapkričio 1–4 d. (stendinis pranešimas).
5. **Ženovienė R.**, Tautvaišienė G., Stonkutė E., Nordström B., *A new kinematically identified stellar group: chemical composition study*, International conference „Science Innovation and Gender 2011”, Vilnius (Lietuva), 2011 m. lapkričio 24–25 d. (stendinis pranešimas).
6. **Ženovienė R.**, Tautvaišienė G., Nordström B., Stonkutė E., *Chemical analysis of a new kinematically identified stellar group*, Symposium 6 „Stellar Populations 55 years after the Vatican Conference” of European Week of Astronomy and Space Science Science, EWASS 2012, Roma (Italija), 2012 m. liepos 1–6 d. (stendinis pranešimas).
7. Stonkutė E., Tautvaišienė G., **Ženovienė R.**, Nordström B., *Chemical imprints of past accretion events in the Galaxy*, Special Sesion 3 „Galaxy evolution through secular processes” of IAU XXVIII General Assembly 2012, Pekinas (Kinija), 2012 m. rugpjūčio 20–31 d. (stendinis pranešimas).
8. Nordström B., Stonkutė E., **Ženovienė R.**, Tautvaišienė G., *Traces of the formation history of the Milky Way*, IAU Symposium No. 298 „Setting the scene for Gaia and LAMOST”, Lijangas (Kinija), 2013 m. gegužės 20–24 d. (stendinis pranešimas).
9. Tautvaišienė G., Stonkutė E., **Ženovienė R.**, Nordström B., *Spectral investigations of kinematic Galactic substructures*, „40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija”, Vilnius (Lietuva), 2013 m. birželio 10–12 d. (žodinis pranešimas).
10. **Ženovienė R.**, Stonkutė E., Tautvaišienė G., Nordström B., *Abundances of heavy elements in the kinematic stellar substructures*, Symposium 5 „Local Group, Local Cosmology” of European Week of Astronomy and



Space Science Science, EWASS 2013, Turku (Suomija), 2013 m. liepos 8–12 d. (stendinis pranešimas).

11. **Ženovienė R.**, Tautvaišienė G., Stonkutė E., Stonkutė E., Bertašius V., *Chemical composition of a kinematic stellar groups in the solar neighbourhood*, 58<sup>th</sup> Scientific Conference for Students of Physics and Natural Sciences „Open Readings 2014”, Vilnius (Lietuva), 2014 m. kovo 19–21 d. (žodinis pranešimas).

## Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, rezultatų apibendrinimas bei išvados, literatūros sąrašas ir priedai.

Pirmajame disertacijos skyriuje pateikiama trumpa kinematinųjų grupių Saulės aplinkoje apžvalga, pristatomas Ženevos-Kopenhagos apžvalgos katalogas, o taip pat supažindinama su identifikuotomis 1-ąja ir 2-ąja ŽKA kinematinėmis žvaigždžių grupėmis. Sekančiame skyriuje pristatomi atlikti stebėjimai ir duomenų analizės metodai. Trečiajame – pateikiami pagrindiniai abiejų tirtų ŽKA kinematinųjų grupių žvaigždžių atmosferų parametrai, cheminių elementų gausos bei amžius, analizuojama galima žvaigždžių grupės ir Galaktikos storojo disko formavimosi sąsaja, gauti rezultatai palyginami su 3-osios ŽKA kinematinės grupės bei keleto kitų kinematinųjų žvaigždžių srautų duomenimis.

Paskutinėje disertacijos dalyje yra apibendrinami gauti rezultatai ir jais remiantis padaromos išvados. Disertacijos pabaigoje pridedamas darbe cituotos literatūros sąrašas ir priedai su stebėjimų suvestinių bei cheminių elementų gausų lentelėmis.

Lentelės, grafikai ir formulės numeruojamos pagal skyrių, kuriam jie priklauso.

# Skyrius 1

## Kinematinės žvaigždžių grupės

### 1.1. Kinematinės žvaigždžių grupės Saulės aplinkoje

Pastaraisiais dešimtmečiais Paukščių Tako galaktikos tyrimai gerokai pasistūmėjo į priekį aukštos kokybės stebėjimų, geresnių, progresyvesnių modelių ir metodų bei galingesnių kompiuterinių galimybių dėka. Kaip vienus naujausių atradimų galima paminėti Galaktikos skersės radimą (Hammersley ir kt. 2000; Gerhard 2002, ir kt.) ir vijų struktūros patikslinimą (pvz.: Drimmel ir Spergel 2001). Savo ruožtu Saulės aplinka – maždaug 200 pc skersmens sfera aplink Saulę – buvo gana giliai ištyrinėta HIPPARCOS <sup>1</sup> misijos metu. Nors, palyginus su visa Galaktika, Saulės aplinka yra mažytis regionas, tačiau šio regiono žvaigždės pasižymi įvairia kinematika ir chemine sudėtimi, o tai suteikia galimybę ieškoti svarbios informacijos ir pėdsakų atkuriant Paukščių Tako galaktikos evoliuciją.

Klasikinis būdas tyrinėti Saulės aplinkos žvaigždžių kinematiką yra greičių pasiskirstymo funkcijos nustatymas. Tačiau stebėjimai parodė, kad vietinis greičių laukas yra gana sudėtingos struktūros. Labiausiai intriguojančios ypatybės – tai tam tikri sutankėjimai ir substruktūros.

Pirmą kartą substruktūros artimų žvaigždžių pasiskirstyme fazinėje erdvėje buvo aprašytos Eggen (1970). Jos atrodo kaip sutankėjimai trijų erdvinio greičio komponentių  $U$ ,  $V$ ,  $W$  ( $U$  komponentė nukreipta į Galaktikos centrą ( $l = 0^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ ),  $V$  – Galaktikos sukimosi kryptimi ( $l = 90^\circ$ ,  $b = 0^\circ$ ) ir  $W$

---

<sup>1</sup>ESA orbitinė observatorija, kurioje 1989–1993 m. su 30 cm teleskopu buvo išmatuoti 120 000 žvaigždžių paralaksai ir savieji judėjimai, 400 000 žvaigždžių ryškiai ir spalvos rodikliai.

– į Galaktikos polių ( $b = 90^\circ$ ) pasiskirstyme ir buvo pavadintos judančiomis grupėmis (angl.: moving groups). Žymiausios Eggen tirtos žvaigždžių grupės yra šios: Sietyno, Hiadų, Sirijaus, HR 1614, Heraklio, Arktūro ir kt. Eggen identifikuotos grupės vėliau buvo patvirtintos šiuolaikiniais tyrimais (Nordström ir kt. 2004; Antoja ir kt. 2008; Famaey ir kt. 2008). Be kita ko, Helmi su bendradarbiais (Helmi ir kt. 1999; Helmi ir de Zeeuw 2000) parodė, kad judančios grupės sėkmingai gali būti aptiktos ir parametrų, apimančių judėjimo ir žvaigždžių orbitų integralus, erdvėje. Šios žvaigždžių, su panašiomis orbitomis, grupės buvo pavadintos žvaigždžių srautais (angl.: star streams).

Paašškinti kinematinų struktūrų kilmei buvo pasiūlytos kelios galimybės. Kai kurios iš judančių grupių (pvz., HR 1614) yra siejamos su jaunais padrikaisiais spiečiais, nuo kurių atsiskyrė ir tolsta spiečiui priklausiusių narių debesis. Šiuo metu vyrauja nuomonė, kad didžioji dalis judančių grupių (pvz., Heraklio, Hiadų, Sietyno, Sirijaus) galėjo susidaryti dėl Galaktikos skersės ir vijų dinaminio poveikio. Taip pat buvo pasiūlyta idėja, kad kinematinės grupės galėtų būti įkritusių į mūsų Galaktiką palydovinių galaktikų liekanos (pvz., yra nuomonių, kad Arktūro grupė gali būti užgalaktinės kilmės), arba kad jos gali susidaryti dėl kertančių mūsų Galaktiką palydovinių galaktikų sukulto išorinio dinaminio efekto. Nors visi šie mechanizmai sunkiai suderinami tarpusavyje, bet jie atspindi šiuo metu vyraujančius Galaktikos formavimosi scenarijus. Negalima atmesti galimybės, kad skirtingos kinematinės grupės yra skirtingų dinaminų procesų pėdsakai, pateikiantys išskirtinius įrodymus apie dabartinę Galaktikos struktūrą ir jos evoliuciją.

Gausėjant stebėjimų duomenims, tobulėja teoriniai modeliai ir kuriami nauji kinematinų grupių aptikimo metodai. Apie A. Helmi ir kolegų identifikuotas žvaigždžių grupes ir taikytus jų aptikimo metodus plačiau kalbėsime 1.3 skyriuje. O šiame skyriuje toliau trumpai apžvelgsime kelis pastarųjų metų kitų autorių darbus, atliktus ieškant žvaigždžių grupių Saulės aplinkoje.

Arifyanto ir Fuchs (2006), Dettbarn ir kt. (2007), ir Klement ir kt. (2008) pasiūlė ekscentriciteto ir  $L_z$  erdvės projekciją, kuri, pagal Dekker (1976) Galaktikos orbitų teoriją, atitinkamai gali būti išreikšta per  $(U^2 + 2V^2)^{1/2}$  ir  $V$  greičius. Prielaida remiasi tuo, kad to paties žvaigždžių srauto žvaigždės lieka judėti artimomis orbitomis, ir tai buvo įrodyta atliekant skaitmenines

palydovinių galaktikų suardymo simuliacijas (Helmi ir kt. 2006).

Naudodamiesi šiuo metodu Arifyanto ir Fuchs (2006) identifikavo keletą žinomų srautų (Hiadų-Sietyno, Heraklio ir Arktūro) ir vieną naują, pavadintą AF06 srautu (vėliau šį srautą patvirtino Klement ir kt. (2009) ir Klement ir kt. (2011)). Mokslininkų grupė savo tyrimui sudarė duomenų rinkinį iš Carney ir kt. (1994) F- ir G- spektrinių klasių subnykštukių katalogo.

Dettbarn ir kt. (2007) analizavo ne kinematiškai atrinktų nemetalingų Saulės aplinkos žvaigždžių imties pasiskirstymą fazinėje erdvėje ir nustatė keleto sferoido srautų orbitinius parametrus. Vienas iš tų srautų turėjo panašius į Šaulio srautą kinematinus parametrus.

Klement ir kt. (2008) ieškojo žvaigždžių srautų ir judančių grupių Saulės aplinkoje, naudodamiesi pirmais viešai paskelbtais RAVE duomenis. Jie nustatė sutankėjimus, susijusius su Sirijaus, Heraklio, Arktūro ir Hiadų-Sietyno judančiomis grupėmis. Be to jie rado naują srautą (KFR08), teigdami, kad jo kilmė yra už Paukščių Tako galaktikos ribų. KFR08 srautas vėliau buvo patvirtintas Klement ir kt. (2009) ir Bobylev ir kt. (2010). Antoja ir kt. (2012) taip pat naudojo RAVE duomenis ir atrado naują grupę Saulės aplinkoje ties  $(U, V) = (92, -22) \text{ km s}^{-1}$ .

Naujas mechanizmas, pavadintas „žiedavimu“ (angl.: ringing), buvo pristatytas Minchev ir kt. (2009). Minchev ir kt. (2009) parodė, kad staigus energijos smūgis, kurį suduoda palydovinės galaktikos, kertančios disko plokštumą, gravitacijos potencialas, gali stipriai sutrikdyti disko žvaigždžių, išsidėsčiusių gana lokaliai, pavyzdžiui Saulės aplinkoje, greičių lauką. Šios perturbacijos gali būti stebimos  $(U, V)$  plokštumoje kaip lanko formos dariniai, išsidėstę teigiamo  $V$  kryptimi (žr.: Gómez ir kt. 2012). Naudodamasis šia technika Minchev ir kt. (2009) patvirtino kelių žinomų judančių grupių egzistavimą ir numatė keturis naujus didelio greičio srautus ties  $V \sim -140, -120, 40, 60 \text{ km s}^{-1}$ . Derinant nustatytų srautų skaičių ir poziciją, jie nustatė, kad Paukščių Tako galaktikos diskas buvo stipriai perturbuotas maždaug prieš 1,9 mlrd. m.

Žvaigždžių srautų pasiskirstymas greičių erdvėje nėra trivialus ir priklauso nuo srauto žvaigždžių kilmės ir amžiaus arba tipo. Iš esmės galima išskirti du srautų tipus: dinaminiai srautai, kurie susidaro dėl dinaminio rezonanso, bei potvyniniai srautai, kurių nariai kilę iš spiečių ar palydovinių galak-

tikų. Pastarojo tipo žvaigždės greičių pasiskirstymo diagramose yra gana išsibarsčiusios, ypač pagal  $W$  komponentę. Šiems srautams būdingas „banano formos“ išsidėstymas  $(U, V)$  plokštumoje ir simetriškas pasiskirstymas  $(U, W)$  plokštumoje. Artimų srautų žvaigždžių su panašiais kampiniais judesio kiekio momentais pasiskirstymas pagal  $V$  komponentę yra gana siauras, nes šių žvaigždžių azimutas yra beveik toks pats. Dinaminių srautų išsidėstymas  $(U, V)$  plokštumoje yra taisyklingesnis, bet išsibarstymas pagal  $W$  komponentę yra taip pat gana platus. Tačiau abiejų tipų srautus identifikuoti greičių erdvėje yra gana sudėtinga, ypač jeigu žvaigždės yra gana išsibarsčiusios erdvėje arba jų kiekis yra gana mažas. Šiuo atveju fazinė erdvė, sudaryta iš judėjimo ir orbitų integralų, yra tinkamesnis metodas žvaigždžių srautų paieškoms.

## 1.2. Ženevos-Kopenhagos apžvalgos katalogas

Mūsų tiriamos žvaigždžių grupės buvo identifikuotos Helmi ir kt. (2006) darbe, naudojantis homogenišku apytiksliai daugiau nei 14 000 F-, G-, K- spektrinės klasės žvaigždžių Ženevos-Kopenhagos apžvalgos katalogu (Nordström ir kt. 2004), kuriame pateikti kinematiniai žvaigždžių duomenys, metalingumas ir amžius.

F-, G-, K-spektrinių klasių nykštukės yra labai naudingos Galaktikos evoliucijos tyrimams: jų yra daugiausia, jos ilgaamžės, jų atmosferos atspindi debesies pradinę cheminę sudėtį, pakilusių nuo pagrindinės sekos žvaigždžių amžių galima nustatyti pritaikant žvaigždžių evoliucijos modelius.

Žvaigždės ŽKA katalogui buvo atrinktos iš kitų publikuotų katalogų su Strömgren  $uvby\beta$  sistemos fotometriniiais duomenimis, daugiausia iš Olsen (1983, 1993, 1994a, 1994b) tyrimų. Žvaigždžių ryškis yra intervale nuo 7.7 iki 9.9 magnitudžių.

Radialinis greitis nustatytas pagal du ar daugiau ankstesnių spektroskopinių stebėjimų (Hoffleit ir Jaschek 1982; Andersen ir Nordstrom 1983a,b; Nordstrom ir Andersen 1985; Andersen ir kt. 1985), su vidutine  $0,5 \text{ km s}^{-1}$  ar mažesne paklaida.

Žvaigždžių savieji judėjimai buvo paimti iš *Tycho-2* katalogo (Høg ir kt.

2000). Šis katalogas sudarytas derinant kelių šaltinių duomenis: HIPPARCOS palydovo matavimus, pažymėtus Tycho žvaigždėlapyje, Astrografijos Katalogo duomenis, paremtus Carte du Ciel matavimais, ir kitų išsamių katalogų duomenis. Savųjų judėjimų tipinė vidutinė paklaida yra 1.8 '' per vienerius metus.

Trigonometrinis paralaksas daugumai žvaigždžių buvo paimtas iš HIPPARCOS katalogo su geresne nei 10 % santykinė paklaida. Tik tuomet, kai HIPPARCOS paralaksai nebuvo žinomi, ar ne tokie tikslūs negu 10 %, buvo naudojami fotometriniai paralaksai, kurie buvo nustatyti naudojant Crawford (1975) ir Olsen (1984) F ir G spektrinių klasių nykštukių atstumų kalibracijas.

F-spektrinės klasės žvaigždėms tarpžvaigždinis parausvėjimas  $E(b-y)$  buvo paskaičiuotas pagal stebėjimų indeksą  $\beta$ , naudojantis Olsen (1988) kalibracija. Nustatytasis parausvėjimas buvo taikomas ieškant temperatūros ir atstumo iki žvaigždės tuo atveju, jeigu žvaigždės  $E(b-y) \geq 0.02$ , o atstumas apie 40 pc; kitu atveju buvo tariama, kad žvaigždės parausvėjimo nėra.

Žvaigždžių efektinė temperatūra ir metalingumas ŽKA kataloge buvo nustatyti naudojantis Strömngren  $uvby\beta$  fotometrine sistema. Duomenų kalibravimui buvo panaudotos jau turimos kalibracijos (Alonso ir kt. 1996; Schuster ir Nissen 1989) arba buvo išplėtos raudonesnėms žvaigždėms remiantis spektroskopiniais metalingumais iš neseniai publikuotų aukštos kokybės spektroskopinių duomenų (Tomkin ir Lambert 1999; Thorén ir Feltzing 2000 ir kt.). Metalingumas nustatytas 0,1 tikslumu. Duomenys puikiai sutapo su kitų autorių darbais, pavyzdžiui Edvardsson ir kt. (1993). Metalingumas nustatytas 99 % žvaigždžių.

ŽKA katalogo žvaigždžių atstumas ir tangentinis greitis buvo nustatytas naudojantis Hipparcos trigonometriniais paralaksais. Absoliutinis ryškis buvo nustatytas pagal atstumą ir pagal stebimą  $V$  ryškį, ir pakoreguotas pagal tarpžvaigždinį parausvėjimą. Absoliutinis ryškis toliau buvo naudojamas skaičiuojant žvaigždžių amžių ir masę.

Erdvinių greičių komponentės ( $U$ ,  $V$ ,  $W$ ) buvo suskaičiuotos, žinant žvaigždžių atstumus ( $d$ , [pc]), savuosius judėjimus ( $\mu$ , ['' per metus]) ir radialinių greičių vidurkius ( $v_{rad}$ , [km s<sup>-1</sup>]). Erdvinių greičių komponentės yra apibrėžtos dešiniarankėje Galaktikos koordinatinių sistemoje.

Nordström ir kt. (2004) kataloge yra identifikuotos daugianarės žvaigždės. Nustatyta, kad iš 16682 žvaigždžių imties 21 % yra vizualinės dvinarės ir 19 % spektrinės dvinarės. Iš viso, bet kokio tipo daugianarių žvaigždžių ŽKA kataloge yra apie 34 %, kadangi kai kurios vizualinių dvinarių komponentės yra ir spektrinės dvinarės.

Žvaigždžių amžius buvo nustatytas naudojantis Bajeso nustatymo metodu, kai teorinių izochronų tinklelis yra palyginamas su žvaigždžių vieta Hercšprungo ir Raselo (HR) diagramoje, naudojant stebėtas  $T_{\text{eff}}$ ,  $M_v$  ir  $[\text{Fe}/\text{H}]$  vertes bei jų stebėjimų paklaidas (Jørgensen ir Lindegren 2005). Iš viso amžius nustatytas 82 % katalogo žvaigždžių.

### 1.3. 1–oji ir 2–oji ŽKA kinematinės žvaigždžių grupės

Helmi ir kt. (2006) analizavo skaitmeninius palydovinės galaktikos suirimo modeliavimus. Erdvėje, apibrėžtoje apocentru (A), pericentru (P) ir kampinio judesio kiekio momento dedamąja  $z$  kryptimi ( $L_z$ ), taip vadinamoje APL erdvėje, autoriai rado žvaigždžių substruktūrų. Įsiliejančios žvaigždės gravitaciškai atsipalaiduoja per skirtingus perigalaktinius perėjimus ir turi šiek tiek skirtingus orbitinius parametrus, todėl yra išsidėsčiusios keletoje mažesnių sutankėjimų APL erdvėje. Tačiau šie sutankėjimai susikoncentruoja pastovaus ekscentriciteto zonoje, o tai leidžia daryti prielaidą apie bendrą jų kilmę. Šios substruktūros išlieka nepakitę per milijardus metų.

Atidėjus ŽKA katalogo duomenis APL erdvėje matyti gana didelis substruktūrų kiekis. Ryškiausios struktūros yra susiję su Hiadų-Sietyno, Sirijaus ir Heraklio superspiečiais ir labiausiai tikėtina, kad yra susidarę dėl dinaminių perturbacijų, kurias sukelia Galaktikos spiralinės vijos arba skersė. Šias struktūras sudaro žvaigždės, turinčios elipsines orbitas su santykinai mažais ekscentricitetais.

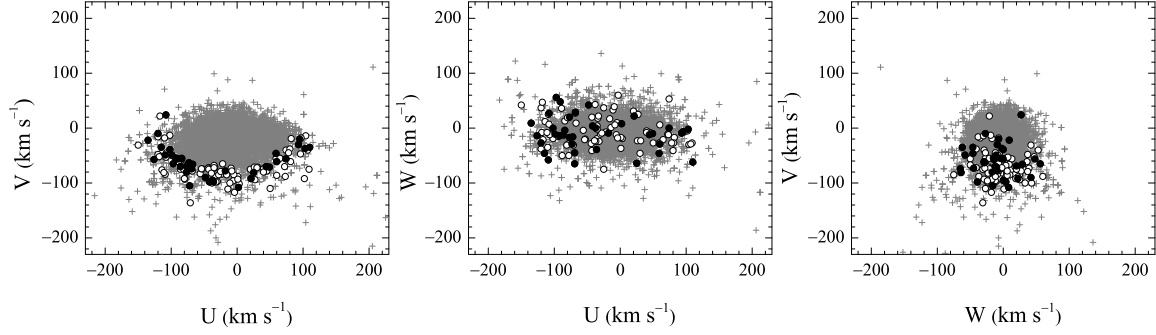
Detali statistinė APL erdvės analizė išryškino apie dešimt kitų sutankėjimų. Šie sutankėjimai yra išsidėstę išilgai dviejų ar trijų pastovaus ekscentriciteto zonų, kaip yra numatyta po mažos masės nykštukinių galaktikų įsiliejimų susidariusioms substruktūroms. APL erdvės regione tarp ekscentricitetų

nuo 0.3 iki 0.5 buvo rastos 274 žvaigždės. Autoriai pateikė statistiškai svarių įrodymų, kad šie sutankėjimai yra tikri ir kad tai nėra skurdaus palyginamųjų Galaktikos modelių pasirinkimo ar ekscentriciteto nustatymo paklaidų rezultatas. Atsižvelgiant į metalingumo pasiskirstymą, šios žvaigždės buvo suskirstytos į tris grupes. Šios trys grupės skiriasi ne tik pagal metalingumo pasiskirstymą, bet ir turi skirtingas kinematinės savybes, ypač skiriasi vertikaliaja  $z$  Galaktikos greičio komponente. 1-osios grupės greičio išsibarstymas  $\sigma_z$  yra apie  $28 \text{ km s}^{-1}$ , 2-osios grupės – apie  $39 \text{ km s}^{-1}$ , o 3-osios grupės – apie  $52 \text{ km s}^{-1}$ . Šiame darbe mes tyrėme dvi grupes, kurias sąlyginai vadinsime 1-ąja ir 2-ąja ŽKA grupe.

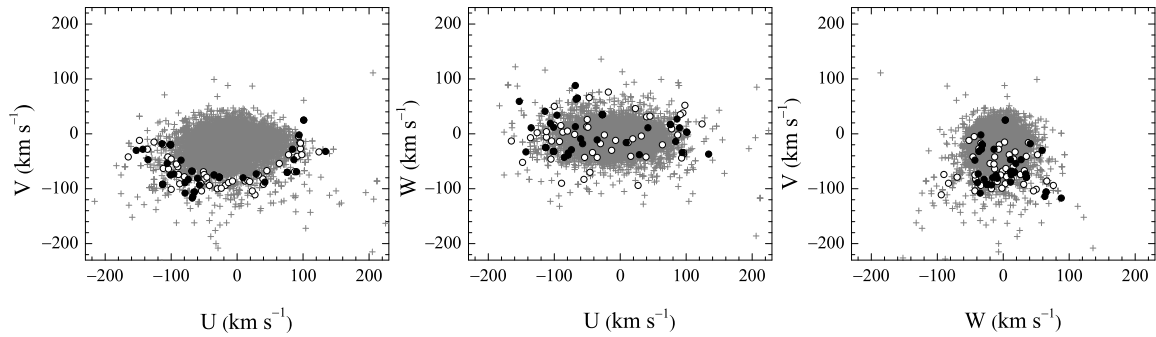
Paveiksluose 1.1 ir 1.2 yra pavaizduotas Galaktikos disko žvaigždžių, paimtų iš Holmberg ir kt. (2009) katalogo, greičių pasiskirstymas. Žvaigždės, priklausančios 1-ajai ir 2-ajai ŽKA kinematinėms grupėms, yra pavaizduotos tuščiaaviduriais ir pilnaviduriais apskritimais. Matyti, kad tirtų kinematinė grupių žvaigždžių pasiskirstymas greičių erdvėje yra skirtingas, lyginant su kitomis Galaktikos disko žvaigždėmis. Pavyzdžiui,  $(U, V)$  plokštumoje žvaigždžių išsidėstymas įgauna taip vadinamą „banano formą“, o disko žvaigždės (1.1 ir 1.2 paveiksluose pažymėtos plusais) koncentruojasi centre.  $(U, W)$  plokštumoje tiriamosios žvaigždės išsidėsto visoje greičių erdvėje, tačiau tiek pagal  $U$ , tiek pagal  $W$  greičio komponentes tiriamųjų žvaigždžių pasiskirstymas yra simetriškas. O tuo tarpu  $(W, V)$  plokštumoje tiriamosios žvaigždės turi mažesnę vidutinį sukimosi greitį nei Galaktikos disko žvaigždės. Šios savybės yra charakteringos žvaigždėms, susijusioms su akreciniais įvykiais Galaktikoje (Helmi 2008; Villalobos ir Helmi 2009). Vidutinė kiekvienos žvaigždžių erdvinio judėjimo komponentės ( $U$ ,  $V$  ir  $W$ ) paklaida yra  $1.5 \text{ km s}^{-1}$  (Nordström ir kt. 2004).

1.3 paveiksle atidėtos analizuojamos 1-osios ŽKA kinematinės žvaigždžių grupės ir viso Ženevos-Kopenhagos apžvalgos katalogo žvaigždės, o 1.4 paveiksle – 2-osios grupės žvaigždės. Matoma, kad kampinio momento, nukreipto  $z$  ašimi ( $L_z$ ), ir apocentro (apo) plokštumoje visos tiek 1-osios, tiek 2-osios ŽKA kinematinė grupių žvaigždės užima išorinę pasiskirstymo dalį. Pericentro ir apocentro plokštumoje identifikuotos žvaigždės taip pat pasiskirsto diagona-  
lėje, kuri žymi pastovaus ekscentriciteto sritį. Žvaigždžių vieta APL erdvėje





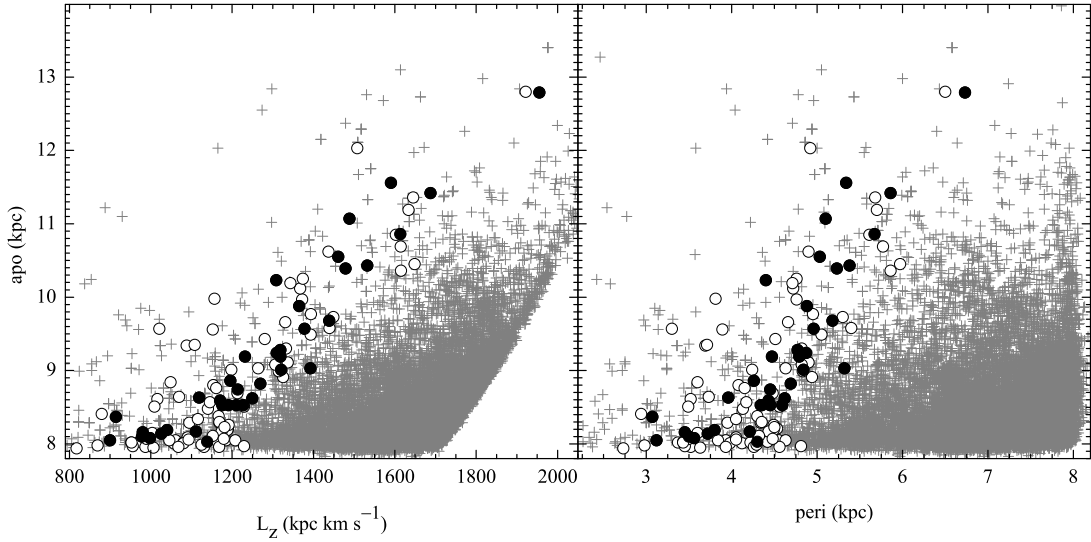
**1.1 pav.:** Visų Holmberg ir kt. (2009) katalogo žvaigždžių (pliusai), 1-osios grupės tirtų (pilnaviduriai apskritimai) ir netirtų (apskritimai) žvaigždžių pasiskirstymas greičių erdvėje.



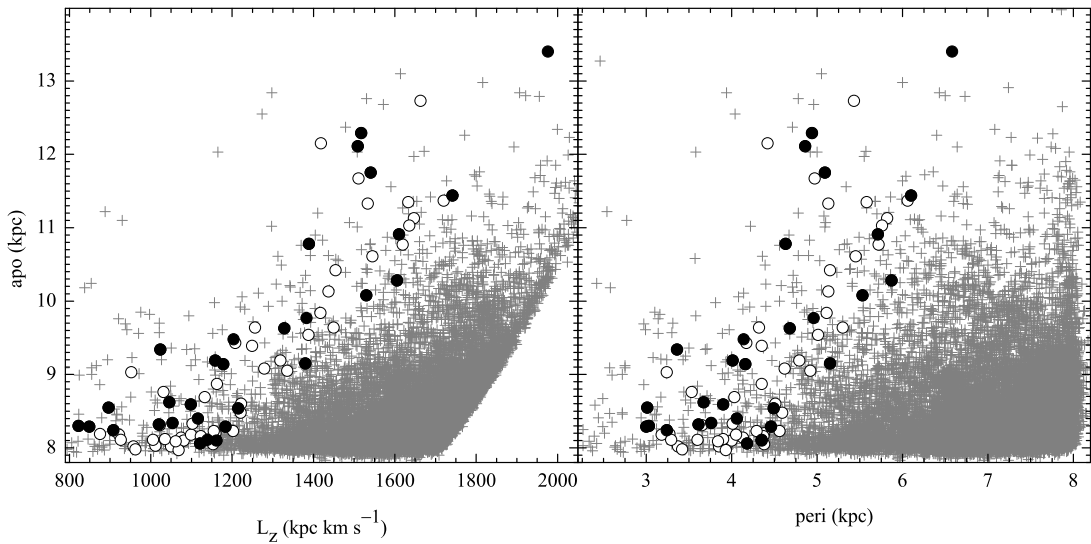
**1.2 pav.:** Visų Holmberg ir kt. (2009) katalogo žvaigždžių (pliusai), 2-osios grupės tirtų (pilnaviduriai apskritimai) ir netirtų (apskritimai) žvaigždžių pasiskirstymas greičių erdvėje.

yra gana tiksli. Ribotos žinios apie Galaktikos potencialo, naudoto apocentro ir pericentro verčių nustatymui, formą neturi didelės įtakos taškų išsidėstymui APL erdvėje, nes ŽKA katalogo žvaigždžių erdvinė apimtis yra tokia maža, kad Galaktikos potencialą galime laikyti pastoviu šiame regione (žr.: Helmi ir kt. 2006). Tai lemia, kad energija, o taip pat ir žvaigždžių orbitiniai parametrai arba jų išsidėstymas APL erdvėje, yra nustatyti daugiausia pagal jų kinematiką nei pagal jų erdvinį išsidėstymą (arba Galaktikos potencialą). Galaktikos potencialo pokyčiai lemia tik nedidelius orbitinių parametru pokyčius. Pagal Helmi ir kt. (2006), potencialo, kurį pasiūlė Flynn ir kt. (1996) ir kuris buvo naudojamas Nordström ir kt. (2004) darbe žvaigždžių orbitų bei kitų parametru integravimui, atveju tipiniai apocentro ir pericentro pokyčiai yra apie 1 – 2 %.

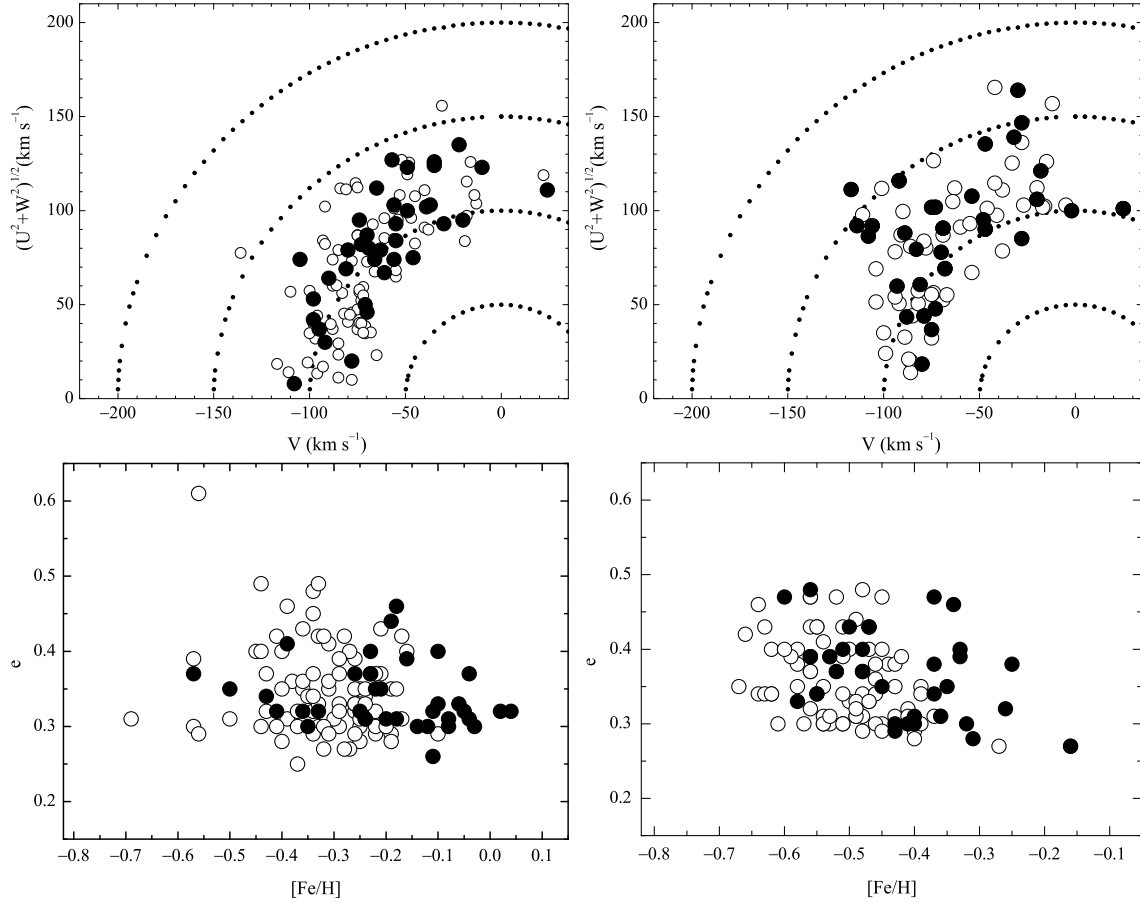
Toomre diagramose 1.5 paveikslo viršuje atidėtos visos nagrinėjamų 1-osios



**1.3 pav.:** Žvaigždžių pasiskirstymas APL erdvėje. Plusais pažymėtos visos ŽKA katalogo žvaigždės (Holmberg ir kt. 2009), apskritimais – 1-osios grupės žvaigždės, pilnaviduriais apskritimais – nagrinėjamos šiame darbe grupės žvaigždės. Atkreipiame dėmesį, kad tiriamos žvaigždės, kaip ir visos 1-osios grupės žvaigždės, išsidėsto APL erdvėje išilgai pastovaus ekscentriciteto.



**1.4 pav.:** Žvaigždžių pasiskirstymas APL erdvėje. Plusais pažymėtos visos ŽKA katalogo žvaigždės (Holmberg ir kt. 2009), apskritimais – 2-osios grupės žvaigždės, pilnaviduriais apskritimais – nagrinėjamos šiame darbe grupės žvaigždės. Atkreipiame dėmesį, kad tiriamos žvaigždės, kaip ir visos 2-osios grupės žvaigždės, išsidėsto APL erdvėje išilgai pastovaus ekscentriciteto.



**1.5 pav.:** Viršuje kairėje: 1-osios grupės, dešinėje: 2-osios grupės žvaigždžių Toomre diagramos. Taškinės linijos žymi pastovią erdvinio greičio  $V$  dedamosios vertę kas 50  $\text{km s}^{-1}$ . Apačioje: ekscentriciteto priklausomybė nuo metalingumo,  $[\text{Fe}/\text{H}]$ . Kairėje: 1-osios grupės, dešinėje: 2-osios grupės žvaigždės. Apskritimais pavaizduotos kinematinė grupių žvaigždės, o pilnaviduriai apskritimais – tiriamosios grupių žvaigždės.

ir 2-osios grupių žvaigždės, ir tos žvaigždės, kurios buvo tiriamos šiame darbe.

Paveiksle 1.5 apačioje atidėtos 1-osios ir 2-osios grupių žvaigždžių ekscentriciteto priklausomybės nuo metalingumo  $[Fe/H]$ . Šiame darbe tiriamų žvaigždžių metalingumas nustatytas mūsų, o likusių grupių narių metalingumo ir ekscentriciteto reikšmės paimtos iš Holmberg ir kt. (2009) katalogo. Žvaigždžių ekscentricitetai yra intervale  $0.3 \leq e < 0.5$  (žr.: 1.5 pav.).

1-ąją ŽKA kinematinę grupę sudaro 120 žvaigždžių, iš kurių mes ištyrėme 37. Ši grupė yra pati metalingiausia iš visų trijų ŽKA grupių. Remiantis Holmberg ir kt. (2007), šios grupės vidutinis metalingumas  $[Fe/H]$  yra didesnis už  $-0.45$ . Anot Helmi ir kt. (2006), šios grupės žvaigždės pasiskirsto į dvi amžiaus populiacijas: 8 (33 %) ir 12 (67 %) mlrd. m.

2-oji grupė susideda iš 86 žvaigždžių. Šiame darbe mes ištyrėme 32 iš jų. Vidutinis šios grupės žvaigždžių metalingumas, remiantis fotometriniiais Holmberg ir kt. (2007) duomenimis, yra apie  $-0.6$ . Helmi ir kt. (2006) teigimu, grupę sudaro trijų amžių populiacijos: 15 % sudaro 8 mlrd. m. žvaigždės, 36 % žvaigždžių yra 12 mlrd. m. ir 49 % yra 16 mlrd. m.

Tirtų žvaigždžių sąrašas ir kai kurie jų parametrai (paimti iš Holmberg ir kt. (2009) katalogo ir iš SIMBAD<sup>2</sup> duomenų bazės) yra pateikti 1.1, 1.2 ir 1.3 lentelėse. Minėtose lentelėse pateikiami šie žvaigždžių parametrai:  $M_v$  yra absoliutinis ryškis,  $d$  – atstumas,  $U$ ,  $V$  ir  $W$  – žvaigždžių erdvinio greičio komponentės,  $e$  – ekscentricitetas,  $z_{\max}$  – maksimalus atstumas nuo Galaktikos plokštumos,  $R_{\text{peri}}$  ir  $R_{\text{apo}}$  – žvaigždžių orbitų pericentras ir apocentras.

Nemetalingiausioji, 3-ioji ŽKA grupė buvo išnagrinėta Stonkutė ir kt. (2012, 2013) darbuose.

---

<sup>2</sup><http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

**1.1 lentelė:** 1-osios grupės žvaigždžių parametrai. H09 – amžius paimtas iš Holmberg ir kt. (2009), C11 – iš Casagrande ir kt. (2011).

Žvaigždės numeris	Spektrinė klasė	Age(H09) mlrd.m.	Age(C11) mlrd.m.	$M_V$ mag	$d$ pc	$U$ km s <sup>-1</sup>	$V$ km s <sup>-1</sup>	$W$ km s <sup>-1</sup>	$e$	$z_{\max}$ kpc	$R_{\text{apo}}$ kpc	$R_{\text{peri}}$ kpc
HD 3795	K0V	10.6	9.9	3.84	29	-48	-90	42	0.37	1.07	3.80	8.19
HD 4607	F5	4.2	3.5	3.08	85	-108	24	27	0.31	0.86	6.73	12.79
HD 15777	G0	11	11.1	4.28	50	-77	-69	20	0.32	0.50	4.45	8.74
HD 22872	F9V	6.2	5.9	3.59	74	-99	-49	-11	0.32	0.06	4.96	9.57
HD 25123	G0	11	...	4.01	67	93	-30	-9	0.32	0.03	5.38	10.43
HD 40040	G0	12.4	11	4.12	65	44	-70	-12	0.31	0.07	4.45	8.53
HD 49409	G0V	11.2	8.2	4.30	53	110	-35	-62	0.37	1.53	5.10	11.07
HD 52711	G4V	7.9	5.1	4.53	19	-18	-78	-9	0.30	0.03	4.30	8.03
HD 60779	G0	6.8	5.3	4.38	36	-126	-57	-14	0.40	0.11	4.40	10.23
HD 67088	G5	13.7	...	4.63	67	95	-20	-7	0.31	0.05	5.67	10.86
HD 67587	F8	4.7	3.9	3.29	47	74	-56	0	0.32	0.12	4.77	9.28
HD 76095	G5V	5.5	5.3	3.28	49	2	-108	8	0.44	0.25	3.12	8.05
HD 77408	F6IV	3.7	4.3	3.52	50	-120	-10	-27	0.32	0.40	5.86	11.42
HD 78558	G0	11.6	10.9	4.44	37	-69	-74	-65	0.32	1.24	4.43	8.59
HD 88371	G2V	13.2	9.4	4.55	59	-135	-22	9	0.37	0.31	5.34	11.56
HD 88446	F8	7.3	7.8	3.77	67	-42	-98	4	0.41	0.17	3.45	8.16
HD 90508	G1V	10.4	7.4	4.63	23	21	-92	22	0.37	0.51	3.72	8.14
HD 109498	G3V	10.4	...	4.53	69	59	-46	-46	0.26	0.79	5.32	9.03
HD 111367	G1V	9.5	8.5	4.11	86	-69	-73	-45	0.33	0.76	4.34	8.53

**1.1 lentelė:** 1-osios grupės žvaigždžių parametrai – tęsinys. H09 – amžius paimtas iš Holmberg ir kt. (2009), C11 – iš Casagrande ir kt. (2011).

