

VILNIAUS UNIVERSITETAS

EDITA STONKUTĖ

CHEMINĖ KINEMATIŠKAI IDENTIFIKUOTOS GALAKTIKOS
ŽVAIGŽDŽIŲ GRUPĖS SUDĖTIS

Daktaro Disertacija
Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2013

Daktaro disertacija rengta 2008–2013 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

EDITA STONKUTĖ

CHEMICAL COMPOSITION OF KINEMATICALLY IDENTIFIED
GALACTIC STELLAR GROUP

Doctoral Dissertation
Physical Sciences, Physics (02 P)

Vilnius, 2013

Doctoral Dissertation was completed during 2008–2013 at Vilnius University,
Institute of Theoretical Physics and Astronomy

Scientific supervisor:

Habil. dr. Gražina Tautvaišienė (Vilnius University, Institute of Theoretical
Physics and Astronomy, Physal sciences, Physics – 02 P)

Turinys

Vartojamų santrumpų sąrašas	7
Įvadas	9
Darbo tikslas	11
Pagrindinės užduotys	12
Mokslinis naujumas	12
Ginamieji teiginiai ir rezultatai	13
Autorės įnašas	14
Publikacijos disertacijos tema	14
Pranešimai tarptautinėse konferencijose	15
Disertacijos struktūra	16
1. Kinematinė žvaigždžių grupė	17
1.1. Ženevos – Kopenhagos apžvalga	17
1.2. 3-oji ŽKA kinematinė žvaigždžių grupė	21
2. Stebėjimų duomenys ir analizės metodai	26
2.1. Stebėjimų duomenys	26
2.2. Diferencialinė analizė	32
2.3. Žvaigždžių atmosferų modeliai	33
2.4. Programiniai paketai	36
2.5. Linijų profiliai ir ekvivalentiniai pločiai	38
2.6. Atominiai duomenys	41
2.7. Nukrypimai nuo lokalsios termodinaminės pusiausvyros	42
2.8. Pagrindinių atmosferos parametrų nustatymas	42
2.8.1. Efektinė temperatūra	43
2.8.2. Gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje	45
2.8.3. Mikroturbulencija	47
2.8.4. Metalingumas	48

2.9. Sintetiniai spektrai	49
2.10. Paklaidų įvertinimas	54
3. Rezultatai ir jų aptarimas	56
3.1. Žvaigždžių atmosferų parametrai ir cheminių elementų gausos .	56
3.2. Palyginimas su ankstesniais rezultatais	58
3.3. Grupės nariai	60
3.4. Lengvieji ir geležies grupės cheminiai elementai	64
3.5. Sunkieji cheminiai elementai	67
3.6. Amžiaus pasiskirstymas	71
3.7. Sąsaja su storuoju Galaktikos disku	73
4. Pagrindiniai rezultatai ir išvados	78
Literatūra	80
Priedas A. Cheminių elementų gausos	87
Padėka	95

Vartojamų santrumpų sąrašas

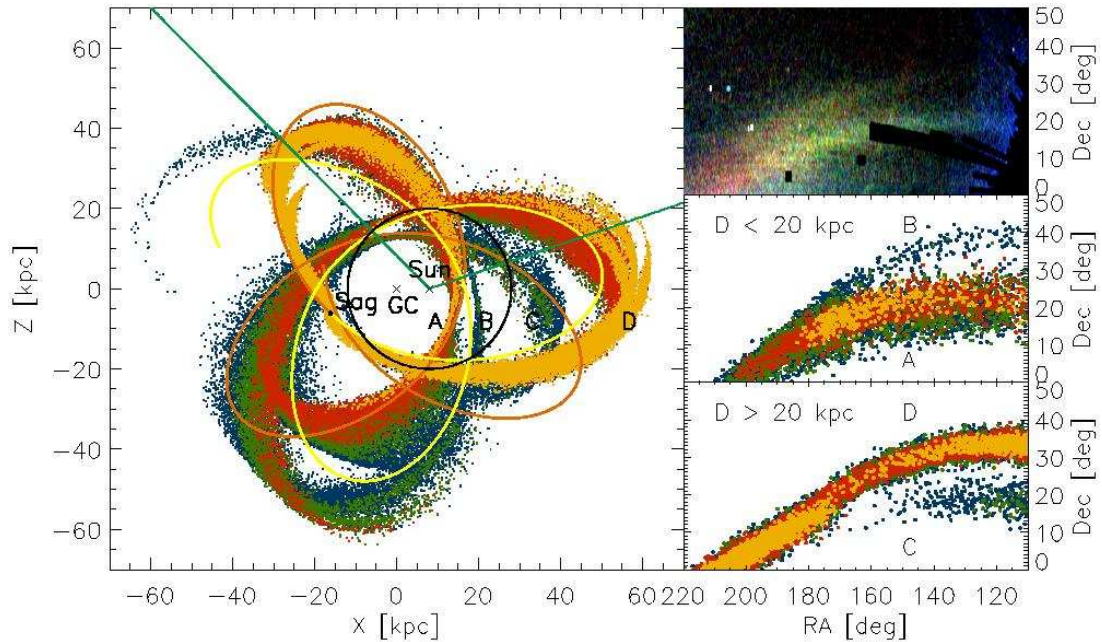
- CCD – Charge Coupled Device (krūvio sąsajos įtaisas)
- FIES – FIBre-fed Echelle Spectrograph (šviesolaidinis ešelinis spektrografas)
- GAIA – Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (globalus astrometrinis interferometras astronomijai, ESA orbitinė observatorija)
- HIPPARCOS – High Precision Parallax Collecting Satellite (didelio tikslumo trigonometrinių paralaksų orbitinė observatorija)
- IRFM – InfraRed Flux Method (infraraudonųjų spindulių srauto metodas)
- LSR – Local Standard of Rest (vietinis rimties standartas)
- LTE – Local Thermodynamical Equilibrium (lokalus termodinaminis pusiausvyra)
- MARCS – Model Atmospheres with Radiative and Convective Scheme (spindulinės ir konvekcinės struktūros žvaigždžių atmosferų modeliai)
- NOT – Nordic Optical Telescope (Šiaurės optinis teleskopas)
- RAVE – RAdial Velocity Experiment (radialinio žvaigždžių sukimosi eksperimentas)
- SDSS – Sloan Digital Sky Survey (Sloan skaitmeninė dangaus apžvalga)
- SEGUE – Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration (Sloan Galaktikos tyrinėjimų ir supratimo apžvalga)
- VALD – Vienna Atomic Line Data (Vienos atominių duomenų bazė)
- ZAMS – Zero Age Main Sequence (nulinio amžiaus pagrindinė seka)
- ŽKA – Geneva - Copenhagen Survey (Ženevos - Kopenhagos apžvalga)

Įvadas

Paukščių Tako galaktika yra spiralinė galaktika, panaši į kitas Visatoje esančias to paties tipo galaktikas. Tobulėjant stebėjimams ir teorinėms žinioms mes jau galime atsakyti į daugelį klausimų apie Galaktikos formavimąsi ir evoliuciją, tačiau neatsakytų klausimų dar yra nemažai. Standartinis Didžiojo sproginimo kosmologinis modelis numato hierarchinį struktūrų formavimąsi. Šis modelis teigia, kad pirmiausia susidarė mažos struktūros, kurios vėliau susijungė, sudarydamos didesnes. Potvyniniai srautai galaktikose yra tiesioginiai galaktikų susiliejamų įrodymai. Prieš priartėjant mažesnėms struktūroms prie didesnių, potvyninės jėgos efektyviai nusineša medžiagą nuo palydovo, taip sukurdamos dalelių, tamsiosios medžiagos, dujų ar žvaigždžių uodegas.

Dar ir šiandien stebime akreciją į Galaktiką. Šie stochastiniai Galaktikos palydovų kritimai į Paukščių Tako galaktiką leidžia stebėjimais patikrinti teorinius modelius. Žinoma, kad į Galaktiką dideliu greičiu skrieja ir į ją įsilieja Šaulio (Ibata ir kt. 1994; Fellhauer ir kt. 2006) ir Didžiojo Šuns (Martin ir kt. 2004) nykštukinės galaktikos. Apskaičiuota, kad Šaulio netaisyklingoji nykštukinė galaktika, kuri yra trečia pagal masę (po Didžiojo ir Mažojo Magelano Debesies), jau apie dvidešimt kartų kirto Galaktikos disko plokštumą ir jos struktūra yra suardyta (Belokurov ir kt. 2006; Niederste-Ostholt ir kt. 2010). 0.1 paveiksle matomas Šaulio netaisyklingosios nykštukinės galaktikos srautų modeliavimas, remiantis Sloan dangaus apžvalgos (angl. Sloan Digital Sky Survey) duomenimis (Fellhauer ir kt. 2006). Modeliuojamas Šaulio netaisyklingosios nykštukinės galaktikos irimas Galaktikos sferoide sutampa su stebėjimo duomenimis, kuruose Galaktikos potencialas yra artimas sferiniam.

Tokių akrecijos atvejų Galaktikoje stebime ir daugiau. Pasak kai kurių autorių, Vienaragio (Yanny ir kt. 2003; Ibata ir kt. 2003) bei Našlaičių srautai (Belokurov ir kt. 2009) yra kilę iš Didžiojo Šuns ir Didžiųjų Grižulo Ratų nykštukinių galaktikų (Peñarrubia ir kt. 2005; Fellhauer ir kt. 2007; Helmi 2008). Momany ir kt. (2004) teigia, kad Vienaragio srautas yra Galaktikos



0.1 pav.: Šaulio netaisyklingosios nykštukinės galaktikos srautų modeliavimas (Fellhauer ir kt. 2006). Kairėje: dalelės yra nuspalvintos atsižvelgiant į tai, kada jos buvo prarastos (geltona – prieš daugiau nei 4 mlrd. metų, raudona – tarp 4 ir 5,7 mlrd. m., žalia - 5,7 ir 7,4 mlrd. m. ir mėlyna – prieš daugiau nei 7,4 mlrd. m.). Dešinėje viršuje: SDSS duomenys, čia žvaigždės pažymėtos pagal ryškį iš Belokurov ir kt. (2006) darbo. Dešinėje per vidurį ir apačioje pavaizduotas skirtingų amžių srautų išsidėstymas.

disko išlinkimo projekcija.

Kitose galaktikose taip pat stebimos substrukūros, susijusios su nykštukinių galaktikų akrecija. Pavyzdžiui, Andromedos galaktika (M31) (Ibata ir kt. 2001; McConnachie ir kt. 2009), NGC 5907 (Martínez-Delgado ir kt. 2008) bei galaktika NGC 4013 (Martínez-Delgado ir kt. 2009) savo evoliucijoje taip pat užgrobė ir/arba sąveikauja su palydovinėmis galaktikomis.

Globali Galaktikos žvaigždžių formavimosi istorija lieka neįvertinta. Reikia detaliai ištirti ir nustatyti žvaigždžių amžių ir erdvinį pasiskirstymą, greičius bei cheminių elementų gausas. Labai svarbu suprasti mechanizmą, kaip yra „užgrobiamos“ kitos galaktikos, kokia priklausomybė nuo užgrobimo trukmės ar orbitos polinkio, masės bei tankio pasiskirstymo profilių. Šie išvardinti faktoriai suformuoja skirtingus palydovinių galaktikų įsiliejimo scenarijus bei skirtingus įkritusių liekanų pasiskirstymus Galaktikos komponentėse (Wyse 2009; van der Kruit ir Freeman 2011).

Paukščių Tako galaktikoje yra identifikuota žvaigždžių srautų, kinematinių bei judančių grupių, kurių kilmė siejama su įkritusių galaktikų liekanomis (Zuckerman ir Song 2004; Helmi 2008; Klement ir kt. 2009; Sesar ir kt. 2012). Įdomu, ar yra tokių senųjų substruktūrų pėdsakų mūsų Saulės aplinkoje? Žinoma, kad F ir G spektrinių klasių nykštukės yra svarbios Galaktikos evoliucijos tyrimams, tokių temperatūrų žvaigždės yra ilgaamžės, palyginus su kitomis spektrinių klasių žvaigždėmis ir jų mūsų Galaktikoje yra daug. O tokių spektrinių klasių žvaigždžių atmosfera atspindi šių žvaigždžių atmosferų pradinę cheminę sudėtį.

Helmi ir kt. (2006), naudodami Nordström ir kt. (2004) Ženevos – Kopenhagos apžvalgos (ŽKA) katalogą, kuriame yra pateikta daugiau nei 14 tūkstančių F ir G spektrinių klasių nykštukių kinematiniai duomenys, temperatūra bei metalingumas, identifikavo tris naujas koherentes žvaigždžių grupes, kurios pasižymi išskirtiniais kinematiniais parametrais. Helmi ir kt. teigimu, šios žvaigždės yra užgalaktinės kilmės.

Šiuo disertacijos darbu siekiama prisidėti prie Galaktikos substruktūrų tyrimų, pasinaudojant detalia aukštos skiriamosios gebos spektrų chemine analize. Darbe tiriama cheminė vienos iš atrastų kinematinių žvaigždžių grupių sudėtis.

Darbo tikslas

Pagrindinis darbo tikslas yra nustatyti detalią trečiosios ŽKA kinematinės žvaigždžių grupės cheminę sudėtį, rezultatus palyginti su Galaktikos disko žvaigždžių chemine sudėtimi bei Galaktikos evoliucijos modeliais. Išsiaiškinti, ar ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių detali atmosferų cheminė sudėtis skiriasi nuo Galaktikos disko žvaigždžių, ar identifikuotoji kinematinė grupė yra homogeniška, ar ŽKA kinematinė žvaigždžių grupė galėjo atsirasti mūsų Galaktikoje, įkritus nykštukinei galaktikai dar Paukščių Tako galaktikos evoliucijos pradžioje. Papildyti Galaktikos disko cheminės sudėties, istorijos bei evoliucijos tyrimus detalia chemine naujai identifikuotos ŽKA kinematinės žvaigždžių grupės analize, remiantis didelės skiriamosios gebos spektroskopiniais duomenimis.

Pagrindinės užduotys

- Atlikti spektrinius 3-osios ŽKA kinematinės grupės ir palyginamųjų plonojo Galaktikos disko žvaigždžių stebėjimus.
- Nustatyti pagrindinius fizikinius parametrus (efektyvą temperatūrą T_{eff} , gravitacijos pagreitį žvaigždės paviršiuje $\lg g$, metalingumą $[\text{Fe}/\text{H}]$ bei mikroturbulencijos greitį v_t) kinematiškai identifikuotai žvaigždžių grupei ir palyginamosioms Galaktikos plonojo disko žvaigždėms.
- Nustatyti detalią deguonies, α -elementų, geležies grupės bei r - ir s -procesų elementų gausas iš didelės skiriamosios gebos spektrų naujai identifikuotai kinematinei žvaigždžių grupei ir palyginamosioms Galaktikos plonojo disko žvaigždėms.
- Interpretuoti gautus rezultatus, palyginant su plonuoju Galaktikos disku bei cheminės evoliucijos modeliais Saulės aplinkoje.

Mokslinis naujumas

- Pirmą kartą ištirta detali Ženevos – Kopenhagos apžvalgoje identifikuotos kinematinės žvaigždžių grupės, esančios Galaktikos diske ir įtariamoms priklausomybei įkritusiai nykštukinei galaktikai, cheminė sudėtis.
- Disertacijos darbe atliktas detalus ŽKA kinematinės žvaigždžių grupės cheminės sudėties tyrimas atskleidė, kad pagal gausų pasiskirstymą žvaigždžių grupės cheminė sudėtis yra panaši į storą Galaktikos disko žvaigždžių cheminę sudėtį. Šis panašumas rodo, kad kinematinės žvaigždžių grupės ir storą Galaktikos disko žvaigždžių formavimasis yra galimai susijęs. Ši informacija papildys tiek storą Galaktikos disko, tiek visos Galaktikos formavimosi ir evoliucijos tyrimus.

Ginamieji teiginiai ir rezultatai

- Dvidešimt vienai 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždei ir šešioms palyginamosioms Galaktikos plonojo disko žvaigždėms iš didelės skiriamosios gebos spektrų nustatyti žvaigždžių atmosferų pagrindiniai parametrai (efektinė temperatūra, gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje, metalingumas bei mikroturbulencijos greitis) ir 22 cheminių elementų gausos.
- Kinematinės žvaigždžių grupės cheminė sudėtis yra homogeniška. Nustatytas dvidešimties žvaigždžių vidutinis metalingumas yra $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.69 \pm 0.05$.
- Deguonies ir α -elementų gausos yra padidėjusios lyginant su plonuoju Galaktikos disku ir yra panašios į Galaktikos storjo disko žvaigždžių atmosferų cheminę sudėtį.
- Cheminių elementų, daugiausia gaminamų r -procesu, gausos yra padidėjusios lyginant su plonuoju Galaktikos disku. Labiausiai padidėjusios yra europio, samario ir prazeodimio gausos.
- Cheminių elementų, daugiausia gaminamų s -procesu, ir geležies grupės elementų, gausos yra panašios į to paties metalingumo plonojo Galaktikos disko nykštukių cheminių elementų gausas.
- Žvaigždė BD +35 3657 nėra 3-osios ŽKA kinematinės grupės narė, o žvaigždė BD +73 566 yra praturtinta s -proceso elementais.
- 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių amžius yra apie 12 mlrd. metų.
- Panaši cheminė kinematinės grupės ir storjo Galaktikos disko žvaigždžių sudėtis parodo, kad kinematinės žvaigždžių grupės ir storjo Galaktikos disko žvaigždžių formavimasis yra galimai susijęs.
- Detalus 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių atmosferų cheminės sudėties tyrimas bei kinematika ir amžiaus pasiskirstymas palaiko

Paukščių Tako galaktikos evoliucijos scenarijų, kuris numato susiliejamą su praturtinta dujomis nykštukine galaktika.

Autorės įnašas

Autorė kartu su bendraautoriais paruošė stebėjimų programas, vykdė stebėjimus su Šiaurės optiniu teleskopu. Taip pat dirbo prie dalies spektrų apdorojimo darbų, pagrindinių fizikinių parametrų (atmosferos efektinės temperatūros, metalingumo, gravitacijos pagreičio žvaigždės paviršiuje, mikroturbulencijos greičio) nustatymo bei cheminės žvaigždžių atmosferų sudėties nustatymo. Darbo autorė atliko rezultatų analizę, suformulavo išvadas ir kartu su bendraautoriais parengė mokslines publikacijas.

Publikacijos disertacijos tema

1. **Stonkutė E.**, Nordström B. & Tautvaišienė G., 2010, *Investigation of ancient substructures in the Milky Way: chemical composition study*, IAU Symposium, Vol. 265, 376–377
2. **Stonkutė E.**, Tautvaišienė G., Nordström B. & Ženovienė R., 2012, *Chemical Composition of a Kinematically Identified Stellar Group in the Milky Way*, The Astrophysics and Space Science series, JENAM 2010, 223–224
3. **Stonkutė E.**, Ženovienė R., Tautvaišienė G., Nordström B., 2012, *Chemical analysis of ancient relicts in the Milky Way disk*, European Physical Journal Web of Conferences, Vol. 19, 05007 1–2
4. **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
5. Nordström B., **Stonkutė E.**, Tautvaišienė G., Ženovienė R., 2012, *Chemical tagging of kinematic stellar groups in the Milky Way Disk*,

6. **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

Pranešimai tarptautinėse konferencijose

1. **Stonkutė E.**, Nordström B., Tautvaišienė G., *Investigation of ancient substructures in the Milky Way: chemical composition study*, „Chemical Abundances in the Universe – Connecting First Stars to Planets, IAU symposium 265”, Rio de Žaneiras (Brazilija), 2009 m. rugpjūčio 3–7 d.
2. **Stonkutė E.**, Tautvaišienė G., Nordström B., Ženovienė R., *Chemical composition of a kinematically identified stellar group in the Milky Way*, „European Week of Astronomy and Space Science Science, JENAM 2010”, Lisabona (Portugalija), 2010 m. rugsėjo 6–10 d.
3. **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.
4. **Stonkutė E.**, Ženovienė R., Tautvaišienė G., Nordström B., *Chemical analysis of ancient relicts in the Milky Way disk*, „Assembling the Puzzle of the Milky Way”, Le Grand Bornand (Prancūzija), 2011 m. balandžio 17–22 d.
5. 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.