Žvaigždės numeris	Spektrinė klasė	Age(H09) mlrd.m.	Age(C11) mlrd.m.	$M_V$ mag	$d$ pc	$U$ km s <sup>-1</sup>	$V$ km s <sup>-1</sup>	$W$ km s <sup>-1</sup>	$e$	$z_{\max}$ kpc	$R_{\text{apo}}$ kpc	$R_{\text{peri}}$ kpc
HD 135694	K0	12.8	6.7	4.82	71	-36	-98	-39	0.40	0.57	3.50	8.10
HD 138750	F8	3.3	3.2	2.60	116	-72	-105	-16	0.46	0.18	3.07	8.37
HD 140209	G0	10.4	9.6	4.03	71	-73	-63	-29	0.30	0.37	4.62	8.62
HD 149105	G0V	6	5.8	3.37	53	49	-71	-10	0.32	0.06	4.35	8.53
HD 149890	F8V	6.8	6.1	4.15	39	60	-61	-29	0.31	0.38	4.69	8.82
HD 156617	G5	9.3	9.1	3.92	66	-102	-39	0	0.30	0.11	5.18	9.68
HD 156893	G5	8.9	8.5	3.74	77	-97	-65	56	0.35	1.60	4.47	9.19
HD 157214	G0V	13.9	8.1	4.60	14	25	-81	-64	0.32	1.33	4.21	8.17
BD +40 3374	K1	...	6.4	6.43	49	-109	-49	-58	0.34	1.15	4.88	9.88
HD 171009	G5	11.7	6.7	4.24	66	-68	-66	29	0.30	0.68	4.59	8.53
HD 171242	G0	9.2	8.5	4.02	62	103	-37	-2	0.35	0.10	5.03	10.55
HD 178478	G5	15.8	...	4.90	47	-86	-70	-12	0.35	0.08	4.26	8.86
HD 188326	G8IV	...	8.7	3.83	56	-91	-56	48	0.31	1.24	4.87	9.24
HD 206373	G0V	5.5	5.6	3.19	104	-37	-95	0	0.39	0.11	3.56	8.08
HD 210483	G1V	9.3	6.6	4.03	51	-77	-80	-17	0.37	0.15	3.96	8.63
HD 211476	G2V	7.1	6.7	4.59	31	-115	-35	-46	0.33	0.87	5.23	10.39
HD 217511	F5	2	2.1	2.23	122	-84	-55	-4	0.30	0.08	4.84	9.01
HD 219175	F9V	3.5	2.9	4.61	39	-92	-55	-14	0.31	0.10	4.79	9.19

**1.2 lentelė:** 2-osios grupės žvaigždžių parametrai. Žvaigždės HD 12782 duomenys yra paimti iš Holmberg ir kt. (2007).

Žvaigždės numeris	Spektrinė klasė	$M_V$ mag	$d$ pc	$U$ km s <sup>-1</sup>	$V$ km s <sup>-1</sup>	$W$ km s <sup>-1</sup>	$e$	$z_{\max}$ kpc	$R_{\text{apo}}$ kpc	$R_{\text{peri}}$ kpc
BD +68 813	G5	4.27	126	-143	-28	-33	0.40	0.56	5.09	11.75
BD +31 3330	K3V	6.66	24	94	-2	-34	0.30	0.55	6.10	11.44
HD 10519	G2/G3V	4.07	48	-96	-73	34	0.37	0.89	4.16	9.14
HD 12782	G5	5.54	37	76	-70	17	0.37	0.45	4.23	9.11
HD 16397	G0V	4.68	34	134	-32	-37	0.43	0.69	4.86	12.11
HD 18757	G4V	4.71	24	-74	-83	-29	0.38	0.37	3.90	8.59
HD 21543	G2V-VI	4.88	47	-57	-93	-18	0.39	0.17	3.61	8.32
HD 24156	G0	3.82	74	29	-73	-38	0.30	0.56	4.46	8.29
HD 29587	G2V	5.06	28	-135	-47	11	0.40	0.35	4.63	10.78
HD 30649	G1V-VI	4.56	30	-60	-81	-9	0.35	0.03	4.06	8.40
HD 37739	F5	3.48	77	-27	-79	35	0.30	0.84	4.35	8.11
HD 38767	F8	3.35	71	101	25	3	0.34	0.19	6.58	13.40
HD 96094	G0	3.90	55	-85	-48	-43	0.28	0.71	5.15	9.15
HD 114606	G1V	4.87	59	-153	-30	59	0.43	2.17	4.94	12.29
HD 121533	G5	4.71	59	42	-88	11	0.38	0.31	3.76	8.34
HD 131582	K3V	6.76	24	-68	-68	13	0.31	0.34	4.49	8.54

**1.2 lentelė:** 2-osios grupės žvaigždžių parametrai – tęsinys. Žvaigždės HD 156802 duomenys yra paimti iš Holmberg ir kt. (2007).

Žvaigždės numeris	Spektrinė klasė	$M_V$ mag	$d$ pc	$U$ km s <sup>-1</sup>	$V$ km s <sup>-1</sup>	$W$ km s <sup>-1</sup>	$e$	$z_{\max}$ kpc	$R_{\text{apo}}$ kpc	$R_{\text{peri}}$ kpc
HD 132142	K1V	5.91	23	-106	-54	19	0.35	0.48	4.68	9.63
HD 133621	G0	3.98	34	-35	-75	-11	0.30	0.06	4.35	8.10
HD 137687	G9	3.68	54	-79	-108	-35	0.48	0.51	3.01	8.55
HD 139457	F8V	3.82	45	84	-28	-14	0.29	0.12	5.53	10.08
HD 143291	K0V	5.91	26	-101	-75	12	0.39	0.33	4.01	9.19
HD 152123	G5	2.69	153	-101	-20	-32	0.27	0.49	5.87	10.28
HD 156802	G2V	3.66	72	-58	-84	-61	0.34	1.24	4.03	8.28
HD 158226	G1V	4.31	69	-65	-106	65	0.43	2.09	3.24	8.24
HD 165401	G0V	4.91	24	-79	-89	-39	0.40	0.60	3.67	8.62
HD 170357	G1V	3.99	72	-68	-117	88	0.46	3.39	3.03	8.30
HD 190404	K1V	6.29	16	86	-47	27	0.33	0.73	4.96	9.77
HD 200580	F9V	3.74	52	90	-69	11	0.39	0.31	4.14	9.48
HD 201099	G0	4.21	47	-114	-18	41	0.31	1.18	5.71	10.91
HD 215594	G5	3.99	88	9	-80	-16	0.32	0.13	4.18	8.06
HD 221830	F9V	4.26	33	-67	-114	63	0.47	2.04	3.00	8.29
HD 224817	G2V	4.09	73	-113	-92	-25	0.47	0.31	3.36	9.34



**1.3 lentelė:** Galaktikos plonojo ir storio disko palyginamųjų žvaigždžių parametrai. H09 – amžius paimtas iš Holmberg ir kt. (2009), C11 – iš Casagrande ir kt. (2011).

Žvaigždės numeris	Spektrinė klasė	Age(H09) mlrd.m.	Age(C11) mlrd.m.	$M_V$ mag	$d$ pc	$U$ km s <sup>-1</sup>	$V$ km s <sup>-1</sup>	$W$ km s <sup>-1</sup>	$e$	$z_{\max}$ kpc	$R_{\text{apo}}$ kpc	$R_{\text{peri}}$ kpc
Galaktikos plonojo disko žvaigždės												
HD 41330	G0V	9.1	7.8	4.08	26	10	-25	-32	0.10	0.40	6.75	8.21
HD 43318	F6V	2.4	2.4	2.77	37	50	3	-36	0.18	0.57	7.01	10.13
HD 69897	F6V	3.2	2.2	3.83	18	-24	-39	7	0.14	0.21	6.09	8.07
HD 108954	F9V	0.3	1.8	4.52	22	0	8	-28	0.06	0.34	7.95	9.01
HD 115383	G0V	4.3	5.1	3.97	18	-38	2	-18	0.09	0.18	7.54	8.99
HD 127334	G5V	10.5	10.7	4.51	24	30	-4	-2	0.12	0.08	7.14	9.10
HD 136064	F9IV	3	3.7	3.12	25	62	-29	-24	0.23	0.29	5.83	9.37
HD 153597	F8V	3.7	2.2	3.97	15	2	-9	-29	0.04	0.34	7.61	8.19
HD 157466	F8V	3.5	4.5	4.55	29	40	16	3	0.17	0.18	7.37	10.37
HD 163989	F6IV	2.2	2.5	2.51	32	-29	-27	-22	0.10	0.22	6.64	8.16
HD 176377	G0	0.7	3.0	4.92	24	-40	-25	-5	0.12	0.04	6.57	8.34
HD 187013	F7V	2.8	...	3.34	22	38	-8	-25	0.14	0.28	6.88	9.20
HD 187691	F8V	3.3	3.1	3.71	19	-3	-3	-25	0.03	0.27	7.88	8.28
HD 200790	F8V	2.2	2.6	2.51	49	19	-37	10	0.15	0.27	6.03	8.21
HD 220117	F5V	1.8	1.6	2.66	42	-15	-21	-16	0.07	0.12	7.03	8.02
Galaktikos storio disko žvaigždės												
HD 150433	G0	13.8	7.1	4.86	30	-8	-58	-46	0.21	0.73	5.21	7.97
HD 181047	G8V	13.9	10.2	4.96	47	-99	-43	-17	0.30	0.15	5.12	9.57
HD 186411	G0	6	...	3.36	88	-64	-56	-6	0.26	0.02	4.96	8.52
HD 195019	G3IV-V	9.7	8.6	3.96	39	-73	-76	-39	0.34	0.61	4.18	8.57
HD 198300	G0	10.3	7.1	4.89	53	81	-20	-24	0.28	0.28	5.84	10.26

# Skyrius 2

## Stebėjimų duomenys ir analizės metodai

### 2.1. Stebėjimų duomenys

Iš viso tiriamojo darbo metu buvo stebėtos 37 žvaigždės iš 1-osios ŽKA kinematinės grupės, 32 žvaigždės iš 2-osios grupės, 15 palyginamųjų Galaktikos plonojo disko ir 5 palyginamųjų storio disko žvaigždžių spektrai.

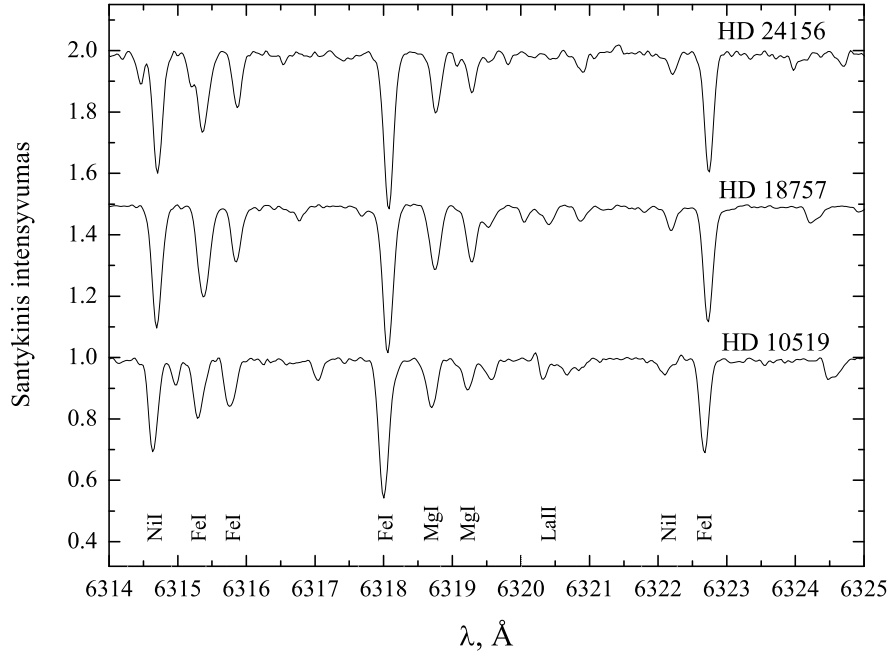
Aukštos skiriamosios gebos spektrai ( $R \approx 67000$ ) buvo gauti 2,56 m skersmens Šiaurės optiniu teleskopu (NOT), esančiu Observatorio Roque de los Muchachos observatorijoje, vienoje iš Kanarų salyno salų La Palmoje (Ispanija). Stebėjimai buvo atliekami trimis etapais: vieną dalį spektrų 2008 m. stebėjo B. Nordström ir E. Stonkutė, kitą dalį 2011 m. stebėjau aš Erasmus praktikos Šiaurės optiniame teleskope metu, o trečią dalį 2012 m. stebėjo B. Nordström ir G. Barisevičius. Stebėjimų suvestines galima rasti A.1, A.2 ir A.3 lentelėse disertacijos priede A.

Spektrai gauti dispersiniu ešele spektrografu FIES (Djupvik ir Andersen 2010). Spektrai apima bangų ilgių intervalą nuo 3680 Å iki 7270 Å. Ekspozicijos laikas buvo paskaičiuotas pagal FIES ekspozicijos laiko skaičiuoklę<sup>1</sup>, turint tikslą pasiekti spektrų signalo triukšmo santykį didesnę už 100. Žvaigždės stebėjimams buvo pasirenkamos tos, kurios stebėjimų naktį buvo gerai matomos Šiaurės optiniu teleskopu, bei kurių regimasis ryškis  $V < 10$ .

FIES spektrografas yra sumontuotas atskirame nuo teleskopo kupolo pastate, ir tokiu būdu yra apsaugotas nuo temperatūrinio ir mechaninio nestabilumo. Šis instrumentas suteikia galimybę gauti ne tik aukštos skiriamosios gebos spektrus, bet ir vidutinės ( $R \approx 46000$ ) bei žemos ( $R \approx 25000$ ). Visas beveik 3600 Å apimantis spektro ruožas yra pilnai padengiamas be tarpų. Lygiagrečiai

---

<sup>1</sup><http://www.not.iac.es/observing/forms/signal/v2.2/index.php>



**2.1 pav.:** Žvaigždžių spektrų pavyzdžiai. Aiškumo dėlei santykinio intensyvumo ašyje spektai yra paslinkti per 0,5.

galima užregistruoti torio-argono (Th-Ar) spektrą (naudojamą bangos ilgių kalibracijai aukštos arba vidutinės skiriamosios gebos spektrams), bei dangaus spektrą (vidutinės skiriamosios gebos spektrams). FIES spektrografu galima atlikti gana tikslus radialinio greičio matavimus. Kaip šio instrumento trūkumą galima paminėti žemą jautrumą ultravioletiniame spektro ruože.

Spektrai registruojami dvimačiu krūvio sąsajos įtaisu (CCD). CCD vaizdų apdorojimas atliekama Python/IRAF programavimo kalbų pagrindu sukurtu duomenų apdorojimo programiniu paketu FIEStool<sup>2</sup>. Spektrų apdorojimas apima kosminių spindulių pašalinimą, plokščio lauko korekciją, išsklaidytos šviesos pašalinimą, spektrinių eilių nuskaitymą, bangos ilgių priskyrimą ir kt. Galutinis FIEStool apdorotų duomenų produktas yra IRAF nesujungtų eilių vaizdas arba pagrindinis viendimensinis sujungtų eilių vaizdas FITS formatu. FIEStool programinio paketo pagalba galima gauti greitą, momentalų FIES instrumentu gautų duomenų apdorojimo rezultata iš karto pasibaigus ekspozicijai arba galima atlikti detalų, neautomatizuotą, didesnio tikslumo apdorojimą.

<sup>2</sup><http://www.not.iac.es/instruments/fies/fiestool/FIEStool.html>

Šiame darbe tirtų spektrų apdorojimas taip pat buvo atliktas programiniu paketu FIEStool. Tolimesniam spektrų apdorojimui buvo naudojami 4A<sup>3</sup> (angl.: the Advanced Acquisition Archiving and Analysis software package) (Ilyin 2000) arba SPLAT<sup>4</sup> (angl.: SPectraL Analysis Tool) programiniai paketai. Po pirminio apdorojimo gauti spektrai lieka paveikti sugerties spektro, ištisinio žvaigždės spektro ir CCD matricos jautrio funkcijos. Tam, kad būtų galima matuoti linijų ekvivalentinius pločius, tokį spektrą dar reikia sunormuoti – atskirti abi minėtas funkcijas. Tos spektro vietos, kur nėra gilių spektrinių linijų ir kur eina numanomas ištisinis spektras, pažymimos taškais. Per šiuos taškus programa mažiausių kvadratų metodu nubrėžia polinomą, kuris yra ištisinio spektro ir CCD matricos jautrio funkcijų suma. Normalizuotas spektras gaunamas padalinus spektrą iš šio polinomo. Kelių aukštos skiriamosios gebos normalizuotų spektrų pavyzdžiai yra parodyti 2.1 paveiksle.

## 2.2. Diferencialinė analizė

Žvaigždžių spektrai buvo analizuoti naudojant klasikinę diferencialinės analizės metodą. Šio metodo pagrindinis principas yra tas, kad cheminių elementų gausa nustatoma palyginamosios standartinės žvaigždės atžvilgiu. Paprastai standartine pasirenkama geriausiai ištyrinėta žvaigždė, idealiu atveju – tos pačios spektrinės ir šviesio klasės. Savo darbe standartine žvaigžde pasirinkome Saulę, nes mūsų tirtos žvaigždės kaip ir Saulė yra nykštukės.

Cheminių elementų gausa Saulėje ir tiriamosiose žvaigždėse nustatoma naudojant tas pačias spektrines linijas, atominius duomenis, tą patį atmosferos modelių tinklą bei skaičiavimo metodus. Tokiu būdu išvengiama skaičiavimo programos efektų, osciliatorių stiprumo ir kitų atominių duomenų paklaidų. Pirmiausiai buvo suskaičiuota cheminių elementų gausa Saulėje, panaudojant literatūros šaltiniuose pateikiamus tiriamųjų linijų ekvivalentinius pločius (Gurtovenko ir Kostyk 1989). Gautos vertės toliau buvo naudojamos skaičiuojant cheminių elementų gausas tiriamosiose žvaigždėse.

---

<sup>3</sup><http://www.aip.de/ilyin/sofin/sofin/node4.html>

<sup>4</sup><http://star-www.dur.ac.uk/~pdraper/splat/splat-vo.html>

## 2.3. Žvaigždžių atmosferų modeliai

Žvaigždžių spektrų sugerties linijų formavimuisi didelę įtaką daro žvaigždžių atmosferose vykstantys įvairūs fizikiniai procesai. Iš spektrų gautą informaciją padeda interpretuoti žvaigždžių atmosferų modeliai. Šie modeliai aprašo kaip žvaigždžių atmosferos temperatūra, dujų slėgis bei tankis kinta priklausomai nuo optinio gylio, kaip kiekvienas atmosferos sluoksnis veikia spektro linijų profilių formavimąsi. Skaičiuojant žvaigždžių atmosferų modelius yra sprendžiamos hidrostatinės pusiausvyros, spindulinės pernašos lygtys, bei kitos termodinaminės, statistikos ir kvantinės mechanikos lygtys.

Savo darbe mes naudojome klasikinius 1D hidrostatinčius, plokščiai lygiagrečius, lokali termodinaminės pusiausvyros, pastovaus srauto žvaigždžių atmosferų MARCS modelius, suskaičiuotus naudojant atnaujintą MARCS kodą (Gustafsson ir kt. 2008). Šie modeliai buvo sukurti laikantis tradicinių prielaidų:

- Žvaigždžių atmosferų geometrija yra plokščiai lygiagreti, visi fizikiniai kintamieji priklauso tik nuo vienos erdvinės koordinatės.
- Žvaigždės yra hidrostatinėje pusiausvyroje.
- Fotosferose nėra medžiagos judėjimų su pagreičiais, lygiais laisvojo kritimo pagreičiams žvaigždžių paviršiuje.
- Įskaitoma lokali termodinaminė pusiausvyra (LTE). Dujų būseną priklauso tik nuo lokalaus spinduliuotės lauko, kuris nesąveikauja su kitais atmosferos sluoksniais. Kiekvienas sluoksnis turi savo temperatūrą.

MARCS biblioteka talpina apie 52 tūkstančius F-, G-, K-spektrinių klasių žvaigždžių atmosferų modelių. Modeliai yra sudaryti iš 56 sluoksnių, kuriuose yra aprašomi pagrindiniai atmosferų parametrai.

MARCS duomenų bazėje galima rasti modelius su efektinėmis temperatūromis  $T_{\text{eff}}$  nuo 2500 K iki 8000 K, gravitacijos pagreičio logaritmais  $\lg g$  nuo  $-1.0$  iki  $5.5$ , logaritminiais santykiniais metalingumais  $[\text{Fe}/\text{H}]$  nuo  $-5.0$  iki  $+1.0$ . Taip pat yra galimybė pasirinkti modelius su skirtingomis mikroturbulencijos greičio  $v_t$  vertėmis. Ryškių žvaigždžių su žemomis  $\lg g$  vertėmis

(nuo  $-1.0$  iki  $3.5$ ) atmosferų modeliai yra apskaičiuoti naudojant sferinę simetriją bei atsižvelgiant į žvaigždžių masių skirtumus. Plokščiai lygiagretūs šaltesnių žvaigždžių modeliai yra suskaičiuoti  $3.0$ ,  $5.0$  ar  $5.5 \lg g$  vertėms. Cheminių elementų Saulėje gausos, naudojamos MARCS modeliuose, nustatytos Grevesse ir kt. (2007). Atomų ir molekulių linijų sąrašas paimtas iš VALD duomenų bazės (Piskunov ir kt. 1995). Yra galimybė pasirinkti modelį, atsižvelgiant į žvaigždės atmosferos cheminę sudėtį – bibliotekoje yra septynių „metalingumo klasių” modeliai, pritaikyti standartinės cheminės sudėties žvaigždėms,  $\alpha$ -procesu elementais praturtintoms arba šių elementų stokojančioms žvaigždėms ir pan.

Tobulėjant kompiuterinėms technologijoms, atsirado galimybė kurti realistiškesnius 3D hidrodinaminius atmosferų modelius, įskaitančius žvaigždės atmosferoje vykstančios konvekcijos įtaką spektro linijų formavimuisi. Savo darbe mes naudojome silpnų linijų sąrašus. Šioms linijoms 3D efektai turi mažai įtakos.

## 2.4. Programiniai paketai

Cheminių elementų gausas skaičiavome naudodami du Uppsalos astronomijos observatorijoje sukurtus programinės įrangos paketus EQWIDTH ir BSYN. Paketai pritaikyti dirbti UNIX/Linux operacinėje sistemoje.

EQWIDTH programinis paketas yra skirtas cheminių elementų gausoms skaičiuoti remiantis ekvivalentinių pločių metodu. Programos duomenų įvesties faile nurodomi šie fizikiniai duomenys: linijos bangos ilgis, apatinio lygmens sužadavimo potencialas, oscilatoriaus stiprumas, van der Waalso konstanta, radiacinio išplitimo konstanta, išmatuotas linijos ekvivalentinis plotis ir atominio šuolio tipas. Parengus įvesties failą, pasirenkamas žvaigždės atmosferos modelis ir paleidžiama programa, kuri iteraciniu būdu nustato cheminių elementų gausas. Duomenų išvesties faile programa pateikia cheminio elemento santykinę  $[E/H]$  ir absoliutinę gausas kiekvienai linijai, suvidurkintas gausas pagal visas tiriamo cheminio elemento linijas ir standartinius išsibarsčius  $\sigma_{EI}$ .

Gausas iš ekvivalentinių pločių nustatėme šiems cheminiams elementams:

natriui (Na I), magniui (Mg I), aliuminiui (Al I), siliciui (Si I), kalciui (Ca I), skandžiui (Sc II), titanui (Ti I, Ti II), vanadžiui (V I), chromui (Cr I), geležiai (Fe I, Fe II), kobaltui (Co I) ir nikeliui (Ni I).

Naudodami programinį paketą BSYN cheminių elementų gausas skaičiuojame sintetinių spektrų metodu. Remiantis pateiktais pagrindiniais fizikiniais atmosferos parametrais, panašiais atominiais duomenimis kaip ir EQWIDTH programa (išskyrus ekvivalentinius pločius), bei gausomis tų elementų, kurie patenka į tiriamą spektro ruožą, BSYN programa sukuria teorinius linijų profilius visoms tiriamo ruožo sugerties linijoms. Tuomet gauti sintetiniai spektrai yra vizualiai lyginami su stebėtu žvaigždės spektru ir tokiu būdu randama norimo cheminio elemento gausa.

Sintetinių spektrų metodą patogiau taikyti, kai ekvivalentinių pločių metodas yra nepatogus dėl linijų išplitimo, blendavimo, esant silpnoms linijoms ir pan. Šiame darbe sintetiniame deguonies ([O I]), itrio (Y II), cirkonio (Zr I, Zr II), bario (Ba II), lantano (La II), cerio (Ce II), prazeodimio (Pr II), neodimio (Nd II), samario (Sm II) ir europio (Eu II) linijas.

## 2.5. Linijų profiliai ir ekvivalentiniai pločiai

Informacija apie aplinkos sąlygas žvaigždės atmosferoje yra užkoduota spektro linijos profilyje. Matuodami spektrinių linijų ekvivalentinius pločius mes galime spręsti apie žvaigždės paviršiaus temperatūrą, apie dujų judėjimą, apie žvaigždės sukimosi greitį, apie slėgį ir kt. Ekvivalentinis plotis yra geometrinis linijos stiprumo matas, kuris aprašo pilnutinį linijos srautą kaip stačiakampį, užimantį tokią pat sritį kaip ir linijos profilis. Tokiu būdu stačiakampio pagrindas atitinka ištinisio spektro lygmenį, normalizuotą į vienetą, aukštis yra lygus energijos srautui linijos centre, o plotas lygus visos linijos sugertam srautui. Ekvivalentinis plotis išreiškiamas formule:

$$W_{\lambda} = \sum \frac{F_c - F_{\lambda}}{F_c} d\lambda, \quad (2.1)$$

čia  $W_{\lambda}$  yra ekvivalentinis plotis,  $F_c = 1$  yra tolydinio spektro intensyvumas,  $F_{\lambda}$  – intensyvumas atitinkamame bangos ilgyje, o  $d\lambda$  – bangų ilgio intervalas.

$W_\lambda$  yra matuojamas bangos ilgio vienetais, pavyzdžiui mÅ.

Šiame darbe ekvivalentiniai linijų pločiai buvo matuojami programiniais paketais 4A (Ilyin 2000) ir SPLAT<sup>5</sup> aproksimuojant spektrines linijas Gauso profiliu. Matavimams linijos buvo atrinktos reikalaujant, kad jų profiliai būtų švarūs, ir jų ekvivalentinių pločių matavimas galėtų duoti kuo patikimesnius rezultatus. Blenduotų linijų eliminavimui buvo pasitelktas Kurucz ir kt. (1984) Saulės spektras, Moore ir kt. (1966) Saulės linijų atlasas bei Gurtovenko ir Kostyk (1989) neblenduotų linijų sąrašas. Taip pat atmetėme linijas, užterštas atmosferinėmis linijomis.

## 2.6. Atominiai duomenys

Ruošdami duomenų įvesties failus naudojome Vienos atominių duomenų bazę (VALD)<sup>6</sup> (Piskunov ir kt. 1995). Osciliatorių stipriai buvo paimti iš Saulės spektro analizės, atliktos Kijeve (Gurtovenko ir Kostyk 1989). Linijų radiacinio išplitimo koeficientai buvo paimti iš VALD duomenų bazės.

Cheminių elementų (Na I, Si I, Ca I, Fe I, Ba II) slopinimo koeficientai buvo paimti iš kvantinės mechanikos darbų, kuriuos atliko Anstee ir O'Mara (1995); Barklem ir O'Mara (1997); Barklem ir kt. (1998). Remiantis Unsöld (1955) aproksimacija, pataisų koeficientai klasikinei van der Valso aproksimacijai buvo paimti iš Simmons ir Blackwell (1982) darbo. Visiems kitiems cheminiam elementams, klasikinei aproksimacijai naudojamas pataisos koeficientas – 2.50, kai  $\Gamma_6$  ( $\Delta \lg C_6 = +1.0$ ), taip, kaip nurodyta Mäckle ir kt. (1975) darbe.

Skaičiavimuose naudojame Upsalos astronomijos observatorijoje suskaičiuotą Saulės atmosferos modelį su  $v_t = 0.80 \text{ km s}^{-1}$ , kuris buvo nustatytas pagal Fe I linijas.

---

<sup>5</sup><http://star-www.dur.ac.uk/~pdraper/splat/splat.html>

<sup>6</sup><http://www.astro.uu.se/~vald/php/vald.php>



## 2.7. Nukrypimai nuo lokalsios termodinaminės pusiausvyros

Naudodami Gratton ir kt. (1999) metodiką natrio ir magnio gausas nustatėme įvertinus nukrypimus nuo lokalsios termodinaminės pusiausvyros. Natrio gausa buvo nustatyta iš penkių spektrinių linijų: 4751.8, 5148.8, 5682.6, 6154.2 ir 6160.8 Å. Magnio gausa nustatyta pagal 4730.0, 5711.1, 6318.7 ir 6319.2 Å linijas. Šių linijų osciliatorių stipriai buvo paimti iš Gurtovenko ir Kostyk (1989) Saulės spektro analizės.

## 2.8. Pagrindinių atmosferos parametrų nustatymas

Efektinė temperatūra, gravitacijos pagreitis, mikroturbulencijos greitis ir metalingumas yra pagrindiniai atmosferų fizikiniai parametrai, charakterizuojantys žvaigždes ir padedantys nustatyti jų tipą, cheminę sudėtį, amžių bei evoliucijos stadiją. Šiame darbe minėti parametrai buvo nustatyti naudojant spektroskopinius metodus, paremtus sužadavimo-jonizacijos pusiausvyros principais.

### 2.8.1. Efektinė temperatūra

Žvaigždės atmosferoje temperatūra kinta (mažėja) einant iš vidaus į išorę, be to žvaigždė išspinduliuoja nevienodą energijos kiekį skirtinguose spektro bangų ilgių ruožuose, todėl paprastai astrofizikoje vartojamas suvidurkintos temperatūros terminas – efektinė temperatūra. Ši temperatūra yra apibūdinama kaip temperatūra idealaus spindulio, kurio paviršiaus vienetinis plotas visais bangų ilgiais skleidžia tiek pat energijos, kiek ir žvaigždės paviršiaus vienetinis plotas. Žvaigždės šviesis  $L$ , spindulys  $R$  ir jos efektinė temperatūra  $T_{\text{eff}}$  yra surišti šiuo sąryšiu:

$$L = 4\pi R^2 \int_0^\infty F_\nu d\nu = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4, \quad (2.2)$$

kur  $\sigma$  yra Stefano ir Bolcmano konstanta, o  $F_\nu$  yra žvaigždės paviršiaus

vienetinio ploto skleidžiama energija visais bangų ilgiais ar dažniais.

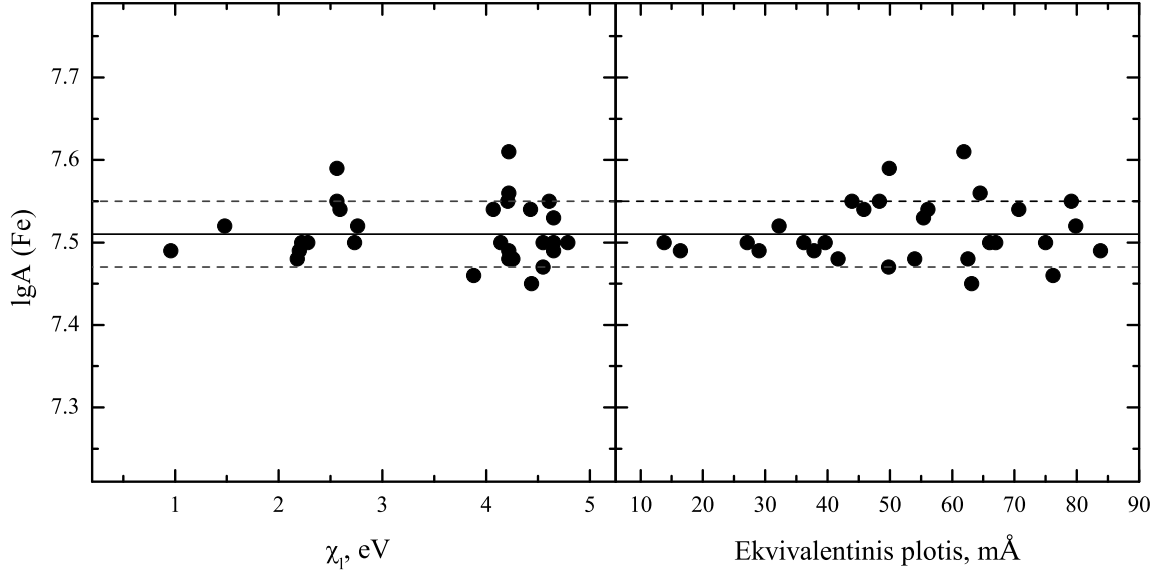
Efektinė temperatūra yra vienas iš svarbiausių fizikinių parametru, nes nuo šio parametro nustatymo tikslumo priklauso ir kitų parametru – tokių, kaip paviršiaus gravitacija ir cheminė sudėtis – nustatymas.

Nustatyti efektinę temperatūrą galima tiek fotometriškai, tiek spektroskopiškai. Žinant žvaigždės radiusą ir fotometriškai nustatčius jos bolometrinių spindesį, galima paskaičiuoti jos temperatūrą pagal 2.2 formulę. Beje, žvaigždės radiusą galima rasti iš evoliucinių trekų, interferometrijos ar astroseismologijos. Spektroskopinių metodų pavyzdžiais galėtų būti vandenilio Balmerio linijų, dažniausiai  $H_\alpha$  ir  $H_\beta$ , profilių tyrimas arba stebėto spektro lyginimas su sintetiniu spektru.

Šiame darbe efektinė temperatūra buvo nustatoma remiantis sužadavimo pusiausvyros principu, reikalaujant, kad gausos, gautos iš neutralios geležies (FeI), nepriklausytų nuo apatinio lygmens sužadavimo potencialo ( $\chi_1$ , eV). Žvaigždžių spektruose esančios sugerties linijos yra jautrios temperatūros pokyčiams, ir kuo sužadavimo potencialas yra žemesnis, tuo jautrumas temperatūros pokyčiams yra didesnis. Buvo pasirenkamas pagrindinių parametru rinkinys ir su juo buvo skaičiuojamos [Fe/H] vertės. Teisinga buvo laikoma ta  $T_{\text{eff}}$  vertė, su kuria geležies gausa, gauta iš atskirų šio cheminio elemento linijų, buvo vienoda. 2.2 paveiksle (kairėje) atidėta gausos priklausomybė nuo apatinio lygmens sužadavimo potencialo. Stebiną tam tikrą išsibarstymą nuo vidutinės gausos vertės lemia ekvivalentinių plocių nustatymų ir atominių duomenų netikslumai.

Pradinę  $T_{\text{eff}}$  vertę ėmėme iš Holmberg ir kt. (2009) katalogo. Šio katalogo žvaigždžių efektinė temperatūra buvo nustatyta iš Strömngren fotometrinių indeksu  $b - y$ ,  $c_1$ ,  $m_1$ , kuriems įskaityta tarpžvaigždinės ekstinkcijos įtaka. Šie fotometriniai indeksai buvo sukalibruoti pagal Alonso ir kt. (1996) darbą.

Casagrande ir kt. (2011) patikslino Holmberg ir kt. (2009) katalogo duomenis. Efektinės temperatūros nustatymui buvo naudojamas infraraudonųjų spindulių srauto metodas (IFRM). Šio metodo pagrindinė idėja yra žvaigždės bolometrinio spindesio  $\mathcal{F}_{\text{Bol}}$  (žemėje) ir infraraudono (IR) monochromatinio spindesio  $\mathcal{F}_\lambda$  (žemėje) santykio palyginimas su žvaigždžių atmosferos modelio nustatyto žvaigždės paviršiaus bolometrinio spindesio ( $\sigma T_{\text{eff}}^4$ ) ir žvaigždės



**2.2 pav.:** Geležies gausos priklausomybė nuo linijų apatinio lygmens sužadavimo potencialo (kairėje) ir nuo ekvivalentinių pločių (dešinėje) žvaigždei HD 210483.

paviršiaus infraraudojono (IR) monochromatinio spindesio  $\mathcal{F}_\lambda$  santykiu. Iteraciniu būdu žvaigždžių efektinė temperatūra yra skaičiuojama pagal formulę:

$$T_{\text{eff, n}} = \left( \frac{\mathcal{F}_\lambda(\text{modelio})_{(n-1)} \cdot \mathcal{F}_{\text{Bol}}(\text{žemėje})_{(n-1)}}{\sigma \mathcal{F}_\lambda(\text{žemėje})_{(n-1)}} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2.3)$$

Pagal IRMF metodą nustatytos temperatūros yra gana didelio tikslumo ( $\pm 100\text{K}$ ), nustatymo tikslumui neturi įtakos NLTE ir žvaigždės paviršiaus granuliacijos efektai (Casagrande ir kt. 2010). Disertaciniame darbe gautas efektinės temperatūros palyginome su Casagrande ir kt. (2011) gautais rezultatais (žr.: 3.2 sk.)

### 2.8.2. Gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje

Gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje tiesiogiai išreiškiamas formule:

$$g = G \frac{M}{R^2}, \quad (2.4)$$

kur  $G$  yra gravitacijos konstanta,  $M$  – kosminio kūno masė, o  $R$  – jo spindulys. Arba logaritmiškai:

$$\log g = \log M - 2\log R + 4.437. \quad (2.5)$$

Gravitacijos pagreitis yra slėgio žvaigždės atmosferoje matas. Gravitacija reguliuoja slėgį žvaigždės atmosferoje ir daro įtaką atomų jonizacijos laipsniui, o tuo pačiu ir ištisiniam spektrui bei spektrinių linijų profilių formavimuisi. Mažėjant laisvojo kritimo pagreičiui, retėja žvaigždės atmosfera, mažėja susidūrimų tarp atomų ir jonų. Todėl cheminių elementų gausų tyrimuose labai svarbu yra žinoti kuo tikslesnę gravitacijos pagreičio vertę. Šis parametras svarbus dar ir žvaigždės evoliucijos stadijos įvertinimui.

Šiame disertacijos darbe žvaigždžių  $\lg g$  parametras nustatėme remdamiesi jonizacijos pusiausvyros principu. Silpnų FeI linijų ekvivalentiniai pločiai yra neįtakojami elektronų slėgio pokyčiams, tuo tarpu kai silpnų jonizuotos geležies linijų – atvirkščiai proporcingi elektronų slėgiui. Standartinė  $\lg g$  vertės nustatymo procedūra šaltų F-, G-, K-spektrinių klasių žvaigždžių atveju yra reikalauti, kad vidutinė gausa, gauta iš neutralios geležies linijų būtų lygi gausai, gautai iš jonizuotos geležies linijų. Naudojantis EQWIDTH programiniu paketu skaičiavome geležies gausą [Fe/H], pasirenkant keletą atmosferų modelių su skirtingomis gravitacijos pagreičio vertėmis. Vertė, ties kuria [Fe I/H] ir [Fe II/H] sutapo, ir buvo ieškomoji  $\lg g$  vertė (žr.: 2.3 pav.).

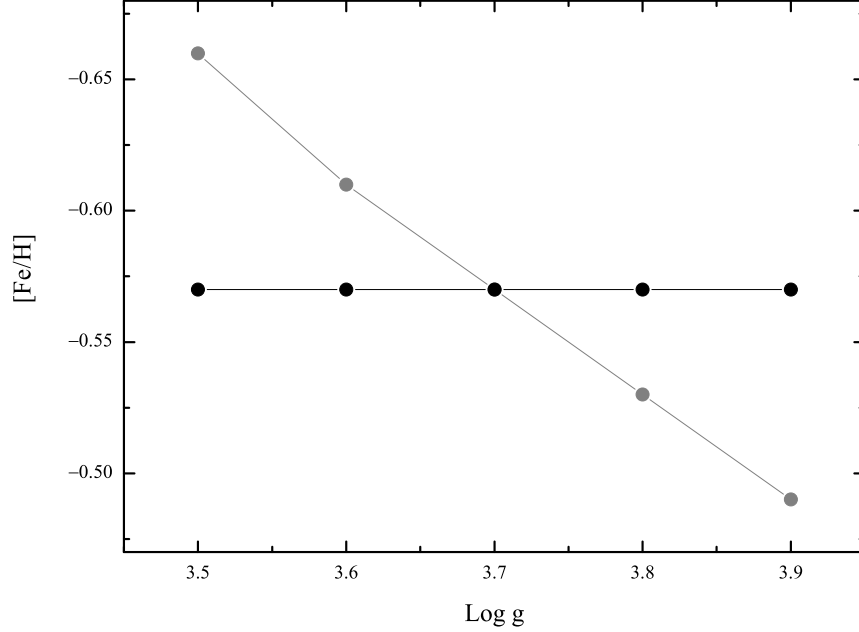
Gravitacijos pagreitį žvaigždės paviršiuje galima nustatyti ir iš fotometrinių matavimų. Šį parametras su kitais fizikiniais dydžiais – mase, efektine temperatūra, absoliutiniu bolometriniu ryškiu – sieja sąryšis:

$$\log \frac{g}{g_{\odot}} = \log \frac{M}{M_{\odot}} + 4 \log \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}_{\odot}}} + 0.4(M_{\text{bol}} - M_{\text{bol}_{\odot}}), \quad (2.6)$$

kur absoliutinis bolometrinis ryškis  $M_{\text{bol}}$  gali būti išreiškiamas:

$$M_{\text{bol}} = V_0 + \text{BC} + 5 \log \pi + 5, \quad (2.7)$$

čia  $V_0$  yra žvaigždės regimasis ryškis, kuriam įskaityta tarpžvaigždinė absorbcija, BC - bolometrinė pataisa, o  $\pi$  yra paralaksas. Šis baziniais principais paremtas būdas gravitacijos pagreičiui rasti yra gana populiarus. Paprastai yra naudojami HIPPARCOS apžvalgos paralaksai.