6. **Stonkutė E.**, Tautvaišienė G., Ženovienė R., Nordström B., *Satellite Remnants in the Milky Way Galaxy* „Science Innovation and Gender 2011”, Vilnius (Lietuva), 2011 m. lapkričio 24–25 d.
7. Ženovienė R., Tautvaišienė G., Nordström B., **Stonkutė E.**, *Chemical analysis of a new kinematically identified stellar group* „European Week of Astronomy and Space Science Science, EWASS 2012”, Roma (Italija), 2012 m. liepos 1–6 d.
8. **Stonkutė E.**, Tautvaišienė G., Ženovienė R., Nordström B., *Chemical imprints of past accretion events in the Galaxy*, „SpS3 Galaxy evolution through secular processes, IAU GA 2012”, Pekinas (Kinija), 2012 m. rugpjūčio 20–31 d.

Disertacijos struktūra

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

Pirmajame disertacijos skyriuje pateikiami duomenys apie identifikuotą 3–ją ŽKA kinematinę žvaigždžių grupę. Sekančiame skyriuje pristatomi atlikti stebėjimai ir duomenų analizės metodai, trečiajame – pateikiami pagrindiniai 3–osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių atmosferų parametrai, cheminių elementų gausos, analizuojama galima žvaigždžių grupės ir Galaktikos storjo disko formavimosi sąsaja.

Paskutinėje disertacijos dalyje yra apibendrinami gauti rezultatai ir jais remiantis padarytos išvados. Disertacijos pabaigoje pridedamas cituojamos literatūros sąrašas.

Lentelių, grafikų ir formulių numeriuose nurodoma informacija apie tai, kokiam skyriui jie priklauso.

Skyrius 1

Kinematinė žvaigždžių grupė

Galaktikos struktūros ir evoliucijos tyrimai bando atsakyti į daugybę klausimų. Kiek Galaktikos evoliucijos istorijoje yra svarbūs susiliejinimai? Kokia dalis žvaigždžių, esančių Saulės aplinkoje, čia ir susiformavo, o kokia dalis susiformavo medžiagos akrecijos metu? Ar praturtintų dujomis nykštukinių galaktikų įkritimai į Paukščių Tako galaktiką turėjo svarbų vaidmenį jos evoliucijoje?

Pastaruoju metu ypač didelis dėmesys nukreiptas į chemodinaminius Galaktikos tyrimus. Organizuojamos didžiulės Galaktikos struktūros ir evoliucijos tyrimų apžvalgos. Vienas iš pirmųjų ir didžiausių darbų prisidėjusių prie Galaktikos kinematinė žvaigždžių grupių tyrimų yra Ženevos – Kopenhagos apžvalga (Nordström ir kt. 2004).

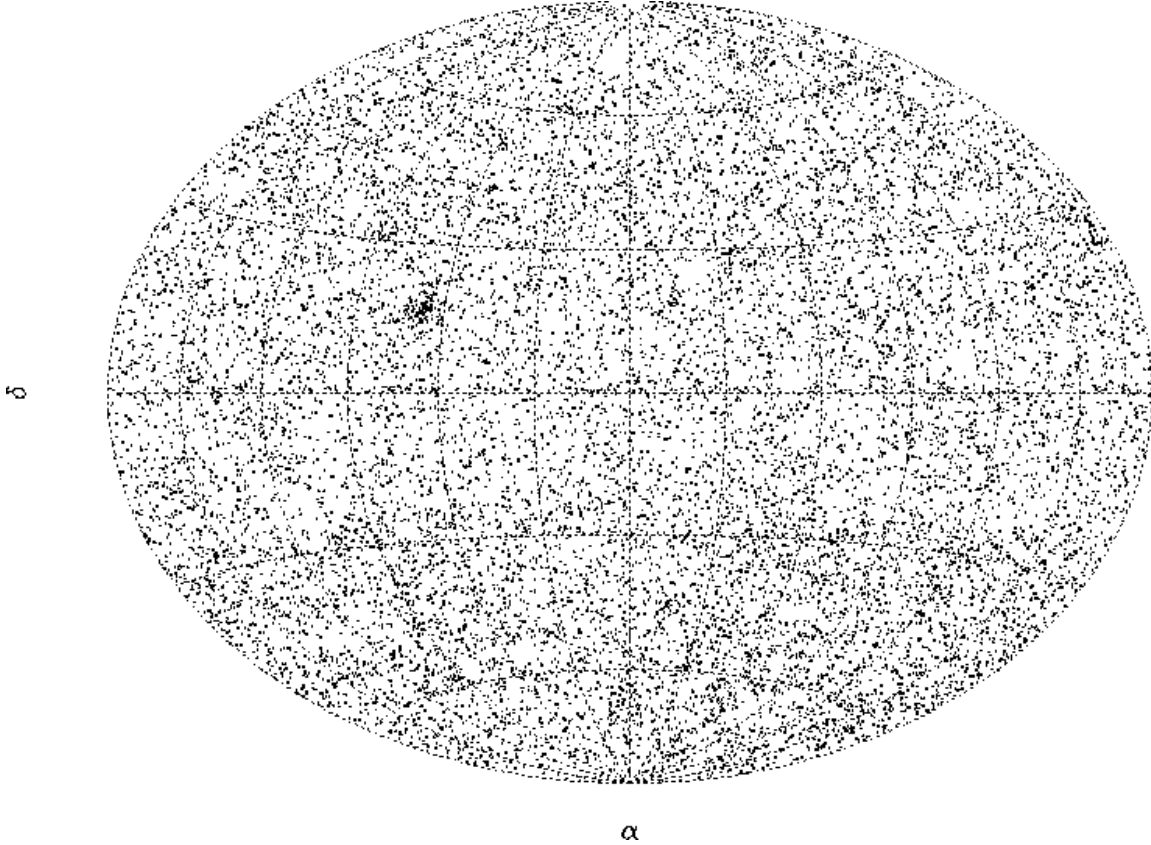
1.1. Ženevos – Kopenhagos apžvalga

Darbe tiriamą kinematinę žvaigždžių grupę identifikavo Helmi ir kt. (2006), panaudojus Ženevos – Kopenhagos apžvalgos (ŽKA) katalogą.

ŽKA kataloge yra apie 14000 F ir G spektrinių klasių žvaigždžių, surinktų iš $uvby\beta$ fotometrinių matavimų duomenis pateikiančių katalogų. Dauguma žvaigždžių buvo paimta iš Olsen (1983, 1993, 1994a, 1994b) darbų. Žvaigždžių ryškis yra intervale nuo 7.7 iki 9.9 magnitudžių. 1.1 paveiksle pateiktas ŽKA žvaigždžių pasiskirstymas danguje.

Žvaigždžių savieji judėjimai buvo paimti iš *Tycho-2* katalogo (Høg ir kt. 2000). Savųjų judėjimų tipinė vidutinė paklaida yra 1.8 '' per vienerius metus. Radialiniai žvaigždžių greičiai yra gauti iš keleto stebėjimų su tipine vidutine ar net mažesne 0.50 km s⁻¹ paklaida.

ŽKA kataloge buvo naudoti HIPPARCOS (angl. High Precision Parallax



1.1 pav.: ŽKA katalogo žvaigždžių pasiskirstymas danguje. Pavaizduotos 14139 žvaigždės, kurioms buvo nustatyti radialiniai greičiai. Paimta iš Nordström ir kt. (2004).

Collecting Satellite)¹ orbitinės observatorijos trigonometriniai paralaksai su geresne nei 10 % santykinė paklaida. Tik tuomet, kai HIPPARCOS paralaksai nebuvo žinomi, ar ne tokie tikslūs negu 10 %, buvo naudojami fotometrinių paralaksai. Pastarieji buvo nustatyti naudojant Crawford (1975) ir Olsen (1984) F ir G spektrinių klasių nykštukių atstumų kalibracijas.

Efektinė temperatūra (T_{eff}) ŽKA kataloge buvo nustatyta pagal fotometrinius $b-y$, c_1 ir m_1 indeksus ir infraraudonųjų spindulių srauto metodu paremtą kalibraciją (Alonso ir kt. 1996).

Pateiktas metalingumas $[\text{Fe}/\text{H}]$ yra nustatytas 0.10 tikslumu, naudojant Strömrgren $uvby\beta$ fotometrinę sistemą. Metalingumas nustatytas 99 % katalogo žvaigždžių, o rezultatai gerai sutampa su Edvardsson ir kt. (1993) spektrosko-

¹ESA 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.

piniais metalingumais, gautais iš didelės skiriamosios gebos spektrų.

Žvaigždžių atstumai ir tangentinis greitis buvo gauti naudojant HIPPARCOS trigonometrinius paralaksus. Absoliutiniai žvaigždžių ryškiai buvo paskaičiuoti įvertinus atstumą ir stebimąjį žvaigždžių V ryškį, o prireikus pakoreguoti įvertinus žvaigždžių parausvėjimą $E(b - y)$. Nustatyta, jeigu žvaigždė yra daugiau nei 40 pc atstume, tai $E(b - y) \geq 0.02$, priešingu atveju laikyta, kad tarpžvaigždinio parausvėjimo nėra. Absoliutiniai ryškiai toliau buvo naudojami įvertinant žvaigždžių amžių.

ŽKA kataloge erdvinių greičių komponentės (U , V , W) buvo suskaičiuotos, žinant žvaigždžių atstumus (d , [pc]), savuosius judėjimus (μ , [″ per metus]) ir radialinių greičių vidurkius (v_{rad} , [km s⁻¹]). Erdvinių greičių komponentės yra apibrėžtos dešiniarankėje Galaktikos koordinatų sistemoje, kurioje U nukreiptas į Galaktikos centrą ($l = 0^\circ$, $b = 0^\circ$), V – Galaktikos sukimosi kryptimi ($l = 90^\circ$, $b = 0^\circ$), o W nukreiptas į Šiaurinę Galaktikos polių ($b = 90^\circ$).

Galaktikos žvaigždžių orbitos nustatytos erdvinius greičius transformuojant į vietinį rimties standartą (LSR). Pagal Dehnen ir Binney (1998) darbą Saulės judėjimas Galaktikoje U , V ir W kryptimis buvo priimtas lygiu (10.0, 5.2, 7.2) km s⁻¹. Orbitų integravimui Nordström ir kt. naudojo Flynn ir kt. (1996) darbe pristatytą Galaktikos potencialą su Saulės galaktocentrinio atstumu, lygiu 8 kpc. Pagrindiniai šio modelio parametrai yra tokie: sukimosi greitis 220 km s⁻¹, disko paviršiaus tankis 52 M_\odot pc⁻² ir disko erdvinis tankis 0.10 M_\odot pc⁻³.

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

Naudojantis nustatytais žvaigždžių atmosferų fizikiniais parametrais (T_{eff} , M_v , [Fe/H]) ir teorinėmis Padovos izochromomis, ŽKA kataloge buvo įvertintas žvaigždžių amžius. Tačiau šis metodas tinka tik evoliucionavusioms žvaigždėms, kurios HR diagramoje evoliucionuoja tolyn nuo nulinio amžiaus pagrindinės sekos (angl. Zero Age Main Sequence, ZAMS). Jaunoms,

mažos masės G ir K spektrinių klasių nykštukėms, esančioms ZAMS sekoje, šis amžiaus įvertinimo metodas nebetinka. Žinoma, kad nulinio amžiaus pagrindinėje sekoje visos izochronos susilieja ir amžiaus įvertinimas tampa nebeįmanomu (Jørgensen ir Lindegren 2005).

Kataloge pateikiami žvaigždžių esami radialiniai galaktocentriniai (R_{gal}) atstumai ir vertikalūs atstumai nuo Galaktikos plokštumos (z). Yra suskaičiuoti perigalaktiniai ir apogalaktiniai orbitų atstumai (R_{min} , R_{max}), žvaigždžių orbitų ekscentricitetai (e) ir maksimalūs atstumai nuo Galaktikos plokštumos (z_{max}).

Helmi ir kt. (2006) kinematinų žvaigždžių grupių tyrimuose naudojo ŽKA katalogą, nes tuo metu tai buvo didžiausias F – G spektrinių klasių katalogas.

Kita didžiulė apžvalga yra radialinio greičio eksperimentas RAVE (angl. RAdial Velocity Experiment)². Tai Paukščių Tako galaktikos žvaigždžių apžvalga, kuri stebėjimams naudojo daugiakanalį šviesolaidinį spektrografą. RAVE dangaus apžvalga apima 20 tūkst. kvadratinių laipsnių dangaus. RAVE Australijos observatorijos Schmidt teleskopu užregistruoto spektro bangų ilgis yra nuo 8410 iki 87940 Å (t.y. infraraudonojo kalcio tripleto regionas, toks pats kaip ir planuojamas GAIA³ apžvalgoje) su spektrine skiriamąja geba $R \approx 7500$.

Pagrindinis RAVE apžvalgos tikslas yra radialinių žvaigždžių greičių nustatymas iš žvaigždžių spektrų, papildomai nustatant efektinę temperatūrą, gravitacijos pagreitį, metalingumą, fotometrinius paralaksus bei cheminių elementų gausas. Per devynerius apžvalgos metus iš viso gauta 556 tūkst. spektrų. Apžvalgos tyrimai leis įsigilinti į Paukščių Tako galaktikos struktūrą ir populiacijų kinematiką, Galaktikos disko formavimąsi ir evoliuciją, judančių grupių ir substruktūrų pasiskirstymus greičių erdvėje, akrecijos įvykius, bei pekuliarų žvaigždžių paieškas.

Šiandien gerai žinomas ir kitas didžiulis Galaktikos struktūrai ir evoliucijai tirti dedikuotas ambicingas projektas SEGUE (angl. Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration)⁴. SEGUE duomenis sudaro 240 tūkst. žvaigždžių spektrų ir fotometriniai matavimai 3500 kvadratinių laipsnių dangaus skliaute. Užregistruoto spektro bangų ilgis yra nuo 3900 iki 9000 Å su spektrine skiriamąja geba $R \approx 1800$. G ir K nykštukių fotometriniai tyrimai

²<http://www.rave-survey.aip.de/rave/>

³<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=26>

⁴<http://www.sdss3.org/surveys/>

apima 5–13 kpc galaktinį atstumą ir siekia 3.5 kpc atstumą nuo Galaktikos plokštumos.

Ši SEGUE spektrinė apžvalga yra ne tik šiuo metu didžiausia, bet ir apima didžiausią kada nors tyrinėtą Galaktikos disko dalį. Apžvalgos tikslas yra Galaktikos struktūros, formavimosi istorijos, kinematikos, dinaminės ir cheminės evoliucijos, tamsiosios medžiagos pasiskirstymo tyrimai. Viena pagrindinių tyrimo užduočių yra substruktūrų Galaktikoje paieška.

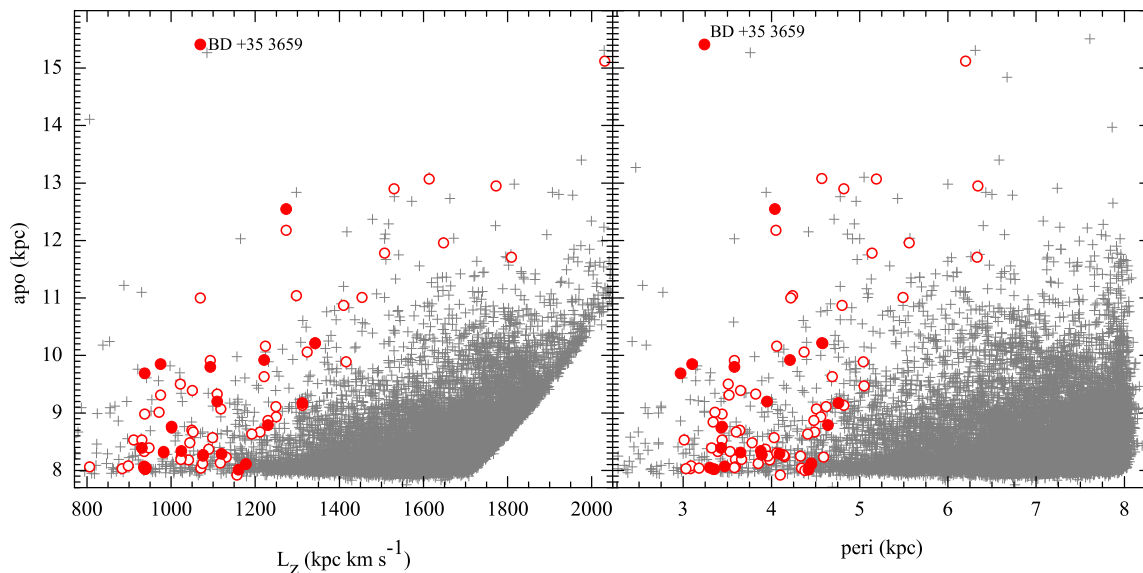
Tiek SEGUE, RAVE, tiek ŽKA apžvalgų duomenys papildė Galaktikos substrukūrų tyrimus. Dar ir šiandien intensyviai publikuojami vis nauji rezultatai (žiūrėti Schlesinger ir kt. 2012; Cheng ir kt. 2012; Pasetto ir kt. 2012; Antoja ir kt. 2012; Datson ir kt. 2012; Stonkutė ir kt. 2012). Neabejotina, kad šios apžvalgos ir GAIA apžvalga ateityje sugebės atkurti Galaktikos cheminės evoliucijos modelį ir formavimosi istoriją.

Šiame darbe naudojome Nordström ir kt. (2004) katalogą ir jo tolesnes versijas: Holmberg ir kt. (2007, 2009). Rezultatus lyginame su Holmberg ir kt. (2009) ir Casagrande ir kt. (2011) katalogu, kuris perkalibravo Holmberg ir kt. (2009) katalogą.

1.2. 3–oji ŽKA kinematinė žvaigždžių grupė

Helmi ir kt. (2006), pasinaudodami homogenišku Ženevos – Kopenhagos apžvalgos F – G spektrinių klasių žvaigždžių katalogu (Nordström ir kt. 2004), ieškojo praeityje įvykusių akrecinių įvykių Paukščių Tako galaktikoje. Analizuodami orbitinių parametrų, apocentro (A), pericentro (P) ir kampinio momento, nukreipto z ašimi (L_z) (vadinama *APL* erdve) koreliaciją, Helmi ir kt. (2006) identifikavo tris koherentes žvaigždžių grupes ir pasiūlė prielaidą, kad šios žvaigždžių grupės gali būti įkritusių nykštukinių galaktikų liekanos.

Naudodami ŽKA katalogo duomenis ir analizuodami modeliavimų duomenis Helmi ir kt. (2006) nustatė, kad *APL* erdvė yra tinkama akrecinių įvykių paieškoms. Taip pat jie nustatė, kad orbitinių parametrų ir kampinio momento, nukreipto z ašimi (L_z), koreliacija nebus paveikta orbitų evoliucijos, keičiantis sistemos masei ar prarandant kinetinę energiją dėl gravitacinės sąveikos su aplinka. Net jei užgrobiamos žvaigždės gravitaciškai atsipalaiduos

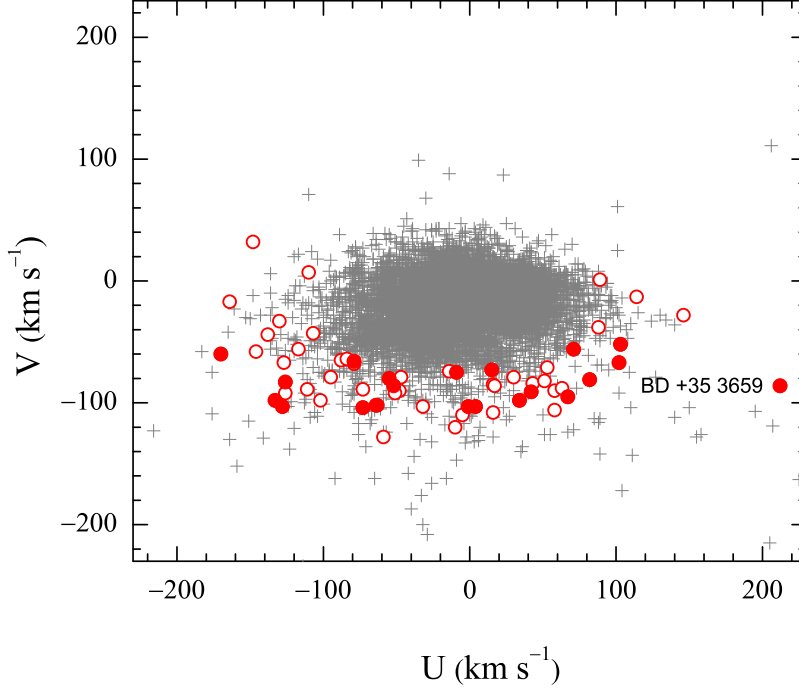


1.2 pav.: Žvaigždžių pasiskirstymas *APL* erdvėje. Plusais pavaizduotas Holmberg ir kt. (2009), apskritimais – visos 3–osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždės, pilnaviduriais apskritimais – grupės žvaigždės, kurios tiriamos šiame darbe.

per skirtingus perigalaktinius perėjimus ir turės truputi skirtingus orbitinius parametrus, jos išliks susikoncentravusios į keletą sutankėjimų *APL* erdvėje (Helmi ir kt. 2006).

Šiame darbe mes nagrinėjame nemetalingiausią ŽKA kinematinę žvaigždžių grupę ir toliau šią grupę vadinsime 3–ąja ŽKA kinematinė žvaigždžių grupe. 1.2 paveiksle atidėtos analizuojamos 3–osios ŽKA kinematinės žvaigždžių grupės ir viso Ženevos – Kopenhagos apžvalgos katalogo žvaigždės. Matoma, kad kampinio momento, nukreipto z ašimi (L_z), ir apocentro (apo) plokštumoje visos 3–osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždės užima išorinę pasiskirstymo dalį. Pericentro ir apocentro plokštumoje identifikuotos žvaigždės taip pat pasiskirsto diagonalėje, kuri žymi pastovaus ekscentriciteto sritį. Žvaigždžių ekscentricitetai yra intervale $0.3 \leq e < 0.5$.

APL erdvėje Helmi ir kt. (2006) taip pat identifikavo ir judančias žvaigždžių grupes, tokias kaip Hiadų padrikasis spiečius. Tokios substruktūros *APL* erdvėje yra tvirtai susijusios, o taip pat išsiskiria savo charakteringu dydžiu. Kaip pavyzdį Helmi ir kt. pateikia Hiadų padrikąjį spiečių, kurio kilmė siejama su dinaminėmis perturbacijomis Galaktikos diske, kurias sukelia spiralinės vijos ar Galaktikos skersė. Substruktūros apocentras yra 8.52 kpc, pericentras 6.85



1.3 pav.: Žvaigždžių greičių pasiskirstymas (U, V) greičių erdvėje. Simbolių žymėjimas kaip ir 1.2 paveiksle.

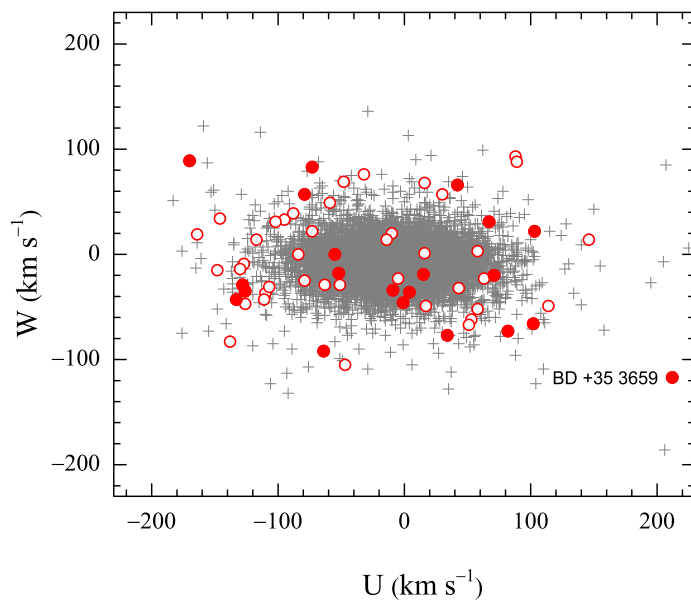
kpc, o $L_z \sim 1659$ kpc km s⁻¹, o tuo tarpu dispersija apie šiuos vidutinius dydžius yra $\sigma_{apo} \sim 0.05$ kpc, $\sigma_{peri} \sim 0.07$ kpc ir $\sigma_{L_z} \sim 11$ kpc km s⁻¹. O substruktūros, kurių kilmė susijusi su žvaigždžių akrecija bus labiau išsiplėtusios *APL* erdvėje, su tipinėmis $\Delta_{apo,peri} \sim 0.5 - 1$ kpc, $\Delta_{L_z} \sim 200 - 400$ kpc km s⁻¹ vertėmis (Helmi ir kt. 2006).

Erdvinių Galaktikos greičio komponentių (U, V, W) plokštumoje, identifikuotos „užgrobtos“ žvaigždės turi tam tikrą specifinį judėjimo pasiskirstymą (Helmi 2008; Villalobos ir Helmi 2009).

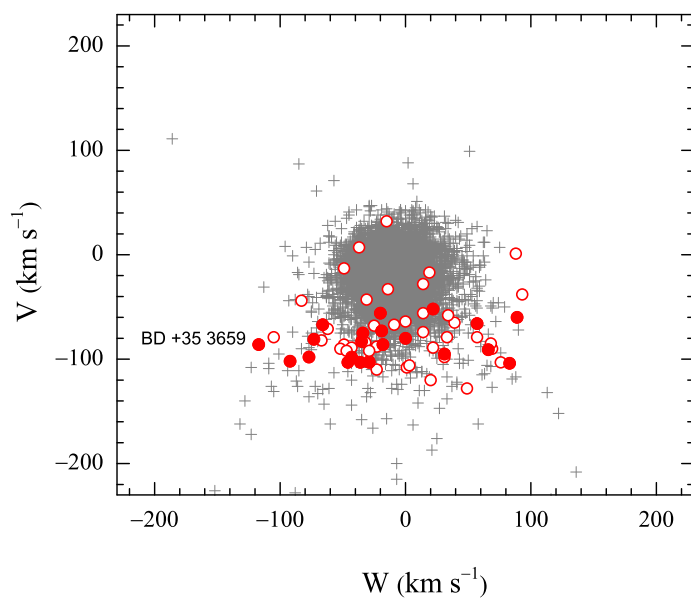
$U - V$ plokštumoje (žiūrėti 1.3 pav.), žvaigždės išsidėsto vadinamu „banano formos“ pasiskirstymu, o disko žvaigždės (1.3, 1.4 ir 1.5 paveiksluose pažymėtos plusais) koncentruojasi centre.

1.4 paveiksle matyti, kad $U - W$ plokštumoje tiriamosios žvaigždės išsidėsto visoje greičių erdvėje, tačiau tiek pagal U tiek pagal W greičio komponentes, tiriamųjų žvaigždžių pasiskirstymas yra simetriškas. O 1.5 paveiksle, $W - V$ plokštumoje, tiriamosios žvaigždės turi mažesnę vidutinį sukimosi greitį, nei Galaktikos disko žvaigždės.

Helmi ir kt. (2006) identifikuotos trys naujos kinematinės žvaigždžių grupės



1.4 pav.: Žvaigždžių greičių pasiskirstymas (U, W) greičių erdvėje. Simbolių žymėjimas kaip ir 1.2 paveiksle.



1.5 pav.: Žvaigždžių greičių pasiskirstymas (W, V) greičių erdvėje. Simbolių žymėjimas kaip ir 1.2 paveiksle.

turi panašų ekscentricitetą ($0.3 \leq e < 0.5$), tačiau jos skiriasi kinematika (ypač vertikaliąja z Galaktikos greičio komponente), metalingumu bei amžiaus pasiskirstymu. Šių grupių kilmė siejama su įkritusiomis nykštukinėmis galaktikomis (Helmi ir kt. 2006).

Tolimesni šių kinematinų grupių tyrimai, pasitelkus didelės spektrinės gebos spektrus, yra labai svarbūs. Žinant detalią kinematinų grupių žvaigždžių atmosferų cheminę sudėtį, galima būtų gauti papildomų žinių apie šių grupių kilmę. Šiame darbe mes nagrinėjame nemetalingiausią kinematinę žvaigždžių grupę, kurią iš viso sudaro 68 žvaigždės. Remiantis Holmberg ir kt. (2007), šios grupės metalingumas $[Fe/H]$ yra apie -0.80 , o žvaigždžių amžiaus apie 14 mlrd. metų. Toliau darbe pristatomi 3-osios ŽKA kinematinės grupės stebėjimų duomenis ir analizės metodai.

Skyrius 2

Stebėjimų duomenys ir analizės metodai

2.1. Stebėjimų duomenys

Žvaigždžių atmosferų gausų įvertinimui reikalinga aukšta skiriamoji geba ir didelis signalo – triukšmo santykis, kad būtų galima patikimiau įvertinti ištisinį spektrą ir išmatuoti silpnas spektrines linijas.

Didelės skiriamosios gebos spektrai kinematinės grupės žvaigždėms buvo gauti Šiaurės optiniu teleskopu, esančiu Kanarų salose (Ispanija), 2008 ir 2011 metais. 2008 metais, kartu su prof. B. Nordström buvo atstebėtos 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždės ir keletas Galaktikos plonojo disko žvaigždžių, o 2011 metais R. Ženovienė atstebėjo panašaus metalingumo, kaip ir 3-oji ŽKA kinematinė grupė, Paukščių Tako galaktikos plonojo disko žvaigždžių, taip padidindama palyginamųjų žvaigždžių imtį. 2.1 lentelėje pateikiame stebėjimų duomenis.

Šiaurės optinio teleskopo pagrindinio veidrodžio skersmuo – 2.56 metro, antrinio veidrodžio – 0.51 metro. Spektrai gauti dispersiniu ešele spektrografu FIES (angl. Fibre-fed Echelle Spectrograph). Stebėjimams buvo naudojama aukščiausia šio spektrografo skiriamoji geba ($R \approx 67000$).

Spektrų registravimui buvo naudojamas dvimatis krūvio sąsajos įtaisas (angl. Charge Coupled Device, CCD). CCD spektrą konvertuoja į skaitmeninį signalą, kaip elemento su x , y koordinatėmis funkciją. Kiekvieno CCD elemento signalas turi fiksuotą nulinį tašką (dar vadinamą paklaidos reikšme) bei monotoniškai didėjantį signalą, kurį sukuria šviesos fotonai. Kiekvienas CCD elementas taip pat yra truputį skirtingas, todėl gali turėti skirtingus jautrumus. Vieni CCD elementai tiesiog surenka daugiau fotonų nei kiti, o dar kiti elementai gali išvis neveikti dėl gamyklinio broko. CCD yra panoraminio

2.1 lentelė: Stebėjimų duomenys.

Žvaigždės numeris	HIP ^a	RA h:m:s	DEC d:m:s	V mag	Eksp. ^b s	Data
HD 967	1128	00 14 04.4	-11 18 41	8.38	1800	2008-07-23
HD 17820	13366	02 51 58.3	+11 22 12	8.38	1000	2011-07-18
HD 107582	60268	12 21 28.1	+61 44 50	8.24	1380	2008-07-20
BD +73 566	61974	12 42 00.1	+72 57 50	9.26	1980	2008-07-20
BD +19 2646	64386	13 11 48.3	+18 22 44	9.87	2000	2008-07-22
HD 114762	64426	13 12 19.7	+17 31 01	7.30	300	2008-07-18
HD 117858	66051	13 32 30.9	+36 02 06	7.97	1500	2008-07-22
BD +13 2698	66665	13 39 59.5	+12 35 21	9.36	1800	2008-07-18
BD +77 0521	67052	13 44 27.1	+77 13 50	9.45	1980	2008-07-19
HD 126512	70520	14 25 30.1	+20 35 24	7.27	1000	2008-07-22
HD 131597	72803	14 52 51.5	+48 28 06	8.43	1500	2008-07-21
BD +67 925	78811	16 05 20.5	+66 47 22	9.86	3600	2008-07-19
HD 159482	86013	17 34 43.0	+06 00 51	8.38	1500	2008-07-23
HD 170737	90659	18 29 54.1	+26 39 26	8.12	1500	2008-07-21
BD +35 3659	95996	19 31 09.2	+36 09 10	10.23	3600	2008-07-19
HD 201889	104660	21 11 59.5	+24 10 05	8.05	1800	2008-07-22
HD 204521	105766	21 25 16.7	+70 28 39	7.29	1000	2008-07-23
HD 204848	106280	21 31 34.3	-09 44 40	7.42	1000	2008-07-22
HD 212029	110291	22 20 23.8	+46 25 05	8.50	1200	2008-07-23
HD 224930	171	00 02 10.1	+27 04 55	5.75	180	2008-07-20
HD 222794	117029	23 43 27.0	+58 04 49	7.14	300	2008-07-19
HD 17548	13128	02 48 51.8	-01 30 34	8.16	1200	2011-08-27
HD 150177	81580	16 39 39.1	-09 33 16	6.34	400	2011-08-27
HD 159307	85963	17 34 08.4	-03 03 20	7.40	600	2011-08-27
HD 165908	88745	18 07 01.5	+30 33 43	5.06	300	2008-07-21
HD 174912	92532	18 51 25.1	+38 37 35	7.16	600	2011-08-27
HD 207978	107975	21 52 29.9	+28 47 36	5.53	400	2008-07-22

^a Žvaigždės numeris HIPPARCOS kataloge.

^b Ekspozicijos trukmė.

tipo šviesos imtuvas, pagrįstas vidiniu fotoefektu.

NOT esantis CCD yra sudarytas iš 2048 x 2048 elementų, išdėstytų eilutėmis, kuriame vieno elemento dydis yra 13.5 μm . Krūvio sąsajos įtaisas yra sudarytas iš metalo–dielektriko–puslaidininkio. Šviesos fotonui patekus į puslaidininkį, jame susidaro elektrono ir skylės pora, o atsiradę elemente



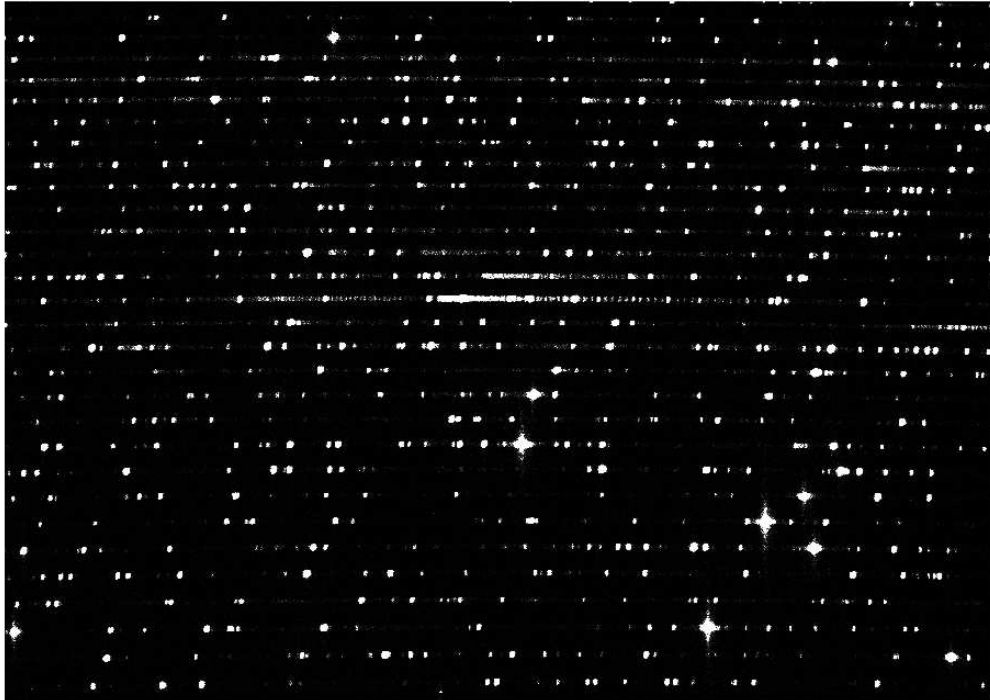
2.1 pav.: Neapdoroto žvaigždės spektro registrogramos fragmentas.

elektronai yra kaupiami. Sukaupto elektrono krūvis priklausys nuo sugertų šviesos fotonų skaičiaus. Sukaupto elektrono krūvis perkeliamas nuosekliai keičiant elementų potencialą. Stebėjimo metu į CCD taip pat patenka ir kosminiai spinduliai, kurie sukuria signalo triukšmus. Galiausiai signalas iš kiekvieno elemento yra konvertuojamas iš analoginio į skaitmeninį.

FIES spektrografu gautas neapdorotas žvaigždės spektro fragmentas yra pateiktas 2.1 paveiksle. Spektro eilės yra išsidėsčiusios vertikalėje, bangos ilgis λ didėja einant nuo apačios į viršų. Kadangi prizmės dispersija nėra tiesinė, todėl spektrinės eilės yra šiek tiek išlenktos. Kiekvienoje spektro eilėje intensyvumas mažėja einant nuo centro į abi puses. FIES viso užregistruoto spektro bangų ilgis yra nuo 3680 iki 7270 Å. Spektrinėse eilėse vietomis gausu metalų linijų, susispietusių į krūvas ir sudaro galias ištinio spektro depresijas. F, G, K spektrinių klasių žvaigždėse stipriausios yra jonizuoto ir neutralaus kalcio bei geležies linijos.