**2.3 pav.:**  $\lg g$  nustatymas jonizacijos pusiausvyros principu žvaigždei HD 3795. Juoda linija –  $[\text{Fe I}/\text{H}]$ , pilka –  $[\text{Fe II}/\text{H}]$ .

Pastaruoju metu vis labiau populiarėja astroseisminis  $\lg g$  nustatymo būdas. Garso impulsų, sklindančių žvaigždės viduje, dažniai yra susiję su jos paviršiaus gravitacija. Saulės tipo žvaigždės „skamba” aukštesniais dažniais, milžinės – žemesniais. Maksimalus žvaigždės akustinių virpesių dažnis  $v_{max}$  gali būti naudojamas kaip paviršiaus gravitacijos indikatorius. Su žvaigždės mase, spinduliu ir efektine temperatūra jį sieja sąryšis:

$$\frac{v_{max}}{v_{max,\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^{-2} \left(\frac{T_{eff}}{T_{eff,\odot}}\right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (2.8)$$

O tai veda prie:

$$\log g = \log g_{\odot} + \log \frac{v_{max}}{v_{max,\odot}} + \frac{1}{2} \log \frac{T_{eff}}{T_{eff,\odot}}. \quad (2.9)$$

Nors šis metodas yra gana sudėtingas, bet remiantis 2.9 formule  $\lg g$  galima nustatyti gana tiksliai (Morel ir Miglio 2012).

Spektroskopijoje taip pat yra keletas kitų populiarių būdų gravitacijos pagreičiui nustatyti. Vandenilio Balmerio linijų sparnai yra stipriai išplitę dėl sugeriančių atomų susidūrimų su laisvaisiais elektronais ir jonais (Štarko

išplitimas), todėl jie jautriai reaguoja į elektronų koncentracijos pokyčius, kurie yra tiesiogiai susiję su gravitacijos pagreičiu. Todėl dažnai  $\lg g$  vertei nustatomas iš Balmerio linijų sparnų tyrimų, aproksimavimų. Taip pat neretai yra naudojamos kitų elementų stiprios linijos, pavyzdžiui Mg Ib linija ties 5172 Å ir 5183 Å arba Ca I linija ties 6162 Å.

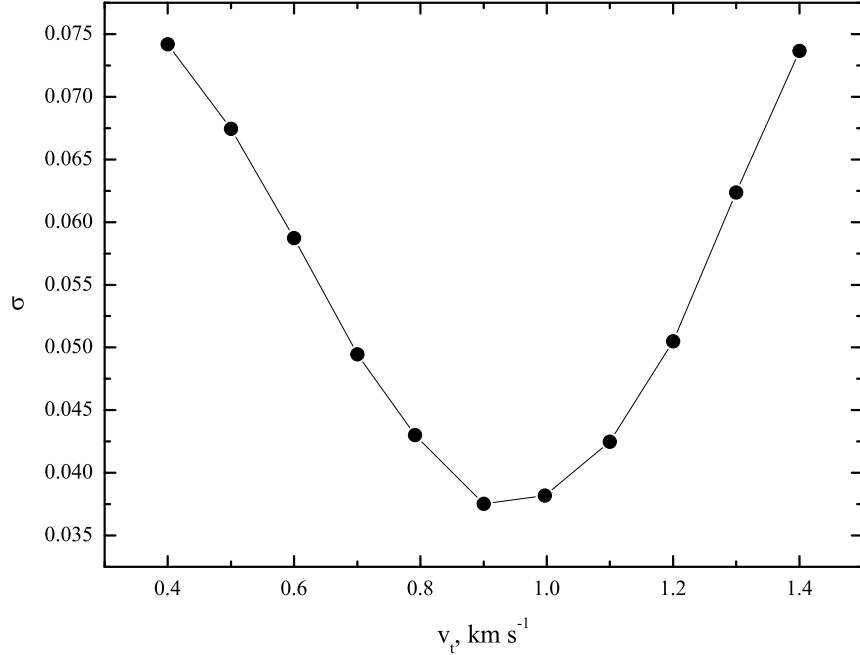
Astroseisminiu metodu  $\lg g$  įvertinti galima gana tiksliai (Gai ir kt. 2011). Deja astroseisminių matavimų duomenų bazės dar nėra tokios gausios, tad šio metodo panaudoti negalėjome, nes nėra mūsų tirtų žvaigždžių duomenų. Gravitacijos pagreičio nustatymas, taikant paralaksų metodą ar naudojant stiprias ir jautrias  $\lg g$  pokyčiams cheminių elementų linijas, tinkamas, kai nėra reikalaujama labai didelio tikslumo (pvz., įvairios  $\lg g$  nustatymo technikos yra palygintos šiuose darbuose: Morel ir Miglio 2012; Bruntt ir kt. 2010).

Mūsų naudotas jonizacijos pusiausvyros metodas taip pat sulaukia kritikos, dėl priklausomybės nuo pasirinkto atmosferos modelio, t.y. nuo  $T_{\text{eff}}$  nustatymo tikslumo (Hekker ir kt. 2013), dėl NLTE efektų geležies linijoms (Edvardsson 1988). Vis dėlto šis metodas išlieka vienas iš tiksliausių ir vienas iš populiariausių. Lyginant su kitų autorių darbais, mūsų nustatytos žvaigždžių atmosferų  $\lg g$  vertės sutampa gana gerai (žr.: 3.2 skyrelį), o žiūrint į gausų duomenis matyti, kad ir kitų cheminių elementų gausos, gautos iš neutralių ir jonizuotų atomų linijų, duoda panašias vertes (žr.: lentelės B.1 – B.6). Tai rodo, kad mūsų pasirinktas  $\lg g$  nustatymo metodas yra tikslus.

### 2.8.3. Mikroturbulencija

Mikroturbulencija žvaigždžių spektrų analizėje paprastai yra naudojama kaip laisvasis parametras. Fizikine prasme šis parametras gali būti apibrėžiamas kaip dujų tūrio, mažesnio už fotonų laisvąjį kelią, judėjimas viena kryptimi. Šis judėjimas daro įtaką ne tik spektro linijų išplitimui, o tuo pačiu ir linijos viršūnės įsisotinimui – fotonai dėl Doplerio poslinkio iš viršūnės pasislenka sparnų link, dėl ko padidėja ir linijos ekvivalentinis plotis.

Šiame darbe mikroturbulencijos greitį nustatėme reikaujant, kad gausos, gautos iš neutralios geležies linijų, nepriklausytų nuo linijų ekvivalentinių plokčių. Neutralių atomų stiprios linijos jautriai reaguoja į mikroturbulencijos greičio pokyčius, tuo tarpu kai silpnos linijos yra beveik nejautrios



**2.4 pav.:** Mikroturbulencijos greičio nustatymas žvaigždei HD 210483.

šiems pokyčiams. Mikroturbulencijos greitis įvertinamas, nustatius, kokiai mikroturbulencijos greičio vertei esant gausa, nustatyta iš stiprių geležies linijų, sutampa su gausa, nustatyta iš silpnų linijų (žr.: 2.2 pav. dešinėje). Programa EQWIDTH buvo skaičiuojama geležies gausa  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , naudojant keletą atmosferų modelių su skirtingomis mikroturbulencijos greičio vertėmis. Ieškomoji mikroturbulencijos greičio vertė buvo ta, ties kuria nukrypimas nuo vidutinės  $[\text{Fe}/\text{H}]$  vertės buvo mažiausias (žr.: 2.4 pav.).

Pastebėta, kad karštesnių žvaigždžių atmosferų mikroturbulencijos parametras sistematiškai linkęs būti didesnės vertės, tuo tarpu mažėjant  $\lg g$  mikroturbulencijos greitis didėja. Atlikus šių trijų dydžių tiesinės regresijos analizę, galima išvesti empirinę formulę mikroturbulencijos greičiui rasti. Pavyzdžiui, Nissen (1981) pateikia tokį sąryšį:

$$v_t = 3.2 \times 10^{-4}(T_{\text{eff}} - 6390) - 1.3(\log g - 4.16) + 1.7. \quad (2.10)$$

Šis sąryšis tinka temperatūrų intervalui nuo 5800 K iki 7200 K, gravitacijos pagreičio logaritmo intervalui nuo 3.5 iki 4.4 bei metalingumo intervalui nuo -0.5 iki 0.2.

Šaltų žvaigždžių atmosferose vyksta sudėtingas konvekcinis judėjimas, kurį aprašyti 1D atmosferų modeliai, netgi su įvestu papildomu mikroturbulencijos parametru, yra nepajėgūs. 3D hidrodinaminiai modeliai atkuria spektro linijų profilius ir stiprius, paaiškina linijų asimetriją ir poslinkius, nenaudodami mikroturbulencijos parametro. Linijų išplitimas, kuris paprastai yra priskiriamas mikroturbulencijai, 3D modeliuose yra aiškinamas ne turbulenciniu judėjimu atmosferose, o Doplerio poslinkiu dėl greičių gradientų žvaigždžių granuliacijų konvekciniame judėjime. Disertaciniame darbe labai šaltos žvaigždės nebuvo tiriamos, šalčiausios tirtos 1-osios grupės žvaigždės  $T_{\text{eff}}$  yra 5050 K, o 2-osios grupės – 4770 K.

#### 2.8.4. Metalingumas

Metalingumu paprastai vadinama santykinė geležies gausa  $[\text{Fe}/\text{H}]$  geležies gausos Saulėje atžvilgiu:

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \lg(\text{N}_{\text{Fe}}/\text{N}_{\text{H}})_{\star} - \lg(\text{N}_{\text{Fe}}/\text{N}_{\text{H}})_{\odot} \quad (2.11)$$

Žvaigždžių atmosferų metalingumą šiame darbe nustatėme iš ekvivalentinių linijų pločių. Geležies linijų sąrašą, kurį naudojome šiame darbe, sudaro 38 Fe I linijos ir 7 Fe II linijos. EQWIDTH programinis paketas apskaičiuoja žvaigždžių metalingumus ir duomenų išvesties faile pateikia kiekvienos spektrinės linijos duodamą metalingumo vertę bei vidutinį kvadratinį nuokrypį, o taip pat visų linijų metalingumą su bendru visoms linijoms vidutiniu kvadratinium nuokrypiu.

### 2.9. Sintetiniai spektrai

Darbai su spektrų sintezės programiniu paketu BSYN linijų parametrai buvo paimti iš VALD duomenų bazės (Piskunov ir kt. 1995). Saulės spektras (Kurucz 2005) buvo kalibruojamas, keičiant oscilatoriaus stiprį  $\lg gf$  taip, kad stebėtas Saulės spektras sutaptų su sintetiniu. Absoliutinės cheminių elementų gausos Saulėje buvo paimtos iš Grevesse ir Sauval (2000) darbo. Jos yra pateikiamos 2.1 lentelėje.



Deguonies gausa buvo nustatyta iš draustinės [OI] linijos ties 6300.31 Å. Osciliatoriaus stipris  $\lg gf$   $^{58}\text{Ni}$  ir  $^{60}\text{Ni}$  izotopams, kurie blenduoja šią deguonies liniją, ir nikelio izotopų bangų ilgiai,  $\lambda(^{58}\text{Ni}) = 6300.335$  Å, bei  $\lambda(^{60}\text{Ni}) = 6300.355$  Å, buvo paimti iš Johansson ir kt. (2003) darbo. Deguonies [OI] osciliatoriaus stipris  $\lg gf = -9.917$ , buvo nustatytas kalibruojant Kurucz (2005) Saulės spektrą su deguonies gausa  $\lg A_{\odot} = 8.83$ , paimta iš Grevesse ir Sauval (2000).

Jonizuoto itrio gausa buvo nustatyta iš septynių Y II spektrinių linijų ties 4883.7, 4982.1, 5087.4, 5200.4, 5289.8, 5402.8 ir 5728.9 Å. Cirkonio gausa buvo nustatoma iš Zr I 4687.8, 4739.5, 4772.3, 4815.6, 5385.1, 6134.6, 6140.5 ir 6143.2 Å spektrinių linijų ir iš Zr II 5112.3 ir 5350.1 Å.

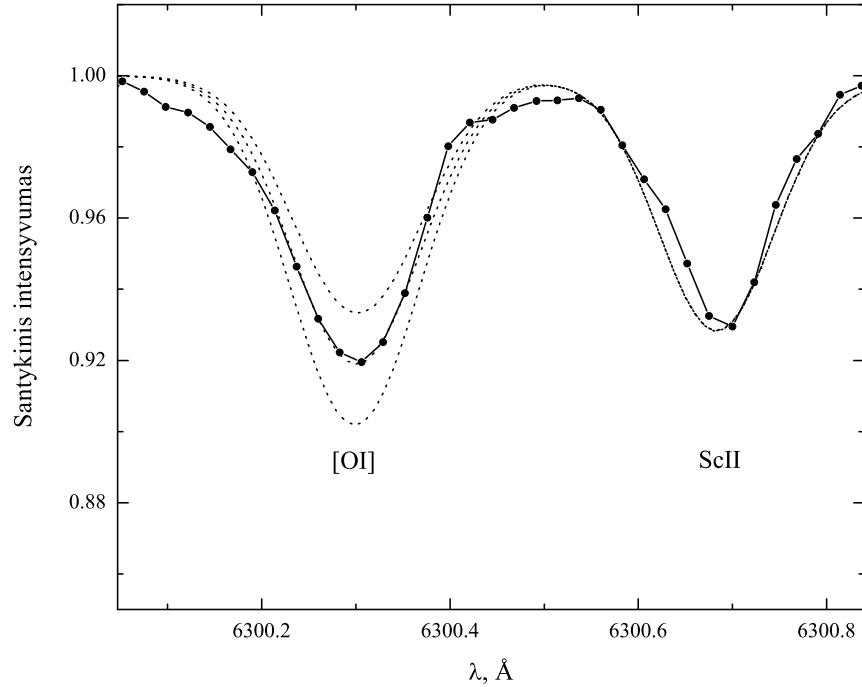
Bario gausai nustatyti naudojome Ba II 5853.7 Å spektrinę liniją, kuriai įskaitėme hipersmulkiąją struktūrą, remiantis McWilliam (1998) darbu.

Lantano gausa buvo nustatyta iš šių La II spektrinių linijų: 4662.5, 4748.7, 5123.0 ir 6390.5 Å. Linijų 4662.5, 5123.0 ir 6390.5 Å analizei pritaikėme  $\lg gf$  vertes iš Lawler ir kt. (2001a), o hipersmulkiąją struktūrą įskaitėme remiantis Ivans ir kt. (2006) darbu. Hipersmulkiąją struktūrą nebuvo įskaitoma linijai 4748.7 Å, nes ši linija yra silpna ir galima nepaisyti išplitimo dėl hipersmul-

**2.1 lentelė:** Cheminių elementų gausos Saulėje (Grevesse ir Sauval 2000).

Elementas	Atomo numeris	$A_{\text{EI}}^{(*)}$	Elementas	Atomo numeris	$A_{\text{EI}}^{(*)}$
H	1	12	Fe	26	$7.50 \pm 0.05$
He	2	$10.93 \pm 0.004$	Co	27	$4.92 \pm 0.04$
O	8	$8.83 \pm 0.06$	Ni	28	$6.25 \pm 0.04$
Na	11	$6.33 \pm 0.03$	Y	39	$2.24 \pm 0.03$
Mg	12	$7.58 \pm 0.05$	Zr	40	$2.60 \pm 0.02$
Al	13	$6.47 \pm 0.07$	Ba	56	$2.13 \pm 0.05$
Si	14	$7.55 \pm 0.05$	La	57	$1.17 \pm 0.07$
Ca	20	$6.36 \pm 0.02$	Ce	58	$1.58 \pm 0.09$
Sc	21	$3.17 \pm 0.10$	Pr	59	$0.71 \pm 0.08$
Ti	22	$5.02 \pm 0.06$	Nd	60	$1.50 \pm 0.06$
V	23	$4.00 \pm 0.02$	Sm	62	$1.01 \pm 0.06$
Cr	34	$5.67 \pm 0.03$	Eu	63	$0.51 \pm 0.08$

$(*) A_{\text{EI}} = \lg (N_{\text{EI}}/N_{\text{H}}) + 12.$



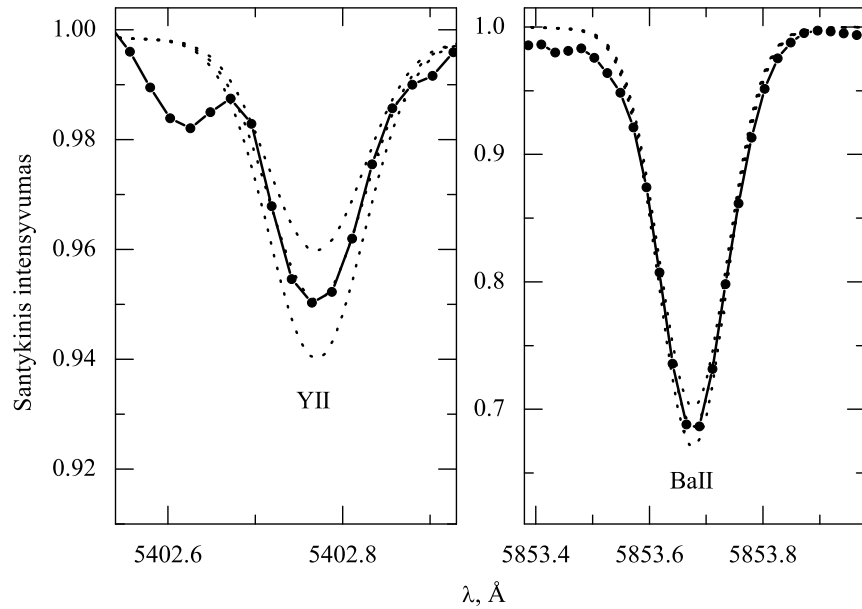
**2.5 pav.:** Sintetinio spektro pavyzdys ties draustine [O I] linija 6300 Å. Stebėtas žvaigždės HD 12782 spektras pavaizduotas taškuota linija, brūkšninė linija žymi sintetinius spektrus, kai  $[O/Fe] = 0.52 \pm 0.10$ .

kiosios struktūros.

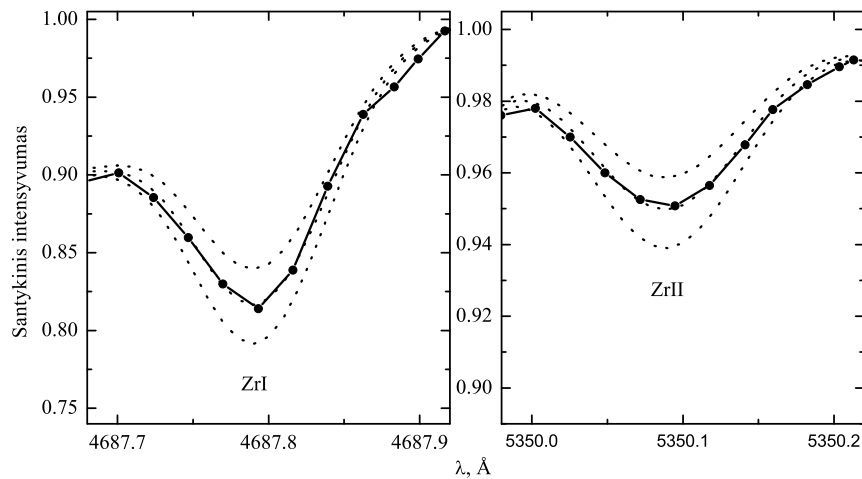
Penkios Ce II linijos 5274.2, 5330.5, 5512.0, 5610.3 ir 6043.4 Å, buvo naudojamos cerio gausos nustatymui. Prazeodimio gausos nustatymui naudojome šias dvi Pr II linijas: 5259.7 ir 5322.8 Å. Informaciją hipersmulkiosios struktūros įvertinimui ėmėme iš Sneden ir kt. (2009) darbo. Tyrėme šias Nd II linijas: 4811.3, 5130.6, 5255.5, 5276.9, 5293.2, 5319.8, 5385.9 ir 5740.9 Å.

Samario gausai nustatyti naudojome tris spektrines linijas ties bangų ilgiais 4467.3, 4577.7, 4791.6 Å. Sm II linijai ties 4467.3 Å  $lg gf$  vertę ėmėme iš Lawler ir kt. (2006) ir įskaitėme hipersmulkiają linijų struktūrą, remiantis Roederer ir kt. (2008). Kitoms dviem linijoms hipersmulkioji struktūra nebuvo įskaityta, nes jos yra labai silpnos, ir hipersmulkaus suskilimo galima nepaisyti (žr.: Mishenina ir kt. (2013))

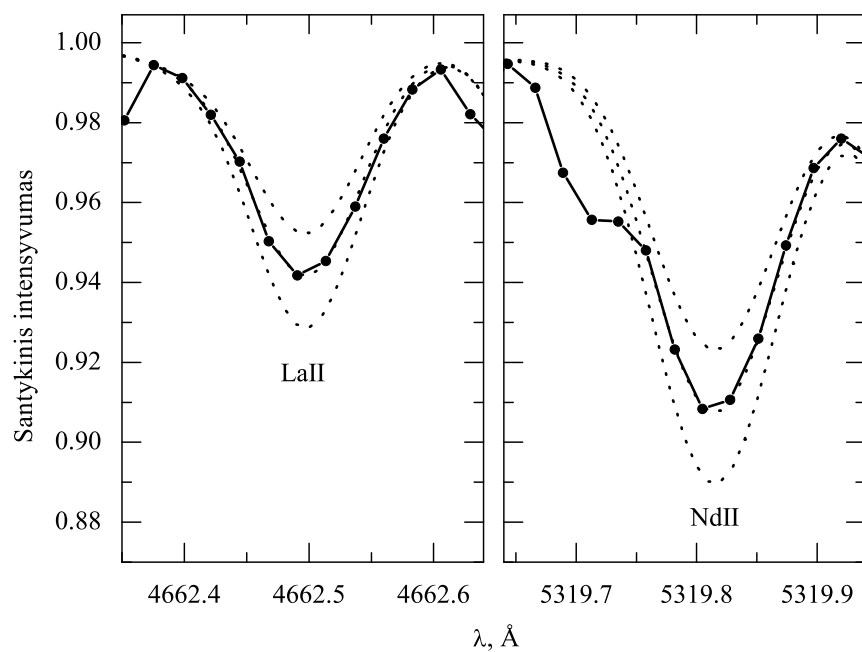
Europio gausa buvo rasta iš Eu II linijų ties 4129.7 ir 6645.1 Å. Šiam elementui taip pat buvo įskaityta hipersmulkioji struktūra. Eu II linijų bangos ilgiai, sužadavimo energijos ir osciliatorių stipriai paimti iš Lawler ir kt. (2001b); Ivans ir kt. (2006) darbų, o europio izotopų pasiskirstymo dalis, pagal



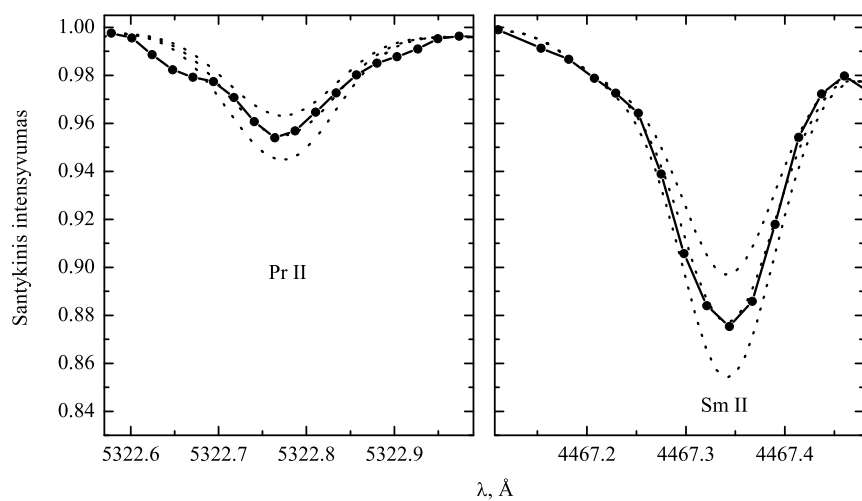
**2.6 pav.:** Sintetinių spektrų pavyzdžiai ties Y II 5402 Å ir Ba II 5853 Å linijomis. Stebėti žvaigždžių HD 21543 (*kairėje*) ir HD 224817 spektrai pavaizduoti taškuota linija, brūkšninė linija žymi sintetinius spektrus, kai  $[Y/Fe] = 0.01 \pm 0.10$  ir  $[Ba/Fe] = -0.10 \pm 0.10$ .



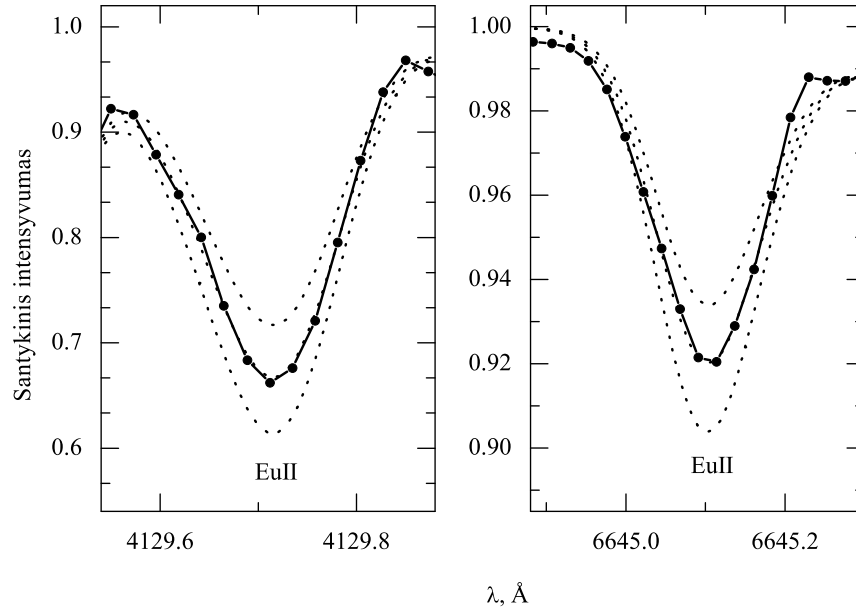
**2.7 pav.:** Sintetinių spektrų pavyzdžiai ties Zr I 4687 Å ir Zr II 5350 Å linijomis. Stebėti žvaigždės HD 188326 spektrai pavaizduoti taškuota linija, brūkšninė linija žymi sintetinius spektrus, kai  $[Zr I/Fe] = 0.07 \pm 0.10$  ir  $[Zr II/Fe] = 0.02 \pm 0.10$ .



**2.8 pav.:** Sintetinių spektrų pavyzdžiai ties La II 4662 Å ir Nd II 5319 Å linijomis. Stebėti žvaigždžių HD 143291 (*kairėje*) ir HD 24156 spektrai pavaizduoti taškuota linija, brūkšninė linija žymi sintetinius spektrus, kai  $[La/Fe] = 0.05 \pm 0.10$  ir  $[Nd/Fe] = 0.12 \pm 0.10$ .



**2.9 pav.:** Sintetinių spektrų pavyzdžiai ties Pr II 5323 Å ir Sm II 4467 Å linijomis. Stebėti žvaigždžių HD 3795 (*kairėje*) ir HD 22872 spektrai pavaizduoti taškuota linija, brūkšninė linija žymi sintetinius spektrus, kai  $[Pr/Fe] = 0.54 \pm 0.10$  ir  $[Sm/Fe] = 0.01 \pm 0.10$ .



**2.10 pav.:** Sintetinių spektrų pavyzdžiai ties Eu II linijomis 4129 Å ir 6645 Å. Stebėti žvaigždės HD 12782 spektrai pavaizduoti taškuota linija, brūkšninė linija žymi sintetinius spektrus, kai  $[Eu/Fe] = 0.40 \pm 0.10$  (*kairėje*) ir  $[Eu/Fe] = 0.45 \pm 0.10$ .

kurią  $^{151}\text{Eu} - 47.77\%$ , o  $^{153}\text{Eu} - 52.23\%$ , bei 6645.1 Å spektrinės linijos izotopų poslinkis, paimti iš Biehl (1976) darbo. Taip pat buvo atsižvelgta į silpnas Si I ir Cr I linijas ties 6645.21 Å.

Įskaitėme ir žvaigždžių sukimąsi,  $v \sin i$  vertės buvo paimtos iš Holmberg ir kt. (2007).

Keletas pavyzdžių, kaip stebėtas spektras buvo aproksimuojamas sintetinių linijų profiliais, yra pateikta 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 ir 2.10 paveiksluose.

## 2.10. Paklaidų įvertinimas

Paklaidų šaltinius galima suskirstyti į dvi grupes. Į pirmąją grupę patenka paklaidos, kilusios dėl kiekvienos linijos analizės, įskaitant ir atsitiktines paklaidas, dėl atominių duomenų, ekvivalentinio linijų pločio matavimų ar ištisinio spektro padėties nustatymo. Paklaidos, kaip kiekvieno elemento apskaičiuotų gausų pagal visas elemento linijas vidutinis kvadratinis nuokrypis, yra pateiktos rezultatų lentelėse. Vidutinis kvadratinis visų cheminių elementų gausų nuokrypis  $\sigma$  yra lygus 0.05. Šią vidutinę paklaidą galima laikyti tipine

atsitiktine paklaida.

Kitas paklaidų atsiradimo šaltinis yra susijęs su žvaigždžių atmosferų parametrais. Remiantis jautrumų sistematinėms paklaidoms analize, galima įvertinti, kurių žvaigždžių atmosferų pagrindinių parametru tikslėnis įvertinimas leistų gerokai sumažinti bendras sistematines paklaidas, o kurių žvaigždžių atmosferų parametru tolesnis tikslinimas nėra prasmingas dėl jų mažos įtakos galutiniam rezultatui.

Cheminių elementų gausų jautrumas sistematinėms paklaidoms ( $\Delta[A/H]$ ) 1-osios ŽKA grupės žvaigždei HD 52711 ir 2-osios ŽKA grupės žvaigždei HD 10519 yra pateiktas 2.2 ir 2.3 lentelėse. Lentelėse taip pat pateikiame suminę paklaidą, kuri yra skaičiuojama pagal bendrą formulę:

$$u_{Suma}(x) = \sqrt{(u_1(x))^2 + (u_2(x))^2 + (u_3(x))^2 + \dots}, \quad (2.12)$$

čia  $u_1(x), u_2(x), u_3(x)$  yra matuojamojo ( $x$ ) kiekvieno atlikto matavimo vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai.

Žvaigždžių atmosferų pagrindiniai parametrai  $T_{\text{eff}}$ ,  $\lg g$ ,  $[Fe/H]$  ir su jais susijusios sistematinės paklaidos nėra didelės, o darbe analizuojamiems cheminių elementų gausų santykiams poveikis yra dar mažesnis.

**2.2 lentelė:** Cheminių elementų gausų jautrumas atmosferų parametrų pokyčiams 1-osios ŽKA grupės žvaigždei HD 52711.

[El/H]	$\Delta T_{\text{eff}}$ $\pm 100$ K	$\Delta \lg g$ $\pm 0.30$	$\Delta v_t$ $\pm 0.30$ km s <sup>-1</sup>	Suma
[O I]	0.03	0.13	0.01	0.13
Na I	0.05	-0.02	-0.01	0.05
Mg I	0.05	-0.02	-0.03	0.06
Al I	0.04	0.00	0.00	0.04
Si I	0.03	0.01	-0.01	0.03
Ca I	0.07	-0.01	-0.02	0.07
Sc II	-0.00	0.11	-0.04	0.12
Ti I	0.09	0.00	-0.01	0.09
Ti II	0.01	0.12	-0.05	0.13
V I	0.11	-0.00	-0.01	0.11
Cr I	0.08	-0.02	-0.06	0.10
Cr II	-0.03	0.10	-0.09	0.14
Fe I	0.07	-0.02	-0.07	0.10
Fe II	-0.02	0.11	-0.07	0.13
Co I	0.08	0.01	-0.01	0.08
Ni I	0.06	-0.00	-0.04	0.07
Y II	0.02	0.10	-0.12	0.16
Zr I	0.11	0.01	0.01	0.11
Zr II	0.02	0.13	0.01	0.13
Ba II	0.06	0.08	-0.18	0.21
La II	0.03	0.12	0.01	0.12
Ce II	0.03	0.11	0.01	0.11
Pr II	0.02	0.12	0.01	0.12
Nd II	0.03	0.12	-0.01	0.12
Sm II	0.04	0.11	-0.01	0.12
Eu II	0.03	0.12	0.01	0.12

**2.3 lentelė:** Cheminių elementų gausų jautrumas atmosferų parametrų pokyčiams 2-osios ŽKA grupės žvaigždei HD 10519.

[El/H]	$\Delta T_{\text{eff}}$ $\pm 100$ K	$\Delta \lg g$ $\pm 0.30$	$\Delta v_t$ $\pm 0.30$ km s <sup>-1</sup>	Suma
[O I]	0.03	0.12	0.01	0.12
Na I	0.05	-0.01	-0.01	0.05
Mg I	0.05	-0.02	-0.03	0.06
Al I	0.03	-0.02	-0.02	0.04
Si I	0.03	0.01	-0.02	0.04
Ca I	0.07	-0.01	-0.03	0.08
Sc II	0.00	0.11	-0.06	0.13
Ti I	0.09	0.00	-0.02	0.09
Ti II	0.01	0.12	-0.05	0.13
V I	0.10	-0.01	-0.01	0.10
Cr I	0.08	-0.01	-0.04	0.09
Fe I	0.07	-0.01	-0.06	0.09
Fe II	-0.02	0.11	-0.08	0.14
Co I	0.09	0.01	-0.01	0.09
Ni I	0.06	0.00	-0.04	0.07
Y II	0.02	0.10	-0.12	0.16
Zr I	0.11	0.00	0.01	0.11
Zr II	0.02	0.13	0.01	0.13
Ba II	0.06	0.09	-0.14	0.18
La II	0.04	0.12	0.01	0.13
Ce II	0.03	0.12	0.01	0.12
Pr II	0.03	0.12	0.01	0.12
Nd II	0.04	0.12	-0.01	0.13
Sm II	0.04	0.11	-0.01	0.12
Eu II	0.04	0.12	0.00	0.13



# Skyrius 3

## Rezultatai ir jų aptarimas

### 3.1. Žvaigždžių atmosferų parametrai ir cheminių elementų gausos

Šiame darbe buvo tirtos trisdešimt septynios 1-osios, trisdešimt dvi 2-osios ŽKA kinematinė grupių žvaigždės bei penkiolika palyginamųjų Galaktikos plonojo disko ir penkios palyginamosios Galaktikos storjo disko žvaigždės. Naudojant aukštos skiriamosios gebos spektrus buvo nustatyti pagrindiniai fizikiniai atmosferų parametrai: efektinė temperatūra  $T_{\text{eff}}$ , gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje  $\lg g$ , metalingumas  $[\text{Fe}/\text{H}]$  ir mikroturbulencijos greitis  $\nu_t$ , bei 21 cheminio elemento gausos. Lentelėse 3.1, 3.2 ir 3.3 yra pateikiami nustatyti pagrindiniai parametrai, geležies gausų vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai ( $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ ) bei linijų skaičius ( $n_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ ) kinematinė grupių ir palyginamosioms žvaigždėms.

1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždės apima metalingumo intervalą nuo  $-0.57$  iki  $0.04$ , su vidutine metalingumo verte  $\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle = -0.20 \pm 0.14$ . 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių metalingumo intervalas siauresnis – nuo  $-0.60$  iki  $-0.16$ , su vidutine verte  $\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle = -0.42 \pm 0.10$ . Kitų cheminių elementų gausos yra gana homogeniškos ir rodo panašų praturtinimą  $\alpha$ -elementais ir elementais, daugiausia gaminamais  $r$ -procesu, kas buvo pastebėta tiriant ir 3-iają ŽKA kinematinę grupę (Stonkutė ir kt. 2012, 2013).

Lentelėse B.1, B.2, B.3, B.4, B.5 ir B.6, esančiose disertacijos priede, yra pateikiamos lengvųjų,  $\alpha$ -proceso, geležies piko bei neutronų pagavimo reakcijų metu susidarančių cheminių elementų gausos, nustatytos kinematinė grupių ir palyginamosioms žvaigždėms.