Kosminių spindulių pašalinimas, plokščio lauko korekcija, išsklaidytos šviesos pašalinimas, spektrinių eilių nuskaitymas bei bangos ilgių priskyrimas ir kt. buvo atlikti FIESTOOL¹ programiniu paketu.

¹<http://www.not.iac.es/instruments/fies/fiestool/FIESTool.html>

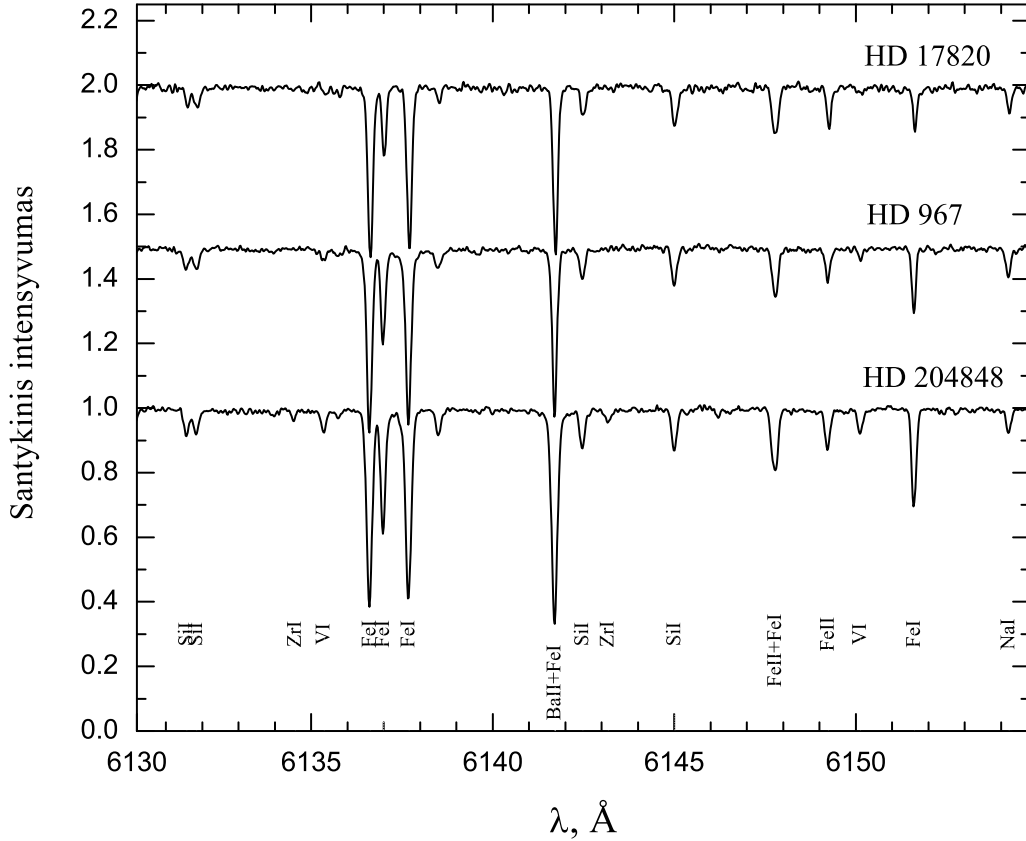


2.2 pav.: FIES spektrografu gautas Th-Ar neapdorotas spektro registrogramos fragmentas.

Bangos ilgių priskyrimui buvo naudojamas torio – argono (Th-Ar) spektras. FIES spektrografo torio – argono kalibracinio emisinio spektro fragmentas pavaizduotas 2.2 paveiksle, čia spektrinių eilių ir bangos ilgių išsidėstymas toks pat, kaip ir 2.1 paveiksle. Bangos ilgių priskyrimui torio – argono lempos kalibracinis spektras buvo stebimas po kiekvienos žvaigždės spektro stebėjimo. Šitoks pasirinktas Th-Ar spektro stebėjimas yra geras tuo, kad lempos šviesa keliauja tuo pačiu optiniu šviesolaidžiu, kaip ir stebėta žvaigždė, o taip galima daug tiksliau aptikti bet kokius instrumentinius nuokrypius.

Po pirminio apdorojimo su FIESTOOL programiniu paketu, toliau turimus spektrus reikėjo sunormuoti. Gautoje spektrinėje eilėje ant tiriamojo sugerties spektro yra užsiklojęs ištisinis žvaigždės spektras ir matricos jautrio funkcija. Abi funkcijos buvo atskirtos su 4A² (angl. Advanced Acquisition, Archiving, and Analysis) programiniu paketu (Ilyin 2000). Tos spektro vietos, kur nėra spektrinių linijų ir, kaip manoma, eina ištisinis spektras, pažymėtos taškais. Per taškus programa 4A mažiausių kvadratų metodu nubrėžia parinktos eilės

²<http://www.aip.de/ilyin/sofin/sofin/node4.html>



2.3 pav.: FIES spektrografo aukštos skiriamosios gebos spektrų pavyzdžiai. Y ašyje, aiškumo dėlei, spektrai paslinkti per 0.50.

polinomą. Gautasis polinomas yra suma ištisinio spektro ir jautrio funkcijos. Turimas spektras yra dalijamas iš polinomo ir taip gaunamas normuotas žvaigždės spektras. 2.3 paveiksle pavaizduoti aukštos skiriamosios gebos sunormuotų spektrų fragmentai. Spektrai išdėstyti efektinės temperatūros T_{eff} mažėjimo tvarka (žiūrint nuo viršaus į apačią). Toliau, turint normuotus žvaigždžių spektrus, galima matuoti ekvivalentinius linijų pločius ir nustatinėti cheminių elementų gausas. Darbe naudojami analizės metodai pristatomi kitame poskyriuje.

Disertacijoje analizuojami dvidešimt vienos Helmi ir kt. (2006) identifikuotos 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždės ir šešių palyginamųjų (plonojo Galaktikos disko) nykštukių aukštos skiriamosios gebos spektrai. Žvaigždžių sąrašas ir kai kurie žvaigždžių fizikiniai parametrai (paimti iš Holmberg ir kt. (2009) katalogo ir iš SIMBAD ³ duomenų bazės) pateikti 2.2 lentelėje.

³<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

2.2 lentelė: Pagrindiniai žvaigždžių parametrai.

Žvaigždės numeris	Spektrinė klasė	Amžius mlrd. m.	M_V mag	d pc	U km s ⁻¹	V km s ⁻¹	W km s ⁻¹	e	z_{\max} kpc	R_{\min} kpc	R_{\max} kpc
HD 967	G5	9.9	5.23	43	-55	-80	0	0.34	0.12	4.09	8.29
HD 17820	G5	11.2	4.45	61	34	-98	-77	0.39	1.62	3.65	8.31
HD 107582	G2V	9.4	5.18	41	-1	-103	-46	0.41	0.76	3.35	8.02
BD +73 566	G0	...	5.14	67	-52	-86	-18	0.36	0.18	3.89	8.27
BD +19 2646	G0	...	5.53	74	103	-52	22	0.38	0.64	4.58	10.21
HD 114762	F9V	10.6	4.36	39	-79	-66	57	0.31	1.57	4.64	8.79
HD 117858	G0	11.7	4.02	61	71	-56	-20	0.32	0.21	4.76	9.17
BD +13 2698	F9V	14.2	4.52	93	102	-67	-66	0.40	1.60	4.21	9.92
BD +77 0521	G5	14.5	5.27	68	4	-103	-36	0.42	0.48	3.30	8.05
HD 126512	F9V	11.1	4.01	45	82	-81	-73	0.40	1.69	3.95	9.20
HD 131597	G0	...	3.06	119	-133	-98	-43	0.52	0.81	3.10	9.85
BD +67 925	F8	13	4.14	139	-128	-103	-29	0.53	0.43	2.97	9.69
HD 159482	G0V	10.9	4.82	52	-170	-60	89	0.51	3.67	4.04	12.55
HD 170737	G8III-IV	...	2.88	112	-64	-102	-92	0.40	2.61	3.47	8.07
BD +35 3659	F1	0.9	5.32	96	212	-86	-117	0.65	5.50	3.24	15.41
HD 201889	G1V	14.5	4.40	54	-126	-83	-35	0.46	0.56	3.58	9.80
HD 204521	G5	2.1	5.18	26	15	-73	-19	0.29	0.18	4.45	8.11
HD 204848	G0	...	1.98	122	42	-91	66	0.36	1.77	3.88	8.34
HD 212029	G0	13.1	4.66	59	67	-95	31	0.44	0.77	3.44	8.76
HD 222794	G2V	12.1	3.83	46	-73	-104	83	0.42	3.02	3.43	8.39
HD 224930	G5V	14.7	5.32	12	-9	-75	-34	0.29	0.44	4.42	8.01
HD 17548	F8	6.9	4.46	55	-14	31	32	0.15	0.88	8.02	10.85
HD 150177	F3V	5.7	3.33	40	-7	-23	-24	0.07	0.25	6.95	7.97
HD 159307	F8	5.2	3.33	65	-14	-21	0	0.06	0.11	7.00	7.95
HD 165908	F7V	6.8	4.09	16	-6	1	10	0.03	0.26	7.97	8.45
HD 174912	F8	6.1	4.73	31	-22	8	-43	0.07	0.69	7.90	9.10
HD 207978	F6IV-V	3.3	3.33	27	13	16	-7	0.11	0.00	7.81	9.68

2.2. Diferencialinė analizė

Diferencialinis metodas – tai cheminio elemento santykinės gausos nustatymas tiriamoje žvaigždėje standartinės žvaigždės atžvilgiu. Dažniausiai standartine žvaigžde yra pasirenkama ta, kurios atmosferos parametrai yra geriausiai žinomi. Šiame darbe standartine žvaigžde pasirinkta Saulė.

Svarbu, kad spektrines linijas, kurios matuojamos tiriamoje žvaigždėje, būtų galima išmatuoti ir Saulėje, o pagal jas nustatomą cheminio elemento gausą – palyginti. Diferencialinė analizė atliekama siekiant sumažinti skaičiavimų paklaidas.

Darbe naudojami keli būdai cheminių elementų gausai žvaigždėje išreikšti. Nustatoma santykinė arba absoliutinė gausa. Santykinė gausa yra logaritminis dydis, kuris parodo kokio nors konkretaus cheminio elemento ir vandenilio gausų santykį žvaigždėje, palyginus su tuo pat santykiu Saulėje. Pavyzdžiui:

$$[\text{El}/\text{H}] = \lg [(\text{El}/\text{H})_{*}/(\text{El}/\text{H})_{\odot}], \quad (2.1)$$

čia 2.1 formulėje El ir H yra žymima kokio nors cheminio elemento ir vandenilio gausos. Gausa $[\text{El}/\text{H}]$ yra išreikšta santykiniais vienetais.

Absoliutinė gausa yra taip pat logaritminis dydis, kuris parodo kokio

2.3 lentelė: Cheminių elementų gausos Saulėje.

Elementas	$A_{\text{El}}^{(*)}$	Elementas	$A_{\text{El}}^{(*)}$
O	8.83	Co	4.92
Na	6.33	Ni	6.25
Mg	7.58	Y	2.24
Al	6.47	Zr	2.60
Si	7.55	Ba	2.13
Ca	6.36	La	1.17
Sc	3.17	Ce	1.58
Ti	5.02	Pr	0.71
V	4.00	Nd	1.50
Cr	5.67	Sm	1.01
Fe	7.50	Eu	0.51

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

nors cheminio elemento atomų kiekio santykį su vandenilio atomų kiekiu ir išreiškiama formule:

$$A_{\text{EI}} \equiv \lg \epsilon(\text{EI}) = \lg (N_{\text{EI}}/N_{\text{H}}) + 12, \quad (2.2)$$

čia N_{EI} ir N_{H} yra kokio nors cheminio elemento ir vandenilio atomų skaičius.

Šiame darbe naudojome Grevesse ir Sauval (2000) nustatytas cheminių elementų Saulėje gausas (2.3 lentelė).

Žvaigždžių atmosferų efektinė temperatūra, gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje, mikroturbulentinis greitis, spektrinių linijų atominiai duomenys bei atmosferos modeliai yra pagrindiniai duomenys, naudojami žvaigždžių atmosferos gausų nustatymui mūsų darbe.

2.3. Žvaigždžių atmosferų modeliai

Žvaigždžių atmosferų modeliai yra skaitmeniniai modeliai, kurie aprašo plazmos fizikinę būseną žvaigždžių viršutiniuose sluoksniuose. Modeliuose aprašoma slėgio, temperatūros, tankio, jonizacijos ir sužadavimo laipsnio priklausomybė nuo optinio gylio žvaigždžių atmosferose. Visos fizikinės žvaigždžių atmosferų savybės turi kiek įmanoma geriau atspindėti sukonstruotose žvaigždžių atmosferų modeliuose.

Žvaigždės yra sudarytos iš karštos plazmos. Spinduliuotės srautas perėjęs žvaigždės atmosferą iš gilesnių sluoksnių, yra sugeriamas, perspinduliuojamas ar išsklaidomas fotosferoje esančių atomų ir molekulių. Spinduliuotės srauto intensyvumo pokytis priklauso nuo sugerties, medžiagos tankio ir spinduliuotės kelio absorbuojančioje medžiagoje. Ne visus procesus įmanoma tinkamai aprašyti fizikinėmis lygtimis, todėl konstruojant klasikinius žvaigždžių atmosferų modelius yra priimanamos prielaidos:

- Lokali termodinaminė pusiausvyra (LTE). Žinoma, kad žvaigždžių atmosferos negali būti termodinaminėje pusiausvyroje, nes matoma, kad žvaigždžių atmosfera spinduliuoja, tačiau tariama, kad lokaliai termodinaminė pusiausvyra egzistuoja. Kiekvienas atmosferos sluoksnis turi savo temperatūrą.

- Žvaigždės atmosfera yra plona palyginus su visos žvaigždės spinduliu. Atmosferų modeliai yra vienmačiai. Žvaigždžių atmosferos yra homogeniškos dviem kryptimis, o fizikinių parametrų pokyčiai vyksta tik viena kryptimi. Plokščiai lygiagrečiuose modeliuose fizikinių parametrų pokyčiai vyksta vertikalia kryptimi, o sferiniuose – radialiaja.
- Žvaigždės yra hidrostatinėje pusiausvyroje. Slėgis yra aprašomas kaip funkcija nuo optinio gylio.
- Atmosferos yra stacionarios, skaičiuojami dydžiai nepriklauso nuo laiko. Dujų būseną ir spinduliuotės srautą pernaša yra pastovi.
- Apibrėžtos atomų gausos yra pastovios visoje žvaigždės atmosferoje.
- Fotosferose nėra medžiagos judėjimų su pagreičiais, lygiais laisvojo kritimo pagreičiams žvaigždžių paviršiuje. Nėra žybaus masės praradimo. Nėra pulsacijų, magnetinių laukų ar stambaus masto srautų. Smulkioji struktūra yra neįskaitoma.
- Temperatūra modeliuose yra nustatoma reikalaujant, kad visa energija, kuri yra pernešama spinduliniu būdu, būtų pastovi per visą žvaigždės atmosferą.

Skaičiuojant žvaigždžių atmosferų modelius yra sprendžiamos dvi pagrindinės diferencialinės lygtys: spindulinės srauto pernašos ir hidrostatinės pusiausvyros. Spinduliavimo šaltiniui aprašyti naudojama Planko funkcija, dalelių greičiams galioja Maksvelo pasiskirstymas. Sužadavimo būsenos apibūdinamos Bolemano dėsnio, o atomų jonizaciją nusako Saha formulė.

Žinant temperatūrą bei dujų slėgį duotame žvaigždžių atmosferos taške, LTE prielaida supaprastina žvaigždžių atmosferų modelių skaičiavimus ir suteikia greitesnę ir lengvesnę būdą suskaičiuoti daugumą fizikinių procesų, vykstančių plazmoje.

Visi šie supaprastinimai yra pritaikyti plačiai naudojamuose klasikiniuose žvaigždžių atmosferų modeliuose. Nepaisant to, kad konstruojant modelius yra priimami supaprastinimai, klasikiniai atmosferų modelių tinkeliai yra pajėgūs atkurti daugybę stebimų parametrų ir pasižymi didžiule prognozavimo galia.

Klasikiniai modeliai yra kuriami keleto pagrindinių tyrėjų grupių. Labiausiai paplitę atmosferų modelių tinkleliai yra suskaičiuoti naudojat MARCS⁴ (Gustafsson ir kt. 2008) ir ATLAS⁵ (Kurucz 1996) kodus. Taip pat žvaigždžių atmosferų modeliai yra apskaičiuoti ir PHOENIX⁶ kodu (Hauschildt ir kt. 1999).

Šiame darbe buvo naudojami vienmačiai, hidrostatiniai, plokščiai lygiagretūs ir sferiniai, lokalinės termodinaminės pusiausvyros, pastovaus srauto žvaigždžių atmosferų MARCS modeliai (angl. Model Atmospheres with Radiative and Convective Scheme), suskaičiuoti naudojant atnaujintą MARCS kodą (Gustafsson ir kt. 2008).

MARCS duomenų bazėje yra apie 52 tūkstančiai F, G, K spektrinių klasių žvaigždžių atmosferų modelių. Vienmačiai MARCS modeliai yra sudaryti iš 56 sluoksnių. Modelių tinklelyje sluoksnis po sluoksnio yra aprašomos atmosferų fizikinės savybės (temperatūra T , slėgis ρ , elektronų slėgis P_e ir kt.). Žvaigždžių atmosferų modeliai yra apskaičiuojami pasirenkant tam tikrą atmosferos cheminę sudėtį, gravitacijos pagreitį paviršiuje $\lg g$ ir energijos srauto, iš giluminių žvaigždės sluoksnių, intensyvumą – efektinę temperatūrą T_{eff} .

MARCS žvaigždžių atmosferų modelių tinklelyje efektinė temperatūra T_{eff} yra nuo 2500 iki 8000 K, modeliai nuo 2500 iki 4000 K yra suskaičiuoti 100 K žingsniu, o nuo 4000 iki 8000 K – kas 250 K. Modeliuose logaritminis santykinis metalingumas yra nuo -5.0 iki $+1.0$. Didesnio šviesio žvaigždėms su mažesniais gravitacijos pagreičiais ($\lg g$ nuo -1.0 iki $+3.5$) $\lg g$ yra paskaičiuoti sferinėje simetrijoje su skirtingomis žvaigždžių masėmis ($0.5, 1.0, 2.0$ ir $5.0 M_{\odot}$). Plokščiai lygiagretūs šaltesnių žvaigždžių modeliai yra suskaičiuoti $3.0, 5.0$ ar $5.5 \lg g$ vertėms. MARCS žvaigždžių atmosferų modelių geometrinės simetrijos skirtumus milžinėms analizavo Heiter ir Eriksson (2006). MARCS modelių bazėje žvaigždžių atmosferų modelių tinkleliai taip pat yra apskaičiuoti ir su skirtingomis mikroturbulencijos greičio v_t vertėmis.

MARCS modeliuose naudojamos cheminių elementų Saulėje gausos nustatytos Grevesse ir kt. (2007). Skaičiavimams naudojamas VALD atomų ir

⁴<http://marcs.astro.uu.se/>

⁵<http://kurucz.harvard.edu/programs.html>

⁶<http://www.hs.uni-hamburg.de/EN/For/ThA/phoenix/index.html>

molekulių linijų sąrašas (Piskunov ir kt. 1995). MARCS duomenų bazėje galima pasirinkti modelius su skirtingomis α -elementų gausomis. Galima pasirinkti modelius su $[\alpha/\text{Fe}] = 0.40$, kai metalingumas yra $-5.00 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -1.00$, $[\alpha/\text{Fe}] = -0.40 \times [\text{Fe}/\text{H}]$, kai metalingumas yra $-1.00 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.00$ ir modelius su $[\alpha/\text{Fe}] = 0.00$, kai metalingumas yra $[\text{Fe}/\text{H}] \geq 0.00$.