**3.1 lentelė:** 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių atmosferų parametrai.

Žvaigždės vardas	$T_{\text{eff}}$ K	$\lg g$	$v_t$ km s <sup>-1</sup>	[Fe/H]	$\sigma_{\text{FeI}}$	$n_{\text{FeI}}$	$\sigma_{\text{FeII}}$	$n_{\text{FeII}}$
HD 3795	5360	3.7	1.0	-0.57	0.05	31	0.04	6
HD 4607	6200	3.8	1.2	-0.08	0.05	25	0.03	6
HD 15777	5800	4.2	1.0	-0.33	0.04	28	0.04	6
HD 22872	5980	4.0	1.1	0.04	0.05	34	0.02	8
HD 25123	5880	3.9	1.1	0.02	0.04	37	0.06	8
HD 40040	5740	4.0	1.1	-0.24	0.05	37	0.05	7
HD 49409	5770	4.1	0.9	-0.23	0.05	32	0.04	6
HD 52711	5870	4.1	1.0	-0.08	0.05	38	0.03	7
HD 60779	5990	4.1	0.9	-0.10	0.05	36	0.04	8
HD 67088	5610	4.0	0.8	-0.04	0.04	37	0.03	7
HD 67587	6030	3.8	1.1	-0.25	0.05	34	0.05	8
HD 76095	5720	4.1	1.0	-0.19	0.04	35	0.05	8
HD 77408	6340	4.2	1.1	-0.11	0.04	25	0.04	7
HD 78558	5640	4.0	0.9	-0.41	0.05	36	0.04	7
HD 88371	5630	4.2	0.8	-0.23	0.04	38	0.06	8
HD 88446	5990	3.9	1.2	-0.39	0.05	34	0.03	8
HD 90508	5760	4.1	1.0	-0.26	0.04	37	0.05	8
HD 109498	5810	4.2	1.0	-0.11	0.06	30	0.06	6
HD 111367	5830	4.0	1.0	-0.06	0.05	34	0.05	8
HD 135694	5520	3.9	0.9	-0.23	0.06	24	0.06	5
HD 138750	6130	3.8	1.1	-0.18	0.05	33	0.04	8
HD 140209	5710	4.0	1.1	-0.14	0.05	28	0.03	5
HD 149105	5930	3.8	1.0	-0.05	0.04	30	0.02	7
HD 149890	6030	4.0	1.1	-0.20	0.05	33	0.03	6
HD 156617	5780	3.9	1.0	-0.03	0.04	33	0.03	7
HD 156893	5300	3.8	0.9	-0.21	0.04	36	0.03	8
HD 157214	5640	4.0	0.8	-0.36	0.04	33	0.02	6
BD +40 3374	5050	4.6	0.8	-0.43	0.05	31	0.06	4
HD 171009	5840	4.0	1.0	-0.35	0.04	32	0.04	6
HD 171242	5920	3.8	0.9	-0.22	0.06	22	0.05	6
HD 178478	5550	3.6	1.0	-0.50	0.03	24	0.04	5
HD 188326	5310	3.8	0.9	-0.18	0.05	35	0.04	6
HD 206373	5900	3.8	1.1	-0.16	0.04	26	0.02	5
HD 210483	5850	4.0	0.9	-0.04	0.04	29	0.06	4
HD 211476	5840	4.2	0.9	-0.10	0.05	32	0.03	7
HD 217511	6460	3.7	1.4	-0.12	0.03	20	0.05	6
HD 219175	6050	4.2	0.9	-0.24	0.05	30	0.03	5

**3.2 lentelė:** 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių atmosferų parametrai.

Žvaigždės vardas	$T_{\text{eff}}$ K	$\lg g$	$v_t$ km s <sup>-1</sup>	[Fe/H]	$\sigma_{\text{FeI}}$	$n_{\text{FeI}}$	$\sigma_{\text{FeII}}$	$n_{\text{FeII}}$
BD +68 813	5820	4.4	1.2	-0.48	0.05	29	0.05	6
BD +31 3330	4830	4.4	0.8	-0.32	0.03	31	0.04	5
HD 10519	5680	3.8	0.9	-0.52	0.04	33	0.05	7
HD 12782	4980	3.4	1.1	-0.48	0.04	35	0.03	7
HD 16397	5750	4.1	1.1	-0.47	0.04	35	0.05	7
HD 18757	5600	4.1	0.8	-0.25	0.04	34	0.01	7
HD 21543	5640	4.1	1.0	-0.53	0.04	34	0.05	7
HD 24156	5470	3.9	0.9	-0.43	0.05	38	0.02	7
HD 29587	5660	4.2	0.9	-0.51	0.04	34	0.06	7
HD 30649	5770	4.1	0.9	-0.45	0.04	36	0.02	7
HD 37739	6280	3.8	1.0	-0.41	0.05	24	0.05	5
HD 38767	6170	3.6	1.0	-0.55	0.05	26	0.06	5
HD 96094	5970	4.1	1.1	-0.31	0.05	26	0.04	6
HD 114606	5600	4.2	0.9	-0.50	0.05	31	0.05	7
HD 121533	5600	4.0	1.0	-0.37	0.05	28	0.04	6
HD 131582	4770	4.3	0.8	-0.36	0.03	37	0.02	5
HD 132142	5180	4.3	0.8	-0.35	0.03	34	0.05	7
HD 133621	5650	3.7	1.0	-0.40	0.05	34	0.06	7
HD 137687	5070	3.6	0.8	-0.56	0.03	29	0.02	6
HD 139457	6000	3.9	1.2	-0.43	0.06	24	0.04	7
HD 143291	5280	4.4	0.7	-0.33	0.03	36	0.05	6
HD 152123	6040	3.7	1.2	-0.16	0.05	23	0.05	6
HD 156802	5660	3.9	0.9	-0.37	0.05	32	0.04	7
HD 158226	5740	4.0	1.1	-0.47	0.05	30	0.03	7
HD 165401	5770	4.3	0.8	-0.33	0.05	34	0.05	7
HD 170357	5710	3.9	0.9	-0.34	0.04	31	0.06	6
HD 190404	5000	4.5	0.8	-0.58	0.04	35	0.03	5
HD 200580	5860	3.9	1.0	-0.56	0.05	28	0.03	7
HD 201099	5890	3.8	1.0	-0.40	0.05	31	0.04	7
HD 215594	5810	3.8	1.0	-0.26	0.04	33	0.03	7
HD 221830	5720	4.1	1.0	-0.37	0.05	32	0.05	7
HD 224817	5720	3.7	0.8	-0.60	0.04	31	0.04	5

**3.3 lentelė:** Palyginamųjų žvaigždžių atmosferų parametrai.

Žvaigždės vardas	$T_{\text{eff}}$ K	$\lg g$	$v_t$ km s <sup>-1</sup>	[Fe/H]	$\sigma_{\text{FeI}}$	$n_{\text{FeI}}$	$\sigma_{\text{FeII}}$	$n_{\text{FeII}}$
Galaktikos plonojo disko žvaigždės								
HD 41330	5820	4.0	1.0	-0.16	0.04	35	0.03	7
HD 43318	6230	3.6	1.1	-0.10	0.05	29	0.05	6
HD 69897	6330	4.0	1.3	-0.24	0.05	38	0.02	7
HD 108954	5960	3.9	1.1	-0.07	0.05	29	0.03	6
HD 115383	6090	4.0	1.2	0.20	0.05	29	0.05	8
HD 127334	5610	4.0	0.8	0.24	0.05	33	0.07	7
HD 136064	6090	3.9	1.1	0.05	0.06	30	0.04	7
HD 153597	6380	4.0	1.3	-0.10	0.05	20	0.05	5
HD 157466	6130	4.2	1.2	-0.34	0.05	30	0.05	7
HD 163989	6240	3.7	1.3	0.06	0.04	30	0.03	8
HD 176377	5770	4.1	0.8	-0.24	0.05	37	0.05	7
HD 187013	6290	3.6	1.3	0.00	0.05	22	0.04	7
HD 187691	6140	3.9	1.2	0.20	0.05	35	0.05	8
HD 200790	6190	3.9	1.3	0.08	0.04	32	0.02	8
HD 220117	6480	3.4	1.2	0.22	0.04	23	0.04	6
Galaktikos storio disko žvaigždės								
HD 150433	5650	4.2	0.9	-0.34	0.05	37	0.05	7
HD 181047	5550	4.2	0.8	0.01	0.05	35	0.04	6
HD 186411	5860	3.7	1.2	0.11	0.05	34	0.03	8
HD 195019	5750	4.0	0.9	0.11	0.03	37	0.04	8
HD 198300	5830	4.1	0.9	-0.44	0.04	38	0.04	8

**3.4 lentelė:** 1-osios grupės ir palyginamųjų plonojo disko žvaigždžių palyginimas su ankstesniais tyrimais.

Dydis	Mūsų–B14 <sup>(1)</sup>	Mūsų–R06 <sup>(2)</sup>	Mūsų–E93 <sup>(3)</sup>
$T_{\text{eff}}$	$-31 \pm 48$	$74 \pm 51$	$-12 \pm 65$
$\log g$	$-0.18 \pm 0.10$	$-0.16 \pm 0.15$	$-0.28 \pm 0.24$
[Fe/H]	$0.04 \pm 0.05$	$0.09 \pm 0.06$	$0.15 \pm 0.06$
[Na/Fe]	$-0.01 \pm 0.03$	$-0.05 \pm 0.05$	$-0.05 \pm 0.07$
[Mg/Fe]	$0.05 \pm 0.08$	$-0.07 \pm 0.06$	$0.06 \pm 0.11$
[Al/Fe]	$0.00 \pm 0.06$	$-0.02 \pm 0.06$	$-0.11 \pm 0.05$
[Si/Fe]	$0.01 \pm 0.03$	$-0.03 \pm 0.03$	$-0.02 \pm 0.03$
[Ca/Fe]	$0.02 \pm 0.03$	$0.04 \pm 0.02$	$0.03 \pm 0.05$
[Sc/Fe]	...	$0.01 \pm 0.07$	...
[Ti/Fe]	$0.02 \pm 0.04$	$0.06 \pm 0.04$	$-0.04 \pm 0.06$
[V/Fe]	...	$0.03 \pm 0.05$	...
[Cr/Fe]	$0.01 \pm 0.02$	$0.02 \pm 0.03$	...
[Co/Fe]	...	$-0.01 \pm 0.04$	...
[Ni/Fe]	$0.00 \pm 0.03$	$-0.02 \pm 0.02$	$-0.12 \pm 0.05$
[Y/Fe]	$-0.05 \pm 0.06$	$-0.10 \pm 0.09$	$-0.12 \pm 0.09$
[Ba/Fe]	$-0.02 \pm 0.14$	$0.06 \pm 0.13$	$-0.06 \pm 0.18$
[Ce/Fe]	...	$0.01 \pm 0.15$	...
[Nd/Fe]	...	$-0.06 \pm 0.10$	...
[Eu/Fe]	...	$-0.02 \pm 0.11$	...

<sup>(1)</sup> 13 bendrų žvaigždžių su Bensby ir kt. (2014) darbu (B14);

<sup>(2)</sup> 7 bendros žvaigždės su Reddy ir kt. (2006) darbu (R06);

<sup>(3)</sup> 8 bendros žvaigždės su Edvardsson ir kt. (1993) darbu (E93).

## 3.2. Palyginimas su ankstesniais rezultatais

Visoms šiame disertacijos darbe tirtoms žvaigždėms efektinė temperatūra ir metalingumas buvo nustatyti Holmberg ir kt. (2009) ir Casagrande ir kt. (2011) darbuose. Lyginant Holmberg ir kt. (2009), Casagrande ir kt. (2011) nustatytas temperatūras matyti, kad žvaigždės Casagrande ir kt. (2011) kataloge yra vidutiniškai 100 K karštesnės nei Holmberg ir kt. (2009) kataloge. O mūsų nustatytos temperatūros 1-osios grupės žvaigždėms yra vidutiniškai  $40 \pm 70$  K karštesnės už Holmberg ir kt. (2009) katalogo ir vidutiniškai  $40 \pm 90$

**3.5 lentelė:** 2-osios grupės žvaigždžių palyginimas su ankstesniais tyrimais.

Dydis	Mūsų–R06 <sup>(1)</sup>	Mūsų–Ma07 <sup>(2)</sup>	Mūsų–Ra07 <sup>(3)</sup>
$T_{\text{eff}}$	$118 \pm 44$	$-56 \pm 29$	$72 \pm 59$
$\log g$	$-0.10 \pm 0.13$	$-0.20 \pm 0.06$	$-0.15 \pm 0.13$
[Fe/H]	$0.12 \pm 0.13$	$0.04 \pm 0.04$	$0.08 \pm 0.05$
[Na/Fe]	$-0.07 \pm 0.03$	...	...
[Mg/Fe]	$0.01 \pm 0.06$	...	...
[Al/Fe]	$-0.02 \pm 0.08$	...	...
[Si/Fe]	$0.01 \pm 0.06$	...	...
[Ca/Fe]	$0.05 \pm 0.04$	...	...
[Sc/Fe]	$0.07 \pm 0.11$	...	...
[Ti/Fe]	$0.06 \pm 0.08$	...	...
[V/Fe]	$0.01 \pm 0.15$	...	...
[Cr/Fe]	$0.02 \pm 0.04$	...	...
[Co/Fe]	$0.00 \pm 0.04$	...	...
[Ni/Fe]	$0.00 \pm 0.05$	...	...
[Y/Fe]	$-0.06 \pm 0.08$	$-0.10 \pm 0.08$	...
[Zr/Fe]	...	$-0.07 \pm 0.08$	...
[Ba/Fe]	$0.08 \pm 0.08$	$0.01 \pm 0.06$	...
[Ce/Fe]	$-0.04 \pm 0.16$	$-0.11 \pm 0.11$	...
[Nd/Fe]	$-0.12 \pm 0.23$	...	...
[Eu/Fe]	$0.03 \pm 0.09$	...	...

<sup>(1)</sup> 7 bendros žvaigždės su Reddy ir kt. (2006) darbu (R06);

<sup>(2)</sup> 5 bendros žvaigždės su Mashonkina ir kt. (2007) darbu (Ma07);

<sup>(3)</sup> 10 bendrų žvaigždžių su Ramírez ir kt. (2007) darbu (Ra07).

K vėsesnės nei Casagrande ir kt. (2011) kataloge. 2-osios grupės žvaigždžių mūsų nustatytos temperatūros yra vidutiniškai tik  $10 \pm 60$  K karštesnės nei Holmberg ir kt. (2009) katalogo ir vidutiniškai  $60 \pm 80$  K vėsesnės nei Casagrande ir kt. (2011) kataloge.

Lyginant Holmberg ir kt. (2009) ir Casagrande ir kt. (2011) nustatytus metalingumus, matyti, kad pastarųjų nustatyta [Fe/H] vertė yra vidutiniškai 0.1 metalingesnė. Mūsų tirtų abiejų grupių žvaigždžių nustatytas metalingumas yra vidutiniškai  $0.1 \pm 0.1$  didesnis, nei Holmberg ir kt. (2009), o lyginant

su Casagrande ir kt. (2011) darbu gaunamas labai geras sutapimas su 0.1 išsibarstymu.

Kai kurios žvaigždės iš mūsų rinkinio buvo tirtos kitų autorių. Lentelėse 3.4 ir 3.5 palyginome mūsų gautus rezultatus su Edvardsson ir kt. (1993), Reddy ir kt. (2006), Mashonkina ir kt. (2007), Ramírez ir kt. (2007) ir Bensby ir kt. (2014) darbų rezultatais (minėtose lentelėse pateikiami skirtumų vidurkiai). Iš paminėtų autorių, tik Bensby ir kt. (2014) naudojo tuos pačius metodus pagrindinių parametrų nustatymui kaip ir mes. Papildomai jie  $\lg g$  nustatė ir pagal 2.6 sąryšį, ir pastebi, kad abu metodai turi savo privalumų ir trūkumų. Tuo tarpu Edvardsson ir kt. (1993)  $T_{\text{eff}}$ ,  $\lg g$  ir  $[\text{Me}/\text{H}]$  nustatė fotometriškai, o  $v_t$  – empiriškai pagal panašų į 2.10 sąryšį. Fotometriškai efektingą temperatūrą nustatė ir Reddy ir kt. (2006), gravitacijos pagreičio logaritmą – kombinuojant žvaigždžių izochronų,  $T_{\text{eff}}$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]$  duomenis bei HIPPARCOS astrometriją, metalingumas buvo nustatytas fotometriškai ir iš ekvivalentinių geležies linijų pločių, mikroturbulencijos greitis – empiriškai. Mashonkina ir kt. (2007)  $T_{\text{eff}}$  nustatė spektroskopiškai, analizuodami Balmerio  $H_\alpha$  ir  $H_\beta$  linijų sparnus,  $\lg g$  – analizuodami Mg I linijų ties 5172 Å ir 5183 Å sparnus ir naudodami HIPPARCOS trigonometrinius paralaksus (2.6 sąryšis),  $[\text{Fe}/\text{H}]$  ir  $v_t$  buvo nustatyti iš Fe II linijų. Galiausiai Ramírez ir kt. (2007)  $T_{\text{eff}}$  nustatymui panaudojo infraraudonųjų spindulių srauto metodą,  $\lg g$  nustatymui - HIPPARCOS paralaksus,  $[\text{Fe}/\text{H}]$  nustatytas iš geležies spektrinių linijų.

Skirtingi pritaikyti pagrindinių fizikinių parametrų nustatymo metodai lemia nežymius skirtumus tarp mūsų ir kitų autorių gautų duomenų. Savo darbe mes matome, kad titano ir cirkonio gausos, nustatytos iš neutralių ir jonizuotų atomų linijų, sutampa gana gerai ir patvirtina gerą disertaciniame darbe iš geležies linijų nustatytų  $\lg g$  verčių tikslumą.

### 3.3. Lengvieji ir geležies grupės cheminiai elementai

Skirtingų masių žvaigždės sintetina ir išmeta į tarpžvaigždinę erdvę skirtingus elementus skirtingais laiko tarpais, todėl atskirų cheminių elementų gausa

teikia daugiau informacijos nei bendras metalingumas. Masyvios žvaigždės ( $8M_{\odot} \leq M \leq 100M_{\odot}$ ), kurios savo gyvenimą baigia kaip II tipo supernovos, gamina ir išmeta vidutinės masės cheminius elementus, daugiausia sintetinus paeiliui prijungiant helio branduolius ir kolektyviškai vadinamus  $\alpha$ -elementais (O, Mg, Si, S, Ca, Ti). Jos evoliucionuoja greičiau nei įprasta (apie  $10^7$  m.). Todėl žvaigždės, kurios susiformuoja anksti, prieš pradėdant sproginėti Ia tipo supernovoms, yra praturtintos tik II tipo supernovų produktais, t.y. pasižymės charakteringu didesniu  $[\alpha/\text{Fe}]$  santykiu.

Ia tipo supernovos sproginimu savo evoliuciją baigia masyvios baltosios nykštukės, esančios artimoje dvinarėje sistemoje ir siurbiančios medžiagą nuo savo kompanionės, kol pasiekama Čandrasekaro masė. Šiose žvaigždėse gaminasi daugiau geležies ir labai maža dalis  $\alpha$ -elementų. Žvaigždei, kurios masė  $\leq 8M_{\odot}$ , pasiekti baltosios nykštukės evoliucijos stadiją, pritraukti pakankamai medžiagos ir sprogti kaip Ia tipo supernovai reikia kelių šimtų milijonų metų. O tam, kad tarpžvaigždinė medžiaga būtų praturtinta pakankamu kiekiu geležies sekančiai žvaigždžių kartai, reikia apie  $10^9$  m. Taip susidaro užlaikymo efektas tarp II ir Ia tipo supernovų sproginimų, kuris sąlygoja  $\alpha$ -proceso elementų mažėjimą dėl Fe gausos padidėjimo. Tarpžvaigždinės medžiagos praturtinimas Ia tipo supernovų produktais priklauso nuo užlaikymo efekto trukmės. Jos konkrečiai apibrėžti neįmanoma, nes, kaip jau minėjau, Ia tipo supernovos paprastai būna dvinarių sistemų žvaigždės, o jų evoliucijos ir suirimo laikas gali stipriai svyruoti. Praturtinimo cheminiais elementais greitis priklauso nuo žvaigždžių formavimosi greičio, dujų kiekio bei sistemos galimybių išlaikyti metalus, kad jų neišneštų žvaigždžių vėjas. Paveiksle 3.2 ištisine linija pavaizduotas Pagel ir Tautvaišienė (1995) teorinis Galaktikos plonojo disko cheminės evoliucijos modelis, rodantis  $\alpha$ -elementų gausos kitimą geležies gausos atžvilgiu.

$\alpha$ -elementų gausos yra labai svarbios Galaktikos cheminės evoliucijos tyrimams. Šių cheminių elementų gausų santykiai gali padėti nustatyti pirminę masių funkciją (IMF), žvaigždžių formavimosi greitį (SFR) ir cheminės evoliucijos laiko skales (McWilliam 1997). Jei žvaigždės susiformavo skirtingose tarpžvaigždinėse aplinkose, jos turės skirtingą  $\alpha$ -elementų ir geležies gausos santykį  $[\alpha/\text{Fe}]$ , esant tam pačiam metalingumui (Pagel ir Tautvaišienė 1995;



Fuhrmann 1998; Reddy ir kt. 2006; Tautvaišienė ir kt. 2007; Tolstoy ir kt. 2009).

Paveiksle 3.1 grafiškai pavaizduoti 37 1-osios ŽKA kinematinės grupės lengvųjų ir geležies piko elementų gausų tyrimo rezultatai kartu su 21 Galaktikos plonojo disko palyginamosios žvaigždės, tirtų šiame darbe ir Stonkutė ir kt. (2012) darbe, rezultatais. Savo rezultatus palyginome su Edvardsson ir kt. (1993), Reddy ir kt. (2006), Zhang ir Zhao (2006), Bensby ir kt. (2014) darbais. Galaktikos plonojo disko cheminės evoliucijos modeliai paimti iš Pagel ir Tautvaišienė (1995) darbo.

Trisdešimt dviejų 2-osios ŽKA kinematinės grupės lengvųjų ir geležies piko elementų gausų tyrimo rezultatai grafiškai pavaizduoti 3.2. Šiame paveiksle taip pat yra pavaizduoti trylikos Galaktikos plonojo disko palyginamųjų žvaigždžių, tirtų šiame darbe ir Stonkutė ir kt. (2012) darbe, rezultatai. Kadangi žvaigždės yra šiek tiek skirtingame metalingumo intervale, savo rezultatus palyginome su Edvardsson ir kt. (1993), Bensby ir kt. (2005), Reddy ir kt. (2006), Zhang ir Zhao (2006) darbais, o Galaktikos plonojo disko cheminės evoliucijos modeliai paimti iš Pagel ir Tautvaišienė (1995) darbo.

Edvardsson ir kt. (1993) ir Zhang ir Zhao (2006) darbuose buvo tirtos ne tik plonojo disko žvaigždės, tad palyginimui plonojo disko žvaigždes iš šių autorių darbų atrinkome naudojantis kinematinio narystės tikimybės analizės metodu, aprašytu Trevisan ir kt. (2011), kadangi jų žvaigždžių imtis apėmė ir kitas Galaktikos komponentes. Tą patį atrankos metodą naudojo ir Bensby ir kt. (2005) su Reddy ir kt. (2006), taigi plonojo disko žvaigždės, naudotos palyginimui, atrinktos vienodai.

Aptariamasis metodas remiasi prielaida, kad kiekvienos populiacijos erdviams greičiams yra būdingas Gauso pasiskirstymas, su duotomis vidutinėmis vertėmis ir išsibarstymu  $\sigma_U$ ,  $\sigma_V$ ,  $\sigma_W$ . Lygtys, pagal kurias nustatoma narystės tikimybė, yra tokios:

$$p_{\text{plonasis}} = f_1 \frac{p_1}{p}, \quad p_{\text{storasis}} = f_2 \frac{p_2}{p}, \quad p_{\text{sferoidas}} = f_3 \frac{p_3}{p}, \quad (3.1)$$

čia  $p_{\text{plonasis}}$ ,  $p_{\text{storasis}}$ ,  $p_{\text{sferoidas}}$  yra tikimybė, kad žvaigždė priklausys plonajam, storajam diskams ar sferoidui. O  $f_i$  – santykinis atitinkamos populiacijos

tankis.

Tuomet tikimybę  $p$  galima užrašyti kaip:

$$p = f_1 p_1 + f_2 p_2 + f_3 p_3.$$

Bet kurios populiacijos tikimybė  $p_i$  tuomet bus lygi:

$$p_i = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{U_i} \sigma_{V_i} \sigma_{W_i}} \exp \left[ -\frac{U^2}{2\sigma_{U_i}^2} - \frac{(V - V_{\text{lag}})^2}{2\sigma_{V_i}^2} - \frac{W^2}{2\sigma_{W_i}^2} \right], \quad (3.2)$$

čia  $V_{\text{lag}}$  yra žvaigždžių asimetrinis greitis.

### 3.3.1. Deguonis

Deguonis yra labiausiai paplitęs elementas po vandenilio ir helio, gaminamas masyviose žvaigždėse. Izotopas  $^{16}\text{O}$  gaminamas helio degimo ir neono degimo reakcijų metu. Mažiau paplitę izotopai  $^{17}\text{O}$  ir  $^{18}\text{O}$  gaminami atitinkamai CNO ciklo metu degant vandenilio apvalkalui ir  $^{14}\text{N}$   $\alpha$  dalelės pagavimo reakcijos metu degant helio apvalkalui (Woosley ir Weaver 1995).

Kaip jau buvo minėta, deguonies gausą nustatėme iš draustinės [OI] linijos ties 6300.31 Å. Iš turimų žvaigždžių deguonies gausą pavyko nustatyti 24 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždėms ir 18 2-osios grupės žvaigždžių. Deguonies gausa nebuvo nustatyta toms žvaigždėms, kurių spektre ši linija buvo per silpna, arba buvo persiklojusi su atmosferos linijomis.

Iš 3.1 ir 3.2 paveikslų matyti, kad 1-osios ir 2-osios grupės žvaigždžių atmosferų deguonies gausa yra padidėjusi, lyginant su Galaktikos plonojo disko nykštukių gausomis tame pačiame metalingumo intervale. Tik dviejų 2-osios grupės žvaigždžių – HD 200580 ir HD 224817 – deguonies gausa sutampa su plonojo disko žvaigždžių gausa.

### 3.3.2. Natris ir aliuminis

Natris ir aliuminis paprastai yra priskiriami prie lengvųjų  $\alpha$ -elementų, nors jų branduoliai ir turi nelyginį protonų skaičių (McWilliam 1997).

Tiek  $^{23}\text{Na}$ , tiek ilgiau išliekantis radioaktyvus  $^{22}\text{Na}$  daugiausia gaminasi vykstant anglies degimo reakcijoms. Ilgaamžis radioaktyvus  $^{26}\text{Al}$  izotopas daugiausia sintetinasi neono apvalkale, bet nemenka jo dalis yra pagaminama ir vandenilio apvalkale bei vykstant maišymuisi raudonosiose milžinėse (Woosley ir Weaver 1995).

Reddy ir kt. (2006) natrių priskiria prie nikelio tipo elementų, Brewer ir Carney (2006) savo darbe mini, kad natrio gausa nerodo priklausomybės nuo geležies gausos. Bensby ir kt. (2005) savo darbe įžvelgia, kad plonojo ir storjo disko žvaigždžių natrio gausos skiriasi – pastarajame žvaigždės turi šiek tiek mažiau natrio.

Daug autorių (Prochaska ir kt. 2000; Bensby ir kt. 2003, 2005; Reddy ir kt. 2006) pastebi, kad aliuminis elgiasi panašiai kaip  $\alpha$ -elementai: nemetalingos storjo disko žvaigždės yra labiau praturtintos nei to paties metalingumo plonojo disko žvaigždės. Bensby ir kt. (2005) svarsto, kad Al ir  $\alpha$ -elementai yra gaminami toje pačioje aplinkoje ir buvo išsklaidyti tarpžvaigždinėje erdvėje tuo pačiu laiko momentu, t.y. sprognus II tipo supernovoms.

Kokias linijas naudojome Na gausos radimui, jau buvo minėta 2.7 skyriuje. Pirmosios dvi linijos (4751.8 ir 5148.8 Å) yra gana silpnos, karštų ir nemetalingų žvaigždžių spektruose jos paprastai būna per silpnos ekvivalentiniams pločiams matuoti. Iš visų penkių linijų Na gausą nustatėme dešimčiai 1-osios grupės žvaigždžių ir tik dviem 2-osios grupės žvaigždėms, aštuonioms 1-osios grupės ir penkioms 2-osios grupės žvaigždėms – iš 4 linijų (žr.: B.3 lentelę). Iš Na grafiko (žr.: 3.1 ir 3.2 pav.) matyti, kad mūsų gauta 1-osios ir 2-osios grupės žvaigždžių atmosferų natrio gausa yra homogeniška. Rezultatai nerodo priklausomybės nuo  $[\text{Fe}/\text{H}]$  bei sutampa su plonojo disko žvaigždžių gausomis.

Aliuminio gausos nustatymui naudojome keturias spektrines linijas: ties 6696.0, 6698.6, 7084.6 ir 7362.2 Å. Bet visos šios linijos yra gana silpnos, todėl iš visų keturių linijų Al gausą nustatėme tik keturioms 1-osios grupės žvaigždėms ir vienai 2-osios grupės žvaigždei, o dviem 2-osios grupės žvaigždėms aliuminio gausos visai nenustatėme. Paskutinės dvi linijos, esančios raudonojoje spektro srityje, dažniausiai būdavo susiliejusios su atmosferos linijomis, ir tai trukdė tiksliai išmatuoti jų ekvivalentinius pločius. O linija ties 7362.2 Å dėl didelio spektrinių linijų poslinkio į raudonąją pusę buvo iš viso nematoma kai kurių

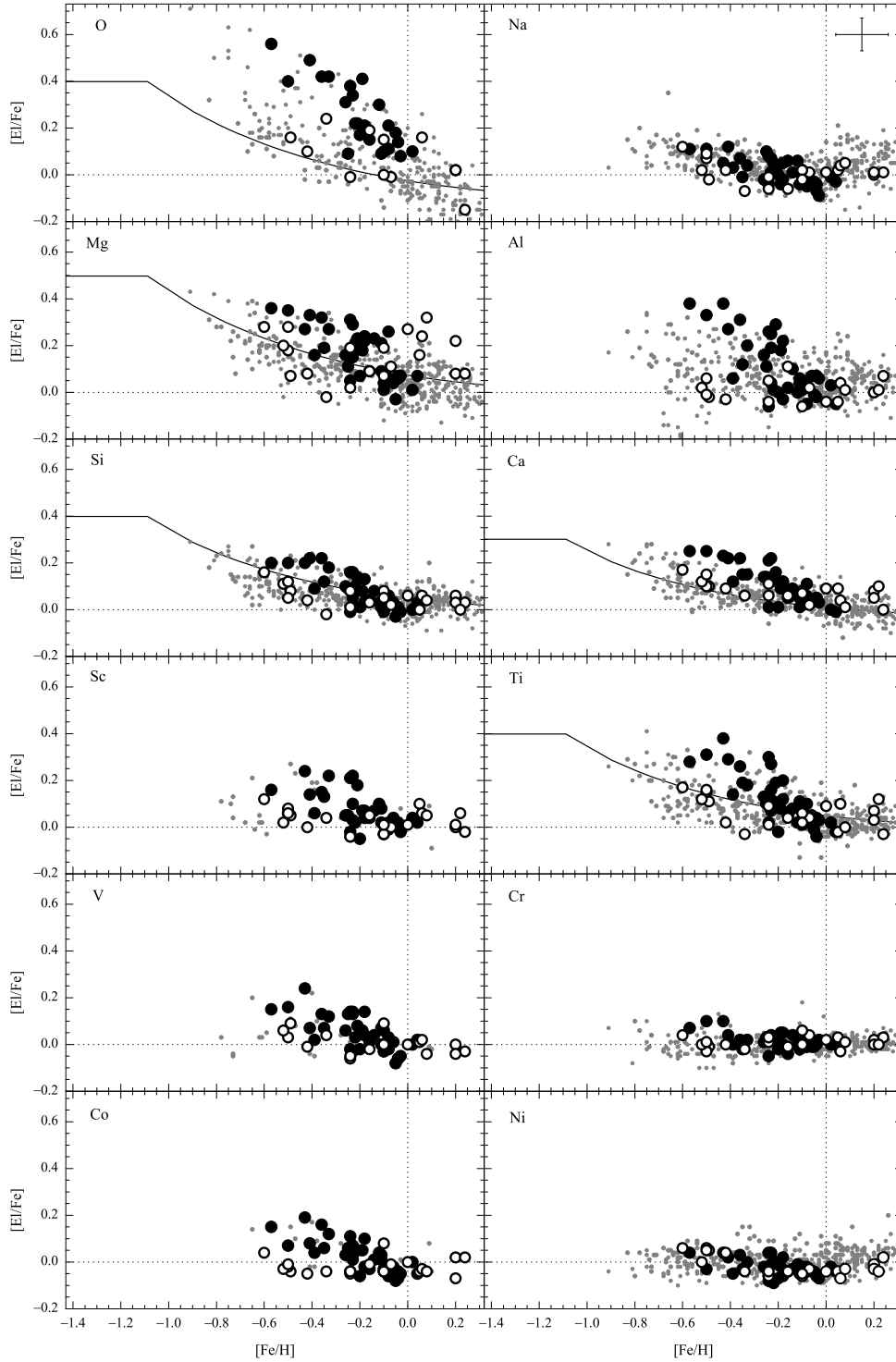
žvaigždžių spektruose. Mūsų nustatyta 1-osios ir 2-osios grupių žvaigždžių aliuminio gausa, kaip matyti iš paveikslų 3.1 ir 3.2, rodo didesnę išsibarstymą, nei natrio atveju. Be to, matyti, kad tiriamų grupių žvaigždžių  $[Al/Fe]$  vertė yra didesnė nei plonojo disko žvaigždžių tame pačiame metalingumo intervale.

### 3.3.3. $\alpha$ -elementai: Mg, Si, Ca, Ti

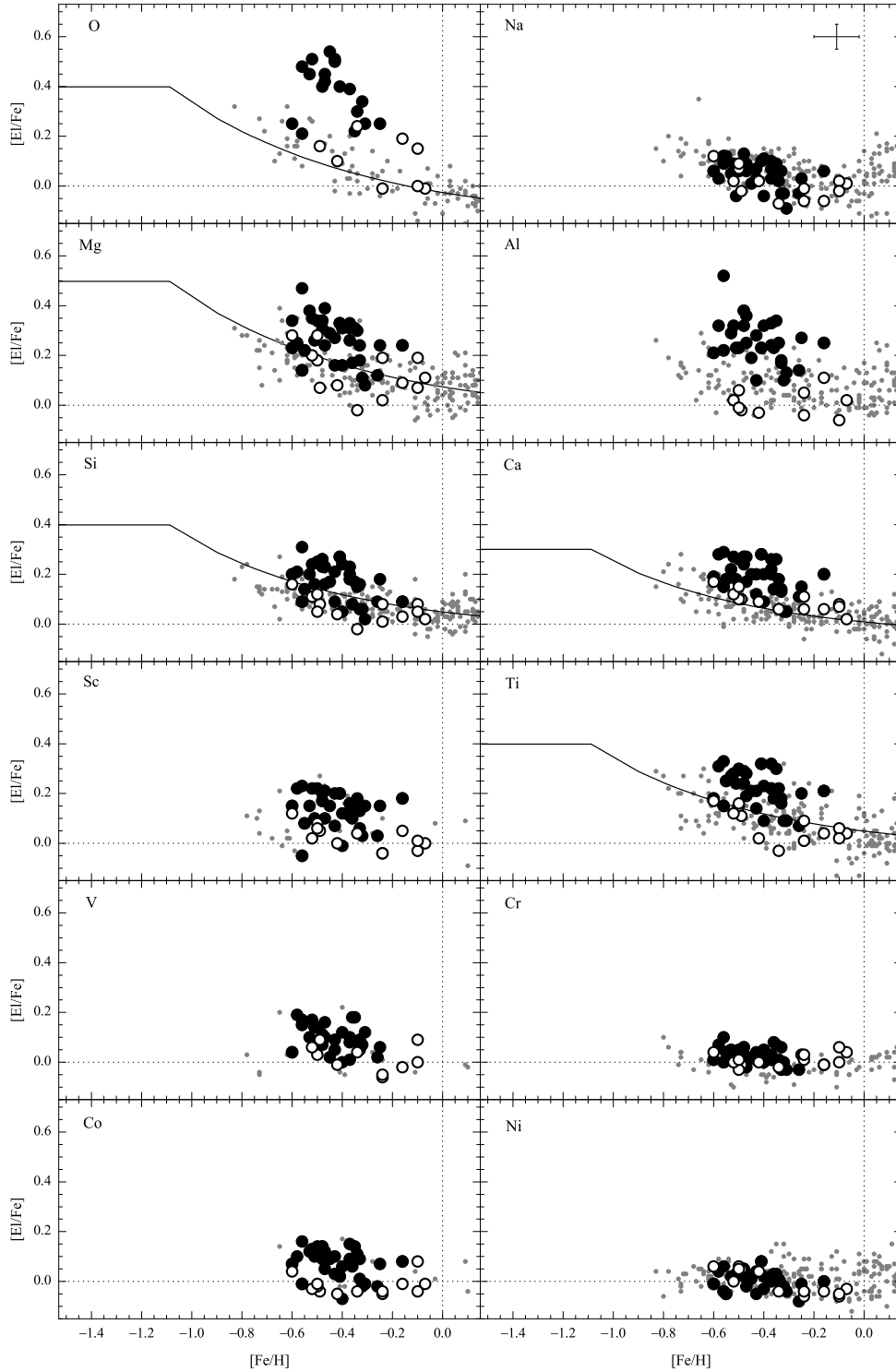
Magnis daugiausia yra gaminamas vykstant anglies ir neono degimo reakcijoms. Neutronais turtingi izotopai  $^{29,30}Si$  yra deguonies ir neono apvalkaluose vykstančių degimo reakcijų produktai, reti, neutronais turtingi izotopai  $^{43,46}Ca$  – neono ir anglies apvalkaluose. Izotopai  $^{40-42}Ca$  yra deguonies degimo reakcijų produktai. Radioaktyvusis  $^{45}Ti$  ir  $^{47}Ti$  izotopai gaminasi degant deguoniui ir siliciui,  $^{46}Ti$  gaminasi degant deguoniui,  $^{48}Ti$  ir  $^{49}Ti$  daugiausia gaminasi silicio degimo reakcijų metu ir maža dalimi – deguonies degimo reakcijose. Kai kurie kalcio ir visi titano izotopai gali būti ir nemaža dalimi Ia tipo supernovų produktai (Woosley ir Weaver 1995).

Magnio matavimai yra itin svarbūs, nes jis yra pagrindinis elektronų šaltinis žvaigždžių atmosferose (Prochaska ir kt. 2000). Šio cheminio elemento gausų skaičiavimo kai kurie aspektai buvo aptarti 2.7 skyrelyje. Visos keturios linijos buvo gana gerai matomos mūsų žvaigždžių spektruose, todėl tik šešiolikai 1-osios grupės ir dešimčiai 2-osios grupės žvaigždžių magnio gausos nepavyko nustatyti iš visų keturių linijų. Linijos ties 6318.7 ir 6319.2 Å kai kuriuose spektruose buvo blenduotos atmosferos linijomis. Iš 3.1 ir 3.2 pav. matyti, kad 1-osios ir 2-osios grupių žvaigždžių  $[Mg/Fe]$  vertė yra didesnė nei plonojo disko žvaigždžių tame pačiame metalingumo intervale.

Kiti  $\alpha$ -elementai – silicis, kalcis ir titanas – taip pat yra svarbūs informacijos apie žvaigždžių populiacijų cheminę evoliuciją šaltiniai. Šiems elementams turime gausius linijų sąrašus su tiksliais sužadavimo potencialo vertėmis, ir tai mums suteikia galimybę atlikti gana tikslią gausų analizę. Kadangi šie elementai yra gaminami ne tik II tipo supernovose bet ir Ia tipo, galima tikėtis stebėti šiek tiek mažesnę tiriamųjų žvaigždžių atmosferų praturtinimą šiais elementais nei deguonies ir magnio atveju (Tautvaišienė ir kt. 2001). Iš 3.1 ir 3.2 pav. pavaizduotų grafikų matome, kad 1-osios ir 2-osios grupių žvaigždžių atmosferose Si, Ca ir Ti gausos yra padidėjusios lyginant su plonojo Galaktikos



**3.1 pav.:**  $[El/Fe]$  santykinės gausos kaip funkcija nuo  $[Fe/H]$  tirtose 1-osios grupės žvaigždėse (juodi apskritimai) ir palyginamosiose žvaigždėse, analizuotose šiame darbe ir Stonkutė ir kt. (2012) (tuščiaviduriai apskritimai). Pilkais taškais yra pažymėti Paukščių Tako galaktikos plonojo disko nykštukių duomenys, paimti iš Edvardsson ir kt. (1993), Bensby ir kt. (2014), Reddy ir kt. (2006), bei Zhang ir Zhao (2006). Ištininės linijos yra Galaktikos plonojo disko cheminės evoliucijos modeliai Pagel ir Tautvaišienė (1995). Vidutinės paklaidos parodytos Na grafike.



**3.2 pav.:**  $[E/Fe]$  santykinės gausos priklausomybė nuo  $[Fe/H]$  tirtose 2-osios grupės žvaigždėse (juodi apskritimai) ir palyginamosiose žvaigždėse, analizuotose šiame darbe ir Stonkutė ir kt. (2012) (tuščiaviduriai apskritimai). Pilkais taškais yra pažymėti Paukščių Tako galaktikos plonojo disko nykštukių duomenys, paimti iš Edvardsson ir kt. (1993), Bensby ir kt. (2005), Reddy ir kt. (2006), bei Zhang ir Zhao (2006). Išsitiesinės linijos yra Galaktikos plonojo disko cheminės evoliucijos modeliai Pagel ir Tautvaišienė (1995). Vidutinės paklaidos parodytos Na grafike.

disko žvaigždžių gausomis. Tiesa, Si atveju tas padidėjimas nėra toks ryškus kaip kitų  $\alpha$ -elementų atveju.

Taip pat pastebime, kad tų pačių žvaigždžių (HD 200580 ir HD 224817), kurios savo gausa išsiskyrė deguonies grafike, [Si/Fe], [Ca/Fe] ir [Ti/Fe] vertės yra mažesnės lyginant su kitomis to paties metalingumo grupės žvaigždėmis, ir sutampa su plonojo disko žvaigždžių vertėmis. Remiantis santykinų gausų vertėmis, šios dvi žvaigždės galėtų nepriklausyti 2-ajai ŽKA kinematinei grupei. Tačiau pagal savo amžių ( $\sim 8$  ir  $12$  mlrd. m., atitinkamai), kuris bus pristatomas 3.6 skyriuje, žvaigždės yra gana senos ir neišsiskiria iš kitų grupės narių. Savo kinematiniais parametrais jos taip pat yra panašios į kitas 2-osios grupės žvaigždes. Todėl lieka tik vienas argumentas suabejoti šių dviejų žvaigždžių priklausymu kinematinei grupei.

### 3.3.4. Geležies grupės elementai

Savo darbe tyrėme šiuos geležies grupės elementus: skandį, vanadį, chromą, kobaltą ir nikelį. Dauguma geležies grupės elementų izotopų susidaro  $\alpha$  dalelei jungiantis su deguonies ar silicio izotopais. Šis procesas dar vadinamas  $e$  procesu (angl.: equilibrium), nes jis vyksta statistinės pusiausvyros sąlygomis. Reakcijų metu susidaro geležies ir jos kaimyninių atomų periodinėje elementų sistemoje izotopai, kurie turi didžiausią ryšio energiją tarp branduolių sudarančių nukleonų. Labiausiai paplitę izotopai:  $^{54,56}\text{Fe}$  ir  $^{56}\text{Ni}$ .

Skandžio gausą nustatėme naudodami jonizuoto atomo sugerties spektrines linijas. Nemažai autorių (Zhao ir Magain (1990); Nissen ir kt. (2000); Prochaska ir kt. (2000); Reddy ir kt. (2006) ir t.t.) pastebi, kad skandis elgiasi panašiai, kaip  $\alpha$ -elementai – nemetalingose storojo disko žvaigždėse jo gausa yra padidėjusi lyginant su plonuoju disku, o tai leidžia daryti prielaidą, kad Sc formuojasi panašioje aplinkoje kaip ir  $\alpha$ -elementai. Mūsų gauti Sc rezultatai 1-ajai ir 2-ajai ŽKA kinematinėms grupėms nesiskiria nuo kitų autorių plonojo disko nykštukių rezultatų.

Lyginį protonų skaičių turinčių Cr ir Ni gausos 1-osios ir 2-osios grupių žvaigždžių atmosferose nesiskiria nuo plonojo disko žvaigždžių ir sutampa su šių elementų gausomis Saulėje.

Nelyginį skaičių turinčių vanadžio ir kobalto gausos 1-osios ir 2-osios grupių

žvaigždžių atmosferose yra didesnės, nei šių elementų gausos saulėje, tačiau gana gerai sutampa su kitų autorių gautais rezultatais. Mūsų naudotą V ir Co spektrinių linijų sąrašą sudaro gana silpnos šių elementų linijos, ir, nors linijų yra nemažai, vienai karščiausiai 1-osios grupės žvaigždei ir trimis karščiausioms 2-osios grupės žvaigždėms nepavyko nustatyti V gausos ir vienai 2-osios grupės žvaigždei – Co gausos. Karštų žvaigždžių spektruose šios linijos yra per silpnos matuoti jų ekvivalentinius plokčius.

### 3.4. Sunkieji cheminiai elementai

Cheminiai elementai, kurių atominis numeris  $Z$  yra didesnis už 30, vadinami sunkiaisiais cheminiais elementais. Jų gamyba vyksta geležies grupės elementams užgrobiančiam neutronus. Šių cheminių elementų tyrimas taip pat labai svarbus, nes teikia naudingos informacijos apie branduolines reakcijas, vykstančias Galaktikoje, bei apie svarbius Galaktikos evoliucijos parametrus: IMF, SFR bei Galaktikos žvaigždžių populiacijų formavimosi laiko skales (Mashonkina ir Gehren 2001).

Sunkieji cheminiai elementai skirtingomis proporcijomis yra gaminami daugiausia dviejų procesų metu:  $s$ - (angl.: slow) ir  $r$ - (angl.: rapid). Savo ruožtu  $s$ -procesas dar skiriamas į dvi komponentes: silpnasis  $s$ -procesas, kuris vyksta masyvių ( $M \geq 20M_{\odot}$ ) žvaigždžių viduje, hidrostatiškai degant helio šerdžiai, bei pagrindinis  $s$ -procesas, vykstantis vidutinės masės ( $2 - 4 M_{\odot}$ ) žvaigždžių viduje, joms termiškai pulsuojant asimptotinių milžinių sekoje (angl.: asymptotic giant branch, AGB).  $s$ -proceso metu neutronai gaminami pamažu, jų srautas mažas, o, užgrobęs vieną neutroną, vyksta  $\beta$  skilimas prieš tai, kai branduolys užgrobs naują neutroną. Pagrindinio  $s$ -proceso metu gaminami sunkesni elementai (Ba, La, Ce, ...), silpnojo proceso metu – elementai, kurių atominė masė  $A \leq 90$  (Y, Zr, Sr, ...). Pagrindiniai neutronų šaltiniai  $s$ -procesui yra  $^{13}\text{C}$  ir  $^{22}\text{Ne}$  degimo reakcijos.