Palyginus MARCS modelius su Castelli ir Kurucz (2004) ODFNEW (ATLAS)⁷ atmosferų modeliais, matoma, kad temperatūros struktūros pasiskirstymas Saulės tipo nykštukėms su skirtingais metalingumais gerai sutampa. Modelių struktūrų sutapimas matomas ir milžinėms, ir supermilžinėms, tačiau MARCS modeliai atmosferų sluoksniuose, kuruose $\tau_{\text{Ross}} \leq 10^{-2}$, tampa 10–80 K šaltesniais. Tokie pat rezultatai gaunami palyginus slėgio ar tankio struktūrų pasiskirstymus (Gustafsson ir kt. 2008).

MARCS palyginus su Hauschildt ir kt. (1999) NextGen žvaigždžių atmosferų modeliais su sferinės simetrijos tinkleliu, kurie suskaičiuoti PHOENIX kodu, sutapimas milžinėms yra mažesnis. Žvaigždžių atmosferų sluoksniuose, kuruose $\tau_{\text{Ross}} \approx 10^{-2}$, MARCS modeliai yra vidutiniškai 250 K šaltesni. Gustafsson ir kt. nesutapimo priežastimi įvardija naudojamus skirtingus molekulių neskaidrumų duomenis.

2.4. Programiniai paketai

Žvaigždžių atmosferų gausoms nustatyti buvo naudojami du programinės įrangos paketai (EQWIDTH ir BSYN). Abu paketai sukurti Upsalos astronomijos observatorijoje. Paketai pritaikyti dirbti UNIX/Linux operacinėje sistemoje.

EQWIDTH programiniu paketu skaičiavome cheminių elementų gausas, pasinaudojant išmatuotais linijų ekvivalentiniais pločiais, pagal šiuos žingsnius:

- parengiami cheminių elementų įvesties duomenys;
- pasirenkamas žvaigždės atmosferos modelis;
- kreipiamasi į programą, kuri apskaičiuoja gausą.

⁷<http://wwwuser.oat.ts.astro.it/castelli/grids.html>

```

* Object name = HD 967
NMY=4 IDAMP=2
* H      He      C      N      O      Ne      Na      Mg
* Al     Si     S      K      Ca     Cr      Fe      Ni
* [M/H]=0.0
  12.00 10.93  8.52  7.92  8.83  8.08  6.33  7.58
   6.47  7.55  7.33  5.12  6.36  5.67  7.50  6.25
NATOM=02
IP=0 IINT=0 MY=1.00 KNOWNF=0 ITE5= 4 EPS=0.0010 IWEAK=0
XITE5=0.90
*=====
IEL=026 ION=1 ABUND= 7.56 Fe I
NLINES= 38
*=====
*   wavel      Chi_1      log gf      FDAMP      gamrad eqwidth err trans
*   col_1      col_2      col_3      col_4      col_5  col_6 col_7 col_8
*=====
  4733.60      1.48      -2.97      1.20  1.65e+08  67.5  1.00 X X
  5067.15      4.22      -0.94      1.40  2.08e+08  47.0  1.00 X X
  5159.06      4.26      -0.92      1.40  2.13e+08  44.2  1.00 X X
  5288.52      3.69      -1.73      1.40  5.96e+07  34.6  1.00 X X
  5307.37      1.61      -3.01      1.20  1.95e+06  66.2  1.00 X X
  5398.28      4.44      -0.68      1.40  1.90e+08  45.9  1.00 X X
  5543.94      4.22      -1.06      1.40  2.39e+08  36.1  1.00 X X
  ...
  ...
  ...
*=====
IEL=026 ION=2 ABUND= 7.56 Fe II
NLINES= 07
*=====
*   wavel      Chi_1      log gf      FDAMP      gamrad eqwidth err trans
*   col_1      col_2      col_3      col_4      col_5  col_6 col_7 col_8
*=====
  4508.28      2.85      -2.62      2.50  4.14e+08  64.3  1.00 s p
  5234.63      3.22      -2.31      2.50  3.07e+08  58.5  1.00 s p
  5414.08      3.22      -3.77      2.50  4.12e+08  11.3  1.00 s p
  5534.84      3.24      -2.98      2.50  2.99e+08  34.2  1.00 s p
  ...
  ...
  ...

```

2.4 pav.: Duomenų įvesties failo fragmentas gausų skaičiavimams EQWIDTH programiniu paketu, remiantis ekvivalentinių linijų pločių matavimu.

Cheminių elementų įvesties duomenų failo fragmentas pateiktas 2.4 paveiksle. Įvesties failo antraštėje nurodomas skaičius (NATOM), kuris parodo, kiek elementų bus analizuojama, nurodomas mikroturbulencijos greitis (XITE5), elemento atominis numeris (IEL), jonizacijos lygmuo, absoliutinė gausa (ABUND), elemento vardas ir skaičiuojamo elemento linijų skaičius (NLINES). O įvesties failą sudaro: bangos ilgis (*wavel*, Å), apatinio lygmens sužadinimo

potencialas (Chi_l , eV), oscilatoriaus stiprumas ($log\ gf$), van der Waalso konstanta ($FDAMP$), radiacinio išplitimo konstanta ($gamrad$), išmatuotas ekvivalentinis linijos plotis ($eqwidth$, mÅ) ir atominio šuolio tipas ($trans$).

EQWIDTH programa iteraciniu būdu suskaičiuoja pasirinkto cheminio elemento gausą ir duomenų išvesties faile nurodo santykinę [El/H] ir absoliutinę gausas, standartinį išsibarstymą σ_{El} kiekvienai linijai ir bendrai visoms linijoms.

EQWIDTH programa gausas vandenilio atžvilgiu skaičiavome šiems elementams: neutraliam natriui (Na I), neutraliam magniui (Mg I), neutraliam aliuminiui (Al I), neutraliam siliciui (Si I), neutraliam kalciui (Ca I), neutraliam skandžiui (Sc I), neutraliam titanui (Ti I), jonizuotam titanui (Ti II), neutraliam vanadžiui (V I), neutraliam chromui (Cr I), neutraliai geležiai (Fe I), jonizuotai geležiai (Fe II), neutraliam kobaltui (Co I) ir neutraliam nikeliui (Ni I).

BSYN programinis paketas yra skirtas sintetinių spektrų modeliavimui. Sintetinių spektrų analizė darbe atlikta tokioms spektrinėms linijoms, kurių gausų įvertinimas ekvivalentinių pločių metodu yra negalimas arba yra sudėtingas. BSYN programiniu paketu buvo skaičiuojami keli sintetiniai konkrečios žvaigždės spektrai, varijuojant tiriamųjų elementų gausas. Gauti sintetiniai spektrai buvo vizualiai lyginami su stebėtu žvaigždės spektru.

Šiame darbe sintetinių spektrų metodas buvo pritaikytas silpnoms spektrinėms linijoms, bei toms, kurių linijų profilis paveiktas hipersmulkiosios struktūros ir/ar izotopų išplitimo. Sintetiniame neutralaus deguonies ([O I]), jonizuoto itrio (Y II), neutralaus ir jonizuoto cirkonio (Zr I, Zr II), jonizuotų 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

Aukštos skiriamosios gebos spektruose esančios sugerties linijos nėra neapibrėžiamai plačios, jos turi baigtinį plotį ir profilį. Linijų profiliai suteikia informaciją apie aplinką, kurioje tos linijos susiformavo.

Žvaigždžių atmosferose linijų profiliai išplinta ir kinta dėl turbulencijos

bei šiluminių judesių (Doplerio išplitimas). Taip pat, linijų profiliui įtaką daro ir sugeriančių atomų susidūrimai su laisvaisiais elektronais ir jonais (Štarko išplitimas), ar susidūrimai su neutraliu vandeniliu (van der Vaalso išplitimas). Tuomet fotonai yra sugeriami didesniame bangų ilgių intervale. Todėl išvardinti reiškiniai ne tik pakeičia linijų profilius, bet ir ekvivalentinius pločius.

Ašinis žvaigždžių sukimasis $v \sin i$ taip pat įneša indėlį į linijų profilių išplatėjimą, tačiau jis ekvivalentinio pločio nekeičia. Šiame darbe $v \sin i$ vertės buvo paimtos iš Holmberg ir kt. (2007) katalogo.

Spektrinių linijų rinkinys, kuris naudojamas skaičiavimams, buvo kruopščiai atrinktas. Visi aukštos skiriamosios gebos spektrai buvo patikrinti, kad matytųsi reikiamos linijos, kad linijų profiliai nebūtų užteršti kitomis linijomis, t.y. kad galėtume tiksliai išmatuoti spektrinių linijų ekvivalentinius pločius. Blendų identifikacijai buvo naudojamas Saulės spektro atlasas (Moore ir kt. 1966).

Ekvivalentinis linijų plotis W_λ priklauso nuo pagrindinių žvaigždžių atmosferų fizikinių parametrų, elementų gausos $[E/H]$. Turint geros kokybės (didelio signalo ir triukšmo santykio S/N bei aukštos skiriamosios gebos R) sunormuotus spektrus, aproksimuojant liniją Gauso profilu, galima išmatuoti linijų ekvivalentinius pločius.

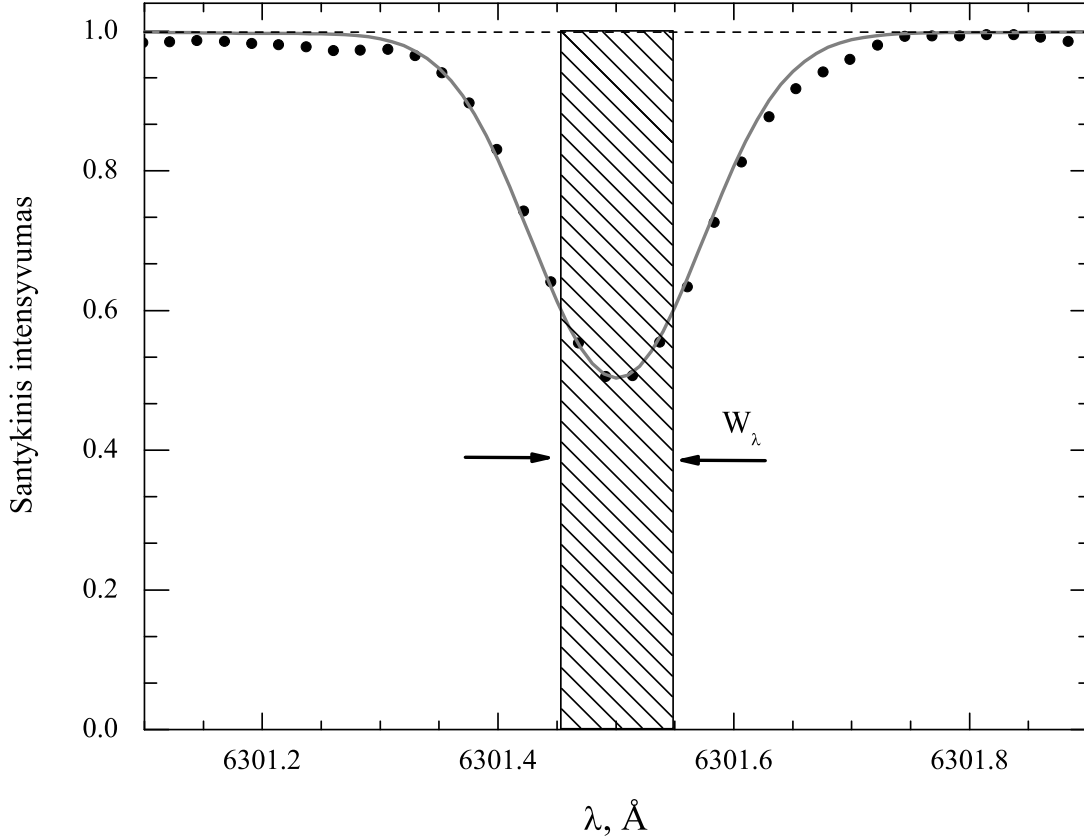
Iš 2.5 paveikslo matyti, kad ekvivalentinis linijų plotis W_λ yra:

$$W_\lambda = \sum \frac{F_c - F_\lambda}{F_c} d\lambda, \quad (2.3)$$

čia $F_c = 1$ yra tolydinio spektro intensyvumas, F_λ intensyvumas atitinkamame bangos ilgyje, o $d\lambda$ – bangų ilgio intervalas.

Ekvivalentinis linijos plotis W_λ yra spektro linijos profilio ir tolydinio spektro apribotas plotas, padalintas iš tolydinio spektro santykinio intensyvumo F_c . Matuojamas bangų ilgio vienetais (čia 2.5 paveiksle – mÅ). Ekvivalentinis plotis W_λ nėra tikrasis linijos plotis, jis apibrėžia linijos profilio stiprumą. W gali būti išreiškiamas ir dažnio vienetais (Hz).

Skaičiuojant ekvivalentinius linijų pločius taikoma formulė:



2.5 pav.: Geležies linijos ekvivalentinio pločio nustatymo pavyzdys. Brūkšninė linija žymi tolydinio spektro eigą pasirinktame bangų ilgių intervale $d\lambda$.

$$\lg W = \lg \left(\frac{\pi e^2}{m_e c^2} \frac{N_i}{N} N_H \right) + \lg \left(\frac{N}{N_H} \right) + \lg(g_n f) - \frac{5040}{T} \chi - \lg(\kappa), \quad (2.4)$$

čia $u_n(T) = \sum g_i e^{-\chi_i/kT}$ yra pasiskirstymo funkcija, o $5040/T = \lg e/kT = \theta$ – atvirkštinė temperatūra. W yra ekvivalentinis linijos plotis, e – elektrono krūvis, m – elektrono masė, N_i/N – jonizuotų atomų skaičiaus santykis su visų atomų skaičiumi, N_H – vandenilio atomų skaičius, $\lg(N/N_H)$ – elemento gausos santykis su vandeniliu, $\lg(g_n f)$ – linijos osciliatorių stipris, χ – sužadavimo potencialas, κ – absorbcijos koeficientas.

2.4 formulėje pirmasis dėmuo, esantis skliaustuose po lygybės, visada yra pastovus dydis atitinkamai žvaigždei ir jonui (Gray 2005).

Ekvivalentiniai linijų pločiai matuojami 4A programiniu paketu aproksimuo-

jant spektrines linijas Gauso profiliu (Ilyin 2000). Ekvivalentinių linijų pločiai 4A programiniu paketu matuojami tokia eiga:

- matuojamos spektrinės linijos yra identifikuojamos pagal bangų ilgius;
- pasirenkami spektrinės linijos taškai, pagal kuriuos 4A programiniu paketu spektrinę liniją aproksimuojama Gauso profiliu;
- programa apskaičiuoja ir pavaizduoja gausinį linijos profilį, o taip pat apskaičiuoja ekvivalentinį linijos plotį;
- palyginus aproksimaciją su tikruoju linijos profiliu, jei linijos aproksimacija netinkama, pasirenkami kiti taškai aproksimacijai ir brėžiamas naujas gausinis linijos profilis.

Darbe, dvidešimt septynioms žvaigždėms, iš viso buvo atlikta apie 4590 ekvivalentinio linijų pločio matavimų, neįskaitant pakartotų matavimų.

2.6. Atominiai duomenys

Vienos atominių duomenų bazė (VALD)⁸ buvo naudojama ruošiant įvesties failus (Piskunov ir kt. 1995). Osciliatorių stipriai buvo paimti iš Saulės spektro analizės, atliktos Kijeve (Gurtovenko ir Kostyk 1989).

Daugumos gilių metalų linijų išplatėjimas yra susijęs ne tik su natūraliu linijos išplatėjimu, bet ir su išplatėjimu, susijusiu su sugeriančių atomų susidūrimais su jonais, elektronais ar vandenilio atomais, o šaltose žvaigždėse – susidūrimais su molekulėmis. Visi šie procesai, susiję su linijų išplatėjimu, buvo įskaityti, skaičiuojant cheminių elementų gausas. Darbe įskaityti sugeriančių atomų susidūrimai su neutraliu vandeniliu, įvedus tam tikras pataisas klasikinei van der Waalso aproksimacijai. 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)

⁸<http://www.astro.uu.se/vald/php/vald.php>

aproksimacija, pataisų koeficientai klasikinei van der Valso aproksimacijai buvo paimti iš Simmons ir Blackwell (1982) darbo. Visiems kitiems cheminiams elementams, klasikinei aproksimacijai naudojamas pataisos koeficientas -2.50 , kai Γ_6 ($\Delta \lg C_6 = +1.0$), taip, kaip nurodyta Mäckle ir kt. (1975) darbe.

Spektrinės linijos, kurios buvo stipresnės nei $100 \text{ m}\text{\AA}$, analizuotos individualiai, remiantis Kurucz (2005) Saulės spektru, ir taip joms parinkti pataisų koeficientai.

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.

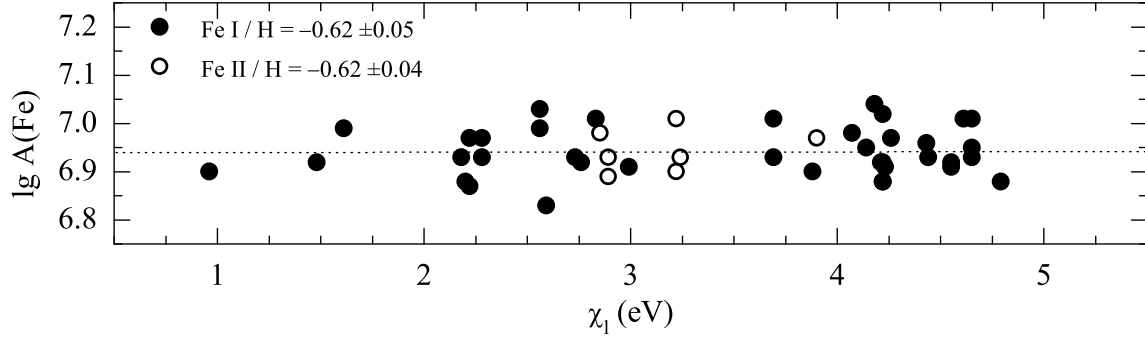
2.7. Nukrypimai nuo lokalsios termodinaminės pusiausvyros

Darbe natrio ir magnio gausos buvo nustatytos įvertinus nukrypimus nuo lokalsios termodinaminės pusiausvyros pagal Gratton ir kt. (1999) metodiką. Apskaičiuoti nukrypimai nuo lokalsios termodinaminės pusiausvyros natrio ir magnio gausoms nėra dideli. Natrio gausos pataisa buvo ne didesnė nei 0.04 , o magnio – nei 0.06 . Didesni nukrypimai nuo lokalsios termodinaminės pusiausvyros paprastai stebimi milžinėms ir supermilžinėms (Gratton ir kt. 1999).

Natrio gausa buvo nustatyta iš keturių spektrinių linijų: 5148.8 , 5682.6 , 6154.2 ir 6160.8 \AA . Magnio gausa nustatyta pagal 4730.0 , 5711.1 , 6318.7 ir 6319.2 \AA linijas.