Vykti  $r$ -procesui reikalingas stiprus neutronų srautas. Kiekvienas branduolys vieną po kito užgrobia daug neutronų ir tik paskui prasideda radioaktyvių virsmų grandinė.  $r$ -proceso elementais tarpžvaigždinė medžiaga pasipildo sprogus II tipo supernovoms. Stiprus neutronų srautas, atsirandantis su-



pernovų sproginimo metu, kyla iš dviejų šaltinių: neutronų srautas susidaro aplink atsiskiriančią nuo išsisklaidančio apvalkalo neutroninę žvaigždę, o kitas šaltinis atsiranda smūginės bangos įkaitintame helio sluoksnyje, kuriame yra sužadinas neutronų pagaminimas. Šio proceso elementų grupė yra labai svarbi Galaktikos evoliucijos tyrimams, kadangi jie geriausiai atspindi sąlygas pirminiame žvaigždėdaros debesyje (Freeman ir Bland-Hawthorn 2002). II tipo supernovos evoliucionuoja greičiau už AGB žvaigždes ( $\tau_{s-pro} \geq 10^9$  m.), todėl susidaro užlaikymo efektas tarp  $s$ - ir  $r$ -procesų produktų pagausėjimo tarpžvaigždinėje medžiagoje (Mashonkina ir Gehren 2001).

Sunkieji elementai yra sintetinami abiejų,  $s$ - ir  $r$ -procesų metu, tik skirtingomis proporcijomis.

Labai nedidelė dalis sunkiųjų cheminių elementų atsiranda ir iš  $p$ -procesu, kuris vyksta masyvių žvaigždžių evoliucijos pabaigoje ir supernovų sproginimų metu, bei neutrinių sukeltose reakcijose.

Trisdešimt septynių žvaigždžių, priklausančių 1-ajai ŽKA kinematinei grupei, neutronų pagavimo reakcijų metu susidarančių cheminių elementų gausos grafiškai yra pavaizduotos 3.3 paveiksle kartu su penkiolikos palyginamųjų Galaktikos plonojo disko žvaigždžių rezultatais. O paveiksle 3.4 pavaizduoti trisdešimt dviejų 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių ir septynių palyginamųjų Galaktikos plonojo disko žvaigždžių sunkiųjų elementų gausų tyrimo rezultatai. Grafikuose taip pat atidėtos palyginamųjų plonojo disko žvaigždžių, tirtų Stonkutė ir kt. (2013), gausos. Savo rezultatus palyginome su kitų autorių gautais duomenimis (Edvardsson ir kt. 1993; Gratton ir Sneden 1994; Koch ir Edvardsson 2002; Bensby ir kt. 2005; Reddy ir kt. 2003, 2006; Brewer ir Carney 2006; Mashonkina ir kt. 2007; Mishenina ir kt. 2013; Bensby ir kt. 2014) bei Galaktikos plonojo disko cheminės evoliucijos modeliais (Pagel ir Tautvaišienė 1997). Kai kurios sunkiųjų elementų gausų nustatymo detalės paminėtos 2.9 skyrelyje.

Lėtojo ( $s$ ) ir greitojo ( $r$ ) neutronų pagavimo metu sintetinamus cheminius elementus aptarsiu atskirai 3.4.1 ir 3.4.2 skyriuose.

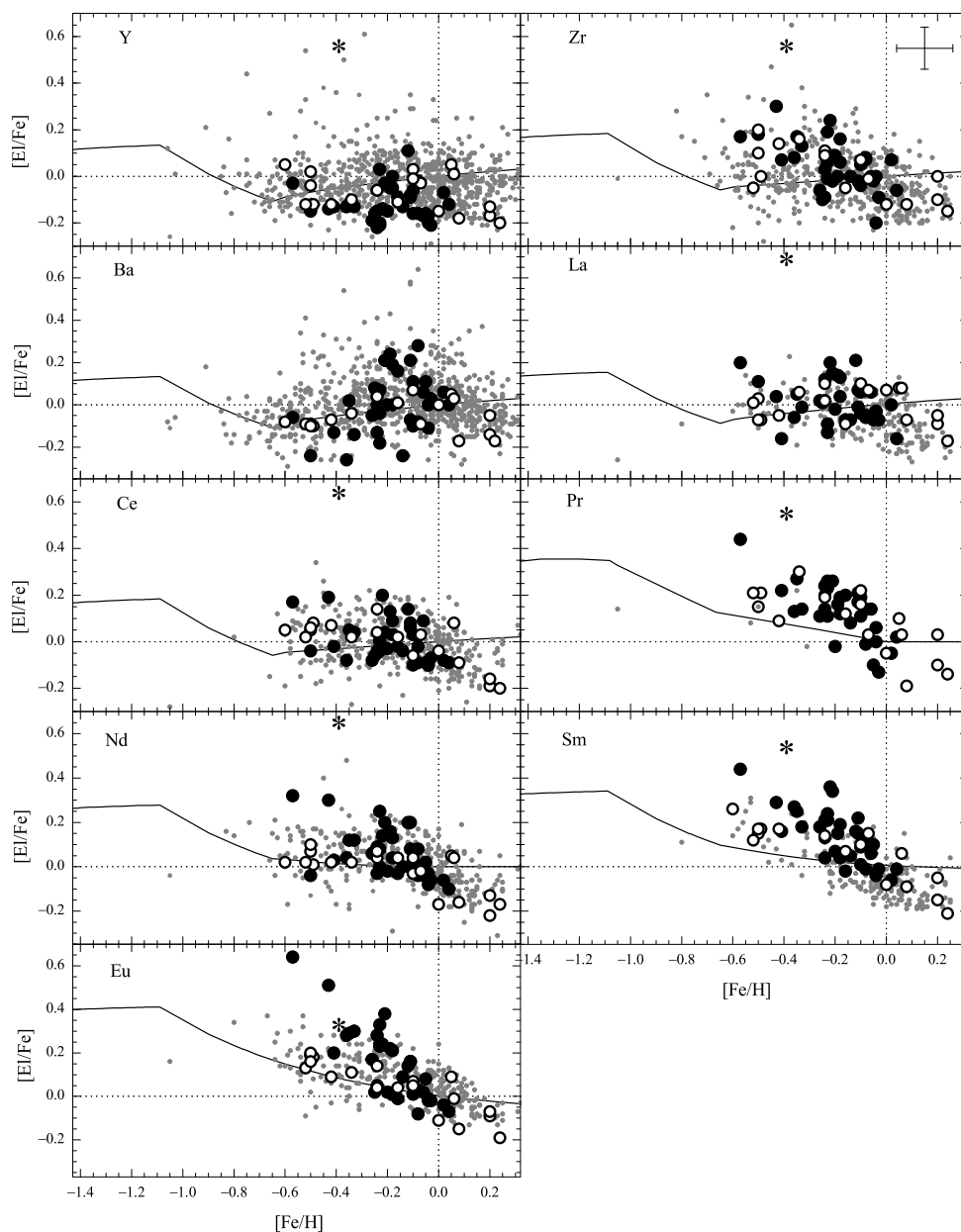
### 3.4.1. s–procesio elementai

Savo darbe tyrėme šiuos cheminius elementus, kurie yra priskiriami prie *s*-procesio elementų: Y, Zr, Ba, La, Ce ir Nd. *s*-procesio įtaka itrio gausai Saulėje siekia 74 %, cirkonio – 67 % (Travaglio ir kt. 2004), bario – 81 %, lantano – 62 %, cerio – 77 % ir neodimio – 56 % (Arlandini ir kt. 1999).

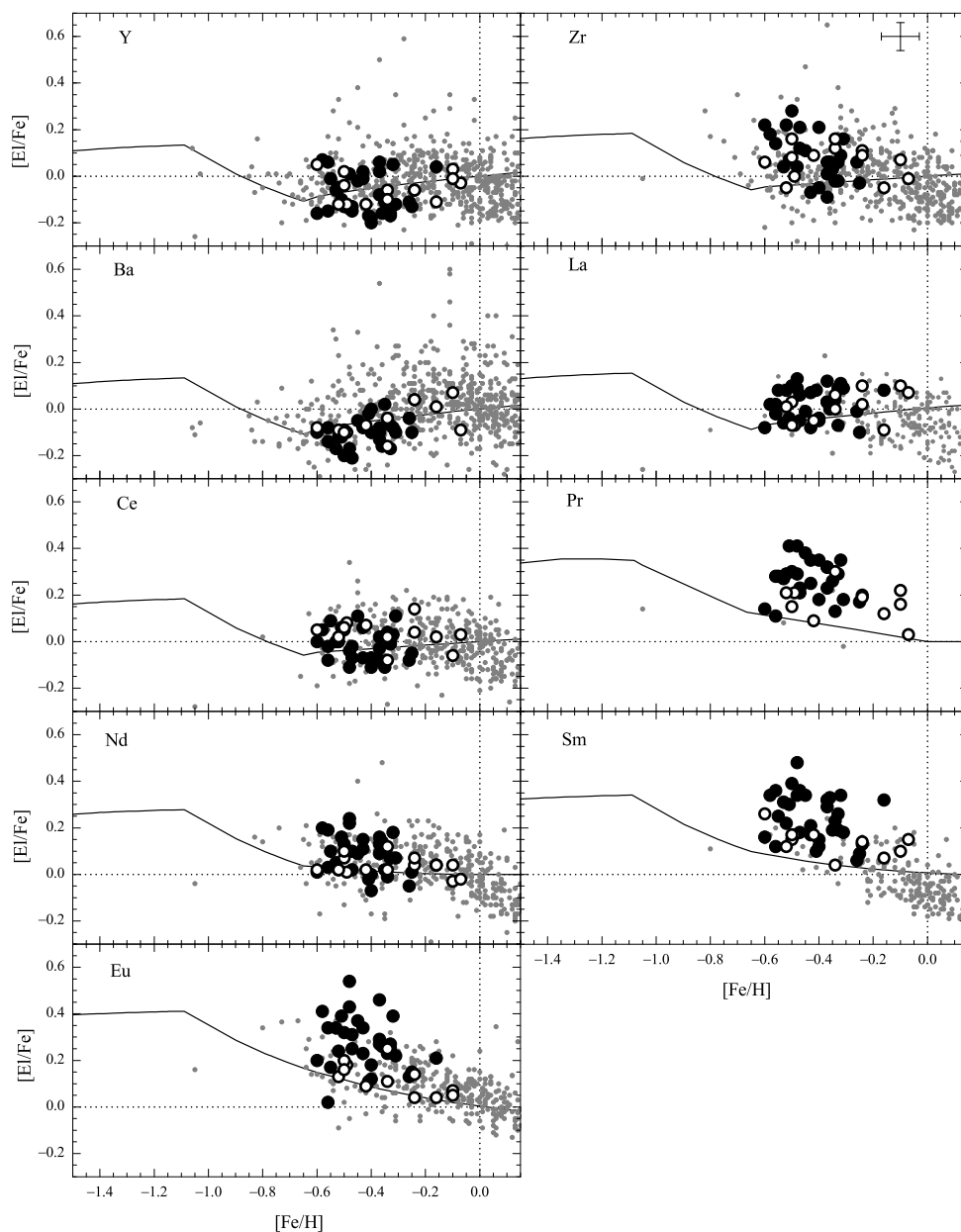
Turimos jonizuoto itrio linijos yra gana blenduotos, todėl daugeliu atvejų, matuojant itrio gausą, teko kai kurias linijas atmesti. Iš visų turimų septynių linijų Y gausą išmatavome tik šešioms 1-osios ŽKA kinematinės grupės ir trims 2-osios grupės žvaigždėms. Dar keblėnė situacija yra su cirkoniu. Didžioji dalis turimų šio cheminio elemento linijų yra per silpnos nemetalingoms ir karštoms nykštukėms. Iš Zr I linijų gausos nepavyko nustatyti trims 1-osios grupės ir šešioms 2-osios grupės žvaigždėms, o iš Zr II linijų gausos nenustatėme dviem 1-osios grupės ir šešioms 2-osios grupės žvaigždėms. Jau buvo minėta, kad bario gausos nustatymui naudojome vieną liniją ties 5853.7 Å. Ši linija yra gana stipri ir išplitusi dėl hipersmulkiosios struktūros ir izotopų poslinkio. Kai kurioms žvaigždėms buvo sudėtinga tą išplitimą pakoreguoti, todėl atmetėme trijų 1-osios ir šešių 2-osios grupės žvaigždžių Ba gausos nustatymo rezultatus. Lantano bei cerio linijos yra gana silpnos ir daugeliu atvejų gana blenduotos, ypač raudonesnėje spektro srityje. Daugumai žvaigždžių galutinis [La/Fe] rezultatas buvo gautas iš 1–3 La II linijų. Vienai 1-osios ir vienai 2-osios grupės žvaigždei lantano gausos nustatyti nepavyko. Iš visų penkių Ce II linijų cerio gausą nustatėme tik penkioms 1-osios grupės žvaigždėms ir vienai 2-osios grupės žvaigždei. Dviem 2-osios grupės žvaigždėms gavome nepatikimas [Ce/Fe] vertes, todėl jų į bendrą rezultatų lentelę neįtraukėme. Mūsų turimų Ne II linijų sąrašas palyginti gausesnis – 8 linijos, tačiau patikimiausios iš jų buvo 4–5, iš kurių nustatėme neodimio gausą didžiajai daliai žvaigždžių.

Iš 3.3 ir 3.4 paveikslų matome, kad 1-osios ir 2-osios ŽKA kinematinė grupių žvaigždžių cheminių elementų, daugiausia pagaminamų *s*-procesu, gausos išsidėsto gana homogeniškai. Taip pat galime pastebėti, kad šių cheminių elementų gausos yra panašios į plonojo Galaktikos disko nykštukių gausas tame pačiame metalingumo intervale bei sutampa su Galaktikos plonojo disko cheminės evoliucijos modeliu.

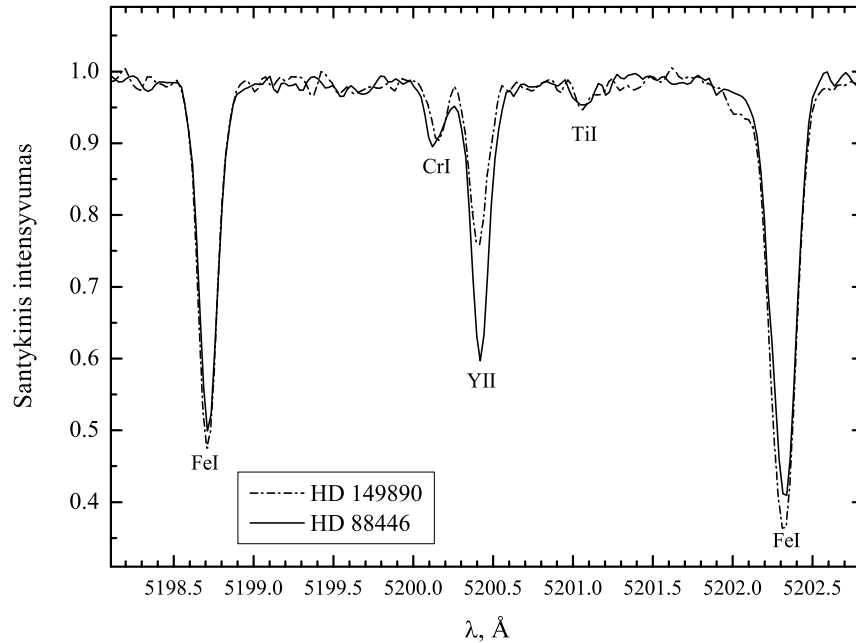
Viena 1-osios grupės žvaigždė yra praturtinta elementais, daugiausia ga-



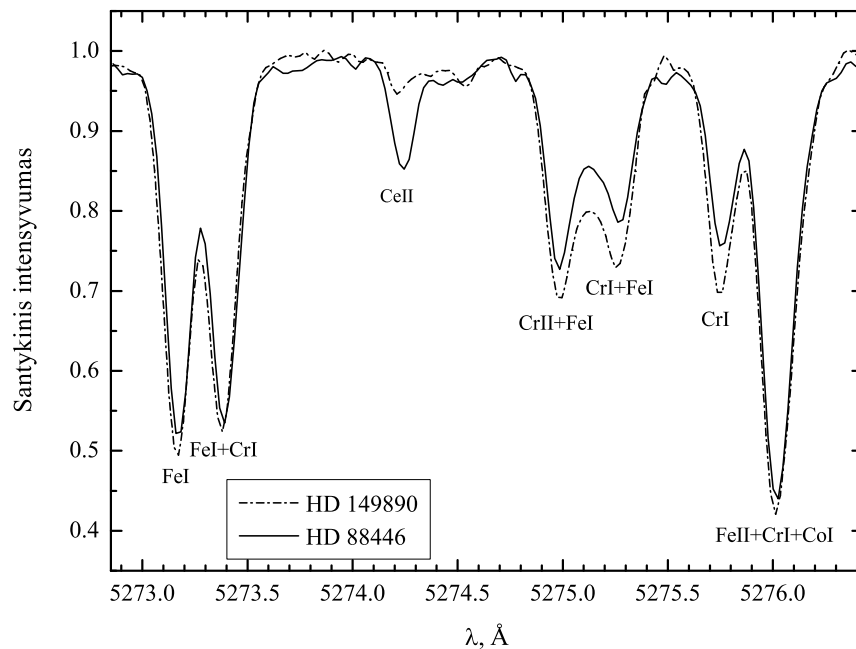
**3.3 pav.:**  $[El/Fe]$  santykinės gausos priklausomybė nuo  $[Fe/H]$  tirtose 1-osios grupės žvaigždėse (juodi apskritimai) ir palyginamosiose žvaigždėse, analizuotose šiame darbe ir Stonkutė ir kt. (2013) darbe (tuščiaviduriai apskritimai). Elementais, daugiausia gaminamais  $s$ -procesu, praturtinta žvaigždė HD 88446 pažymėta žvaigždute. Pilkais taškais yra pažymėti Paukščių Tako galaktikos plonojo disko nyktukių duomenys, paimti iš Edvardsson ir kt. (1993), Gratton ir Sneden (1994), Koch ir Edvardsson (2002), Bensby ir kt. (2014), Reddy ir kt. (2006, 2003), Brewer ir Carney (2006), Mashonkina ir kt. (2007), bei Mishenina ir kt. (2013) (pilki taškai). Galaktikos plonojo disko cheminės evoliucijos modeliai yra pavaizduoti ištisinėmis linijomis (Pagel ir Tautvaišienė, 1997). Vidutinės paklaidos yra parodytos Zr grafike.



**3.4 pav.:**  $[El/Fe]$  santykinės gausos priklausomybė nuo  $[Fe/H]$  tirtose 2-osios grupės žvaigždėse (juodi apskritimai) ir palyginamosiose žvaigždėse, analizuotose šiame darbe ir Stonkutė ir kt. (2013) darbe (tuščiaviduriai apskritimai). Pilkais taškais yra pažymėti Paukščių Tako galaktikos plonojo disko nykštukių duomenys, paimti iš Edvardsson ir kt. (1993), Gratton ir Sneden (1994), Koch ir Edvardsson (2002), Bensby ir kt. (2005), Reddy ir kt. (2006, 2003), Brewer ir Carney (2006), Mashonkina ir kt. (2007), bei Mishenina ir kt. (2013). Galaktikos plonojo disko cheminės evoliucijos modeliai yra pavaizduoti ištinėmis linijomis (Pagel ir Tautvaišienė, 1997). Vidutinės paklaidos yra parodytos Zr grafike.



**3.5 pav.:** 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių HD 149890 ir HD 88446 NOT-FIES spektrų fragmentai. Šie spektrai yra nubrėžti vienas ant kito, kad išryškėtų skirtumai tarp elementų, daugiausia gaminamų *s*-proceso metu, spektrinių linijų, kai tuo tarpu kitų elementų linijos yra panašios. Y II spektrinės linijos regionas.



**3.6 pav.:** 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių HD 149890 ir HD 88446 NOT-FIES spektrų fragmentai. Šie spektrai yra nubrėžti vienas ant kito, kad išryškėtų skirtumai tarp elementų, daugiausia gaminamų *s*-proceso metu, spektrinių linijų, kai tuo tarpu kitų elementų linijos yra panašios. Ce II spektrinės linijos regionas.

minamais *s*-procesu metu. Kaip galime matyti iš B.2 lentelės bei 3.3, 3.5, ir 3.6 paveikslų, žvaigždė HD 88446 turi kur kas stipresnes elementų, daugiausia gaminamų *s*-procesu, linijas taigi ir aukštesnes šių elementų gausas. Pagal Beers ir kt. (2005) apibrėžimą, žvaigždė HD 88446, su  $[\text{Ba}/\text{Fe}] = 1.04$  ir  $[\text{Ba}/\text{Eu}] = 0.70$ , patenka į žvaigždžių, praturtintų elementais, daugiausia gaminamais *s*-procesu metu, kategoriją.

### 3.4.2. *r*-procesu elementai

Iš cheminių elementų, daugiausia gaminamų *r*-procesu, grupės tyrime prazeodimį, samarį ir europį. 51 % prazeodimio gausos Saulėje yra pagaminta *r*-procesu metu, samario – 71 %, o europio 94 % (Arlandini ir kt. 1999).

Prazeodimio linijos ties 5259.7 ir 5322.8 Å nykštukių spektruose yra silpnos (žr.: 2.9 pav.). Penkioms 1-osios ŽKA kinematinės grupės ir šešioms 2-osios grupės žvaigždėms Pr gausos nustatyti nepavyko, o iš abiejų turimų Pr II linijų gausą nustatėme devyniolikai 1-osios grupės ir vienuolikai 2-osios grupės žvaigždžių. Iš visų trijų turimų samario linijų šio elemento gausą nustatėme didžiajai daliai 1-osios grupės žvaigždžių ir tik dviem 1-osios grupės žvaigždėms samario gausos nustatyti nepavyko. Tuo tarpu Sm gausą nustatėme visoms 2-osios grupės žvaigždėms ir tik septynioms iš jų samario gausą nustatėme iš 1 linijos. Europio dvi naudotos linijos skiriasi viena nuo kitos tiek savo vieta spektre (viena mėlynojoje srityje, kita – raudonojoje), tiek stipriu (žr.: 2.10 pav.). Gausa, nustatyta tiek iš vienos tiek iš kitos Eu II linijos sutampa gana neblogai: vidutinis išsibarstymas pirmosios grupės žvaigždėms 0.03, o antrosios grupės – 0.06. Europio linija ties 6645.1 Å kai kuriais atvejais pasirodė nepatikima dėl blendavimo, tad gausą, gautą iš šios linijos, atmetėme trims 1-osios grupės žvaigždėms ir septynioms 2-osios grupės žvaigždėms.

Žiūrint į 3.3 ir 3.4 paveikslą matyti, kad cheminių elementų, daugiausia pagaminamų *r*-procesu ( $[\text{Pr}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Sm}/\text{Fe}]$ ,  $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ ), gausos yra padidėjusios lyginant su plonu juo Galaktikos disku ir Galaktikos plonojo disko cheminės evoliucijos modeliu.

Panašus praturtinimas *r*-procesu elementais atitinkamame metalingumo intervale buvo pastebėtas ir tiriant 3-iąją ŽKA kinematinę grupę (Stonkutė ir kt. 2013).

### 3.5. Palyginimas su storuoju Galaktikos disku

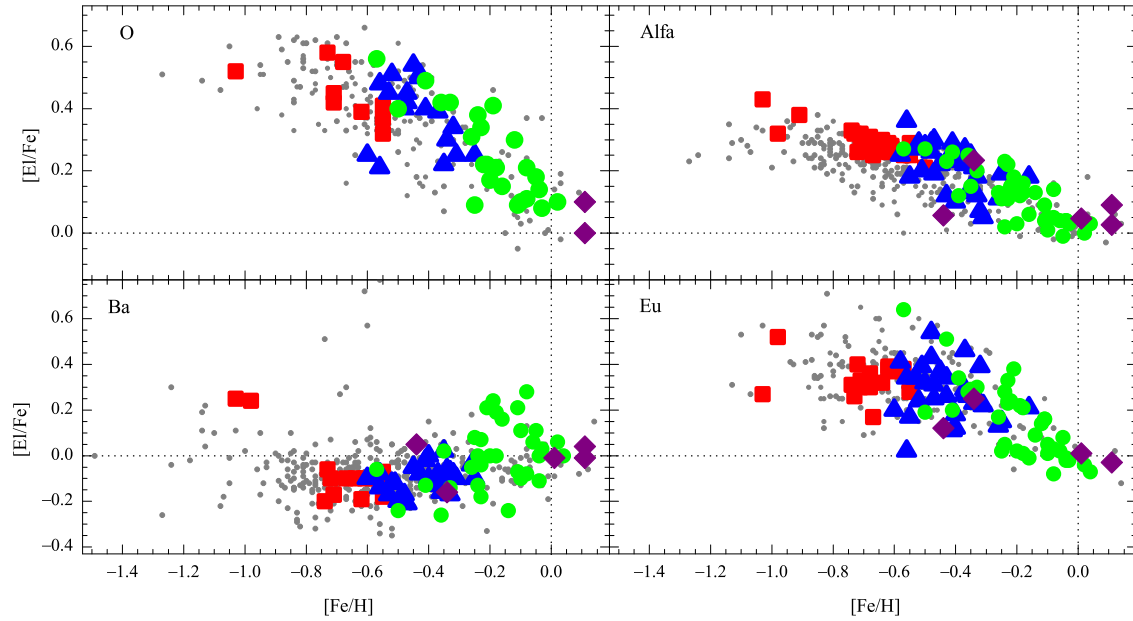
Panašų į 3.3 ir 3.4 skyriuose aptartą cheminių elementų gausų išsidėstymą demonstruoja ir storjo Galaktikos disko žvaigždės. Lentelėje 3.6 pateikiamas skirtumas tarp 1-osios ŽKA grupės vidutinių santykinių  $[El/Fe]$  gausų ir storjo disko žvaigždžių, patenkančių į metalingumo intervalą  $-0.57 < [Fe/H] < 0.04$ , gausų. Į minėtą metalingumo intervalą patenka 63 žvaigždės iš Bensby ir kt. (2014) darbo, 37 žvaigždės iš Reddy ir kt. (2006) darbo, 10 – iš Mashonkina ir kt. (2007) darbo, 51 žvaigždė, tirta Stanford ir Lambert (2012) ir 7 žvaigždės iš Mishenina ir kt. (2013) tyrimo. O 3.7 lentelėje mes pristatome vidutinių santykinių  $[El/Fe]$  gausų, paskaičiuotų 2-ajai kinematinei grupei ir storjo disko žvaigždėms, patenkančioms į metalingumo intervalą  $-0.60 < [Fe/H] < -0.20$ , palyginimą. Į šį metalingumo intervalą patenka dvidešimt viena storjo disko žvaigždė, tirta Bensby ir kt. (2005), trisdešimt aštuonios žvaigždės, tirtos Reddy ir kt. (2006), vienuolika žvaigždžių, tirtų Mashonkina ir kt. (2007), bei septynios žvaigždės iš Mishenina ir kt. (2013) darbo.

Lygindami deguonies gausas mes neįtraukėme rezultatų, gautų Reddy ir kt. (2006) ir Stanford ir Lambert (2012), nes jie deguonies gausos nustatymui naudojo O I liniją, kai tuo tarpu mes naudojome [OI] liniją. O I linija yra labai jautri efektinei temperatūrai bei nukrypimams nuo LTE (Prochaska ir kt. 2000) ir todėl nėra patikimas deguonies gausos indikatorius. Taip pat neįtraukėme Mishenina ir kt. (2013) gautų deguonies gausų rezultatų į 3.7 lentelę, nes į mus dominantį metalingumo intervalą pateko tik trys žvaigždės, kurioms buvo nustatyta deguonies gausa.

Rezultatus iš Mashonkina ir kt. (2007) ir Mishenina ir kt. (2013) darbų į savo skaičiavimus įtraukėme norėdami išplėsti informaciją apie cheminių elementų, gaminamų neutronų pagavimo reakcijų metu, gausas.

Į  $\alpha$ -elementų gausų vidurkio skaičiavimą įtraukėme Mg, Si ir Ca. Titano neįtraukėme, nes šio elemento gausa nebuvo paskaičiuota Mishenina ir kt. (2013) darbe.

Rezultatų palyginimas parodo, kad mūsų gautos cheminių elementų gausos gana gerai sutampa su kitų autorių gautais storjo disko žvaigždžių rezultatais.



**3.7 pav.:**  $[El/Fe]$  santykis kaip funkcija nuo  $[Fe/H]$  tirtose 1-osios ŽKA grupės (žali taškai), 2-osios grupės (mėlyni trikampiai) ir 3-osios grupės (Stonkutė ir kt. 2012, 2013, raudoni kvadratai) žvaigždėse ir palyginamosiose Galaktikos storjo disko žvaigždėse (alyviniai rombai). Galaktikos storjo disko žvaigždžių duomenys, paimti iš literatūros, yra pavaizduoti pilkais taškais.  $\alpha$ -elementų vidurkis skaičiuotas imant Mg, Si ir Ca gausių vertes.

Nuokrypis nesiekia paklaidų ribų.

Paveiksle 3.7 palyginome visų trijų ŽKA kinematinė grupių ir aukščiau paminėtų storjo disko tyrimų kai kurių cheminių elementų santykinių gausių vertes  $[El/Fe]$ . Palyginimui mes pasirinkome deguonį, vidutinę Mg, Si ir Ca vertę ir Ba bei Eu kaip elementus, atitinkamai daugiausia gaminamus  $s$ - ir  $r$ -procesuose. Kinematinė grupių ir storjo disko žvaigždžių cheminė sudėtis yra labai panaši. Šiame darbe mes taip pat stebėjome ir išanalizavome kelias storjo disko žvaigždes. Jų santykinės gausos taip pat pavaizduotos 3.7 paveiksle ir jų rezultatai gerai sutampa su kinematinė grupių žvaigždžių gausomis. Taigi, visų trijų ŽKA kinematinė grupių cheminė sudėtis yra panaši į storjo disko žvaigždžių cheminę sudėtį, vadinasi tirtų kinematinė grupių ir storjo disko formavimasis gali būti susijęs.



**3.6 lentelė:** 1-osios grupės žvaigždžių palyginimas su storėjo disko tyrimais.

[El/Fe]	Mūsų-B14 <sup>(1)</sup>	Mūsų-R06 <sup>(2)</sup>	Mūsų-Ma07 <sup>(3)</sup>	Mūsų-S12 <sup>(4)</sup>	Mūsų-Mi13 <sup>(5)</sup>
[O/Fe]	-0.02	...	...	...	0.08
[Na/Fe]	-0.02	-0.06	...	-0.02	...
[Mg/Fe]	-0.03	-0.06	...	-0.01	-0.03
[Al/Fe]	-0.07	-0.12	...	-0.07	...
[Si/Fe]	-0.04	-0.10	...	-0.10	-0.06
[Ca/Fe]	0.01	-0.02	...	-0.02	-0.04
[Sc/Fe]	...	-0.06	...	-0.11	...
[Ti/Fe]	-0.05	-0.04	...	-0.01	...
[V/Fe]	...	-0.06	...	-0.04	...
[Cr/Fe]	0.01	0.03	...	-0.05	...
[Co/Fe]	...	-0.06	...	-0.05	...
[Ni/Fe]	-0.03	-0.05	...	-0.02	-0.05
[Y/Fe]	-0.09	-0.08	-0.13	-0.11	-0.11
[Zr/Fe]	...	...	-0.07	...	0.02
[Ba/Fe]	0.05	0.12	0.11	0.07	0.06
[La/Fe]	...	...	...	...	0.10
[Ce/Fe]	...	-0.07	-0.06	-0.08	0.02
[Nd/Fe]	...	-0.09	...	-0.06	-0.05
[Sm/Fe]	...	...	...	...	0.02
[Eu/Fe]	...	-0.14	...	-0.17	-0.06

<sup>(1)</sup> 63 žvaigždės iš Bensby ir kt. (2014).

<sup>(2)</sup> 37 žvaigždės iš Reddy ir kt. (2006).

<sup>(3)</sup> 10 žvaigždžių iš Mashonkina ir kt. (2007).

<sup>(4)</sup> 51 žvaigždė iš Stanford ir Lambert (2012).

<sup>(5)</sup> 10 žvaigždžių iš Mishenina ir kt. (2013).

**3.7 lentelė:** 2-osios grupės žvaigždžių palyginimas su storojo disko tyrimais.

[El/Fe]	Mūsų-B05 <sup>(1)</sup>	Mūsų-R06 <sup>(2)</sup>	Mūsų-Ma07 <sup>(3)</sup>	Mūsų- Mi13 <sup>(4)</sup>
[O/Fe]	0.04	...	...	...
[Na/Fe]	-0.03	-0.03	...	...
[Mg/Fe]	-0.01	0.00	...	0.02
[Al/Fe]	-0.01	0.01	...	...
[Si/Fe]	0.00	-0.02	...	0.00
[Ca/Fe]	0.03	0.05	...	0.02
[Sc/Fe]	...	-0.01	...	...
[Ti/Fe]	0.01	0.04	...	...
[V/Fe]	...	-0.02	...	...
[Cr/Fe]	0.02	0.04	...	...
[Co/Fe]	...	-0.02	...	...
[Ni/Fe]	-0.01	-0.02	...	-0.02
[Y/Fe]	-0.05	-0.09	-0.11	-0.07
[Zr/Fe]	...	...	-0.03	0.01
[Ba/Fe]	-0.13	0.00	0.01	-0.04
[La/Fe]	...	...	...	0.07
[Ce/Fe]	...	-0.09	-0.06	0.02
[Nd/Fe]	...	-0.10	...	-0.02
[Sm/Fe]	...	...	...	0.10
[Eu/Fe]	-0.05	-0.05	...	0.03

<sup>(1)</sup> 21 žvaigždė iš Bensby ir kt. (2005).

<sup>(2)</sup> 38 žvaigždės iš Reddy ir kt. (2006).

<sup>(3)</sup> 11 žvaigždžių iš Mashonkina ir kt. (2007).

<sup>(4)</sup> 7 žvaigždės iš Mishenina ir kt. (2013).

### 3.6. Amžiaus pasiskirstymas

Kaip jau buvo minėta 1.3 skyriuje, remiantis Helmi ir kt. (2006), 1-osios grupės žvaigždės pasiskirsto į dvi amžiaus grupes: 33 % žvaigždžių yra 8 mlrd. m. ir 67 % yra 12 mlrd. m.

Lentelėje 1.1 kartu su kitais parametrais pateikiamas 1-osios ŽKA grupės žvaigždžių amžius, nustatytas Holmberg ir kt. (2009) ir Casagrande ir kt. (2011). Tarpusavy šie dviejų autorių rezultatai paklaidų ribose dera gerai. Paveiksle 3.8 HR diagramoje pavaizduotos tirtos 1-osios grupės žvaigždės su mūsų nustatytomis spektroskopinėmis efektinėmis temperatūromis ir absoliutiniu ryškiu  $M_v$ , paimtu iš Holmberg ir kt. (2009). Izochronos paimtos iš Bressan ir kt. (2012). Bendrą žvaigždžių išsidėstymą diagramoje geriausiai aprašo dviejų amžių izochronos. Metalingiausios žvaigždės geriausiai dera prie 8 mlrd. m. izochronos, o nemetalingiausios žvaigždės – prie 12 mlrd. m. izochronos (nemetalingoms žvaigždėms pritaikėme izochroną su  $[\alpha/Fe]=0.2$ ).

Mūsų 1-osios grupės žvaigždžių imtyje yra 10-ties jaunesnių žvaigždžių pogrupis (2 mlrd. m.  $\leq$  amžius  $\leq$  5 mlrd. m.) ir jos HR diagramoje išsidėsto aukščiau 8 mlrd. m. izochronos šviesio posūkio taško. Iš visų 120 1-osios grupės žvaigždžių galima išskirti maždaug 18-kos jaunesnių nei 5 mlrd. m. žvaigždžių pogrupį (remiantis Holmberg ir kt. (2009) paskaičiuotais duomenimis). Mūsų darbe tirtos jaunosios žvaigždės savo chemine sudėtimi nesiskiria nuo kitų to paties metalingumo grupės žvaigždžių.

Tiriamai 2-ajai kinematinei grupei yra būdinga gana įdomi amžiaus pasiskirstymo ypatybė. Helmi ir kt. (2006) teigimu, grupę sudaro trijų amžių populiacijos: 15 % sudaro 8 mlrd. m. žvaigždės, 36 % žvaigždžių yra 12 mlrd. m. ir 49 % yra 16 mlrd. m. Dėl šios ypatybės buvo nuspręsta atidžiau patyrinėti 2-osios grupės žvaigždžių amžių. Kadangi mes, naudodami aukštos skiriamosios gebos spektrus, patiksliname žvaigždžių efektinės temperatūros ir metalingumo vertes, atsirado galimybė patikslinti ir amžiaus vertes.

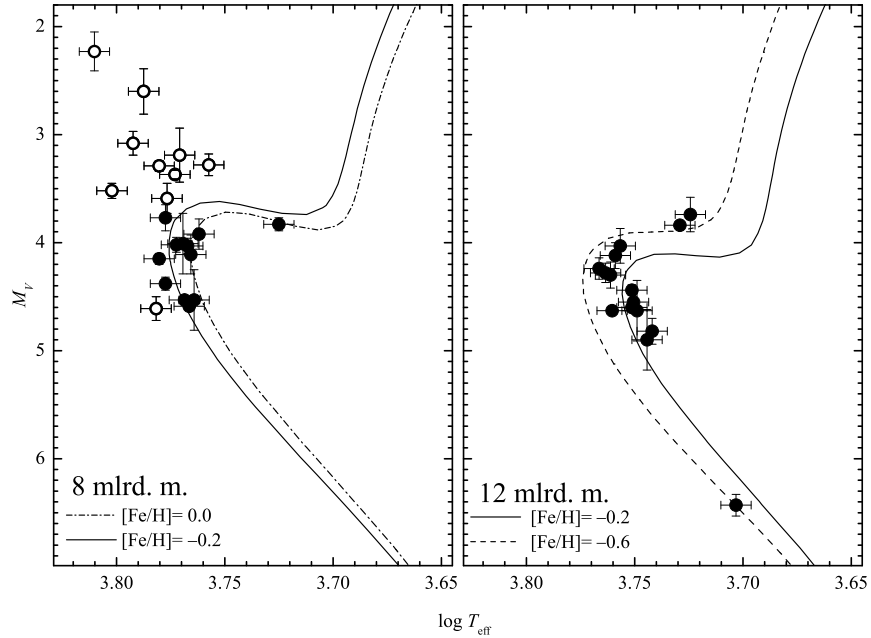
2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių amžiaus nustatymui buvo naudojamas metodas, aprašytas Jørgensen ir Lindegren (2005) darbe, kuris taip pat buvo naudotas ŽKA apžvalgos tyrimams (Helmi ir kt. 2006; Holmberg ir kt. 2009). Šis metodas yra pagrįstas kiekvienos žvaigždės amžiaus tikimybes

**3.8 lentelė:** Amžius, nustatytas šiame darbe ir kitų autorių.

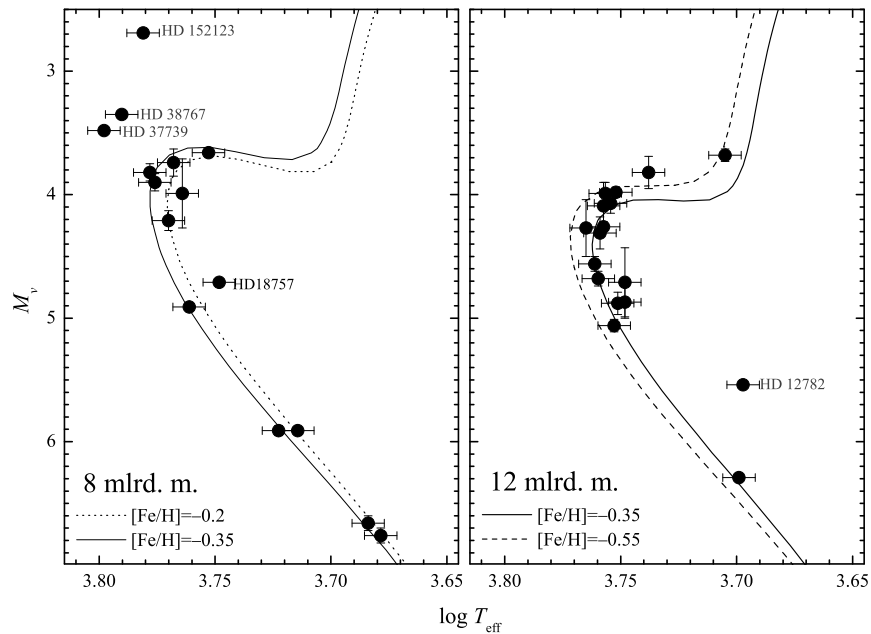
Žvaigždė	H09 <sup>(1)</sup>	C11 <sup>(2)</sup>	Šis darbas	$-1\sigma$	$+1\sigma$
BD +68 813	13.3	9.2	9.8	7.5	11.8
BD +31 3330	...	7.1	...	...	...
HD 10519	12.4	11.8	12.0	10.9	13.1
HD 12782	...	...	...	...	...
HD 16397	10.6	...	10.4	7.9	12.4
HD 18757	16.8	...	11.0	8.9	16.2
HD 21543	11.6	8.3	13.5	9.3	17.4
HD 24156	11	10.2	10.4	8.9	11.8
HD 29587	11.7	8.5	8.3	2.1	13.3
HD 30649	10.1	7.8	9.8	8.1	12.5
HD 37739	3.4	3.4	3.3	3.0	3.7
HD 38767	4.9	...	5.0	3.9	5.8
HD 96094	8.6	8.7	6.3	4.9	7.9
HD 114606	16.6	7.6	15.1	10.8	17.7
HD 121533	12.6	...	14	10.3	17.7
HD 131582	...	...	...	...	...
HD 132142	...	6.9	3.5	0.1	17.7
HD 133621	11.8	10.5	10.9	10.0	11.7
HD 137687	...	7.1	8.7	7.9	9.9
HD 139457	7.7	7.1	7.3	5.8	8.0
HD 143291	...	6.1	...	...	...
HD 152123	3.6	3.4	2.5	2.3	2.8
HD 156802	9.7	7.9	9.1	7.3	11.3
HD 158226	12.6	8.1	11.8	10.4	13.5
HD 165401	8	5.1	2.5	0.1	7.5
HD 170357	12.7	8.5	10.0	8.9	11.0
HD 190404	0.2	...	5	0.1	17.7
HD 200580	8	8.4	8.4	7.6	9.4
HD 201099	7.5	7.1	7.2	6.2	8.5
HD 215594	10.2	...	7.8	6.4	9.5
HD 221830	12.4	9.3	11.5	10.2	12.9
HD 224817	10.3	9.5	12.0	10.5	13.9

<sup>(1)</sup> amžius paimtas iš Holmberg ir kt. (2009).

<sup>(2)</sup> amžius paimtas iš Casagrande ir kt. (2011).



**3.8 pav.:** 1-osios grupės žvaigždžių HR diagrama. Isochronos paimtos iš Bressan ir kt. (2012). Juodais apskritimais pažymėtos šiame darbe tirtos žvaigždės su spektroskopinėmis temperatūromis. Nemetalingoms žvaigždėms izochronos yra su  $[\alpha/\text{Fe}] = 0.2$ . Tuščiaviduriai apskritimai žymi jaunesnes žvaigždes, kurių amžius nuo 2 iki 5 mlrd.m.



**3.9 pav.:** 2-osios grupės žvaigždžių HR diagrama. Isochronos paimtos iš Bressan ir kt. (2012). Juodais apskritimais pažymėtos šiame darbe tirtos žvaigždės su spektroskopinėmis temperatūromis. Isochronos pritaikytos  $\alpha$ -proceso elementais praturtintų žvaigždžių populiacijai su  $[\alpha/\text{Fe}] = 0.2$ .

tankio funkcijos tyrimu (angl.: probability density function, pdf), kuomet priimtinas amžius būna nustatomas pagal pdf formą. Baigtinė tikimybės tankio funkcija (angl.: posterior probability density function) išreiškiama formule:

$$f(\tau, \zeta, m) \propto f_0(\tau, \zeta, m)L(\tau, \zeta, m) \quad (3.3)$$

kur  $f_0$  yra pirminis parametrų tikimybės tankis (angl.: the prior probability density of the parameters) o  $L$  yra tikėtinumo funkcija (angl.: the likelihood function). Parametrai  $\tau$ ,  $\zeta$  ir  $m$  yra atitinkamai amžius, pradinis metalingumas ir pradinė masė. Tokiu būdu tikimybės tankio funkcija gali būti apibrėžta taip, kad  $f(\tau, \zeta, m)d\tau d\zeta dm$  yra žvaigždžių grupė su amžiais tarp  $\tau$  ir  $\tau + d\tau$ , metalingumais tarp  $\zeta$  ir  $\zeta + d\zeta$  bei pradinėmis masėmis tarp  $m$  ir  $m + dm$ . 3.3 lygties proporcingumo konstanta gali būti parinkta tokia, kad  $\int \int \int f(\tau, \zeta, m)d\tau d\zeta dm = 1$ .

Funkcija  $L$  lygi tikimybei gauti stebėjimų duomenis  $q(T_{\text{eff}}, \lg g, [M/H])$  konkretiems parametrams  $p(\tau, \zeta, m)$ . Tuomet funkcija  $L$  išreiškiama:

$$L(\tau, \zeta, m) = \left( \prod_{i=1}^n \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_i} \right) \times \exp(-\chi^2/2), \quad (3.4)$$

kur

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{q_i^{\text{obs}} - q_i(\tau, \zeta, m)}{\sigma_i} \right)^2, \quad (3.5)$$

ir kur  $\sigma_i$  yra standartinės paklaidos.

Žvaigždės amžių atitinka tikimybės tankio funkcijos maksimumas. Tikslī pdf forma kiekvienai žvaigždei skiriasi, kadangi tai priklauso nuo parametrų paklaidų, o labiausiai nuo žvaigždės padėties spalvos-ryškio diagramoje. Daugeliu atvejų tikimybės tankio funkcija yra smaili, ir tai leidžia gana gerai nustatyti parametrus. Kai kurios žvaigždės gali turėti labiau neapibrėžtus parametrus dėl išplitusios pdf, arba net turinčios dvi viršūnes.

Pirminis modelio parametrų tankis gali būti apibrėžtas kaip:

$$f_0(\tau, \zeta, m) = \psi(\tau)\phi(\zeta|\tau)\xi(m|\zeta, \tau), \quad (3.6)$$

kur  $\psi(\tau)$  yra *a priori* SFR istorija,  $\phi(\zeta|\tau)$  – metalingumo pasiskirstymas kaip amžiaus funkcija ir  $\xi(m|\zeta, \tau)$  – *a priori* IMF kaip metalingumo ir amžiaus funkcija.

Galutinė tikimybės pasiskirstymo funkcija – funkcija  $G$  – yra išreiškiamą:

$$G(\tau) \propto \int \int L(\tau, \zeta, m) \xi(m) dm d\zeta. \quad (3.7)$$

Lygtis 3.7 normalizuojama taip, kad  $G(\tau) = 1$  ties funkcijos maksimumu. Tikslus, be reikšmingų paklaidų amžiaus įvertinimas yra gaunamas ties  $G$  funkcijos maksimumu. Aukštutinis ir žemutinis  $1\sigma$  pasiklivimo intervalai yra taškai, kur  $G$  funkcija pasiekia 0.6 vertę.

Šis metodas, kaip ir kiti panašūs Bajeso metodai, yra šiuo metu labiausiai paplitęs būdas nustatyti amžių didelėms žvaigždžių imtims. Šis metodas su Bajeso tikimybės funkcija leidžia geriau suprasti, koks tikslus yra žvaigždės amžius.

Nustatant 2-osios grupės amžių buvo atsižvelgta į praturtinimą  $\alpha$ -proceso elementais. Ėmėme vidutinę grupės  $[\alpha/\text{Fe}]$  vertę 0.2. Naujai nustatyti žvaigždžių amžiai kartu su aukštutine ir žemutine amžių ribomis yra pateikti 3.8 lentelėje (atitinkamai ketvirtas, penktas ir šeštas lentelės stulpeliai). Taip pat šioje lentelėje pateikiami anksčiau nustatyti amžiai iš Holmberg ir kt. (2009) ir Casagrande ir kt. (2011) darbų.

Paveiksle 3.9 HR diagramoje yra atidėtos tirtos 2-osios grupės žvaigždės su jų spektroskopinėmis efektinėmis temperatūromis ir absoliutiniu ryškiu  $M_v$ , paimtu iš Holmberg ir kt. (2009). Izochronas, praturtintas  $[\alpha/\text{Fe}] \sim 0.2$ , ėmėme iš Bressan ir kt. (2012). Bendrą žvaigždžių išsidėstymą diagramoje gerai atkartoja dviejų amžių izochronos. Metalingų žvaigždžių amžių geriausiai reprezentuoja 8 mlrd. m. izochrona, tuo tarpu nemetalingos žvaigždės dera prie 12 mlrd. m. izochronos. Dauguma žvaigždžių, kurioms buvo nustatytas mažesnis arba didesnis amžius, taip pat dera prie šių dviejų amžiaus populiacijų, kadangi šios žvaigždės priklauso pagrindinei sekai, ir tiksliai nustatyti jų amžių yra problematiška.

Iš 3.9 paveikslo taip pat matome, kad žvaigždės HD 37739, HD 38767 ir HD 152123 žymiai jaunesnės (nuo 2.5 iki 5 mlrd. m.). HR diagramoje jos išsidėsto aukščiau 8 mlrd. m. izochronos šviesio posūkio taško. Iš visų 86

grupės žvaigždžių būtų galima išskirti maždaug penkiolikos jaunų pagrindinės sekos žvaigždžių subpopuliaciją. Savo chemine sudėtimi mūsų tirtos jaunosios žvaigždės neišsiskiria nuo kitų grupės žvaigždžių.

Žvaigždžių padėties HR diagramose (3.8 ir 3.9 pav.) neapibrėžtumą sudaro tipinė 100 K  $T_{\text{eff}}$  paklaida ir  $M_V$  paklaidos, kurias ėmėme iš Holmberg ir kt. (2009).

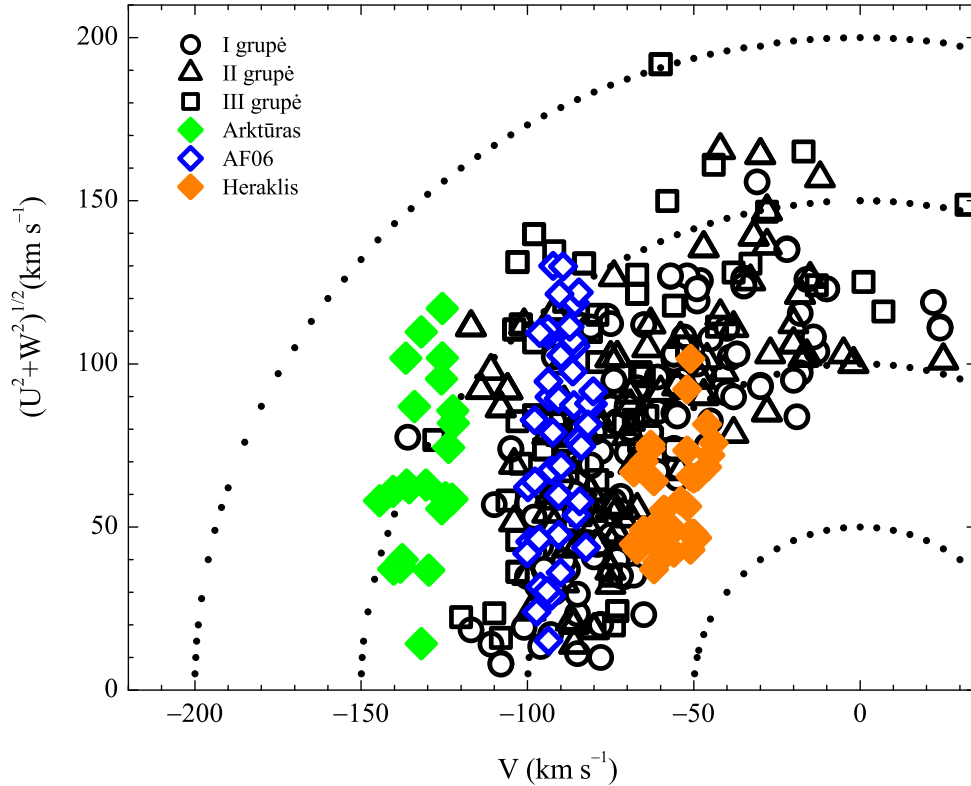
### 3.7. Palyginimas su kitais kinematiniais srautais

Šiame darbe visų trijų ŽKA kinematinų grupių žvaigždžių rezultatus palyginome su kitomis trimis panašaus metalingumo Galaktikos substruktūromis: Herakliu, Artūru ir AF06.

Heraklio kinematinio srauto žvaigždės turi gana panašų metalingumo ir amžiaus intervalą kaip ir ŽKA kinematinų grupių žvaigždės (Bobylev ir Bajkova 2007; Antoja ir kt. 2008; Bensby ir kt. 2007, 2014). Heraklio srautą pirmas identifikavo Eggen (1958) kaip 22 žvaigždžių, savo greičiais panašių į didelio greičio žvaigždę  $\xi$  Herkulis (HD 150680), grupę. Manoma, kad Heraklio srautas yra rezonansinės aukštesniojo disko žvaigždžių ir Galaktikos skersės sąveikos rezultatas. Šis žvaigždžių srautas yra nevienalytė storjo ir plonojo diskų objektų grupė (Dehnen 2000; Fux 2001; Quillen 2003; Famaey ir kt. 2005; Soubiran ir Girard 2005; Pakhomov ir kt. 2011; Antoja ir kt. 2014; Bensby ir kt. 2014).

Diskusijos dėl Arktūro srauto kilmės tęsiasi jau daugelį metų. Arktūro srauto narių identifikacija prasidėjo 1971 m. ir vis dar tęsiasi (Eggen 1971, 1996, 1998; Arifyanto ir Fuchs 2006; Gilmore ir kt. 2002; Wyse ir kt. 2006; Bensby ir kt. 2014). Arktūro srauto žvaigždės identifikavo Gilmore ir kt. (2002), o vėliau ir Wyse ir kt. (2006), kaip žvaigždžių, kurių sukimosi greitis yra apie  $-100 \text{ km s}^{-1}$ , grupę. Šis srautas buvo susietas su iširusia palydovine galaktika, įsiliejusia į Paukščių Tako galaktiką prieš 10 – 12 mlrd. m. Navarro ir kt. (2004) teigė, kad šios žvaigždės yra ta pati žvaigždžių grupė, kurią Eggen (1971) susiejo su ryškia žvaigžde Arktūru, turinčia panašią orbitinio greičio dedamosios vertę. Navarro ir kt. (2004) analizavo grupę

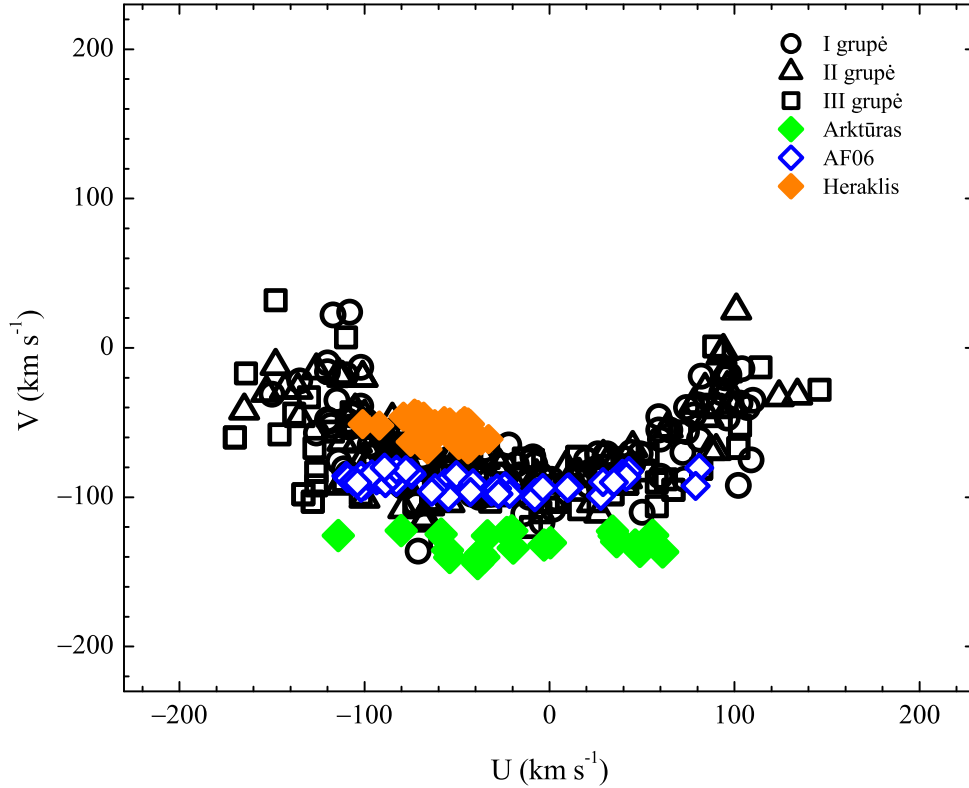




**3.10 pav.:** ŽKA kinematinų grupių ir Arktūro, AF06 bei Heraklio srautų žvaigždžių Toomre diagrama. Taškinės linijos žymi pastovią erdvinio greičio  $V$  dedamosios vertę kas  $50 \text{ km s}^{-1}$ .

žvaigždžių, kinematiškai susietų su Arktūru, ir patvirtino kad jos sudaro savitą nemetalingų žvaigždžių kompoziciją su panašiu apocentrinium radiusu, bendru kampiniu judesio kiekio momentu ir skirtingu metalų gausų pasiskirstymu. Šios savybės atitinka tas, kurias, manoma, turėtų demonstruoti žvaigždžių grupės, kildinamos iš suardytų palydovinių galaktikų liekanų. Taip pat buvo paminėta, kad žvaigždžių kampinis judesio kiekio momentas atrodo per mažas, kad būtų kildinamas iš dinaminių perturbacijų, kurias sukelia Galaktikos skersė. Neseniai Gardner ir Flynn (2010) ir Monari ir kt. (2013) parodė, kad Galaktikos ilgoji skersė greičių erdvėje gali sukurti kinematinį darinį su tokiais pat savybėmis, kokiomis pasižymi Arktūro judanti grupė. Kaip ten bebūtų, jeigu Arktūro grupė išties turi storojo disko kinematiką ir plonojo disko gausas, jos savitumas ir galima užgalaktinė kilmė lieka neišspręstu klausimu.

Taip vadinamąją AF06 kinematinę grupę identifiko Arifyanto ir Fuchs (2006), analizuodami substrukūras artimų subnykštukių pasiskirstyme fazi-

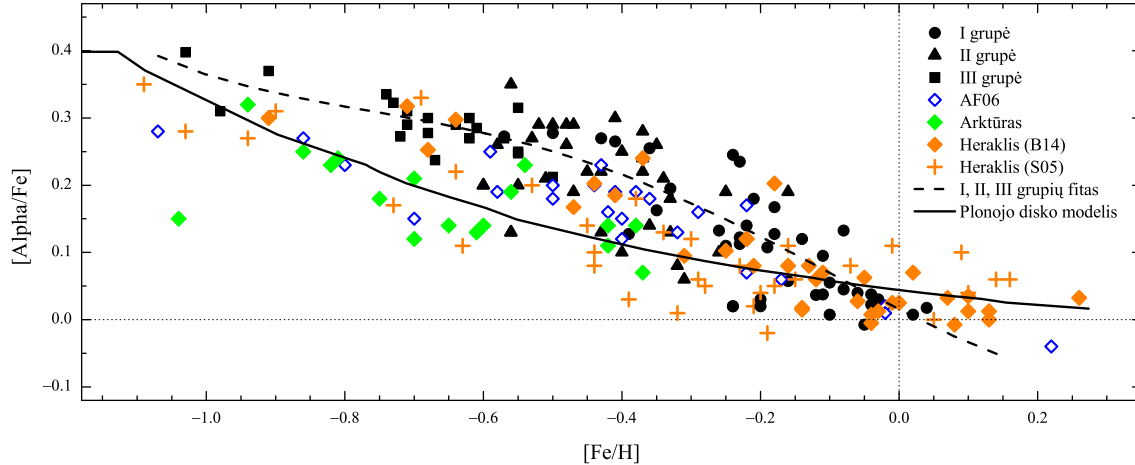


**3.11 pav.:** ŽKA kinematinė grupių ir Arktūro, AF06 bei Heraklio srautų žvaigždžių pasiskirstymas Botlingerio diagramoje.

nėje erdvėje. Anot atradėjų, AF06 grupė galimai yra panaši į Arktūro srautą.

Paveiksluose 3.10 ir 3.11 atitinkamai pavaizduotas ŽKA kinematinė grupių ir Arktūro, AF06 bei Heraklio srautų žvaigždžių pasiskirstymas Toomre ir Botlingerio diagramose. Iš paveikslų matyti, kad ŽKA grupių žvaigždžių kinematika ganėtinai skiriasi nuo pateiktų srautų kinematikos, tikrai AF06 iš dalies sutampa su grupių žvaigždžių išsidėstymu. Minėtuose paveiksluose atidėtos visos ŽKA grupių žvaigždės. Kinematiniai jų duomenys paimti iš Holmberg ir kt. (2009) darbo, Arktūro ir AF06 srautų žvaigždžių kinematinis duomenis ėmėme iš Ramya ir kt. (2012) darbo, o Heraklio – iš Bensby ir kt. (2014) darbo.

Paveiksle 3.12 pavaizdavome visų trijų ŽKA kinematinė grupių, Arktūro, AF06 ir Heraklio srautų atskirų žvaigždžių  $\alpha$ -elementų santykinį gausų [El/Fe] palyginimą. Vidutinę  $\alpha$ -elementų gausą skaičiavome iš Mg, Si, Ca ir Ti gausų. Cheminių elementų gausas 33 Heraklio žvaigždėms ėmėme iš Soubiran ir Girard (2005) ir 35 žvaigždėms iš Bensby ir kt. (2014).



**3.12 pav.:**  $[\text{Alpha}/\text{Fe}]$  santykinės gausos priklausomybė nuo  $[\text{Fe}/\text{H}]$  tirtose ŽKA kinematinėse grupėse, Arktūro srauto (žali rombai), AF06 srauto (mėlyni tuščiaviduriai rombai) ir Heraklio srauto (oranžiniai rombai ir plusai) žvaigždėse. Arktūro ir AF06 grupių žvaigždžių duomenys paimti iš Ramya ir kt. (2012). Heraklio grupės – iš Soubiran ir Girard (2005) ir Bensby ir kt. (2014). Suvidurkinta  $\alpha$ -proceso elementų gausa susideda iš Mg, Si, Ca ir Ti gausų. Plonjo disko modelis (ištinė linija) yra paimtas iš Pagel ir Tautvaišienė (1995), ŽKA grupių duomenų aproksimacija antros eilės polinomu pavaizduota punktyrine linija.

Soubiran ir Girard (2005) savo darbe Heraklio srautui žvaigždes priskyre naudodamiesi tikimybės analizės metodu, aptartu 3.3 skyriuje (3.1 ir 3.2 formulės). Bensby ir kt. (2014) pateikia tikimybių priklausyti kuriai nors kinematinėi Galaktikos populiacijai santykius. Remdamiesi autorių rekomendacijomis Heraklio srautui priskyre tas žvaigždes, kurių tikimybių santykiai  $\text{Her}/\text{TD} > 2$  ir  $\text{Her}/\text{D} > 2$  ( $\text{Her}/\text{TD}$  yra Heraklio ir plonjo disko tikimybių santykis, o  $\text{Her}/\text{D}$  – Heraklio ir storojo disko tikimybių santykis). Aštuoniolikai Arktūro srauto žvaigždžių, 26 AF06 žvaigždėms cheminių elementų gausas ėmėme iš Ramya ir kt. (2012) darbo. Paveiksle 3.12 taip pat yra parodytas suvidurkintas  $\alpha$ -elementų Galaktikos cheminės evoliucijos modelis, paimtas iš Pagel ir Tautvaišienė (1995), bei aproksimacija paprastu antros eilės polinomu, pritaikyta ŽKA kinematinėms grupėms.

Iš 3.12 paveikslo matyti, kad ŽKA grupių santykinės cheminių elementų gausos išsidėsto aukščiau, nei daugumos žvaigždžių, priklausančių Arktūro, AF06 ir Heraklio srautams. AF06 grupė savo chemine sudėtimi yra panašiausia į ŽKA grupių žvaigždes. Arktūro grupė, savo kinematiniais parametrais

panaši į storąjį diską, chemine sudėtimi yra panaši į plonojo disko žvaigždes. Ir galiausiai žvaigždės, siejamos su Heraklio srautu, neturi savitų cheminės sudėties požymių. Šio srauto žvaigždžių gausa mišri, turi panašumų ir su storuoju, ir su plonuoju disku (Soubiran ir Girard 2005; Bensby ir kt. 2007, 2014; Pakhomov ir kt. 2011).

Taigi, pateiktas Galaktikos substruktūrų kinematinų savybių ir cheminės sudėties palyginimas leidžia mums daryti išvadą, kad ŽKA kinematinų žvaigždžių grupių kilmė yra kitokia, nei Galaktikos srautų, kurių kilmė siejama su rezonansiniu Galaktikos skersės poveikiu.

### 3.8. ŽKA kinematinų žvaigždžių grupių kilmė

Tai, kad 1-oji, 2-oji ir 3-ioji (Stonkutė ir kt. 2012, 2013) ŽKA kinematinės grupės yra panašios savo cheminės sudėties pasiskirstymu, rodo, kad šių grupių kilmė yra panaši. O šių trijų kinematinų grupių ir storąjo Galaktikos disko cheminės sudėties panašumas reiškia, kad šių grupių ir storąjo disko formavimosi istorija gali būti susijusi. Todėl natūralu būtų nustatyti, kuris iš šiuo metu vyraujančių storąjo disko formavimosi scenarijų yra labiausiai tinkamas. Pagal kinematinės ŽKA kinematinų žvaigždžių grupių savybes labiausiai tiktų praturtintų dujomis galaktikų įsiliejimo scenarijus (angl.: *gas-rich mergers*) (Jones ir Wyse 1983; Brook ir kt. 2004, 2005; Dierickx ir kt. 2010; Wilson ir kt. 2011; Di Matteo ir kt. 2011 ir kt.). Pagal šį scenarijų, įtrauktų žvaigždžių ekscentricitetų pasiskirstymo maksimumas yra apie  $0.3 < e < 0.5$  (Sales ir kt. 2009), būtent toks ekscentriciteto pasiskirstymas yra būdingas tirtoms ŽKA grupėms. Šis scenarijus pagal storąjo disko žvaigždžių ekscentricitetų pasiskirstymą taip pat dera labiau su stebimu storąjo disko ekscentricitetų pasiskirstymu, nei akrecijos, susijungimo su nykštukinėmis galaktikomis ar radialinės migracijos scenarijai (Dierickx ir kt. 2010).

Dierickx ir kt. (2010) analizavo storąjo disko žvaigždžių ekscentricitetų pasiskirstymą, kuris neseniai buvo pasiūlytas kaip puiki vyraujančių storąjo disko formavimosi scenarijų diagnostinė priemonė (Sales ir kt. 2009). Naudodami SDSS duomenų septintą redakciją, jie sudarė 31 535 G-spektrinės klasės nykštukių rinkinį su šešiamatės fazinės erdvės duomenimis ir metalingumais ir

nustatė jų orbitinius ekscentricitetus. Jie pastebėjo, kad stebimas ekscentricitetų pasiskirstymas prieštarauja tam, kuris yra prognozuojamas vien tik pagal orbitinę migraciją. Taip pat storasis diskas negali būti susiformavęs veikiant vien tik nykštukinių galaktikų įsiliejimams, kadangi šis modelis numato daugiau žvaigždžių su dideliu ekscentricitetu nei yra šiuo metu stebima. Anot Dierickx ir kt. (2010), stebimą ekscentricitetų pasiskirstymą geriausiai atitinka praturtintų dujomis galaktikų įsiliejimo scenarijus, pagal kurį didžioji storąjo disko žvaigždžių dalis susidarė *in situ*<sup>1</sup>, tačiau jų formavimasis vyksta iš užgrobtų negalaktinės kilmės praturtintų dujų.

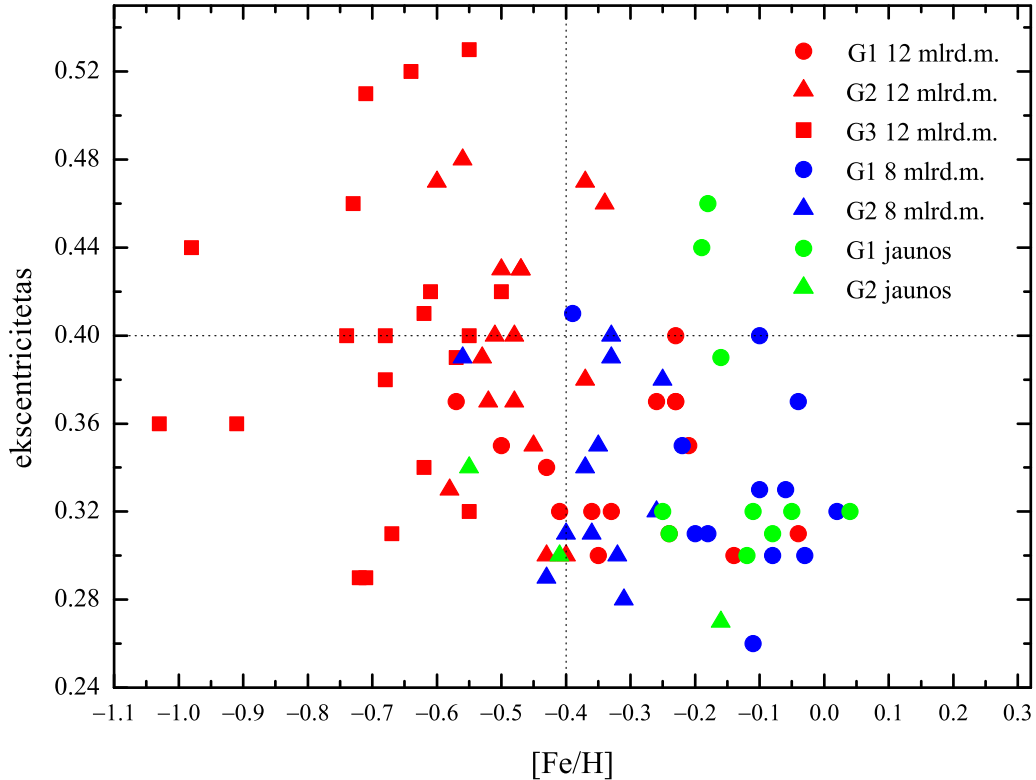
Pagal šį scenarijų, žvaigždžių ekscentricitetų pasiskirstymo maksimumas yra ties  $e \approx 0.25$ , o pasiskirstymo „šleifas“ tęsiasi link didesnių ekscentriciteto verčių, kur išsidėsto įkritusių galaktikų žvaigždės. Šiame darbe tirtų kinematinų grupių žvaigždžių ekscentricitetai yra tokia pačiame verčių intervale ir atitinka šį modelį. Praturtintų dujomis galaktikų įsiliejimo scenarijų palaiko ir RAVE apžvalgos duomenų tyrimas, kurį atliko Wilson ir kt. (2011), bei Di Matteo ir kt. (2011) atliktos simuliacijos. Pagal šį scenarijų, 1-osios, 2-osios ir 3-osios grupių žvaigždės gali būti susiformavusios įsiliejančiose palydovinėse galaktikose.

Pietiniame danguje esančias ŽKA kinematinų grupių žvaigždes tyrinėjo Helmi ir kt. (2014). Autoriai nustatė detalią cheminę sudėtį 36 ŽKA 1-osios grupės žvaigždėms, 22 2-osios grupės žvaigždėms ir 14 3-osios grupės žvaigždžių, matomų pietiniame dangaus pusrutulyje. Savo darbe jie pastebi gana ryškų dinaminių ir cheminių savybių pasikeitimą ties metalingumu  $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.4$ . Jų imtyje žvaigždės, kurių  $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.4$ , turi daugiausia mažesnius ekscentricitetus, mažesnę greičių dispersiją vertikalia kryptimi, yra labiau praturtintos  $\alpha$ -elementais ir išsiskiria gana siaura seka  $[\alpha/\text{Fe}]$  nuo  $[\text{Fe}/\text{H}]$  diagramoje, kuri akivaizdžiai skiriasi nuo plonojo disko. Žvaigždės, kurių  $[\text{Fe}/\text{H}] < -0.4$ , turi didesnę ekscentriciteto išsibarstymą, didesnę greičių dispersiją vertikalia kryptimi, stebimas platesnis  $[\alpha/\text{Fe}]$  verčių paplitimas.

Žiūrint į mūsų šiek tiek didesnę tirtų ŽKA kinematinų grupių žvaigždžių imtį (žr.: pav. 3.13), mes sutinkame su Helmi ir kt. (2014) tvirtinimu, kad mažesnio metalingumo žvaigždės turi didesnę ekscentricitetų išsibarstymą, nei

---

<sup>1</sup> „toje vietoje” (lot. k.)



**3.13 pav.:** ŽKA kinematinų grupių žvaigždžių ekscentriciteto ir  $[Fe/H]$  diagrama. Raudonais simboliais pavaizduotos žvaigždės, kurių amžius yra apie 12 mlrd. m., mėlynais – apie 8 mlrd. m., o žali simboliai atitinka jaunas 1-osios ir 2-osios grupių žvaigždes.

metalingesnės žvaigždės. Tačiau  $[\alpha/Fe]$  pasiskirstymas atrodo yra toks pat visame metalingumo intervale (žr.: pav. 3.7). Paveiksle 3.13 skirtingomis spalvomis pažymėjome skirtingų amžių žvaigždes. Praktiškai visos žvaigždės, kurių  $[Fe/H] < -0.4$ , yra maždaug 12 mlrd. m. amžiaus, tuo tarpu jaunesnės žvaigždės yra daugiausia didesnio metalingumo.

Net jeigu, remiantis dinaminėmis charakteristikomis, ŽKA kinematinės grupės nesudaro homogeniškos populiacijos, jų panaši cheminė sudėtis leidžia daryti išvadą, kad šių kinematinų grupių kilmė gali būti ta pati. Šios kinematinės žvaigždžių grupės gali priklausyti tai pačiai palydovinei galaktikai ir galėjo atsirasti mūsų Galaktikoje to paties susiliejoimo įvykio metu. Helmi ir kt. (2006) atlikti palydovinės galaktikos suirimo, jai krentant į kitą galaktiką, modeliavimai parodė, kad palydovės likučiai galiausiai gali tapti keliais šaltais žvaigždžių srautais, su apytikriai tokiais pat charakteringais jų

orbitų ekscentricitetais.

Vertėtų paminėti, kad šiuo metu stebimos mūsų Galaktikos palydovinės galaktikos, kurios dažnai yra vadinamos mūsų Galaktikos statybiniais elementais, pasižymi sistematiškai mažesniu  $[\alpha/\text{Fe}]$  santykiu esant atitinkamiems metalin-gumams, nei stebime aptariamose kinematinėse grupėse ar Galaktikos lauko žvaigždėse, o be to skirtingos palydovinės galaktikos demonstruoja skirtingą gausų pasiskirstymą (žr. pvz.: Geisler ir kt. 2007; Tautvaišienė ir kt. 2009; Tolstoy ir kt. 2009). Juo labiau, kad fotometriniai ir spektroskopiniai nykštukinių sferoidinių galaktikų tyrimai parodė, jog jos turi nedaug arba visai neturi dujų bei žvaigždėdaros rajonų (pvz.: Smecker-Hane ir kt. 1994; Tolstoy ir kt. 2003; Venn ir kt. 2004). Šiai problemai išspręsti buvo pasiūlyta daug įvairių sprendimų (Robertson ir kt. 2005; Bullock ir Johnston 2005; Font ir kt. 2006a,b; Kirby ir kt. 2008, 2011; Frebel ir kt. 2010; Tafelmeyer ir kt. 2010; Smith ir kt. 2012; Belokurov 2013), netgi buvo pasiūlyta idėja, kad šių dienų Vietinės galaktikų grupės nykštukinės galaktikos gal ir nėra charakteringi statybiniai galaktikų blokai (Unavane ir kt. 1996).

Iš tiesų dar yra labai daug ką atrasti Paukščių Tako galaktikoje ir jos disko formavimosi ir evoliucijos tyrimai yra tęsiami tiek stebėjimų srityje (pvz.: Haywood ir kt. 2013; Kordopatis ir kt. 2013b; Anders ir kt. 2014; Bensby ir kt. 2014; Bergemann ir kt. 2014; Mikolaitis ir kt. 2014), tiek teorinio modeliavimo srityje (Micalì ir kt. 2013; Snaith ir kt. 2014; Robin ir kt. 2014; Kubryk ir kt. 2014; Minchev ir kt. 2014 ir kt.). Modelis, kuris puikiai atkurtų visus pagrindinius šių dienų disko žvaigždžių stebėjimų duomenis, dar nėra sukurtas. Panašu, kad visi aukščiau paminėti procesai (praturtintų dujomis galaktikų įsiliejimas, akrecija, susijungimas su nykštukinėmis galaktikomis, radialinė migracija ir kt.) turėjo tam tikrą įtaką Paukščių Tako galaktikos disko formavimuisi, ir nėra aišku, kuris iš šių mechanizmų yra dominuojantis.

# Skyrius 4

## Pagrindiniai rezultatai ir išvados

Mes nustatėme 22 cheminių elementų gausas 37 žvaigždėms, priklausančioms 1-ajai Ženevos-Kopenhagos apžvalgos grupei ir 32 žvaigždėms, priklausančioms 2-ajai grupei. Šios kinematiškai identifikuotos žvaigždžių grupės, kaip ir trečioji ŽKA kinematinė grupė, manoma, yra suirusios palydovinės galaktikos liekana. Mūsų pagrindinis tikslas buvo ištirti šių dviejų grupių žvaigždžių cheminę sudėtį ir palyginti ją su Galaktikos storojo ir plonojo disko žvaigždėmis, 3-osios grupės žvaigždėmis bei kelių panašaus metalingumo kinematinųjų srautų žvaigždėmis.

Iš savo tyrimo padarėme tokias išvadas:

1. Tirtų 1-osios ŽKA žvaigždžių grupės metalingumo intervalas:  $0.04 \geq [\text{Fe}/\text{H}] \geq -0.57$ . Vidutinė  $[\text{Fe}/\text{H}]$  vertė yra  $-0.20 \pm 0.14$ . Tirtų 2-osios žvaigždžių grupės metalingumo intervalas:  $-0.16 \geq [\text{Fe}/\text{H}] \geq -0.60$ . Vidutinė  $[\text{Fe}/\text{H}]$  vertė yra  $-0.42 \pm 0.10$ . Cheminė kinematinųjų žvaigždžių grupių sudėtis yra homogeniška.
2. Tirtų 1-osios ir 2-osios ŽKA grupių žvaigždžių deguonies,  $\alpha$ -elementų ir elementų, daugiausia gaminamų  $r$ -procesu, gausos yra padidėjusios, lyginant su Galaktikos plonojo disko nykštukių gausomis ir Galaktikos plonojo disko cheminės evoliucijos modeliu. Toks gausų pasiskirstymas yra būdingas tiek Galaktikos storajam diskui, tiek 3-iajai Ženevos-Kopenhagos apžvalgos grupei.
3. Geležies grupės elementų ir elementų, daugiausia gaminamų  $s$ -procesu, gausos yra panašios į Galaktikos plonojo ir storojo disko nykštukių gausas tame pačiame metalingumo intervale.



4. Ties atitinkamais metalingumais cheminė 1-osios, 2-osios ir 3-osios ŽKA grupių bei storjo Galaktikos disko žvaigždžių sudėtis yra panaši. Tai parodo, kad šių kinematinų žvaigždžių grupių ir storjo Galaktikos disko žvaigždžių formavimasis yra galimai susijęs.
5. Dauguma tirtų ŽKA grupių žvaigždžių priklauso dviem amžiaus populiacijoms: 8 ir 12 mlrd. m.
6. Savo chemine sudėtim ir kinematinėmis savybėmis 1-osios, 2-osios ir 3-osios ŽKA grupių žvaigždės skiriasi nuo Heraklio, Arktūro ir AF06 srautų žvaigždžių.
7. Visų trijų Ženevos-Kopenhagos apžvalgos kinematinų grupių žvaigždžių cheminė sudėtis kartu su kinematinėmis savybėmis ir amžiumi palaiko praturtintų dujomis nykštukinių galaktikų įsiliejimo scenarijų, kaip labiausiai tinkamą šių grupių kilmės paaiškinimą.