2.8. Pagrindinių atmosferos parametrų nustatymas

Šiame darbe pagrindiniai atmosferų fizikiniai parametrai (T_{eff} , $\lg g$, v_t , $[\text{Fe}/\text{H}]$) buvo nustatyti iš aukštos skiriamosios gebos žvaigždžių spektrų.



2.6 pav.: Gausos priklausomybė nuo linijų apatinio lygmens sužadavimo potencialo žvaigždei HD 967.

2.8.1. Efektinė temperatūra

Žvaigždės efektinė temperatūra yra fiziškai susijusi su žvaigždės paviršiaus vienetinio ploto skleidžiama energija visais bangų ilgiais ar dažniais:

$$\sigma T_{\text{eff}}^4 \equiv \int_0^{\infty} F_{\nu} d\nu = E = \frac{L}{4\pi R^2}, \quad (2.5)$$

čia σ yra Stefano ir Bolcmano konstanta, L – šviesis, R – spindulys.

Ši temperatūra yra apibūdinama kaip temperatūra idealaus spinduolio, kurio paviršiaus vienetinis plotas visais bangų ilgiais skleidžia tiek pat energijos, kiek ir žvaigždės paviršiaus vienetinis plotas. Iš 2.5 formulės taip pat matoma, kad efektinė temperatūra yra tiesiogiai susijusi su žvaigždės spinduliu ir šviesiu.

Tačiau tiesiogiai išmatuoti nei spindulio R , nei šviesio L negalime. Jeigu yra žinomas bolometrinis spindesys f_{bol} ir kampinis spindulys θ , efektinę temperatūrą apskaičiuoti ir įvertinti galima pagal šią formulę:

$$f_{\text{bol}} = \frac{\theta^2}{4} \sigma T_{\text{eff}}^4. \quad (2.6)$$

Kampinį spindulį artimoms Saulei žvaigždėms galima nustatyti pasitelkiant interferometrinius (žiūrėti Boyajian ir kt. 2012) ar tranzito metodus (Brown 2010). Yra ir alternatyvių metodų nustatyti efektinę žvaigždžių atmosferų temperatūrą T_{eff} , tačiau tokie T_{eff} nustatymo metodai priklausys nuo priimto modelio.

Savo darbe žvaigždžių atmosferų efektinės temperatūros nustatymui naudojome spektrinį metodą.

Efektinė temperatūra nustatoma reikalaujant, kad elemento gausa $[E/H]$ nepriklaustų nuo apatinio lygmens sužadavimo potencialo (χ_1 , eV). Pasirenkamas pagrindinių parametrų rinkinys ir su juo yra skaičiuojamos $[E/H]$ gausos.

Pirminės T_{eff} vertės buvo paimtos iš Holmberg ir kt. (2009) katalogo. Teisinga ta efektinė temperatūra T_{eff} , kai to paties elemento, šiuo atveju geležies, gausa, gauta iš skirtingo sužadavimo potencialo linijų, yra vienoda. 2.6 paveiksle atidėta gausos priklausomybė nuo apatinio lygmens sužadavimo potencialo. Atidėtos neutralios ir vieną kartą jonizuotos geležies linijų gausos, duodamos pasirinktam geležies linijų rinkiniui. 2.6 paveiksle ištisinė linija žymi vidutinę metalingumo vertę. Matome, kad tiek neutralios, tiek jonizuotos geležies gausos $[Fe/H]$ nepriklauso nuo apatinio lygmens sužadavimo potencialo (χ_1 , eV). Toks T_{eff} nustatymo metodas vadinamas sužadavimo balanso metodu.

Darbe nustatytas efektines temperatūras lyginome su Holmberg ir kt. (2009) bei Casagrande ir kt. (2011) darbais, šie autoriai naudojo skirtingus T_{eff} nustatymo metodus. Holmberg ir kt. (2009) efektinę temperatūrą T_{eff} nustatė remiantis Striömgren fotometrija, o Casagrande ir kt. (2011) naudojo infraraudonųjų spindulių srauto metodą.

Holmberg ir kt. (2009) žvaigždžių efektinę temperatūrą nustatė iš Striömgren fotometrinių indeksų $b - y$, c_1 , m_1 , kuriems įskaityta tarpžvaigždinės ekstinkcijos įtaka, ir remtasi Alonso ir kt. (1996) kalibracija.

Casagrande ir kt. (2011) naudojamo infraraudonųjų spindulių srauto metodo (IFRM) pagrindinė idėja yra žvaigždės bolometrinio spindesio \mathcal{F}_{Bol} (žemėje) ir infraraudonojo (IR) monochromatinio spindesio \mathcal{F}_λ (žemėje) santykio palyginimas su žvaigždžių atmosferos modelio nustatyto žvaigždės paviršiaus bolometrinio spindesio (σT_{eff}^4) ir žvaigždės paviršiaus infraraudonojo (IR) monochromatinio spindesio \mathcal{F}_λ santykiu. Efektinė žvaigždžių temperatūra pagal šiuos minėtus santykius yra iteraciniu būdu suskaičiuojama pagal šią formulę:

$$T_{\text{eff}, n} = \left(\frac{\mathcal{F}_\lambda(\text{modelio})_{(n-1)} \mathcal{F}_{\text{Bol}}(\text{žemėje})_{(n-1)}}{\sigma \mathcal{F}_\lambda(\text{žemėje})_{(n-1)}} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2.7)$$

čia T_{eff} n-oji priklausys nuo žvaigždės atmosferos efektinės temperatūros,

nustatytos iteracijoje (n-1), o vėliau bus naudojama 2.7 formulėje esančių dešinėje lygybės pusėje dydžių patikslinimui.

2.8.2. Gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje

Kuo didesnis paviršiaus gravitacijos pagreitis, tuo didesnis slėgis ir dujų tankis bet kuriame atmosferos taške. Žinoma, kad mažėjant paviršiaus gravitacijos pagreičiui, didėjant žvaigždės spinduliui, retėja žvaigždės atmosfera, o tai reiškia, kad mažėja susidūrimų tarp atomų ir jonų. Netiesiogiai tai galima pamatyti žvaigždės ištisiniame spektre ir spektro linijose. Linijos stiprumas priklausys nuo elektronų slėgio, o šis – nuo tankio ir paviršiaus gravitacijos pagreičio.

Darbe gravitacijos pagreičio žvaigždės paviršiuje $\lg g$ nustatymui naudojame jonizacijos pusiausvyros principą. Jonizacijos pusiausvyros principas sako, kad jonizuotų elementų linijų ekvivalentiniai pločiai, stipriai priklauso nuo gravitacijos pagreičio vertės, o tuo tarpu neutralių elementų silpnos ir vidutinio stiprumo linijos nėra jautrios gravitacijos pagreičio pokyčiams (žiūrėti 2.7 paveikslą). Neutralių elementų stiprios linijos tik iš dalies jautrios gravitacijos pagreičio pokyčiams. Šiais faktais remiantis $\lg g$ įvertinamas reikalaujant, kad gausa konkrečiam elementui (šiuo atveju $[\text{Fe}/\text{H}]$), nustatoma iš neutralių ir jonizuotų linijų, sutaptų.

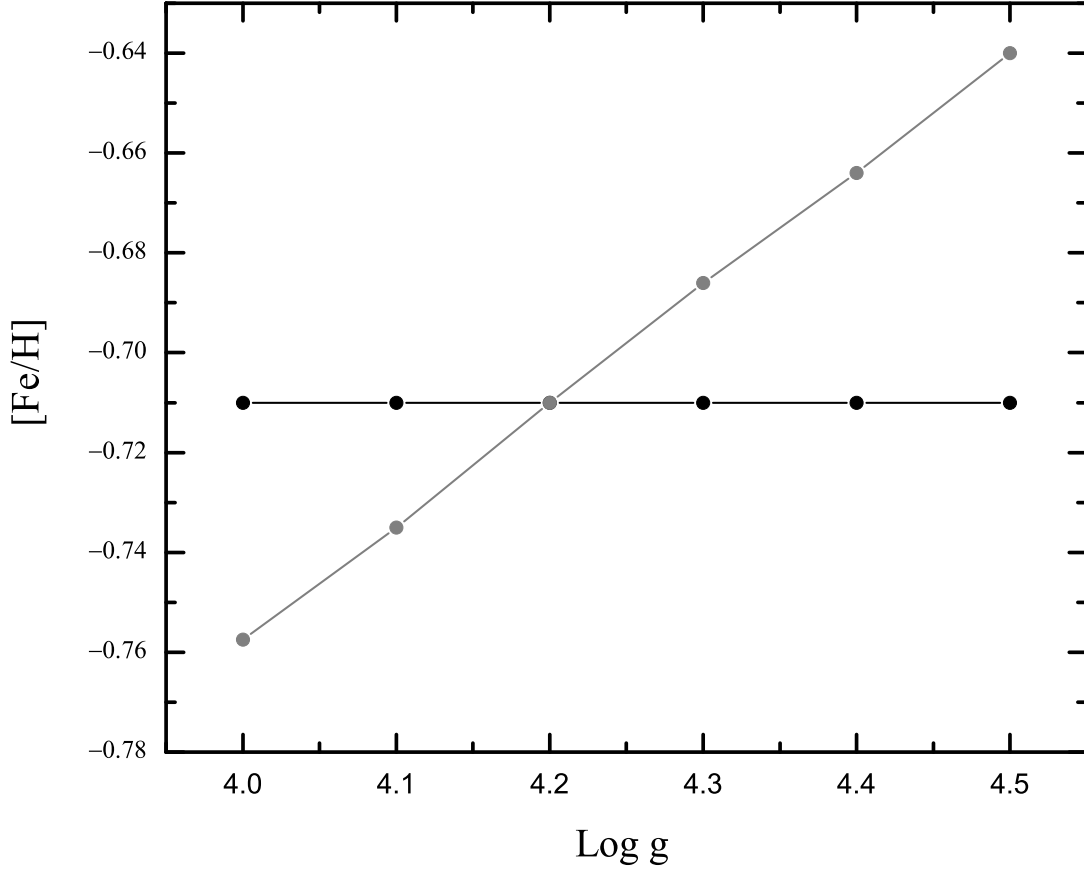
Naudojantis EQWIDTH programiniu paketu skaičiavome geležies gausą $[\text{Fe}/\text{H}]$, pasirenkant keletą atmosferų modelių su skirtingomis gravitacijos pagreičio $\lg g$ vertėmis. Žvaigždės paviršiaus gravitacijos pagreičio vertė, ties kuria $[\text{Fe I}/\text{H}]$ ir $[\text{Fe II}/\text{H}]$ sutapo, ir buvo ieškomoji $\lg g$ vertė. Šis principas galioja tiek stiprioms, tiek silpnoms jonizuotų elementų linijoms.

Yra ir alternatyvių $\lg g$ įvertinimo būdų. Gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje priklauso nuo žvaigždės masės M ir spindulio R :

$$g = g_{\odot} \frac{M}{R^2}, \quad (2.8)$$

o gravitacijos pagreičio dešimtainis logaritmas yra:

$$\lg(g) = \lg M - 2 \lg R + 4.437. \quad (2.9)$$



2.7 pav.: $\lg g$ nustatymas jonizacijos pusiausvyros principu žvaigždei HD 224930. Juoda linija – $[\text{Fe I}/\text{H}]$, pilka – $[\text{Fe II}/\text{H}]$.

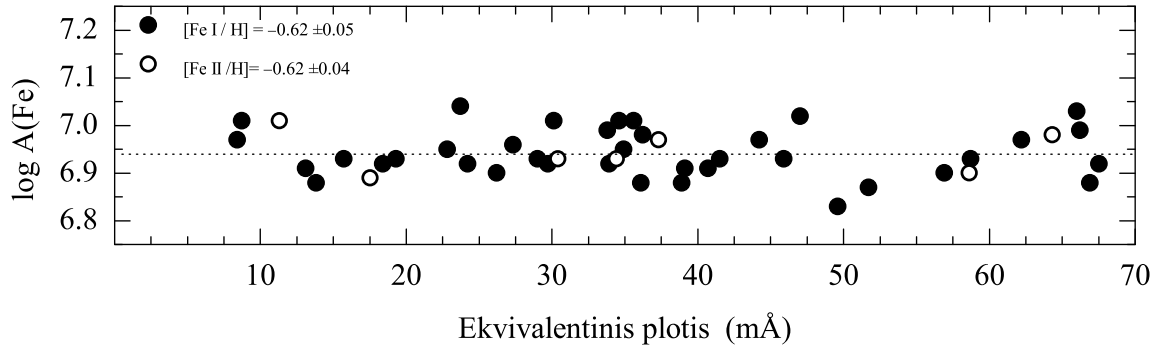
Žinant atstumą iki žvaigždės ir pasinaudojant šviesio išraiška $L = 4\pi\sigma T_{\text{eff}}^4 R^2$, bei 2.9 formule, kurioje M – žvaigždės masė ir R – spindulys, kuri išreiškę per šviesį, galėtume apskaičiuoti $\lg g$. Šviesio logaritmą Saulės atžvilgiu užrašome kaip $\lg(L_{\odot}/L) = 0.4(M_{\text{bol}} - M_{\text{bol}\odot})$, čia M_{bol} yra bolometrinis ryškis. Tuomet laisvo kritimo pagreičio logaritmą žvaigždės paviršiuje Saulės atžvilgiu galėtume užrašyti kaip:

$$\lg \frac{g}{g_{\odot}} = \lg \frac{M}{M_{\odot}} + 4 \lg \frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}\odot}} + 0.4(M_{\text{bol}} - M_{\text{bol}\odot}), \quad (2.10)$$

čia

$$M_{\text{bol}} = V + BC + 5 \lg \pi + 5. \quad (2.11)$$

2.11 formulėje paralakas π daugumai žvaigždžių yra nustatytas HIPPARCOS palydovo, o bolometrinės pataisas BC galima nusistatyti iš Alonso ir kt. (1995)



2.8 pav.: Gausos priklausomybė nuo ekvivalentinio linijų pločio žvaigždei HD 967.

darbo.

Gravitacijos pagreičio nustatymui naudojome jonizacijos pusiausvyros principą, nes mums aktualu, kad gausos nustatytos pagal neutralius cheminius elementus $[\text{FeI}/\text{H}]$ ir jonizuotus $[\text{FeII}/\text{H}]$ sutaptų.

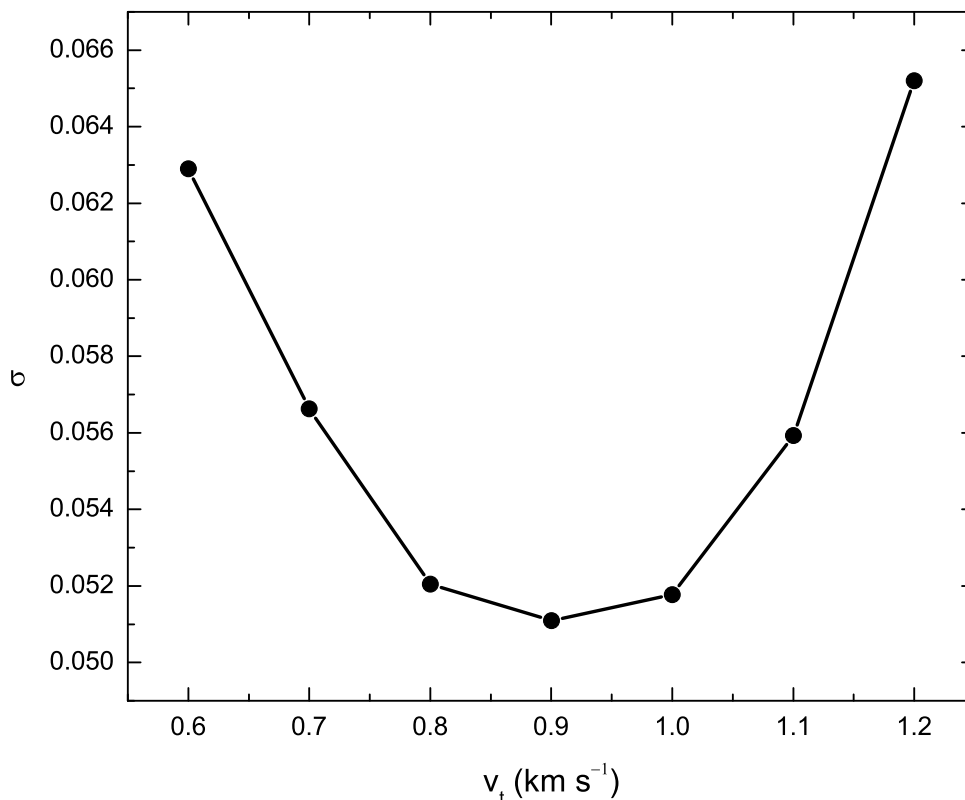
2.8.3. Mikroturbulencija

Mikroturbulencijos greitis žvaigždžių atmosferose yra apibrėžiamas kaip konvekcinis srautų judėjimas. Manoma, kad dujų srautai juda įvairiomis kryptimis ir jiems galioja Maksvelo greičių pasiskirstymas.

Skaičiavimuose turime atsižvelgti į mikroturbulencijos greitį kaip į papildomą linijų išplatėjimo parametą. Mikroturbulencijos greitis paprastai nėra gerai aprašomas vienmačiuose, statiškuose žvaigždžių atmosferų modeliuose, nors MARCS žvaigždžių atmosferų modeliai suskaičiuoti su skirtingomis v_t reikšmėmis.

Kurucz (2005) mini, kad mikroturbulencijos greitis yra parametras, kuris paprastai yra neįskaitomas kitų žvaigždžių skaičiavimuose, apart Saulės. Saulėje greičių laukai gali būti nustatyti kaip funkcija nuo optinio gylio, analizuojant empirinį Saulės intensyvumo spektrą. Kitoms žvaigždėms, naudojant vienmačius žvaigždžių atmosferų modelius, kuriuose konvekcija nėra išsamiai aprašyta, v_t reprezentuoja korekcijos koeficientą, kuris sumažina duoto cheminio elemento linijų gausų išsibarstymą.

Žinant, kad neutralių elementų silpnos linijos beveik nejautrios mikroturbulencijos greičio pokyčiams, tuo tarpu stiprios linijos yra jautrios mikroturbulen-



2.9 pav.: Mikroturbulencijos greičio nustatymas žvaigždei HD 967.

cijos greičiui, nustatyta, kokiai mikroturbulencijos greičio vertei esant gausa, nustatyta pagal stiprias linijas, sutampa su gausa, nustatyta pagal silpnas linijas. Mikroturbulencijos greitis gautas, reikalaujant, kad geležies linijų gausa nepriklausytų nuo ekvivalentinio linijų pločio (žiūrėti 2.8 paveikslą). Naudojant EQWIDTH paketą, geležies gausa $[\text{Fe}/\text{H}]$ yra apskaičiuojama pasirenkant skirtingas mikroturbulencijos greičio v_t vertes. Mikroturbulencijos greičio vertė v_t , ties kuria $[\text{Fe}/\text{H}]$ nuokrypis $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ nuo vidutinės metalingumo vertės mažiausias ir yra ieškomoji v_t vertė. 2.9 paveiksle žvaigždės HD 967 mikroturbulencijos greitis yra 0.90 km s^{-1} .