## Literatūra

- Alonso A., Arribas S., Martinez-Roger C., 1996, A&A, 313, 873
- Anders, F., Chiappini, C., Santiago, B. X., ir kt. 2014, A&A, 564, AA115
- Andersen, J., Nordstrom, B., Ardeberg, A., ir kt. 1985, A&AS, 59, 15
- Andersen, J., Nordstrom, B. 1983, A&AS, 52, 479
- Andersen, J., Nordstrom, B. 1983, A&A, 122, 23
- Anstee S. D., O'Mara B. J., 1995, MNRAS, 276, 859
- Antoja, T., Figueras, F., Fernández, D., Torra, J. 2008, A&A, 490, 135
- Antoja T., ir kt., 2012, MNRAS, 426, L1
- Antoja, T., Helmi, A., Dehnen, W., ir kt. 2014, A&A, 563, A60
- Arifyanto M. I., Fuchs B., 2006, A&A, 449, 533
- Arlandini, C., Käppeler, F., Wisshak, K., ir kt. 1999, ApJ, 525, 886
- Asplund, M., Nordlund, Trampedach, R., Allende Prieto, C., Stein, R. F. 2000, A&A, 359, 729
- Barklem P. S., O'Mara B. J., Ross J. E., 1998, MNRAS, 296, 1057
- Barklem P. S., O'Mara B. J., 1997, MNRAS, 290, 102
- Beers T. C., Barklem P. S., Christlieb N., Hill V., 2005, NuPhA, 758, 595
- Belokurov, V. 2013, New Astron. Rev., 57, 100
- Bensby T., Feltzing S., Lundström I., 2003, A&A, 410, 527
- Bensby T., Feltzing S., Lundström I., Ilyin I., 2005, A&A, 433, 185
- Bensby, T., Oey, M. S., Feltzing, S., Gustafsson, B. 2007, ApJ, 655, L89
- Bensby, T., Feltzing, S., Oey, M. S. 2014, A&A, 562, A71
- Bergemann, M., Ruchti, G. R., Serenelli, A., ir kt. 2014, A&A, 565, AA89

Biehl D., 1976, Doktoro disertacija, Kylio universitetas, Vokietija

Bobylev, V. V., Bajkova, A. T. 2007, Astronomy Reports, 51, 372

Bobylev, V. V., Bajkova, A. T., Mylläri, A. A. 2010, Astronomy Letters, 36, 27

Bressan A., Marigo P., Girardi L., Salasnich B., Dal Cero C., Rubele S., Nanni A., 2012, MNRAS, 427, 127

Brewer M.-M., Carney B. W., 2006, AJ, 131, 431

Brook C. B., Kawata D., Gibson B. K., Freeman K. C., 2004, ApJ, 612, 894

Brook C. B., Gibson B. K., Martel H., Kawata D., 2005, ApJ, 630, 298

Bruntt, H., Bedding, T. R., Quirion, P.-O., ir kt. 2010, MNRAS, 405, 1907

Bullock, J. S., Johnston, K. V. 2005, ApJ, 635, 931

Carney, B. W., Latham, D. W., Laird, J. B., Aguilar, L. A. 1994, AJ, 107, 2240

Casagrande, L., Ramírez, I., Meléndez, J., Bessell, M., Asplund, M. 2010, A&A, 512, A54

Casagrande L., Schönrich R., Asplund M., Cassisi S., Ramírez I., Meléndez J., Bensby T., Feltzing S., 2011, A&A, 530, A138

Crawford D. L., 1975, AJ, 80, 955

Dehnen, W. 2000, AJ, 119, 800

Dekker, E. 1976, Phys. Rep., 24, 315

Dettbarn C., Fuchs B., Flynn C., Williams M., 2007, A&A, 474, 857

Di Matteo P., Lehnert M. D., Qu Y., van Driel W., 2011, A&A, 525, L3

Dierickx M., Klement R., Rix H.-W., Liu C., 2010, ApJ, 725, L186

Djupvik, A. A., Andersen, J. 2010, Highlights of Spanish Astrophysics V, 211

Drimmel, R., Spergel, D. N. 2001, ApJ, 556, 181

Edvardsson, B. 1988, A&A, 190, 148

- Edvardsson B., Andersen J., Gustafsson B., Lambert D. L., Nissen P. E., Tomkin J., 1993, *A&A*, 275, 101
- Eggen, O. J. 1958, *MNRAS*, 118, 154
- Eggen, O. J. 1970, *Vistas Astron.*, 12, 367
- Eggen, O. J. 1971, *PASP*, 83, 271
- Eggen, O. J. 1996, *AJ*, 112, 1595
- Eggen, O. J. 1998, *AJ*, 115, 2397
- Famaey, B., Jorissen, A., Luri, X., ir kt. 2005, *A&A*, 430, 165
- Famaey, B., Siebert, A., Jorissen, A. 2008, *A&A*, 483, 453
- Fellhauer M., ir kt., 2007, *MNRAS*, 375, 1171
- Flynn C., Sommer-Larsen J., Christensen P. R., 1996, *MNRAS*, 281, 1027
- Font, A. S., Johnston, K. V., Bullock, J. S., Robertson, B. E. 2006a, *ApJ*, 638, 585
- Font, A. S., Johnston, K. V., Bullock, J. S., Robertson, B. E. 2006b, *ApJ*, 646, 886
- Frebel, A., Simon, J. D., Geha, M., Willman, B. 2010, *ApJ*, 708, 560
- Freeman, K., Bland-Hawthorn, J. 2002, *ARA&A*, 40, 487
- Fuhrmann K., 1998, *A&A*, 338, 161
- Fux, R. 2001, *A&A*, 373, 511
- Gai, N., Basu, S., Chaplin, W. J., Elsworth, Y. 2011, *ApJ*, 730, 63
- Gardner, E., Flynn, C. 2010, *MNRAS*, 405, 545
- Geisler, D., Wallerstein, G., Smith, V. V., Casetti-Dinescu, D. I. 2007, *PASP*, 119, 939
- Gerhard, O. 2002, *The Dynamics, Structure & History of Galaxies: A Workshop in Honour of Professor Ken Freeman*, 273, 73
- Gilmore, G., Reid, N. 1983, *MNRAS*, 202, 1025
- Gilmore, G., Wyse, R. F. G., Norris, J. E. 2002, *ApJ*, 574, L39

- Gómez, F. A., Helmi, A. 2010, MNRAS, 401, 2285
- Gómez, F. A., Minchev, I., Villalobos, Á., O'Shea, B. W., Williams, M. E. K. 2012, MNRAS, 419, 2163
- Gratton R. G., Sneden C., 1994, A&A, 287, 927
- Gratton R. G., Carretta E., Eriksson K., Gustafsson B., 1999, A&A, 350, 955
- Gray D. F., 2005, knyga „The observation and analysis of stellar photospheres”, Kembridžas
- Grevesse N., Sauval A. J., 2000, „Origin of Elements in the Solar System, Implications of Post-1957 Observations”, Konferencijos medžiaga. Redaktorius O. Manuel. Bostonas Dordrechtas, p. 261
- Grevesse N., Asplund M., Sauval A. J., 2007, SSRv, 130, 105
- Gurtovenko E. A., Kostyk R. I., 1989, Izdatel'stvo Naukova Dumka, Kijevas, p. 200
- Gustafsson B., Edvardsson B., Eriksson K., Jørgensen U. G., Nordlund Å., Plez B., 2008, A&A, 486, 951
- Hammersley, P. L., Garzón, F., Mahoney, T. J., López-Corredoira, M., Torres, M. A. P. 2000, MNRAS, 317, L45
- Haywood, M., Di Matteo, P., Lehnert, M. D., Katz, D., Gómez, A. 2013, A&A, 560, AA109
- Hekker, S., Elsworth, Y., Mosser, B., ir kt. 2013, A&A, 556, AA59
- Hoffleit, D., Jaschek, C. 1982, The Bright Star Catalogue, New Haven: Yale University Observatory (4th edition), 1982,
- Høg E., ir kt., 2000, A&A, 355, L27
- Helmi, A., White, S. D. M., de Zeeuw, P. T., Zhao, H. 1999, Nature, 402, 53
- Helmi, A., de Zeeuw, P. T. 2000, MNRAS, 319, 657
- Helmi, A., Navarro, J. F., Meza, A., Steinmetz, M., Eke, V. R. 2003, ApJ, 592, L25
- Helmi, A. 2004, ApJ, 610, L97

- Helmi A., Navarro J. F., Nordström B., Holmberg J., Abadi M. G., Steinmetz M., 2006, MNRAS, 365, 1309
- Helmi A., 2008, A&ARv, 15, 145
- Helmi, A., Williams, M., Freeman, K. C., Bland-Hawthorn, J., De Silva, G. 2014, ApJ, 791, 135
- Holmberg J., Nordström B., Andersen J., 2007, A&A, 475, 519
- Holmberg J., Nordström B., Andersen J., 2009, A&A, 501, 941
- Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J., 1994, Nature, 370, 194
- Ibata R. A., Irwin M. J., Lewis G. F., Ferguson A. M. N., Tanvir N., 2003, MNRAS, 340, L21
- Ilyin I. V., 2000, Doktoro disertacija, Oulu universitetas, Suomija
- Ivans I. I., Simmerer J., Sneden C., Lawler J. E., Cowan J. J., Gallino R., Bisterzo S., 2006, ApJ, 645, 613
- Jørgensen B. R., Lindegren L., 2005, A&A, 436, 127
- Johansson S., Litzén U., Lundberg H., Zhang Z., 2003, ApJ, 584, L107
- Johnston, K. V., Spergel, D. N., Hernquist, L. 1995, ApJ, 451, 598
- Jones B. J. T., Wyse R. F. G., 1983, A&A, 120, 165
- Kirby, E. N., Simon, J. D., Geha, M., Guhathakurta, P., Frebel, A. 2008, ApJ, 685, L43
- Kirby, E. N., Lanfranchi, G. A., Simon, J. D., Cohen, J. G., Guhathakurta, P. 2011, ApJ, 727, 78
- Klement, R., Fuchs, B., Rix, H.-W. 2008, ApJ, 685, 261
- Klement R., *ir kt.*, 2009, ApJ, 698, 865
- Klement, R. J., Bailer-Jones, C. A. L., Fuchs, B., Rix, H.-W., Smith, K. W. 2011, ApJ, 726, 103
- Koch A., Edvardsson B., 2002, A&A, 381, 500
- Kordopatis, G., Hill, V., Irwin, M., *ir kt.* 2013a, A&A, 555, A12
- Kordopatis, G., Gilmore, G., Wyse, R. F. G., *et al.* 2013b, MNRAS, 436, 3231

- Kubryk, M., Prantzos, N., Athanassoula, E. 2014, arXiv:1412.0585
- Kurucz R. L., 2005, MSAIS, 8, 189
- Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L., 1984, knyga „Solar flux atlas from 296 to 1300 nm” Naujasis Meksikas
- Law, D. R., Johnston, K. V., Majewski, S. R. 2005, ApJ, 619, 807
- Lawler J. E., Bonvallet G., Sneden C., 2001a, ApJ, 556, 452
- Lawler J. E., Wickliffe M. E., den Hartog E. A., Sneden C., 2001b, ApJ, 563, 1075
- Lawler J. E., Den Hartog E. A., Sneden C., Cowan J. J., 2006, ApJS, 162, 227
- Mäckle R., Griffin R., Griffin R., Holweger H., 1975, A&AS, 19, 303
- Mashonkina, L., Gehren, T. 2001, A&A, 376, 232
- Mashonkina L. I., Vinogradova A. B., Ptitsyn D. A., Khokhlova V. S., Chernetsova T. A., 2007, ARep, 51, 903
- McWilliam A., 1997, ARA&A, 35, 503
- McWilliam A., 1998, AJ, 115, 1640
- Micali, A., Matteucci, F., Romano, D. 2013, MNRAS, 436, 1648
- Mikolaitis, Š., Hill, V., Recio-Blanco, A., ir kt. 2014, A&A, 572, AA33
- Minchev I., Quillen A. C., Williams M., Freeman K. C., Nordhaus J., Siebert A., Bienaymé O., 2009, MNRAS, 396, L56
- Minchev, I., Chiappini, C., Martig, M. 2014, A&A, 572, AA92
- Mishenina, T. V., Pignatari, M., Korotin, S. A., ir kt. 2013, A&A, 552, A128
- Mo, H. J., Mao, S., White, S. D. M. 1998, MNRAS, 295, 319
- Monari, G., Antoja, T., Helmi, A. 2013, arXiv:1306.2632
- Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J., 1966, knyga „The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å”, Vašingtonas
- Morel, T., Miglio, A. 2012, MNRAS, 419, L34
- Navarro, J. F., Helmi, A., Freeman, K. C. 2004, ApJ, 601, L43

- Nissen, P. E. 1981, A&A, 97, 145
- Nissen, P. E., Chen, Y. Q., Schuster, W. J., Zhao, G. 2000, A&A, 353, 722
- Nordstrom, B., Andersen, J. 1985, A&AS, 61, 53
- Nordström B., ir kt., 2004, A&A, 418, 989
- Olsen E. H., 1983, A&AS, 54, 55
- Olsen E. H., 1984, A&AS, 57, 443
- Olsen, E. H. 1988, A&A, 189, 173
- Olsen E. H., 1993, A&AS, 102, 89
- Olsen E. H., 1994a, A&AS, 104, 429
- Olsen E. H., 1994b, A&AS, 106, 257
- Pagel B. E. J., Tautvaisiene G., 1995, MNRAS, 276, 505
- Pagel B. E. J., Tautvaisiene G., 1997, MNRAS, 288, 108
- Pakhomov, Y. V., Antipova, L. I., Boyarchuk, A. A. 2011, Astronomy Reports, 55, 256
- Peñarrubia J., ir kt., 2005, ApJ, 626, 128
- Perryman, M. A. C., de Boer, K. S., Gilmore, G., ir kt. 2001, A&A, 369, 339
- Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., Weiss W. W., Jeffery C. S., 1995, A&AS, 112, 525
- Prochaska J. X., Naumov S. O., Carney B. W., McWilliam A., Wolfe A. M., 2000, AJ, 120, 2513
- Quillen A. C. 2003, AJ, 125, 785
- Ramírez I., Allende Prieto C., Lambert D. L., 2007, A&A, 465, 271
- Ramya, P., Reddy, B. E., Lambert, D. L. 2012, MNRAS, 425, 3188
- Reddy B. E., Tomkin J., Lambert D. L., Allende Prieto C., 2003, MNRAS, 340, 304
- Reddy B. E., Lambert D. L., Allende Prieto C., 2006, MNRAS, 367, 1329



- Robertson, B., Bullock, J. S., Font, A. S., Johnston, K. V., Hernquist, L. 2005, ApJ, 632, 872
- Robin, A. C., Reylé, C., Fliri, J., et al. 2014, A&A, 569, AA13
- Roederer I. U., Lawler J. E., Sneden C., Cowan J. J., Sobeck J. S., Pilachowski C. A., 2008, ApJ, 675, 723
- Sales L. V., ir kt., 2009, MNRAS, 400, L61
- Schuster W. J., Nissen P. E., 1989, A&A, 222, 69
- Siebert, A., Williams, M. E. K., Siviero, A., ir kt. 2011, AJ, 141, 187
- Silk, J., Bouwens, R. 2001, NAR, 45, 337
- Simmons G. J., Blackwell D. E., 1982, A&A, 112, 209
- Smecker-Hane, T. A., Stetson, P. B., Hesser, J. E., Lehnert, M. D. 1994, AJ, 108, 507
- Smith, M. C., Okamoto, S., Yuan, H.-B., Liu, X.-W. 2012, Research in Astronomy and Astrophysics, 12, 1021
- Snaith, O. N., Haywood, M., Di Matteo, P., ir kt.. 2014, ApJ, 781, LL31
- Sneden C., Lawler J. E., Cowan J. J., Ivans I. I., Den Hartog E. A., 2009, ApJS, 182, 80
- Stanford, L. M., Lambert, D. L. 2012, MNRAS, 424, 2118
- Steinmetz, M., Zwitter, T., Siebert, A., ir kt. 2006, AJ, 132, 1645
- Stonkutė E., Tautvaišienė G., Nordström B., Ženovienė R., 2012, A&A, 541, A157
- Stonkutė E., Tautvaišienė G., Nordström B., Ženovienė R., 2013, A&A, 555, A6
- Soubiran, C., Girard, P. 2005, A&A, 438, 139
- Tafelmeyer, M., Jablonka, P., Hill, V., ir kt. 2010, A&A, 524, A58
- Tautvaišienė G., Edvardsson B., Tuominen I., Ilyin I., 2001, A&A, 380, 578
- Tautvaišienė G., Geisler D., Wallerstein G., Borissova J., Bizyaev D., Pagel B. E. J., Charbonnel C., Smith V., 2007, AJ, 134, 2318

- Tautvaišienė, G., Geisler, D., & Wallerstein, G. 2009, *Science with the VLT in the ELT Era*, 205
- Thorén, P., Feltzing, S. 2000, *A&A*, 363, 692
- Tolstoy, E., Venn, K. A., Shetrone, M., *ir kt.* 2003, *AJ*, 125, 707
- Tolstoy E., Hill V., Tosi M., 2009, *ARA&A*, 47, 371
- Tomkin, J., Lambert, D. L. 1999, *ApJ*, 523, 234
- Travaglio, C., Gallino, R., Arnone, E., *ir kt.* 2004, *ApJ*, 601, 864
- Trevisan M., Barbuy B., Eriksson K., Gustafsson B., Grenon M., Pompéia L., 2011, *A&A*, 535, A42
- Unavane, M., Wyse, R. F. G., & Gilmore, G. 1996, *MNRAS*, 278, 727
- Unsöld A., 1955, *Physik der Stern Atmosphären*. Springer-Verlag, Berlin
- Venn, K. A., Irwin, M., Shetrone, M. D., *ir kt.* 2004, *AJ*, 128, 1177
- Villalobos Á., Helmi A., 2009, *MNRAS*, 399, 166
- Wilson M. L., *ir kt.*, 2011, *MNRAS*, 413, 2235
- Woosley, S. E., Weaver, T. A. 1995, *ApJS*, 101, 181
- Wyse, R. F. G., Gilmore, G., Norris, J. E., *ir kt.* 2006, *ApJ*, 639, L13
- Yanny B., *ir kt.*, 2003, *ApJ*, 588, 824
- Yanny, B., Rockosi, C., Newberg, H. J., *ir kt.* 2009, *AJ*, 137, 4377
- Zhang H. W., Zhao G., 2006, *A&A*, 449, 127
- Zhao, G., Magain, P. 1990, *A&A*, 238, 242
- Zwitter, T., Siebert, A., Munari, U., *ir kt.* 2008, *AJ*, 136, 421

# Priedas A

## Stebėjimų suvestinės

Šiame priede yra pateikiamos trys lentelės.

**Lentelėje A.1** yra pateikiama 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių stebėjimų suvestinė.

2-osios ŽKA grupės žvaigždžių ir palyginamųjų Galaktikos storojo ir plonojo disko žvaigždžių stebėjimų suvestinės yra pateikiamos atitinkamai **A.2** ir **A.3** lentelėse.

Pirmuosiuose išvardintų lentelių stulpeliuose yra pateikti žvaigždžių numeriai iš Henry Draper (HD) arba Bonner Durchmusterung (BD) žvaigždžių katalogų. Antrajame ir trečiajame stulpeliuose nurodomos stebėtų žvaigždžių koordinatės – rektascensija (RA) ir deklinacija (DEC). Sekančiuose stulpeliuose yra žvaigždžių ryškis V, ekspozicijos trukmė (Eksp.) ir data, kuomet buvo atliekami stebėjimai.

**A.1 lentelė:** 1-osios ŽKA kinematinės grupės stebėjimų suvestinė.

Žvaigždės numeris	RA h:m:s	DEC d:m:s	V mag	Eksp.* s	Data
HD 3795	00:40:32.8	-23:48:17	6.84	600	2008/07/22
HD 4607	00:47:57.3	-09:20:47	8.25	1200	2008/07/22
HD 15777	02:33:53.7	+49:30:21	8.00	1500	2008/07/19
HD 22872	03:42:41.6	+51:10:23	7.94	1200	2012/03/27
HD 25123	04:03:21.9	+63:16:51	8.13	1300	2012/03/12
HD 40040	05:57:01.7	+15:44:28	8.19	1300	2012/03/01
HD 49409	06:48:39.3	+07:37:20	7.92	500	2012/03/01
HD 52711	07:03:30.4	+29:20:13	5.94	300	2012/02/12
HD 60779	07:36:01.4	-03:09:06	7.17	600	2012/02/29
HD 67088	08:07:36.1	+30:40:58	8.76	1800	2012/04/16
HD 67587	08:10:11.4	+35:27:17	6.64	400	2012/02/29
HD 76095	08:54:55.9	+26:11:54	6.74	400	2012/02/29
HD 77408	09:03:15.7	+32:52:53	7.03	500	2012/04/10
HD 78558	09:08:25.2	-15:08:41	7.30	1000	2012/05/29
HD 88371	10:11:48.0	+23:45:18	8.43	1600	2012/04/10
HD 88446	10:12:19.0	+17:17:57	7.85	1100	2012/04/10
HD 90508	10:28:03.8	+48:47:05	6.44	300	2012/03/12
HD 109498	12:34:58.1	+23:08:53	8.77	1200	2008/07/18
HD 111367	12:48:34.0	+26:35:49	8.81	1200	2008/07/18
HD 135694	15:11:28.9	+71:50:27	9.10	1000	2008/07/21
HD 138750	15:33:40.2	+09:21:12	7.92	1200	2012/04/25
HD 140209	15:42:05.7	+10:58:38	8.29	1800	2008/07/22
HD 149105	16:30:14.9	+47:57:08	7.03	900	2008/07/20
HD 149890	16:36:26.0	+30:56:29	7.10	300	2008/07/18
HD 156617	17:18:39.2	-01:30:35	8.02	1200	2012/04/25
HD 156893	17:19:46.3	+06:33:13	8.30	1300	2012/04/25
HD 157214	17:20:39.5	+32:28:03	5.40	120	2008/07/18
BD +40 3374	18:26:55.4	+40:42:50	9.85	2700	2008/07/18
HD 171009	18:30:57.5	+33:55:58	8.36	1000	2008/07/18
HD 171242	18:31:30.0	+45:00:35	8.03	1000	2008/07/19
HD 178478	19:08:18.8	+15:01:02	8.24	1000	2008/07/21
HD 188326	19:53:01.5	+38:46:24	7.56	500	2008/07/18
HD 206373	21:41:00.6	+29:20:25	8.30	1000	2008/07/18
HD 210483	22:10:26.1	+18:47:49	7.59	1000	2008/07/20
HD 211476	22:17:15.1	+12:53:54	7.04	800	2008/07/20
HD 217511	23:01:02.1	+22:23:28	7.71	900	2008/07/19
HD 219175	23:14:07.4	-08:55:27	7.56	1000	2008/07/20

\* Ekspozicijos trukmė.

**A.2 lentelė:** 2-osios ŽKA kinematinės grupės stebėjimų suvestinė.

Žvaigždės numeris	RA h:m:s	DEC d:m:s	V mag	Eksp.* s	Data
BD +68 813	14:59:03.0	+67:44:59	9.75	2000	2008/07/20
BD +31 3330	18:40:54.8	+31:31:58	8.50	1000	2008/07/18
HD 10519	01:42:14.9	-17:53:19	7.45	1000	2011/08/10
HD 12782	02:06:41.7	+51:19:41	8.38	1000	2008/07/19
HD 16397	02:38:27.8	+30:48:59	7.34	1000	2008/07/21
HD 18757	03:04:09.6	+61:42:21	7.25	1000	2008/07/22
HD 21543	03:28:21.0	-06:31:51	8.23	1200	2011/09/05
HD 24156	03:50:41.6	+04:37:20	8.15	1000	2011/09/05
HD 29587	04:41:36.3	+42:07:06	7.29	800	2011/08/10
HD 30649	04:51:43.5	+45:50:03	6.97	600	2011/08/10
HD 37739	05:41:46.7	+22:52:13	7.92	1000	2011/09/05
HD 38767	05:48:15.0	+03:53:56	7.60	900	2011/09/05
HD 96094	11:05:15.4	+25:12:06	7.62	360	2008/07/18
HD 114606	13:11:21.4	+09:37:33	8.74	1000	2008/07/22
HD 121533	13:55:48.3	+12:26:19	8.58	1500	2008/07/22
HD 131582	14:53:41.5	+23:20:42	8.65	1000	2008/07/18
HD 132142	14:55:11.0	+53:40:49	7.73	1500	2008/07/22
HD 133621	15:00:26.9	+71:45:55	6.66	600	2008/07/21
HD 137687	15:24:17.9	+60:32:57	7.40	1000	2008/07/21
HD 139457	15:37:59.2	+10:14:23	7.04	1000	2008/07/22
HD 143291	15:58:32.0	+27:44:23	8.01	700	2008/07/18
HD 152123	16:45:47.3	+69:38:14	8.50	1000	2008/07/19
HD 156802	17:20:00.1	-08:01:23	7.97	1500	2008/07/21
HD 158226	17:26:43.1	+31:04:37	8.50	1500	2008/07/20
HD 165401	18:05:37.4	+04:39:25	6.79	900	2008/07/21
HD 170357	18:26:37.7	+46:05:01	8.31	1500	2008/07/22
HD 190404	20:03:52.1	+23:20:26	7.28	900	2008/07/19
HD 200580	21:04:07.3	+02:59:40	7.33	1000	2008/07/20
HD 201099	21:07:43.8	-05:33:57	7.60	600	2011/07/21
HD 215594	22:45:54.0	+32:51:32	8.70	1000	2008/07/18
HD 221830	23:35:28.8	+31:01:01	6.85	600	2008/07/20
HD 224817	00:00:58.2	-11:49:25	8.95	1800	2008/07/22

\* Ekspozicijos trukmė.

**A.3 lentelė:** Palyginamųjų žvaigždžių stebėjimų suvestinė.

Žvaigždės numeris	RA h:m:s	DEC d:m:s	V mag	Eksp.* s	Data
Galaktikos plonojo disko žvaigždės					
HD 41330	06:06:08.5	+35:23:15	6.12	300	2012/02/12
HD 43318	06:15:34.2	-00:30:43	5.65	150	2012/02/12
HD 69897	08:20:03.8	+27:13:03	5.10	300	2012/02/29
HD 108954	12:30:50.1	+53:04:35	6.22	200	2008/07/19
HD 115383	13:16:46.5	+09:25:26	5.22	300	2008/07/22
HD 127334	14:29:36.8	+41:47:45	6.40	500	2008/07/22
HD 136064	15:14:38.3	+67:20:48	5.10	100	2008/07/19
HD 153597	16:56:01.6	+65:08:05	4.89	200	2008/07/19
HD 157466	17:22:27.7	+24:52:46	6.89	300	2012/02/29
HD 163989	17:49:27.0	+76:57:46	5.04	200	2008/07/19
HD 176377	18:58:51.0	+30:10:50	6.78	300	2012/02/29
HD 187013	19:46:25.6	+33:43:39	4.99	300	2008/07/22
HD 187691	19:51:01.6	+10:24:56	5.10	300	2008/07/20
HD 200790	21:05:26.7	+05:57:29	5.96	400	2008/07/21
HD 220117	23:20:53.2	+38:10:56	5.78	300	2008/07/20
Galaktikos storio disko žvaigždės					
HD 150433	16:41:08.2	-02:51:26	7.22	400	2012/03/01
HD 181047	19:17:53.7	+25:22:11	8.34	1200	2011/07/17
HD 186411	19:42:39.4	+37:39:32	8.07	900	2011/07/17
HD 195019	20:28:18.6	+18:46:10	6.88	500	2011/07/17
HD 198300	20:46:35.5	+59:51:09	8.57	1500	2011/07/17

\* Ekspozicijos trukmė.

# Priedas B

## Cheminių elementų gausos

Šiame priede yra pateikiamos šešios lentelės:

**Lentelėje B.1** yra pateikiamos 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos, nustatytos disertacijos darbe.

**Lentelėje B.2** yra pateikiamos sunkiųjų cheminių elementų gausos nustatytos disertacijos darbe 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždėms.

**Lentelėje B.3** yra pateikiamos 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos, nustatytos disertacijos darbe.

**Lentelėje B.4** yra pateikiamos sunkiųjų cheminių elementų gausos nustatytos disertacijos darbe 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždėms.

**Lentelėje B.5** yra pateikiamos lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos, nustatytos disertacijos darbe palyginamosioms Galaktikos plonojo ir storjo disko žvaigždėms.

**Lentelėje B.6** yra pateikiamos palyginamųjų Galaktikos plonojo ir storjo disko žvaigždžių sunkiųjų cheminių elementų gausos, nustatytos disertacijos darbe.

Pirmuosiuose išvardintų lentelių stulpeliuose yra pateikti žvaigždžių numeriai iš HD arba BD katalogų. Kituose stulpeliuose pateikiamos cheminių elementų gausos  $[El/Fe]$ , vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai  $\sigma_{[El/Fe]}$  bei linijų skaičius  $n_{[El/Fe]}$ .

Taip pat pirmuosiuose lentelės B.2 stulpeliuose simbolis <sup>(a)</sup> žymi žvaigždę, kuri yra praturtinta elementais, daugiausia gaminamais s-proceso metu.

**B.1 lentelė:** 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos.

HD/BD	[O/Fe]	[Na/Fe]	$\sigma$	n	[Mg/Fe]	$\sigma$	n	[Al/Fe]	$\sigma$	n
3795	0.56	0.11	0.02	4	0.36	0.05	4	0.38	0.03	3
4607	0.21	0.00	0.02	2	0.26	0.00	3	0.03	...	1
15777	0.42	0.04	0.01	5	0.27	0.06	3	0.20	0.05	2
22872	...	-0.03	0.01	3	0.07	0.09	4	-0.05	0.04	3
25123	0.10	-0.01	0.01	5	0.01	0.02	3	0.03	0.01	2
40040	0.38	0.08	0.02	3	0.31	0.06	4	0.26	0.01	3
49409	...	0.01	0.02	3	0.15	0.05	4	0.04	0.06	2
52711	0.11	-0.05	0.01	4	0.06	0.05	4	-0.05	0.04	4
60779	0.10	0.02	0.03	4	0.04	0.03	3	0.01	0.04	2
67088	0.14	-0.07	0.04	5	0.07	0.05	4	-0.02	0.00	2
67587	0.09	0.10	0.03	4	0.11	0.03	3	0.11	0.06	3
76095	0.41	-0.04	0.01	4	0.18	0.05	4	0.18	0.01	2
77408	...	-0.04	0.05	3	0.21	0.11	3	0.04	0.04	3
78558	0.49	0.12	0.06	5	0.33	0.07	4	0.27	0.05	3
88371	0.34	0.01	0.05	5	0.29	0.06	4	0.25	0.03	3
88446	...	0.03	0.04	3	0.16	0.04	3	0.06	0.04	3
90508	0.31	-0.02	0.06	5	0.16	0.01	4	0.16	0.04	3
109498	0.09	0.01	0.06	4	0.09	0.02	3	0.06	0.03	3
111367	...	-0.03	0.01	4	0.04	0.05	3	0.07	0.05	4
135694	...	0.07	0.01	3	0.19	0.09	2	0.19	0.02	3
138750	...	-0.02	0.00	3	0.24	0.05	3	-0.03	0.03	2
140209	...	0.01	0.05	5	0.23	0.08	4	0.10	...	1
149105	0.18	-0.03	0.04	3	-0.03	0.01	3	-0.01	0.03	2
149890	0.17	0.00	0.04	3	0.07	0.07	3	0.00	0.04	3
156617	0.08	-0.09	0.05	5	0.07	0.07	4	0.06	0.04	4
156893	0.22	0.02	0.05	4	0.23	0.07	4	0.29	0.04	3
157214	0.42	0.07	0.04	3	0.32	0.03	4	0.31	0.05	2
+40 3374	...	0.05	0.05	3	0.27	0.02	3	0.38	0.03	3
171009	...	-0.01	0.04	3	0.19	0.04	3	0.12	...	1
171242	0.22	0.05	0.01	3	0.21	0.04	3	0.01	0.04	2
178478	0.40	0.11	0.02	3	0.35	0.04	4	0.33	0.04	3
188326	0.21	0.05	0.06	3	0.22	0.05	4	0.22	0.00	2
206373	0.15	0.06	0.03	3	0.09	0.08	4	0.02	0.03	4
210483	...	-0.04	0.05	5	0.06	0.10	4	0.07	0.03	3
211476	...	-0.03	0.02	3	0.01	0.03	4	0.05	0.01	2
217511	0.30	0.06	0.03	2	...	...	...	0.00	0.04	2
219175	...	-0.04	0.04	5	0.05	0.04	4	-0.06	...	1



**B.1 lentelė:** 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Si/Fe]	$\sigma$	n	[Ca/Fe]	$\sigma$	n	[Sc/Fe]	$\sigma$	n
3795	0.20	0.05	16	0.25	0.05	7	0.16	0.04	10
4607	0.06	0.06	8	0.11	0.06	6	0.02	0.06	6
15777	0.18	0.05	20	0.15	0.04	9	0.22	0.06	12
22872	0.03	0.05	19	-0.01	0.06	9	0.02	0.05	12
25123	0.00	0.04	20	0.00	0.05	11	0.04	0.04	10
40040	0.16	0.05	19	0.21	0.06	11	0.21	0.05	12
49409	0.05	0.04	15	0.13	0.04	10	0.10	0.05	10
52711	0.04	0.05	20	0.06	0.05	11	-0.01	0.05	12
60779	0.04	0.05	19	0.07	0.05	8	0.01	0.05	11
67088	0.01	0.05	21	0.05	0.04	10	0.00	0.05	12
67587	0.09	0.05	16	0.14	0.05	9	0.05	0.05	8
76095	0.08	0.05	21	0.09	0.05	10	0.07	0.04	10
77408	0.01	0.06	14	0.05	0.04	7	0.08	0.05	9
78558	0.22	0.05	18	0.22	0.05	9	0.14	0.05	12
88371	0.16	0.05	20	0.22	0.06	11	0.22	0.05	9
88446	0.09	0.05	20	0.12	0.05	9	0.06	0.05	12
90508	0.10	0.05	21	0.14	0.04	11	0.05	0.04	11
109498	0.03	0.06	14	0.01	0.06	7	0.02	0.02	8
111367	0.03	0.04	20	0.04	0.04	10	0.04	0.04	11
135694	0.07	0.06	11	0.12	0.06	7	0.03	0.04	8
138750	0.03	0.05	20	0.12	0.05	9	0.04	0.04	11
140209	0.08	0.05	19	0.09	0.06	7	0.07	0.05	9
149105	-0.03	0.04	15	0.04	0.07	5	0.01	0.04	8
149890	0.01	0.05	18	0.01	0.04	7	-0.05	0.04	7
156617	-0.01	0.04	18	0.03	0.05	11	-0.02	0.04	10
156893	0.14	0.04	20	0.16	0.05	11	0.18	0.05	11
157214	0.22	0.04	16	0.22	0.06	8	0.15	0.04	9
+40 3374	0.20	0.05	18	0.23	0.04	8	0.24	0.04	8
171009	0.12	0.04	15	0.15	0.06	7	0.13	0.04	7
171242	0.10	0.05	11	0.14	0.04	7	0.02	0.05	7
178478	0.20	0.05	14	0.25	0.05	7	0.06	0.06	7
188326	0.13	0.03	15	0.12	0.05	7	0.07	0.05	6
206373	0.04	0.05	15	0.05	0.02	6	0.04	0.04	8
210483	0.00	0.05	17	0.05	0.06	7	0.02	0.04	8
211476	-0.01	0.04	16	0.02	0.03	6	-0.03	0.04	8
217511	0.03	0.05	17	0.06	0.05	9	0.10	0.05	7
219175	-0.01	0.06	15	0.01	0.05	7	-0.02	0.03	9

**B.1 lentelė:** 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[TiI/Fe]	$\sigma$	n	[TiII/Fe]	$\sigma$	n	[V/Fe]	$\sigma$	n
3795	0.28	0.05	15	0.20	0.06	4	0.15	0.05	11
4607	0.10	0.05	8	0.06	0.02	3	0.03	0.03	5
15777	0.18	0.07	13	0.22	0.03	4	0.12	0.05	8
22872	-0.02	0.05	14	-0.03	0.06	4	0.02	0.05	13
25123	0.02	0.05	18	0.02	0.04	4	0.00	0.04	10
40040	0.30	0.06	17	0.26	0.04	4	0.14	0.06	12
49409	0.16	0.05	12	0.08	0.02	4	0.14	0.05	10
52711	0.02	0.05	18	0.03	0.06	4	-0.02	0.05	12
60779	0.07	0.05	15	0.03	0.05	4	0.06	0.06	9
67088	-0.04	0.05	16	-0.05	0.06	4	-0.06	0.06	14
67587	0.10	0.05	13	0.06	0.02	4	0.13	0.05	6
76095	0.08	0.05	18	0.12	0.04	3	0.06	0.05	12
77408	0.11	0.05	8	0.10	0.07	3	0.07	0.05	5
78558	0.29	0.05	16	0.20	0.05	4	0.07	0.05	12
88371	0.27	0.05	24	0.27	0.02	4	0.13	0.04	14
88446	0.14	0.06	10	0.04	0.02	4	0.02	0.03	5
90508	0.13	0.05	18	0.07	0.04	4	0.06	0.05	13
109498	0.02	0.06	7	0.01	0.03	4	0.00	0.04	6
111367	0.05	0.05	14	-0.01	0.04	4	0.01	0.06	7
135694	0.07	0.06	6	0.05	0.00	2	-0.03	0.05	9
138750	0.12	0.05	10	0.08	0.08	4	0.04	0.05	5
140209	0.08	0.04	12	0.04	0.03	3	0.04	0.05	9
149105	-0.01	0.05	7	-0.06	0.03	2	-0.08	0.01	3
149890	-0.02	0.05	6	-0.01	0.02	3	-0.02	0.04	5
156617	0.03	0.05	15	-0.04	0.05	4	-0.05	0.04	12
156893	0.19	0.05	25	0.17	0.05	4	0.08	0.05	14
157214	0.26	0.04	12	0.10	0.01	2	0.13	0.03	5
+40 3374	0.38	0.07	22	0.30	0.04	3	0.24	0.04	7
171009	0.19	0.03	8	0.11	0.04	3	0.07	0.04	4
171242	0.11	0.04	10	0.03	0.05	4	0.03	0.04	8
178478	0.31	0.06	8	0.21	0.01	3	0.16	0.05	8
188326	0.20	0.05	13	0.27	0.03	4	0.14	0.06	9
206373	0.05	0.03	7	0.03	0.05	4	0.01	0.05	5
210483	0.04	0.05	18	0.01	0.04	4	-0.06	0.02	7
211476	0.01	0.03	9	0.00	0.04	4	-0.03	0.04	6
217511	0.02	0.05	6	0.06	0.01	2	...	...	...
219175	0.02	0.04	6	-0.03	0.03	3	-0.02	0.05	8

**B.1 lentelė:** 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Cr/Fe]	$\sigma$	n	[Co/Fe]	$\sigma$	n	[Ni/Fe]	$\sigma$	n
3795	0.07	0.05	13	0.15	0.03	6	0.04	0.05	23
4607	-0.01	0.06	13	-0.06	0.05	5	-0.04	0.05	15
15777	0.02	0.05	17	0.12	0.05	8	0.00	0.05	27
22872	0.00	0.05	19	-0.05	0.05	10	-0.04	0.05	30
25123	0.00	0.06	17	0.00	0.05	9	-0.02	0.06	30
40040	0.03	0.06	17	0.11	0.05	6	0.04	0.04	28
49409	0.02	0.05	14	0.03	0.03	7	-0.01	0.05	19
52711	0.01	0.05	18	-0.02	0.05	10	-0.02	0.05	29
60779	0.01	0.06	15	-0.03	0.06	9	-0.02	0.05	28
67088	0.00	0.05	19	-0.07	0.04	9	-0.05	0.05	29
67587	0.03	0.06	14	0.06	0.04	5	-0.03	0.05	23
76095	0.05	0.05	17	0.05	0.04	9	-0.02	0.05	30
77408	-0.02	0.05	11	0.03	0.04	6	-0.05	0.05	14
78558	0.04	0.06	18	0.08	0.04	8	0.02	0.05	28
88371	0.04	0.06	18	0.07	0.03	10	0.04	0.05	28
88446	0.00	0.05	14	0.04	0.02	5	-0.05	0.04	23
90508	0.01	0.05	18	0.03	0.05	10	-0.02	0.05	30
109498	0.01	0.07	15	0.01	0.03	4	-0.04	0.06	18
111367	-0.01	0.04	16	-0.02	0.05	8	-0.04	0.05	28
135694	0.02	0.04	12	0.01	0.03	6	-0.07	0.05	14
138750	0.00	0.05	14	-0.02	0.05	6	-0.06	0.05	24
140209	0.04	0.05	15	0.01	0.05	7	-0.03	0.06	26
149105	-0.01	0.09	15	-0.08	0.06	5	-0.04	0.03	24
149890	-0.02	0.07	13	-0.06	0.04	9	-0.07	0.05	21
156617	0.02	0.05	17	-0.05	0.03	9	-0.07	0.05	29
156893	0.02	0.06	16	0.05	0.04	11	0.00	0.05	27
157214	0.02	0.08	12	0.16	0.03	5	0.03	0.06	19
+40 3374	0.10	0.05	13	0.19	0.04	8	0.04	0.06	24
171009	-0.02	0.08	13	0.06	0.08	5	-0.03	0.05	16
171242	0.03	0.04	12	0.05	0.05	4	-0.09	0.05	15
178478	0.10	0.06	9	0.07	0.03	4	-0.03	0.05	18
188326	0.05	0.05	15	0.10	0.04	7	0.02	0.05	21
206373	-0.04	0.05	13	-0.03	0.04	4	-0.04	0.04	18
210483	0.01	0.07	14	-0.04	0.05	9	-0.06	0.05	26
211476	0.01	0.05	16	-0.04	0.04	7	-0.04	0.04	22
217511	0.00	0.05	8	0.04	0.01	4	-0.01	0.05	13
219175	-0.05	0.05	9	-0.04	0.03	3	-0.08	0.05	22

**B.2 lentelė:** 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių sunkiųjų cheminių elementų gausos.

HD/BD	[Y/Fe]	$\sigma$	n	[Zr I/Fe]	$\sigma$	n	[Zr II/Fe]	$\sigma$	n
3795	-0.03	0.03	6	0.17	0.07	4	0.08	0.02	2
4607	-0.02	0.02	5	0.07	0.02	3	0.07	0.01	2
15777	-0.13	0.06	4	0.13	0.00	3	0.10	0.09	2
22872	-0.12	0.01	6	-0.06	0.08	4	-0.01	0.09	2
25123	-0.07	0.05	7	0.07	0.02	2	-0.04	0.01	2
40040	-0.22	0.03	4	0.03	0.01	2	-0.05	0.05	2
49409	-0.21	0.08	2	0.19	0.05	2	0.11	...	1
52711	-0.16	0.03	7	0.08	0.05	5	0.05	0.04	2
60779	-0.06	0.06	7	0.05	0.03	3	0.01	0.04	2
67088	-0.20	0.04	7	-0.20	0.03	3	-0.15	0.04	2
67587	-0.16	0.05	4	-0.10	...	1	-0.18	...	1
76095	-0.05	0.06	5	0.00	0.05	3	0.00	0.04	2
77408	-0.08	0.01	3	...	...	...	0.17	...	1
78558	-0.13	0.05	6	0.07	0.09	2	-0.01	0.01	2
88371	0.03	0.07	4	0.06	0.03	4	0.06	0.02	2
88446 <sup>(a)</sup>	0.57	0.05	5	0.57	...	1	0.56	0.01	2
90508	-0.19	0.05	6	-0.06	0.05	4	-0.01	0.01	2
109498	-0.09	0.02	6	-0.02	0.06	3	-0.03	0.04	2
111367	-0.17	0.05	6	0.00	0.06	3	-0.02	0.03	2
135694	-0.20	0.07	3	-0.01	0.07	4	0.01	...	1
138750	0.00	0.04	7	0.16	0.03	3	0.04	0.07	2
140209	-0.13	0.03	4	0.00	0.04	3	-0.14	0.06	2
149105	-0.16	0.04	5	-0.02	...	1	-0.03	0.01	2
149890	-0.15	0.04	6	0.09	...	1	0.07	...	1
156617	-0.21	0.05	6	-0.09	0.04	2	-0.07	...	1
156893	-0.03	0.06	6	-0.02	0.04	6	0.04	0.02	2
157214	-0.13	0.07	5	0.08	0.06	4	0.05	0.03	2
+40 3374	-0.14	0.07	3	0.30	0.04	5	0.34	...	1
171009	-0.12	0.04	4	0.17	0.03	3	0.09	...	1
171242	-0.14	0.00	2	0.24	...	1	0.21	0.06	2
178478	-0.15	0.10	3	0.18	0.04	2	...	...	...
188326	-0.05	0.06	5	0.06	0.03	6	0.02	...	1
206373	-0.09	0.06	6	...	...	...	-0.14	...	1
210483	-0.17	0.05	4	0.00	0.02	2	-0.05	0.02	2
211476	-0.16	0.06	7	-0.04	0.04	5	0.00	0.06	2
217511	0.11	0.02	5	...	...	...	...	...	...
219175	-0.15	0.04	5	-0.09	...	1	-0.09	0.00	2

<sup>(a)</sup> s-proceso elementais praturtinta žvaigždė.