2.8.4. Metalingumas

Vienas iš pagrindinių parametrų, nusakantis žvaigždžių atmosferų cheminę sudėtį, yra metalingumas $[\text{Fe}/\text{H}]$. Žvaigždžių atmosferų metalingumas šiame darbe buvo nustatytas iš ekvivalentinių linijų pločių. EQWIDTH programinis paketas apskaičiuoja žvaigždžių metalingumus ir duomenų išvesties faile


```

HE= 10.93  C=  8.52  N=  7.92  O=  8.83  [FE/H]=  0.00  if Abund_Fe_Sun=7.50
THE CONSTANT MICROTURB IS EQUAL TO 0.90 KM/S, MCODE=MRXF .....
LG W/L   CHIE  GFLOG  ABUN   X/H   I-CHI  EQW   EL  ION  EL  DMP  LMBDA  EQW(THEOR)  ERROR
-4.85   1.48  -2.97  6.92  -0.64  6.39  67.5  26  1   FE  U  4733.600  68.2  0.029
-5.03   4.22  -0.94  7.02  -0.54  3.65  47.0  26  1   FE  S  5067.150  43.6  0.030
-5.07   4.26  -0.92  6.97  -0.59  3.61  44.2  26  1   FE  S  5159.060  43.0  0.031
-5.18   3.69  -1.73  7.01  -0.55  4.18  34.6  26  1   FE  S  5288.520  31.6  0.043
-4.90   1.61  -3.01  6.99  -0.57  6.26  66.2  26  1   FE  S  5307.370  64.6  0.031
-5.07   4.44  -0.68  6.93  -0.63  3.43  45.9  26  1   FE  S  5398.280  46.5  0.029
-5.19   4.22  -1.06  6.88  -0.68  3.65  36.1  26  1   FE  S  5543.940  38.9  0.038
...
...
...
MEAN ABUNDANCE (IF GF(IN) CORRECT)= 6.94
38 LINE(S) MEAN RELATIVE ABUNDANCE=-0.62 ST. DEV.= 0.05 (MEAN:0.01)

LG W/L   CHIE  GFLOG  ABUN   X/H   I-CHI  EQW   EL  ION  EL  DMP  LMBDA  EQW(THEOR)  ERROR
-4.85   2.85  -2.62  6.98  -0.58  13.33  64.3  26  2   FE  S  4508.280  62.7  0.023
-4.95   3.22  -2.31  6.90  -0.66  12.96  58.6  26  2   FE  S  5234.630  60.2  0.029
-5.68   3.22  -3.77  7.01  -0.55  12.96  11.3  26  2   FE  S  5414.080  10.0  0.067
-5.21   3.24  -2.98  6.93  -0.63  12.94  34.4  26  2   FE  S  5534.840  34.8  0.039
...
...
...
MEAN ABUNDANCE (IF GF(IN) CORRECT)= 6.94
7 LINE(S) MEAN RELATIVE ABUNDANCE=-0.62 ST. DEV.= 0.04 (MEAN:0.02)

```

2.10 pav.: Duomenų išvesties failo fragmentas gausų skaičiavimams EQWIDTH programiniu paketu, remiantis ekvivalentinių linijų pločių matavimu.

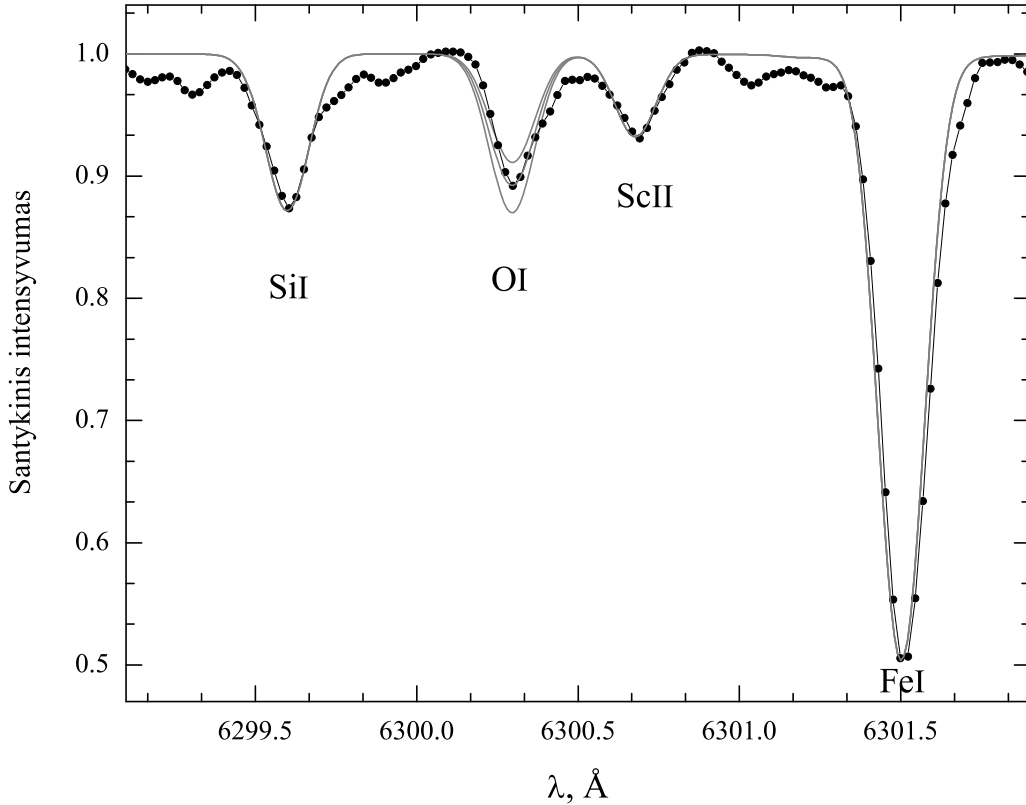
pateikia kiekvienos spektrinės linijos duodamą metalingumo vertę bei vidutinį kvadratinį nuokrypį, o taip pat visų linijų metalingumą su bendru visoms linijoms vidutiniu kvadratinu nuokrypiu.

Metalingumas [Fe/H] išvesties faile bus teisingas tik tuomet, jei pagrindiniai žvaigždžių atmosferų parametrai (T_{eff} , $\lg g$, v_t), nustatyti pagal 2.8.1, 2.8.2, 2.8.3 poskyriuose išvardintus kriterijus, yra teisingi. Duomenų išvesties failo fragmentas pateiktas 2.10 paveiksle.

2.9. Sintetiniai spektrai

Kaip jau minėjome 2.4 skyriuje, sintetinius žvaigždžių spektrus skaičiavome BSYN programiniu paketu. Linijų parametrai buvo paimti iš VALD duomenų bazės (Piskunov ir kt. 1995). Saulės spektras (Kurucz 2005) buvo kalibruojamas, keičiant osciliatoriaus stiprį $\lg gf$ taip, kad stebėtas Saulės spektras sutaptų su sintetiniu. Cheminių elementų gausos Saulėje buvo paimtos iš Grevesse ir Sauval (2000) darbo.

Deguonies gausa buvo nustatoma sintetinių spektrų metodu iš draustinės

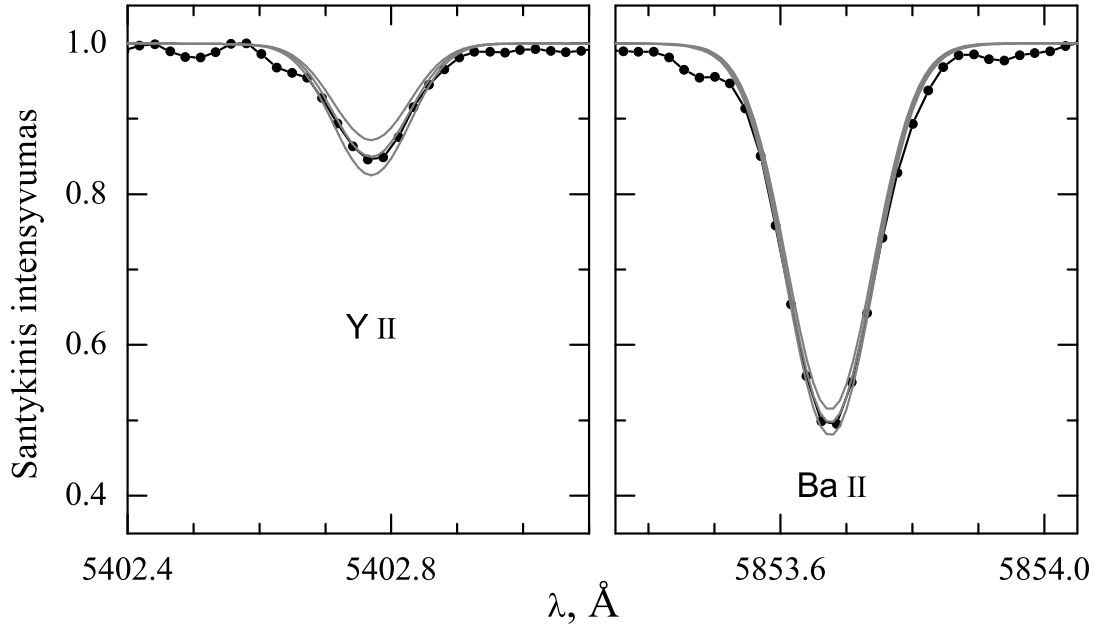


2.11 pav.: Sintetinio spektro pavyzdys ties uždrausta [OI] linija 6300.3 Å. Sintetinius spektrus su $[O/Fe] = 0.52 \pm 0.10$ žymi pilkos linijos, o žvaigždės HD 204848 spektrą žymi juoda taškuota linija.

spektrinės linijos, esančios 6300.3 Å optiniame bangų ruože (žiūrėti 2.11 paveikslą). Šios linijos tyrimas yra sudėtingas, nes draustinė [OI] 6300.3 Å linija yra šiek tiek blenduojama nikelio izotopais (^{58}Ni , ^{60}Ni). Nikelio oscilatoriaus stipris, kuris yra lygus $\lg gf = -2.11$ ir nikelio izotopų bangų ilgiai, kurie lygūs $\lambda(^{58}\text{Ni}) = 6300.335$ Å, bei $\lambda(^{60}\text{Ni}) = 6300.355$ Å, buvo paimti iš Johansson ir kt. (2003) darbo. Tuomet, deguonies [OI] oscilatoriaus 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). Kai kurių žvaigždžių spektruose 6300 Å regionas buvo užklotas žemės atmosferos linijomis, tad tokioms žvaigždėms deguonies [OI] gausa nebuvo nustatyta.

Darbe jonizuoto itrio gausa nustatyta naudojant septynias Y II spektrines linijas, esančias ties bangų ilgiais: 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, 4772.3, 4815.6, 5385.1, 6134.6,



2.12 pav.: Sintetinių spektrų pavyzdžiai ties itrio 5402 Å ir bario 5853 Å linijomis. Sintetiniai spektrai pavaizduoti pilkomis linijomis su vertėmis $[Y/Fe] = 0.33 \pm 0.10$ ir $[Ba/Fe] = 0.25 \pm 0.10$. Juoda taškuota linija žymi žvaigždės HD 204848 spektrą.

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.

Naudojome keturias La II spektrines linijas: 4662.5, 4748.7, 5123.0 ir 6390.5 Å lantano gausos nustatymui. Lantanui taip pat įskaitėme hipersmulkiąją struktūrą, remiantis Lawler ir kt. (2001a) bei Ivans ir kt. (2006) darbais.

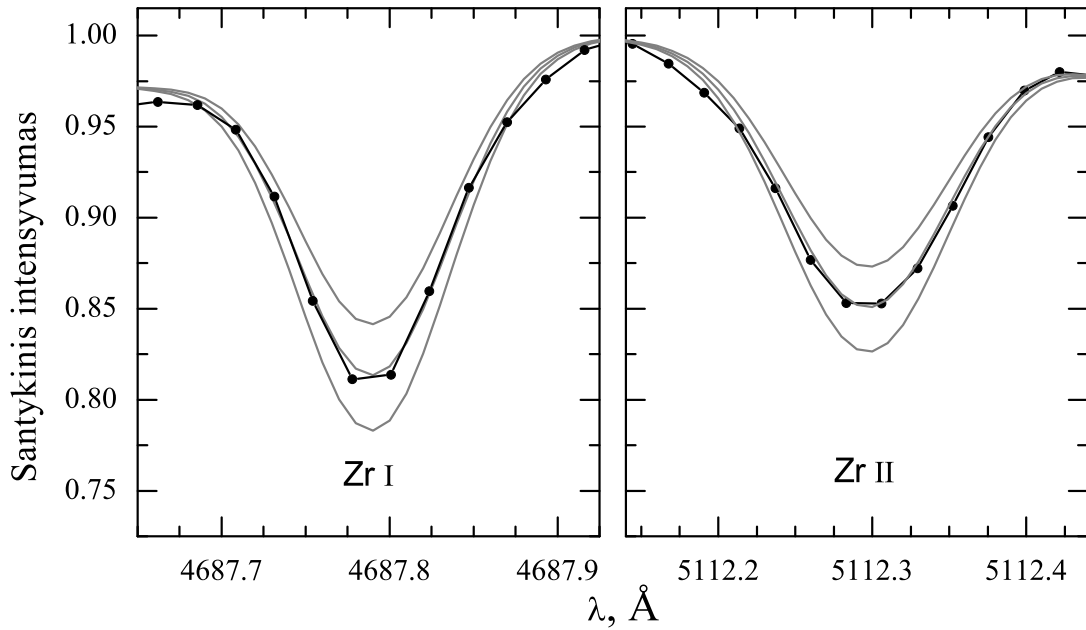
Penkios Ce II linijos 5274.2, 5330.5, 5512.0, 5610.3 ir 6043.4 Å, buvo naudojamos cerio gausos nustatymui.

Prazeodimis buvo nagrinėjamas jo gausą nustatant iš Pr II, 5259.7 ir 5322.8 Å linijų. Prazeodimio gausos nustatymui įskaityta linijų hipersmulkiąji struktūra buvo paimta iš Sneden ir kt. (2009) darbo.

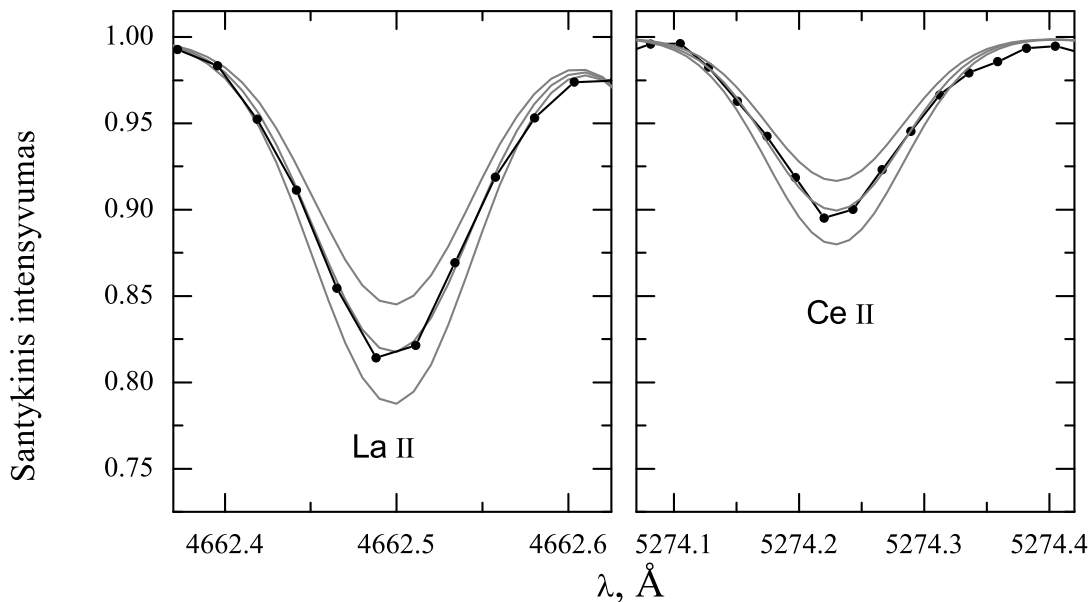
Neodimio gausai nustatyti naudojome septynias Nd II spektrines linijas ties bangų ilgiais: 4811.3, 5130.6, 5255.5, 5276.9, 5293.2, 5319.8 ir 5385.9 Å.

Samario gausai nustatyti naudojome tris spektrines linijas ties bangų ilgiais 4467.3, 4577.7, 4791.6 Å ir taip pat įskaitėme hipersmulkiąją linijų struktūrą, remiantis Roederer ir kt. (2008).

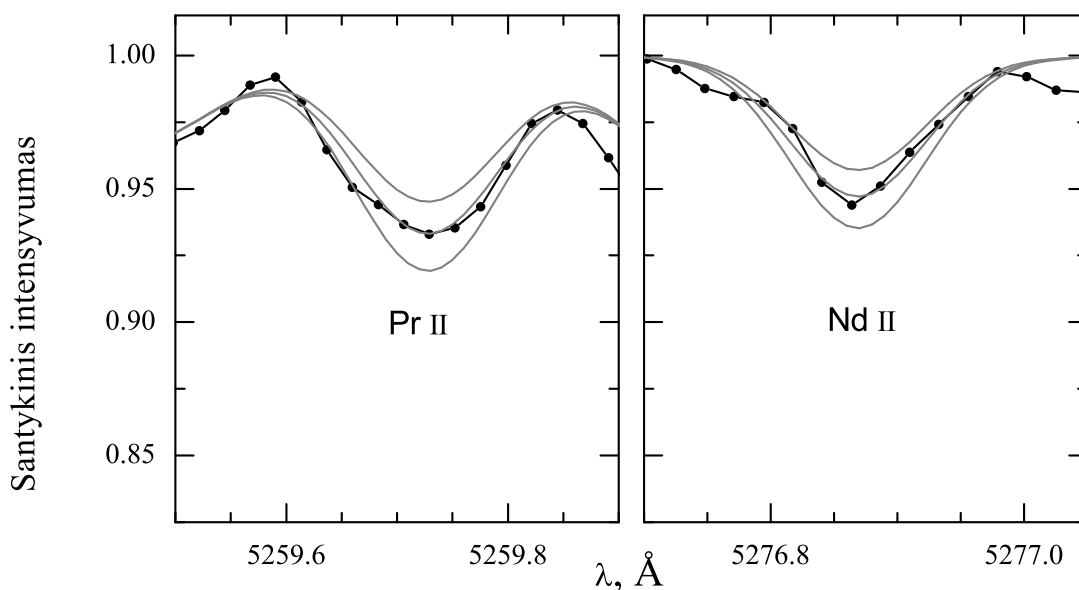
Europio gausa buvo nustatoma iš dviejų europio linijų: 4129.7 ir 6645.1 Å.