**B.2 lentelė:** 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių sunkiųjų cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Ba/Fe]	[La/Fe]	$\sigma$	n	[Ce/Fe]	$\sigma$	n	[Pr/Fe]	$\sigma$	n
3795	-0.06	0.20	0.05	3	0.17	0.06	2	0.44	0.14	2
4607	0.28	-0.05	0.07	2	-0.02	0.00	2	0.14	...	1
15777	-0.14	-0.01	0.01	3	0.04	0.02	3	0.14	0.05	2
22872	0.00	-0.16	0.05	3	-0.09	0.09	3	0.02	0.06	2
25123	0.06	0.00	0.04	4	-0.08	0.05	5	-0.05	0.01	2
40040	-0.13	0.02	0.06	2	-0.05	0.06	3	0.24	0.02	2
49409	0.07	-0.13	...	1	-0.04	0.06	2	0.23	...	1
52711	-0.08	-0.06	0.06	4	-0.09	0.05	4	-0.01	0.12	2
60779	0.11	-0.04	0.06	4	0.03	0.04	3	0.19	...	1
67088	0.00	-0.03	0.05	4	-0.10	0.03	4	0.06	0.03	2
67587	0.08	0.01	0.00	3	-0.06	0.05	2	...	...	...
76095	0.24	0.14	0.01	2	0.13	0.04	4	0.16	0.06	2
77408	0.21	0.07	...	1	0.06	...	1	0.21	...	1
78558	-0.13	-0.16	0.04	2	-0.02	0.05	5	0.22	0.03	2
88371	-0.18	-0.09	...	1	0.00	0.04	3	0.11	...	1
88446 <sup>(a)</sup>	1.04	0.70	0.08	4	0.65	0.03	4	0.56	0.06	2
90508	-0.05	0.02	0.04	3	-0.08	0.09	3	0.11	0.07	2
109498	-0.07	-0.01	0.07	2	0.08	0.03	4	0.17	0.04	2
111367	0.06	0.06	0.05	2	0.09	...	1	0.14	0.00	2
135694	-0.04	...	...	...	0.01	0.08	3	0.26	...	1
138750	0.19	0.04	0.05	4	0.03	0.08	3	0.12	0.07	2
140209	-0.24	-0.07	0.02	3	-0.04	0.03	5	0.08	...	1
149105	0.11	-0.07	...	2	-0.09	0.02	2	-0.10	...	1
149890	0.00	-0.02	0.01	2	-0.03	...	1	-0.02	...	1
156617	0.03	-0.07	0.08	3	-0.07	0.02	4	-0.13	0.04	2
156893	0.21	0.15	0.07	3	0.04	0.09	3	0.26	0.08	2
157214	-0.26	-0.06	0.06	2	-0.08	0.03	3	0.13	0.01	2
+40 3374	...	0.04	...	1	0.19	0.05	3	...	...	...
171009	0.02	0.05	0.05	3	0.05	0.09	3	0.27	0	1
171242	...	0.20	0.01	2	0.20	0.07	2	...	...	...
178478	-0.24	0.11	0.05	3	-0.04	0.05	2	...	...	...
188326	0.00	0.13	0.05	3	0.09	0.05	3	0.19	0.01	2
206373	0.16	-0.07	0.05	3	-0.02	0.05	3	0.20	0.00	2
210483	-0.11	-0.03	0.06	3	-0.10	0.09	4	0.00	...	1
211476	-0.10	0.06	0.05	2	-0.10	0.06	4	0.11	...	1
217511	...	0.21	0.01	2	0.14	...	1	...	...	...
219175	0.00	0.12	0.00	2	-0.04	0.06	2	0.14	...	1

<sup>(a)</sup> *s*-proceso elementais praturtinta žvaigždė.

**B.2 lentelė:** 1-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių sunkiųjų cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Nd/Fe]	$\sigma$	n	[Sm/Fe]	$\sigma$	n	[Eu/Fe]	$\sigma$	n
3795	0.32	0.03	6	0.64	0.03	2	0.44	0.13	3
4607	0.08	0.04	4	0.03	0.04	2	0.11	0.01	2
15777	0.12	0.05	5	0.30	0.04	2	0.18	0.05	3
22872	-0.10	0.02	7	-0.07	0.06	2	-0.01	0.08	3
25123	-0.06	0.05	5	-0.04	0.00	2	-0.06	0.04	3
40040	0.09	0.05	5	0.28	0.03	2	0.21	0.05	2
49409	0.25	0.03	3	0.33	...	1	0.24	0.07	3
52711	-0.04	0.05	5	-0.08	0.04	2	-0.01	0.03	3
60779	-0.02	0.07	6	0.01	0.02	2	0.01	0.03	3
67088	-0.08	0.05	6	-0.01	0.08	2	-0.03	0.06	3
67587	0.07	0.07	3	0.02	0.06	2	...	...	...
76095	0.16	0.07	5	0.22	0.04	2	0.15	0.01	2
77408	0.20	0.02	3	0.16	0.02	2	0.22	...	1
78558	0.03	0.05	5	0.20	0.01	2	0.16	0.01	2
88371	0.08	0.03	5	0.24	...	1	0.21	0.01	3
88446 <sup>(a)</sup>	0.66	0.03	7	0.34	0.09	2	0.55	0.06	2
90508	0.06	0.04	8	0.17	0.01	2	0.18	0.03	3
109498	0.08	0.06	4	0.16	0.05	2	0.15	0.00	2
111367	-0.04	0.07	4	0.02	0.06	2	0.06	0.00	2
135694	0.00	0.05	4	0.23	0.11	2	0.21	0.08	3
138750	0.04	0.04	5	0.01	0.01	2	0.04	0.05	3
140209	0.00	0.03	5	0.09	0.04	2	0.05	0.04	3
149105	0.02	0.03	4	0.08	0.05	2	0.10	0.11	2
149890	-0.02	0.02	4	0.02	0.00	2	0.07	...	1
156617	-0.06	0.04	5	-0.02	0.05	2	-0.01	0.02	3
156893	0.20	0.02	8	0.38	0.02	2	0.34	0.01	2
157214	0.04	0.06	5	0.28	0.02	2	0.27	0.05	3
+40 3374	0.30	0.06	3	0.51	0.01	2	0.29	0.05	3
171009	0.12	0.06	6	0.29	0.03	2	0.25	0.06	2
171242	0.14	0.04	5	0.24	...	1	0.36	...	1
178478	-0.04	0.04	4	0.19	0.07	2	...	...	...
188326	0.13	0.04	7	0.21	0.04	2	0.19	0.05	3
206373	-0.03	0.05	3	-0.01	...	1	-0.02	0.03	2
210483	-0.03	0.04	6	-0.02	...	1	-0.04	...	1
211476	0.02	0.05	5	0.05	0.02	2	0.09	0.07	3
217511	0.20	...	1	0.14	0.01	2	0.16	...	1
219175	-0.03	0.06	4	0.05	0.01	2	0.04	0.00	2

<sup>(a)</sup> s-proceso elementais praturtinta žvaigždė.

**B.3 lentelė:** 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos.

HD/BD	[O/Fe]	[Na/Fe]	$\sigma$	n	[Mg/Fe]	$\sigma$	n	[Al/Fe]	$\sigma$	n
+68 813	...	0.07	0.03	3	0.31	0.05	4	0.32	0.03	2
+31 3330	0.34	-0.03	0.07	4	0.11	0.06	4	0.10	0.05	3
10519	0.51	0.09	0.03	3	0.35	0.01	4	0.32	0.04	2
12782	0.40	0.13	0.03	3	0.34	0.04	4	0.38	0.03	2
16397	0.45	0.09	0.04	3	0.24	0.03	4	0.25	0.03	2
18757	0.25	0.03	0.02	5	0.24	0.02	3	0.27	0.00	2
21543	0.45	0.05	0.02	3	0.38	0.07	4	0.29	0.01	2
24156	0.51	0.07	0.01	4	0.27	0.05	4	0.28	0.04	2
29587	...	-0.04	0.02	3	0.26	0.03	3	0.23	0.00	2
30649	0.54	0.01	0.03	4	0.29	0.05	4	0.19	0.04	2
37739	0.40	0.10	0.01	3	0.33	0.12	4	0.23	...	1
38767	...	0.12	0.04	3	0.22	0.05	3	...	...	...
96094	0.25	-0.09	0.04	3	0.08	0.03	3	0.13	...	1
114606	...	0.06	0.03	3	0.34	0.05	4	0.23	0.01	2
121533	...	0.07	0.04	5	0.33	0.05	4	0.33	0.05	3
131582	...	0.07	0.05	4	0.17	0.03	4	0.23	0.04	2
132142	0.22	0.09	0.06	4	0.31	0.02	4	0.34	0.02	2
133621	...	0.11	0.03	3	0.31	0.03	4	0.32	0.01	2
137687	0.48	0.09	0.04	2	0.47	0.10	4	0.52	0.05	2
139457	0.50	0.03	0.03	3	0.16	0.06	3	0.10	...	1
143291	...	-0.03	0.05	3	0.18	0.04	4	0.17	0.03	2
152123	...	0.06	0.04	3	0.24	0.05	4	0.25	0.05	2
156802	...	0.10	0.01	3	0.26	0.04	3	0.24	0.05	2
158226	0.42	0.06	0.03	3	0.39	0.03	4	0.36	0.03	3
165401	...	0.06	0.03	3	0.24	0.01	3	0.18	0.04	2
170357	0.30	0.02	0.01	3	0.30	0.02	4	0.25	0.01	2
190404	...	0.03	0.02	3	0.25	0.03	3	0.32	0.06	4
200580	0.21	0.12	0.03	3	0.14	0.02	4	0.22	0.03	2
201099	...	-0.04	0.04	3	0.16	0.07	4	...	...	...
215594	...	-0.03	0.02	3	0.12	0.04	4	0.14	0.02	2
221830	0.39	0.03	0.02	3	0.31	0.03	3	0.24	...	1
224817	0.25	0.06	0.02	3	0.23	0.04	3	0.21	0.01	2

**B.3 lentelė:** 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Si/Fe]	$\sigma$	n	[Ca/Fe]	$\sigma$	n	[Sc/Fe]	$\sigma$	n
+68 813	0.23	0.04	14	0.24	0.05	8	0.20	0.03	12
+31 3330	0.06	0.05	18	0.05	0.05	10	0.03	0.05	9
10519	0.24	0.05	19	0.27	0.05	6	0.22	0.05	10
12782	0.26	0.05	16	0.27	0.06	11	0.17	0.06	8
16397	0.16	0.05	15	0.17	0.05	8	0.10	0.05	11
18757	0.18	0.05	20	0.15	0.05	10	0.15	0.05	10
21543	0.20	0.05	16	0.22	0.05	9	0.15	0.04	11
24156	0.21	0.06	16	0.20	0.05	8	0.20	0.04	12
29587	0.16	0.05	16	0.18	0.05	7	0.10	0.05	10
30649	0.17	0.05	20	0.20	0.05	9	0.15	0.05	11
37739	0.27	0.06	12	0.28	0.04	5	0.20	0.06	10
38767	0.14	0.05	14	0.18	0.04	6	0.08	0.05	8
96094	0.02	0.05	12	0.05	0.05	6	0.15	0.05	9
114606	0.25	0.05	15	0.26	0.05	8	0.22	0.04	10
121533	0.20	0.05	14	0.20	0.05	7	0.11	0.04	10
131582	0.08	0.05	17	0.14	0.05	5	0.10	0.05	9
132142	0.17	0.05	15	0.26	0.05	10	0.14	0.05	11
133621	0.24	0.05	18	0.20	0.05	8	0.12	0.04	10
137687	0.31	0.05	16	0.29	0.05	11	0.23	0.05	9
139457	0.09	0.05	13	0.12	0.05	7	0.07	0.03	8
143291	0.06	0.04	16	0.13	0.05	10	0.06	0.03	11
152123	0.09	0.05	12	0.20	0.03	6	0.18	0.04	9
156802	0.18	0.05	16	0.22	0.05	7	0.13	0.04	9
158226	0.23	0.04	15	0.27	0.06	8	0.21	0.04	11
165401	0.16	0.04	18	0.14	0.05	9	0.13	0.04	10
170357	0.15	0.05	17	0.18	0.05	9	0.18	0.04	11
190404	0.21	0.05	17	0.28	0.06	9	0.22	0.05	9
200580	0.09	0.05	14	0.15	0.05	6	-0.05	0.04	9
201099	0.05	0.05	15	0.09	0.05	10	-0.01	0.04	10
215594	0.09	0.05	19	0.11	0.05	9	0.03	0.05	9
221830	0.23	0.05	17	0.26	0.05	8	0.16	0.04	5
224817	0.20	0.05	16	0.19	0.05	8	0.15	0.05	9



**B.3 lentelė:** 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[TiI/Fe]	$\sigma$	n	[TiII/Fe]	$\sigma$	n	[V/Fe]	$\sigma$	n
+68 813	0.24	0.04	10	0.21	0.03	3	0.07	0.04	6
+31 3330	0.09	0.05	23	0.06	0.03	3	0.07	0.05	11
10519	0.28	0.05	10	0.31	0.03	3	0.17	0.04	7
12782	0.29	0.05	23	0.29	0.05	3	0.11	0.05	11
16397	0.19	0.04	10	0.16	0.05	3	0.10	0.05	9
18757	0.20	0.05	22	0.15	0.05	3	0.06	0.05	14
21543	0.27	0.05	14	0.23	0.05	3	0.10	0.05	11
24156	0.21	0.05	19	0.25	0.03	3	0.09	0.05	13
29587	0.24	0.05	14	0.18	0.05	3	0.14	0.05	13
30649	0.21	0.05	10	0.22	0.03	3	0.02	0.05	10
37739	0.32	0.05	6	0.33	0.02	2	...	...	...
38767	0.25	0.05	5	0.19	0.01	2	...	...	...
96094	0.09	0.05	9	0.14	0.04	3	0.12	0.04	4
114606	0.30	0.05	14	0.23	0.06	3	0.14	0.03	6
121533	0.22	0.04	10	0.17	0.03	3	0.01	0.05	11
131582	0.18	0.05	21	0.07	0.03	3	0.18	0.05	3
132142	0.30	0.05	23	0.25	0.05	3	0.18	0.04	8
133621	0.23	0.04	9	0.19	0.05	3	0.12	0.05	7
137687	0.33	0.05	15	0.30	0.05	3	0.17	0.03	9
139457	0.14	0.05	6	0.16	0.05	3	0.05	0.06	3
143291	0.16	0.05	23	0.10	0.02	3	0.09	0.05	13
152123	0.21	0.05	11	0.14	0.03	2	...	...	...
156802	0.22	0.05	10	0.13	0.05	3	0.10	0.05	7
158226	0.28	0.05	11	0.24	0.06	3	0.16	0.05	7
165401	0.18	0.03	11	0.18	0.05	3	0.05	0.05	8
170357	0.22	0.05	12	0.20	0.02	3	0.08	0.05	10
190404	0.31	0.05	23	0.24	0.05	3	0.19	0.05	9
200580	0.15	0.05	8	0.06	0.05	3	0.15	0.05	6
201099	0.09	0.04	9	0.05	0.03	2	0.00	0.05	7
215594	0.07	0.05	11	0.10	0.02	2	0.02	0.05	8
221830	0.32	0.04	15	0.28	0.04	3	0.08	0.04	4
224817	0.18	0.04	8	0.21	0.04	3	0.04	0.05	7

**B.3 lentelė:** 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Cr/Fe]	$\sigma$	n	[Co/Fe]	$\sigma$	n	[Ni/Fe]	$\sigma$	n
+68 813	0.03	0.05	13	0.09	0.03	3	0.02	0.05	19
+31 3330	0.00	0.05	18	-0.02	0.05	8	-0.02	0.05	27
10519	0.03	0.05	13	0.13	0.04	8	0.01	0.05	23
12782	0.06	0.06	16	0.14	0.03	9	0.05	0.05	25
16397	-0.02	0.04	15	0.05	0.04	6	-0.02	0.05	23
18757	0.03	0.06	19	0.07	0.05	13	-0.01	0.05	29
21543	0.05	0.05	16	0.12	0.05	5	0.02	0.03	23
24156	0.04	0.06	15	0.10	0.05	8	0.04	0.05	24
29587	0.03	0.05	16	0.10	0.05	8	0.03	0.05	27
30649	0.02	0.05	15	0.09	0.05	6	0.01	0.05	28
37739	0.02	0.05	11	0.02	0.02	3	0.08	0.06	13
38767	0.04	0.04	9	...	...	...	-0.05	0.06	12
96094	-0.03	0.05	13	-0.01	0.03	4	-0.04	0.05	22
114606	0.05	0.06	15	0.14	0.02	4	0.05	0.05	22
121533	0.01	0.05	12	0.09	0.04	6	0.00	0.05	15
131582	0.08	0.04	14	0.06	0.05	8	0.03	0.05	21
132142	0.07	0.04	16	0.14	0.04	7	0.03	0.05	24
133621	0.05	0.05	13	0.06	0.05	6	0.02	0.05	21
137687	0.10	0.04	13	0.16	0.05	7	0.06	0.05	22
139457	0.01	0.05	12	0.03	0.04	3	-0.05	0.05	15
143291	0.06	0.06	19	0.01	0.05	8	-0.03	0.05	26
152123	-0.01	0.05	14	0.08	0.05	5	0.00	0.05	17
156802	0.01	0.06	12	0.15	0.05	5	0.02	0.05	25
158226	0.01	0.06	13	0.12	0.04	6	0.03	0.05	23
165401	-0.03	0.05	13	0.09	0.05	6	-0.01	0.03	24
170357	0.01	0.07	15	0.11	0.05	7	0.01	0.05	27
190404	0.07	0.04	12	0.10	0.05	8	0.04	0.05	25
200580	0.00	0.05	10	-0.01	0.02	3	-0.04	0.05	15
201099	0.00	0.05	17	-0.07	0.03	4	-0.03	0.05	17
215594	-0.03	0.05	14	-0.02	0.04	7	-0.08	0.05	25
221830	0.03	0.06	6	0.08	0.05	6	0.01	0.05	22
224817	0.01	0.05	11	0.07	0.04	5	-0.01	0.05	20

**B.4 lentelė:** 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių sunkiųjų cheminių elementų gausos.

HD/BD	[Y/Fe]	$\sigma$	n	[Zr I/Fe]	$\sigma$	n	[Zr II/Fe]	$\sigma$	n
+68 813	-0.14	0.08	4	...	...	...	...	...	...
+31 3330	0.05	0.01	3	0.09	0.04	7	...	...	...
10519	-0.05	0.05	6	0.22	0.03	3	0.08	0.07	2
12782	-0.01	0.05	5	0.04	0.05	7	0.05	0.08	2
16397	-0.14	0.07	6	0.12	0.07	3	0.09	...	1
18757	-0.16	0.07	4	-0.03	0.04	3	-0.13	0.02	2
21543	-0.07	0.05	4	0.04	0.06	4	...	...	...
24156	0.00	0.07	7	-0.07	0.04	2	-0.02	...	1
29587	-0.11	0.06	7	0.07	0.07	4	0.07	0.01	2
30649	-0.06	0.11	6	0.11	0.05	5	0.05	0	2
37739	-0.17	0.04	4	...	...	...	0.12	...	1
38767	0.01	0.04	4	...	...	...	0.22	...	1
96094	-0.14	0.05	5	0.16	0.00	2	0.05	...	1
114606	-0.12	0.04	5	0.28	0.05	3	0.20	...	1
121533	0.02	0.05	2	0.01	...	1	-0.04	0.08	2
131582	-0.16	0.06	2	0.06	0.10	8	0.10	...	1
132142	-0.11	0.04	2	0.03	0.07	6	...	...	...
133621	-0.20	0.04	2	-0.05	...	1	0.01	...	1
137687	0.05	0.06	5	0.14	0.08	6	0.23	0.04	2
139457	-0.01	0.03	6	...	...	...	0.02	...	1
143291	-0.16	0.05	5	0.06	0.05	6	0.06	...	1
152123	0.04	0.00	2	...	...	...	...	...	...
156802	-0.08	0.05	6	-0.09	0.01	2	-0.1	...	1
158226	-0.13	0.06	4	0.21	0.08	2	0.13	0.03	2
165401	-0.17	0.01	2	-0.02	0.03	3	-0.07	...	1
170357	-0.14	0.06	6	-0.02	0.04	3	0.00	...	1
190404	0.07	0.11	4	0.18	0.07	7	0.15	...	1
200580	-0.16	0.05	4	...	...	...	0.11	...	1
201099	-0.21	0.06	4	0.21	0.01	3	0.09	...	1
215594	-0.14	0.09	4	0.06	0.09	3	0.06	...	1
221830	0.05	0.06	5	0.06	0.12	2	0.14	0.04	2
224817	-0.16	0.06	7	0.22	0.06	2	...	...	...

**B.4 lentelė:** 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių sunkiųjų cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Ba/Fe]	[La/Fe]	$\sigma$	n	[Ce/Fe]	$\sigma$	n	[Pr/Fe]	$\sigma$	n
+68 813	-0.17	0.09	...	1	-0.04	0.00	2	0.41	...	1
+31 3330	-0.08	0.11	0.01	3	0.03	...	1	0.35	0.06	2
10519	-0.12	0.08	0.06	4	0.00	0.10	4	0.29	0.08	2
12782	...	0.13	0.06	4	-0.11	0.06	4	0.29	...	1
16397	...	-0.05	0.04	2	-0.07	0.05	2	0.21	0.03	2
18757	-0.10	-0.10	0.03	4	-0.05	0.03	3	0.17	...	1
21543	-0.17	-0.06	...	1	0.00	...	1	0.27	0.05	2
24156	-0.08	-0.08	0.02	2	0.06	0.02	2	0.25	...	1
29587	-0.12	-0.04	...	1	0.06	0.04	4	0.41	...	1
30649	-0.05	-0.01	0.04	3	0.11	0.12	5	0.38	...	1
37739	-0.02	0.08	...	1	...	...	...	...	...	...
38767	...	0.08	0.11	2	0.09	...	1	0.28	...	1
96094	-0.10	0.09	0.01	2	0.11	0.01	2	0.18	...	1
114606	-0.20	0.10	0.06	2	0.06	0.02	3	0.30	...	1
121533	-0.08	0.03	0.01	2	0.02	0.07	3	0.32	...	1
131582	-0.16	0.00	...	1	0.02	0.08	2	...	...	...
132142	0.02	...	...	...	-0.11	0.01	3	0.26	0.03	2
133621	-0.10	-0.04	0.10	2	-0.07	0.09	3	0.18	...	1
137687	-0.14	0.02	0.06	2	-0.02	0.07	3	0.28	0.06	2
139457	...	0.07	0.02	3	-0.07	...	1	0.35	...	1
143291	-0.17	0.09	0.01	2	0.00	0.04	4	0.29	...	1
152123	...	0.08	...	1	...	...	...	...	...	...
156802	-0.13	0.03	0.03	2	-0.08	0.04	3	0.32	...	1
158226	-0.21	0.06	0.02	3	-0.02	0.05	3	0.23	...	1
165401	-0.07	-0.07	...	1	-0.01	...	1	...	...	...
170357	-0.06	0.04	0.04	3	0.04	0.03	3	0.13	0.01	2
190404	...	0.02	0.04	2	0.05	0.07	2	...	...	...
200580	-0.08	-0.02	...	1	-0.08	...	1	0.11	0.03	2
201099	0.00	-0.05	...	1	-0.11	0.03	2	0.35	...	1
215594	-0.04	-0.01	...	1	-0.08	0.08	3	...	...	...
221830	-0.10	0.12	0.06	2	-0.03	0.02	3	0.23	0.07	2
224817	-0.10	-0.08	0.07	3	0.00	0.02	3	0.14	0.08	2

**B.4 lentelė:** 2-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių sunkiųjų cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Nd/Fe]	$\sigma$	n	[Sm/Fe]	$\sigma$	n	[Eu/Fe]	$\sigma$	n
+68 813	0.22	0.10	4	0.48	0.04	2	0.54	0.14	2
+31 3330	0.18	0.09	3	0.34	0.07	2	0.39	0.16	2
10519	0.02	0.02	5	0.22	0.04	3	0.24	0.01	2
12782	0.24	0.05	7	0.34	0.06	2	0.43	0.04	2
16397	0.02	0.06	5	0.18	0.04	3	0.25	0.12	2
18757	0.01	0.07	7	0.09	0.08	3	0.15	0.01	2
21543	0.05	0.05	4	0.31	0.06	3	0.34	0.08	2
24156	0.11	0.03	6	0.21	0.02	3	0.34	0.12	2
29587	0.16	0.02	4	0.30	0.00	3	0.39	0.09	2
30649	0.09	0.01	6	0.34	0.04	3	0.37	0.12	2
37739	-0.02	...	1	0.10	...	1	0.11	...	1
38767	0.10	0.01	4	0.25	...	1	0.17	...	1
96094	0.07	0.04	3	0.18	0.07	2	0.22	0.04	2
114606	0.13	0.01	4	0.39	0.04	2	0.32	...	1
121533	0.09	0.07	5	0.32	0.00	1	0.29	0.11	2
131582	0.14	0.01	2	0.33	0.05	2	0.26	0.01	2
132142	0.02	0.05	4	0.19	0.05	3	0.26	0.04	2
133621	-0.07	0.03	5	0.15	0.07	3	0.12	0.00	2
137687	0.19	0.05	6	0.36	...	1	0.34	0.04	2
139457	0.15	0.03	3	0.17	0.06	3	0.23	0.19	2
143291	0.07	0.05	4	0.19	0.08	3	0.25	0.11	2
152123	0.04	0.01	2	0.32	...	1	0.21	...	1
156802	0.16	0.06	4	0.32	...	1	0.27	0.05	2
158226	0.10	0.05	4	0.36	0.06	3	0.31	0.06	2
165401	0.07	0.07	5	0.26	0.03	2	0.27	0.02	2
170357	-0.01	0.06	5	0.23	0.06	3	0.23	0.00	2
190404	0.20	0.03	4	0.34	0.10	3	0.41	0.04	2
200580	0.03	0.03	4	0.12	0.08	2	0.02	...	1
201099	0.00	0.04	3	0.12	...	1	0.18	0.20	2
215594	-0.05	0.07	5	0.06	0.07	3	0.13	0.18	2
221830	0.13	0.05	3	0.29	0.04	2	0.46	0.01	2
224817	0.01	0.08	5	0.16	0.07	2	0.20	0.04	2

**B.5 lentelė:** Palyginamųjų žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių cheminių elementų gausos.

HD/BD	[O/Fe]	[Na/Fe]	$\sigma$	n	[Mg/Fe]	$\sigma$	n	[Al/Fe]	$\sigma$	n
Galaktikos plonojo disko žvaigždės										
41330	0.19	-0.06	0.03	3	0.09	0.05	4	0.11	0.05	2
43318	0.00	-0.02	0.05	3	0.07	0.33	4	-0.06	0.02	3
69897	-0.01	-0.01	0.02	3	0.19	0.09	4	-0.04	0.04	2
108954	-0.01	0.01	0.02	3	0.11	0.02	4	0.02	0.04	3
115383	0.02	0.00	0.01	4	0.08	0.07	3	...	...	...
127334	-0.15	0.01	0.06	5	0.08	0.11	4	0.07	0.03	2
136064	...	0.02	0.03	3	0.16	0.14	2	-0.04	0.03	2
153597	0.15	0.02	0.02	2	0.19	0.33	4	...	...	...
157466	0.24	-0.07	0.04	3	-0.02	0.03	3	...	...	...
163989	0.16	0.04	0.07	3	0.24	0.14	3	0.04	0.07	4
176377	...	-0.06	0.01	3	0.02	0.01	4	0.05	0.02	3
187013	...	0.01	0.04	3	0.27	0.01	2	-0.04	0.02	2
187691	0.02	0.01	0.02	5	0.22	0.09	3	0.00	0.06	3
200790	...	0.05	0.05	3	0.32	0.09	2	0.01	0.01	2
220117	...	...	...	...	...	...	...	0.01	...	1
Galaktikos storio disko žvaigždės										
150433	...	0.07	0.01	3	0.31	0.04	4	0.10	...	1
181047	...	-0.02	0.02	5	0.06	0.05	3	0.05	0.02	2
186411	0.00	0.00	0.01	5	0.16	0.05	3	0.05	0.02	3
195019	0.10	-0.10	0.01	5	0.07	0.08	4	-0.02	0.03	3
198300	...	-0.03	0.03	3	0.11	0.05	4	0.18	0.05	4

**B.5 lentelė:** Palyginamųjų žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Si/Fe]	$\sigma$	n	[Ca/Fe]	$\sigma$	n	[Sc/Fe]	$\sigma$	n
Galaktikos plonojo disko žvaigždės									
41330	0.03	0.04	20	0.06	0.05	10	0.05	0.05	11
43318	0.05	0.05	5	0.07	0.05	8	0.01	0.04	10
69897	0.08	0.04	16	0.11	0.04	8	-0.04	0.05	9
108954	0.02	0.05	15	0.02	0.05	8	0.00	0.05	6
115383	0.06	0.05	13	0.08	0.04	8	0.00	0.06	9
127334	0.03	0.05	20	0.00	0.05	11	-0.02	0.05	10
136064	0.00	0.05	15	0.09	0.05	6	0.10	0.04	8
153597	0.08	0.05	10	0.08	0.04	5	-0.03	0.05	7
157466	-0.02	0.04	15	0.06	0.05	7	0.04	0.05	9
163989	0.06	0.05	15	0.04	0.03	4	0.06	0.05	9
176377	0.01	0.05	16	0.06	0.05	8	-0.04	0.04	10
187013	0.06	0.06	11	0.09	0.04	4	0.01	0.06	7
187691	0.03	0.05	18	0.05	0.02	8	0.01	0.05	12
200790	0.04	0.05	16	0.01	0.04	7	0.05	0.05	9
220117	0.00	0.05	9	0.10	0.05	5	0.06	0.04	4
Galaktikos storio disko žvaigždės									
150433	0.17	0.05	18	0.22	0.05	9	0.19	0.05	9
181047	0.03	0.04	20	0.05	0.05	11	-0.02	0.05	11
186411	0.00	0.05	20	0.11	0.04	8	0.02	0.04	9
195019	-0.01	0.04	20	0.02	0.05	10	-0.04	0.05	11
198300	0.03	0.03	19	0.03	0.05	9	-0.01	0.05	11

**B.5 lentelė:** Palyginamųjų žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[TiI/Fe]	$\sigma$	n	[TiII/Fe]	$\sigma$	n	[V/Fe]	$\sigma$	n
Galaktikos plonojo disko žvaigždės									
41330	0.04	0.05	14	0.03	0.00	2	-0.02	0.04	9
43318	0.02	0.05	8	0.01	0.00	3	0.00	0.04	3
69897	0.09	0.05	8	0.08	0.01	2	-0.06	0.03	2
108954	0.04	0.05	9	0.02	...	1	...	...	...
115383	0.07	0.04	8	0.07	0.03	3	0.00	0.06	7
127334	-0.03	0.05	16	-0.07	0.04	4	-0.03	0.05	13
136064	-0.02	0.05	10	0.05	0.03	3	0.01	0.05	8
153597	0.06	0.06	5	0.06	...	1	0.09	0.01	3
157466	-0.03	0.04	7	-0.04	0.01	2	0.04	0.04	5
163989	0.10	0.06	8	0.08	0.03	4	0.02	0.08	4
176377	0.01	0.04	16	0.00	0.01	3	-0.05	0.05	8
187013	0.09	0.06	5	0.09	0.01	2	...	...	...
187691	0.03	0.05	12	0.02	0.03	4	-0.04	0.05	7
200790	0.00	0.04	7	-0.04	0.03	4	-0.04	0.05	5
220117	0.12	0.05	6	...	...	...	...	...	...
Galaktikos storio disko žvaigždės									
150433	0.28	0.05	18	0.26	0.03	2	0.17	0.05	8
181047	-0.01	0.05	23	-0.05	0.05	4	-0.02	0.05	14
186411	0.03	0.05	18	0.02	0.03	4	-0.01	0.06	12
195019	-0.02	0.05	25	-0.05	0.05	4	-0.05	0.05	12
198300	0.1	0.06	11	0.03	0.05	4	0.01	0.04	7



**B.5 lentelė:** Palyginamųjų žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Cr/Fe]	$\sigma$	n	[Co/Fe]	$\sigma$	n	[Ni/Fe]	$\sigma$	n
Galaktikos plonojo disko žvaigždės									
41330	-0.01	0.06	18	-0.01	0.05	9	-0.04	0.05	28
43318	0.00	0.05	11	-0.04	0.01	4	-0.05	0.04	14
69897	0.01	0.05	13	-0.05	0.05	3	-0.06	0.05	21
108954	0.04	0.05	15	-0.01	0.04	4	-0.03	0.05	17
115383	0.02	0.06	16	0.02	0.05	5	-0.01	0.04	20
127334	0.03	0.05	15	0.02	0.04	8	0.02	0.05	26
136064	0.03	0.05	12	-0.04	0.03	6	-0.04	0.05	16
153597	0.06	0.05	10	0.08	0.04	8	-0.06	0.05	11
157466	-0.02	0.05	14	-0.04	0.04	3	-0.04	0.05	21
163989	-0.03	0.05	11	-0.03	0.05	6	-0.07	0.05	23
176377	0.03	0.05	15	-0.04	0.04	7	-0.04	0.05	27
187013	0.02	0.06	9	...	...	...	-0.04	0.05	13
187691	0.00	0.04	17	-0.07	0.06	6	-0.03	0.05	28
200790	0.01	0.04	15	-0.04	0.05	6	-0.03	0.04	23
220117	0.00	0.06	7	...	...	...	-0.04	0.04	9
Galaktikos storio disko žvaigždės									
150433	0.07	0.05	16	0.07	0.05	7	0.04	0.05	25
181047	0.05	0.06	18	-0.02	0.06	11	-0.01	0.05	26
186411	0.01	0.06	17	-0.04	0.05	7	-0.07	0.05	27
195019	0.01	0.05	19	-0.05	0.05	8	-0.06	0.05	30
198300	-0.04	0.06	16	0.04	0.02	6	-0.06	0.05	26

**B.6 lentelė:** Palyginamųjų žvaigždžių sunkiųjų cheminių elementų gausos.

HD/BD	[Y/Fe]	$\sigma$	n	[Zr I/Fe]	$\sigma$	n	[Zr II/Fe]	$\sigma$	n
Galaktikos plonojo disko žvaigždės									
41330	-0.11	0.07	5	-0.01	0.05	2	-0.09	0.03	2
43318	0.03	0.07	4	...	...	...	0.07	0.00	2
69897	-0.06	0.04	6	0.10	0.01	2	0.12	0.00	2
108954	-0.03	0.04	2	0.05	...	1	-0.07	...	1
115383	-0.17	0.06	5	0.00	...	1	-0.03	0.05	2
127334	-0.20	0.05	6	-0.15	0.05	7	-0.15	0.03	2
136064	0.05	0.00	2	...	...	...	0.19	0.04	2
153597	-0.01	0.04	3	...	...	...	...	...	...
157466	-0.10	0.08	4	0.17	0.05	3	0.15	0.04	2
163989	0.01	0.05	5	...	...	...	0.03	0.01	2
176377	-0.06	0.04	6	0.11	0.06	5	0.07	0.00	2
187013	-0.15	0.03	5	-0.12	...	1	-0.12	...	1
187691	-0.13	0.07	6	-0.10	...	1	-0.09	0.01	2
200790	-0.18	0.04	5	-0.12	...	1	-0.11	0.07	2
220117	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Galaktikos storio disko žvaigždės									
150433	-0.06	0.04	5	0.12	0.06	4	0.12	...	1
181047	0.00	0.06	7	-0.08	0.05	4	-0.05	0.01	2
186411	-0.05	0.05	6	-0.03	0.04	3	-0.03	0.04	2
195019	-0.17	0.06	7	-0.20	0.04	4	-0.17	0.04	2
198300	-0.14	0.06	5	-0.02	0.09	2	...	...	...

**B.6 lentelė:** Palyginamųjų žvaigždžių sunkiųjų cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Ba/Fe]	[La/Fe]	$\sigma$	n	[Ce/Fe]	$\sigma$	n	[Pr/Fe]	$\sigma$	n
Galaktikos plonojo disko žvaigždės										
41330	0.01	-0.09	0.05	3	0.02	0.04	2	0.12	0.06	2
43318	...	0.10	0.09	3	-0.06	0.06	3	0.16	...	1
69897	0.04	0.02	0.05	2	0.04	0.03	3	0.20	...	1
108954	-0.09	0.07	0.08	3	0.03	0.06	2	0.03	...	1
115383	-0.05	-0.09	...	1	-0.19	0.01	2	0.03	...	1
127334	...	-0.17	0.06	3	-0.20	0.03	4	-0.14	...	1
136064	0.05	0.08	...	1	...	...	...	0.10	...	1
153597	0.07	...	...	...	...	...	...	0.22	...	1
157466	-0.04	0.06	0.01	2	0.02	0.04	2	0.30	...	1
163989	0.03	0.08	0.09	3	0.08	0.03	3	0.03	...	1
176377	0.04	0.10	0.04	2	0.14	...	1	0.19	...	1
187013	0.00	0.07	0.04	2	-0.04	...	1	-0.05	0.01	2
187691	-0.14	-0.05	0.02	3	-0.16	0.05	3	-0.10	...	2
200790	-0.17	-0.07	0.05	4	-0.09	0.08	4	-0.19	0.03	2
220117	-0.17	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Galaktikos storio disko žvaigždės										
150433	-0.16	0.00	0.04	2	-0.08	...	1	0.37	...	1
181047	-0.01	-0.06	0.02	3	-0.02	0.05	3	0.07	...	1
186411	0.04	0.03	0.06	4	-0.11	0.05	4	-0.06	0.13	2
195019	-0.01	-0.09	0.06	4	-0.10	0.02	4	-0.01	0.06	2
198300	0.05	-0.01	0.07	3	-0.03	0.07	4	0.28	0.06	2

**B.6 lentelė:** Palyginamųjų žvaigždžių sunkiųjų cheminių elementų gausos – tūsinys.

HD/BD	[Nd/Fe]	$\sigma$	n	[Sm/Fe]	$\sigma$	n	[Eu/Fe]	$\sigma$	n
Galaktikos plonojo disko žvaigždės									
41330	0.04	0.02	5	0.07	...	1	0.04	0.06	2
43318	-0.03	0.05	3	0.10	...	1	0.07	0.00	2
69897	0.04	0.09	5	0.13	0.04	2	0.14	0.08	2
108954	-0.02	0.03	3	0.15	...	1	...	...	...
115383	-0.13	0.03	4	-0.09	0.01	2	-0.15	0.03	3
127334	-0.17	0.05	6	-0.19	0.06	2	-0.21	0.04	2
136064	0.05	0.07	4	0.09	0.06	2	...	...	...
153597	0.04	0.00	2	...	...	...	0.05	...	1
157466	0.02	0.00	2	...	...	...	0.11	...	1
163989	0.04	0.03	3	-0.01	0.04	2	0.06	0.05	2
176377	0.07	0.06	6	0.14	0.06	2	0.04	0.03	2
187013	-0.17	0.03	2	-0.11	0.03	2	-0.08	0.08	2
187691	-0.22	0.04	4	-0.07	0.00	2	-0.05	...	1
200790	-0.16	0.05	5	-0.15	0.00	2	-0.09	0.02	2
220117	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Galaktikos storio disko žvaigždės									
150433	0.12	0.03	4	0.25	0.03	2	0.34	...	1
181047	-0.02	0.04	6	0.01	0.08	2	0.07	0.06	2
186411	-0.05	0.04	6	-0.03	0.01	2	-0.06	0.02	2
195019	-0.06	0.04	8	-0.03	0.08	2	-0.01	0.08	3
198300	0.07	0.02	3	0.12	0.00	2	0.25	0.01	2

## Padėka

Pirmiausia noriu padėkoti savo darbo vadovei habil. dr. Gražinai Tautvaišienei už parodytą pasitikėjimą ir suteiktą galimybę dirbti mokslinį darbą, už puikų vadovavimą ir perduotas vertingas žinias.

Bendraautorei iš Kopenhagos universiteto Nilso Boro instituto profesorei Birgittai Nordström esu dėkinga už bendradarbiavimą, pastabas ir pasiūlymus rengiant mokslines publikacijas.

Romualdai Lazauskaitei noriu padėkoti už pagalbą žengiant pirmuosius žingsnius Astronomijos pasaulio link.

Dėkoju Editai Stonkutei už idėjas, pastabas ir patarimus vykdant mokslinius tyrimus, ir apskritai už tai kad turiu nuostabią kolegę ir draugę viename.

Gintarui Barisevičiui dėkoju už sukurtą darbinį įrankį, be kurio mokslinis tyrimas nebūtų praėjęs taip sklandžiai.

Dėkoju Šarūnui, Mariui, Arnui, Mindaugui, Kristupui ir Romui už suteiktą pagalbą, supratimą, moralinį palaikymą, šiltą bei linksmą atmosferą darbo metu. Taip pat esu dėkinga visiems Teorinės Fizikos ir Astronomijos instituto kolegoms, džiaugiuosi turėdama galimybę dirbti kartu.

Ačiū tėveliams už skatinimą žengti tolyn ir palaikymą.

Ypatingai dėkinga esu savo vyrui Algirdui už jo supratingumą, kantrybę ir palaikymą pasirinktame kelyje per visus ilgus studijų metus.

Dr. Stanislavai Bartašiūtei ir dr. Algirdui Kazlauskui dėkoju už disertacijos recenzavimą, atidų jos perskaitymą ir vertingų patarimų bei kritinių pastabų pateikimą.

Darbe buvo naudojami duomenys iš SIMBAD, VALD ir NASA ADS duomenų bazių. Dalis šiame darbe tirtų spektrų buvo gauti Erasmus praktikos Šiaurės Optiniame teleskope metu.

Darbą rėmė Europos komisijos finansuojamas OPTICON projektas bei Lietuvos Mokslo taryba.