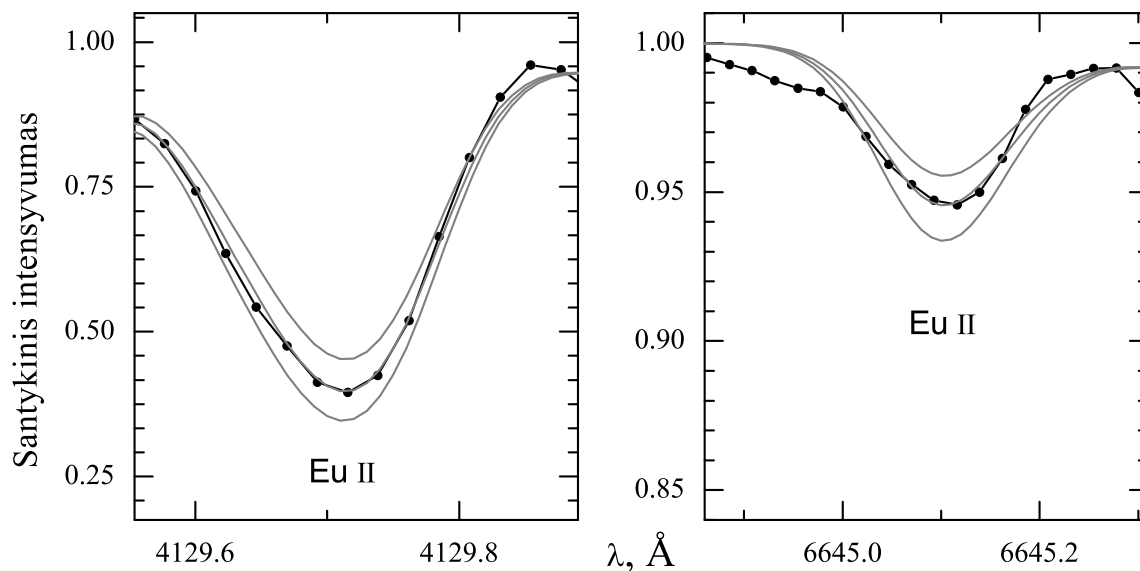
2.13 pav.: Sintetinių spektrų pavyzdžiai ties Zr I 4687 Å ir Zr II 5112 Å linijomis. Sintetiniai spektrai pavaizduoti pilkomis linijomis su vertėmis $[Zr\ I/Fe] = 0.40 \pm 0.10$ ir $[Zr\ II/Fe] = 0.38 \pm 0.10$. Juoda taškuota linija žymi žvaigždės HD 204848 spektrą.



2.14 pav.: Sintetinių spektrų pavyzdžiai ties lantano 4662 Å ir cerio 5274 Å linijomis. Sintetiniai spektrai pavaizduoti pilkomis linijomis su vertėmis $[La/Fe] = 0.20 \pm 0.10$ ir $[Ce/Fe] = 0.10 \pm 0.10$. Juoda taškuota linija žymi žvaigždės HD 204848 spektrą.



2.15 pav.: Sintetinių spektrų pavyzdžiai ties prazeodimio 5259 Å ir neodimio 5276 Å linijomis. Sintetiniai spektrai pavaizduoti pilkomis linijomis su vertėmis $[\text{Pr}/\text{Fe}] = 0.20 \pm 0.10$ ir $[\text{Nd}/\text{Fe}] = 0.38 \pm 0.10$. Juoda taškuota linija žymi žvaigždės HD 204848 spektrą.



2.16 pav.: Sintetinių spektrų pavyzdžiai ties europio 4129 Å ir 6645 Å linijomis. Sintetiniai spektrai pavaizduoti pilkomis linijomis su vertėmis $[\text{Eu}/\text{Fe}] = 0.35 \pm 0.10$ ir $[\text{Eu}/\text{Fe}] = 0.37 \pm 0.10$. Juoda taškuota linija žymi žvaigždės HD 170737 spektrą.

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 kurią $^{151}\text{Eu} - 47.77\%$, o $^{153}\text{Eu} - 52.23\%$, bei 6645.1 \AA spektrinės linijos izotopų poslinkis, paimti iš Biehl (1976) darbo.

Y II, Ba II, Zr I, Zr II, La II, Ce II, Pr II, Nd II ir Eu II sintetinių spektrų fragmentai pavaizduoti 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 ir 2.16 paveiksluose.

2.10. Paklaidų įvertinimas

Paklaidos šiame darbe buvo įvertintos, atsižvelgus į du pagrindinius paklaidų atsiradimo šaltinius. 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 σ yra lygus 0.05. Šią vidutinę paklaidą galima laikyti tipine atsitiktine paklaida.

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

Cheminių elementų gausų jautrumas sisteminėms paklaidoms ($\Delta[A/H]$) žvaigždei HD 224930 yra pateiktas 2.4 lentelėje. 2.4 lentelėje 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_{eff} , $\lg g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ ir su jais susijusios sisteminės paklaidos nėra didelės, o darbe analizuojamiems cheminių elementų gausų santykiams poveikis yra dar mažesnis.

2.4 lentelė: Cheminių elementų gausų jautrumas atmosferų parametrų pokyčiams.

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

* Skaičiavimai atlikti žvaigždei HD 224930.

Skyrius 3

Rezultatai ir jų aptarimas

3.1. Žvaigždžių atmosferų parametrai ir cheminių elementų gausos

Dvidešimt vienai 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždei bei šešioms palyginamosioms Galaktikos plonojo disko žvaigždėms iš didelės skiriamosios gebos spektrų nustatyti žvaigždžių atmosferų pagrindiniai fizikiniai parametrai: efektinė temperatūra (T_{eff}), gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje ($\lg g$), metalingumas ($[\text{Fe}/\text{H}]$) ir mikroturbulencijos greitis (v_t). Nustatyti žvaigždžių atmosferų pagrindiniai parametrai, geležies gausų vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai ($\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$) bei linijų skaičius ($n_{[\text{Fe}/\text{H}]}$) yra pateikti 3.1 lentelėje.

3-ajai ŽKA kinematinei žvaigždžių grupei spektriniu metodu darbe nustatytos efektinės temperatūros yra intervale nuo 5100 iki 5900 K. Nustatytas vidutinis 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių metalingumas $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle = -0.69 \pm 0.05$.

Šiame darbe nustatytos lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų (t.y. O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Co ir Ni) gausos $[\text{El}/\text{Fe}]$, vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai bei linijų skaičius 3-ajai ŽKA kinematinei grupei ir palyginamosioms plonojo Galaktikos disko žvaigždėms yra pateikti disertacijos A priedo lentelėje A.1.

Šiame darbe mes taip pat pristatome n -pagavimo elementų (t.y. Y, Zr, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm ir Eu) gausų $[\text{El}/\text{Fe}]$ rezultatus. Sunkiųjų cheminių elementų ($39 \leq Z \leq 63$) gausos $[\text{El}/\text{Fe}]$, vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai bei linijų skaičius 3-ajai ŽKA kinematinei grupei ir palyginamosios plonojo Galaktikos disko žvaigždėms yra pateikti disertacijos A priedo lentelėje A.2.

3.1 lentelė: Žvaigždžių atmosferų parametrai.

Žvaigždės vardas	T_{eff} K	$\lg g$	v_t km s ⁻¹	[Fe/H]	σ_{FeI}	n_{FeI}	σ_{FeII}	n_{FeII}
HD 967	5570	4.3	0.9	-0.62	0.05	38	0.04	7
HD 17820	5900	4.2	1.0	-0.57	0.05	29	0.01	6
HD 107582	5600	4.2	1.0	-0.62	0.05	32	0.07	5
BD +73 566	5580	3.9	0.9	-0.91	0.05	31	0.02	6
BD +19 2646	5510	4.1	0.9	-0.68	0.04	31	0.04	5
HD 114762	5870	3.8	1.0	-0.67	0.05	32	0.03	7
HD 117858	5740	3.8	1.2	-0.55	0.04	34	0.03	6
BD +13 2698	5700	4.0	1.0	-0.74	0.06	28	0.05	5
BD +77 0521	5500	4.0	1.1	-0.50	0.07	24	0.05	5
HD 126512	5780	3.9	1.1	-0.55	0.05	27	0.03	6
HD 131597	5180	3.5	1.1	-0.64	0.04	32	0.03	6
BD +67 925	5720	3.5	1.2	-0.55	0.05	24	0.03	6
HD 159482	5730	4.1	1.0	-0.71	0.05	26	0.01	5
HD 170737	5100	3.3	1.0	-0.68	0.04	29	0.05	6
BD +35 3659 ^(a)	5850	3.9	0.9	-1.45	0.04	25	0.04	4
HD 201889	5700	3.8	0.9	-0.73	0.05	30	0.03	4
HD 204521	5680	4.3	1.0	-0.72	0.05	30	0.05	5
HD 204848	4900	2.3	1.2	-1.03	0.04	31	0.05	7
HD 212029	5830	4.2	0.9	-0.98	0.02	20	0.01	2
HD 222794	5560	3.7	1.1	-0.61	0.04	30	0.05	6
HD 224930	5470	4.2	0.9	-0.71	0.05	35	0.05	6
HD 17548	6030	4.1	1.0	-0.49	0.05	32	0.03	7
HD 150177	6300	4.0	1.5	-0.50	0.04	23	0.05	4
HD 159307	6400	4.0	1.6	-0.60	0.04	17	0.04	4
HD 165908	6050	3.9	1.1	-0.52	0.04	24	0.03	7
HD 174912	5860	4.1	0.8	-0.42	0.04	33	0.04	6
HD 207978	6450	3.9	1.6	-0.50	0.04	22	0.04	7

^(a) Ne kinematinės grupės narė.

3.2. Palyginimas su ankstesniais rezultatais

Šiame darbe tirtoms žvaigždėms efektinės temperatūros T_{eff} buvo nustatytos ir kituose darbuose. Palyginome T_{eff} , nustatytas Holmberg ir kt. (2009) bei Casagrande ir kt. (2011) darbuose. Casagrande ir kt. (2011) savo darbe pristatė perkalibruotus Ženevos – Kopenhagos apžvalgos žvaigždžių atmosferų parametrus, efektinės temperatūros nustatymui naudodami infraraudonųjų spindulių srauto metodą (IRFM).

Palyginus Holmberg ir kt. bei Casagrande ir kt. gautas T_{eff} vertes pastebima, kad Casagrande ir kt. (2011) kataloge žvaigždžių atmosferų efektinės temperatūros yra vidutiniškai 100 K didesnės.

Šiame darbe spektriniu metodu nustatytos T_{eff} yra vidutiniškai 40 ± 70 K karštesnės nei Holmberg ir kt. (2009) kataloge ir vidutiniškai 60 ± 80 K šaltesnės nei Casagrande ir kt. (2011) kataloge (žvaigždė BD +35 3659, kuri skiriasi 340 K, nebuvo įtraukta į skirtumų vidurkio skaičiavimą).

Keturioms 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždėms spektriniu metodu gauta efektinė temperatūra T_{eff} buvo nuo +100 iki +200 K didesnė nei Holmberg ir kt. (2009) kataloge.

Fotometriniis žvaigždžių metalingumas taip pat yra pateiktas Holmberg ir kt. (2009) bei Casagrande ir kt. (2011) kataloguose. Palyginus šiuose kataloguose pateiktas $[\text{Fe}/\text{H}]$ vertes, matyti, kad Casagrande ir kt. katalogo žvaigždės yra apie 0.10 metalingesnės. Darbe nustatyti metalingumai $[\text{Fe}/\text{H}]$, palyginus su Holmberg ir kt. katalogo $[\text{Fe}/\text{H}]$ vertėmis, taip pat vidutiniškai per 0.10 ± 0.10 didesni, o palyginus su Casagrande ir kt. katalogu, sisteminio $[\text{Fe}/\text{H}]$ skirtumo nėra, tik imties vidutinis kvadratinis nuokrypis yra lygus 0.10.

Kelios 3-osios ŽKA grupės žvaigždės spektriniais metodais buvo analizuotos ir kitų autorių. 3.2 lentelėje pateiktas mūsų darbe nustatytų žvaigždžių atmosferų pagrindinių parametrų ir gausų palyginimas su Nissen ir Schuster (2010); Reddy ir kt. (2006) bei Ramírez ir kt. (2007) rezultatais. 3.2 lentelėje taip pat pateikti nustatytų dydžių skirtumų vidurkiai (pažymėti „Skirt.“) bei atitinkamo dydžio vidutinis kvadratinis nuokrypis σ .

Ramírez ir kt. (2007) nustatė dešimties 3-osios kinematinės grupės žvaigždžių pagrindinius atmosferų parametrus (T_{eff} , $\lg g$ ir $[\text{Fe}/\text{H}]$). Pagrindinius

3.2 lentelė: 3-osios ŽKA kinematinės grupės rezultatų palyginimas su kitų autorių rezultatais.

Dydis	Mūsų–Nissen ^(a)		Mūsų–Reddy ^(b)		Mūsų–Ramírez ^(c)	
	Skirt.*	σ	Skirt.	σ	Skirt.	σ
T_{eff} (K)	34	54	86	33	47	45
$\lg g$	-0.26	0.16	-0.28	0.15	-0.27	0.14
[Fe/H]	0.03	0.04	0.06	0.07	0.10	0.04
[Na/Fe]	0.02	0.11	0.00	0.04	...	...
[Mg/Fe]	-0.02	0.05	0.02	0.01	...	...
[Al/Fe]	...	...	-0.01	0.07	...	...
[Si/Fe]	-0.05	0.01	0.03	0.05	...	...
[Ca/Fe]	0.00	0.01	0.08	0.05	...	...
[Sc/Fe]	...	...	-0.01	0.05	...	...
[Ti/Fe]	0.06	0.10	0.07	0.06	...	...
[V/Fe]	...	...	-0.01	0.03	...	...
[Cr/Fe]	0.02	0.06	0.08	0.04	...	...
[Co/Fe]	...	...	-0.04	0.03	...	...
[Ni/Fe]	0.01	0.05	-0.01	0.04	...	...
[Y/Fe]	0.07	0.06	0.01	0.09	...	...
[Ba/Fe]	0.13	0.05	0.11	0.10	...	...
[Ce/Fe]	...	...	0.01	0.10	...	...
[Nd/Fe]	...	...	-0.05	0.11	...	...
[Eu/Fe]	...	...	0.08	0.09	...	...

* Skirtumų vidurkis;

^(a) 4 bendros žvaigždės su Nissen ir Schuster (2010) darbu;

^(b) 7 bendros žvaigždės su Reddy ir kt. (2006) darbu;

^(c) 10 bendrų žvaigždžių su Ramírez ir kt. (2007) darbu.

atmosferų parametrus bei cheminių elementų gausas, keturioms bendroms žvaigždėms nustatė Nissen ir Schuster (2010), o Reddy ir kt. (2006) septynioms bendroms žvaigždėms.

Visos mūsų darbe analizuojamos palyginamosios plonojo Galaktikos disko žvaigždės spektriniais metodais buvo tiriamos Edvardsson ir kt. (1993) bei 5 palyginamosios Thévenin ir Idiart (1999) darbe. 3.3 lentelėje pristatome plonojo Galaktikos disko žvaigždžių palyginimą su minėtų autorių rezultatais.

Šiame darbe nustatytas [El/Fe] gausų santykis 3-osios ŽKA kinematinės grupės ir palyginamosioms plonojo Galaktikos disko žvaigždėms gerai sutampa

3.3 lentelė: Plonojo disko žvaigždžių palyginimas su kitų autorių rezultatais.

Dydis	Mūsų–Edvardsson ^(a)		Mūsų–Thévenin ^(b)	
	Skirt.*	σ	Skirt.	σ
T_{eff} (K)	86	66	87	68
$\lg g$	-0.18	0.21	-0.06	0.14
[Fe/H]	0.10	0.04	0.03	0.03
[Na/Fe]	-0.08	0.09	...	...
[Mg/Fe]	-0.02	0.07	...	...
[Al/Fe]	-0.10	0.07	...	...
[Si/Fe]	-0.02	0.02	...	...
[Ca/Fe]	0.05	0.03	...	...
[Ti/Fe]	-0.02	0.08	...	...
[Ni/Fe]	-0.06	0.06	...	...
[Y/Fe]	-0.06	0.11	...	...
[Ba/Fe]	-0.04	0.07	...	...

* Skirtumų vidurkis;

^(a) 6 bendros žvaigždės su Edvardsson ir kt. (1993) darbu;

^(b) 5 bendros žvaigždės su Thévenin ir Idiart (1999) darbu.

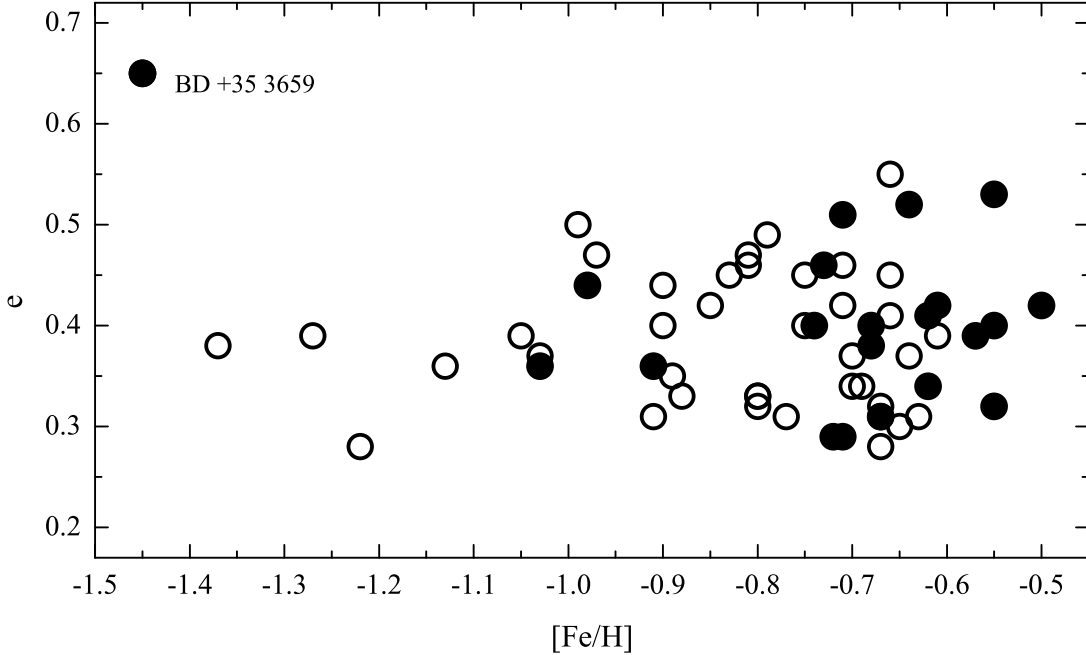
su minėtų darbų rezultatais. Didesni nesutapimai pastebimi tarp $\lg g$ verčių, tačiau jie yra paklaidų ribose. Minėti nesutapimai atsiranda dėl skirtingų $\lg g$ nustatymo metodų.

Analizuojant mūsų nustatytą gausą pagal Ti I bei Ti II linijas, matome, kad neutralaus ir jonizuoto titano linijos duoda tą pačią gausą. Vadinasi, mūsų darbe $\lg g$ nustatymas, naudojant jonizacijos balanso metodą ir geležies linijas, yra tikslus.

3.3. Grupės nariai

3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių metalingumo [Fe/H] pasiskirstymas yra homogeniškas. Dvidešimties žvaigždžių metalingumas yra [Fe/H] = -0.69 ± 0.05 . 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždės BD +35 3659 ir BD +73 566 išsiskiria iš kitų grupės narių. Toliau pateikiama detalesnė šių žvaigždžių apžvalga.

Šiame darbe nystatyta, kad žvaigždės BD +35 3659 metalingumas yra



3.1 pav.: Ekscentriciteto priklausomybė nuo metalingumo, $[\text{Fe}/\text{H}]$. Apskritimai – visos 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždės, pilnaviduriai apskritimai – šiame darbe tiriamos žvaigždės.

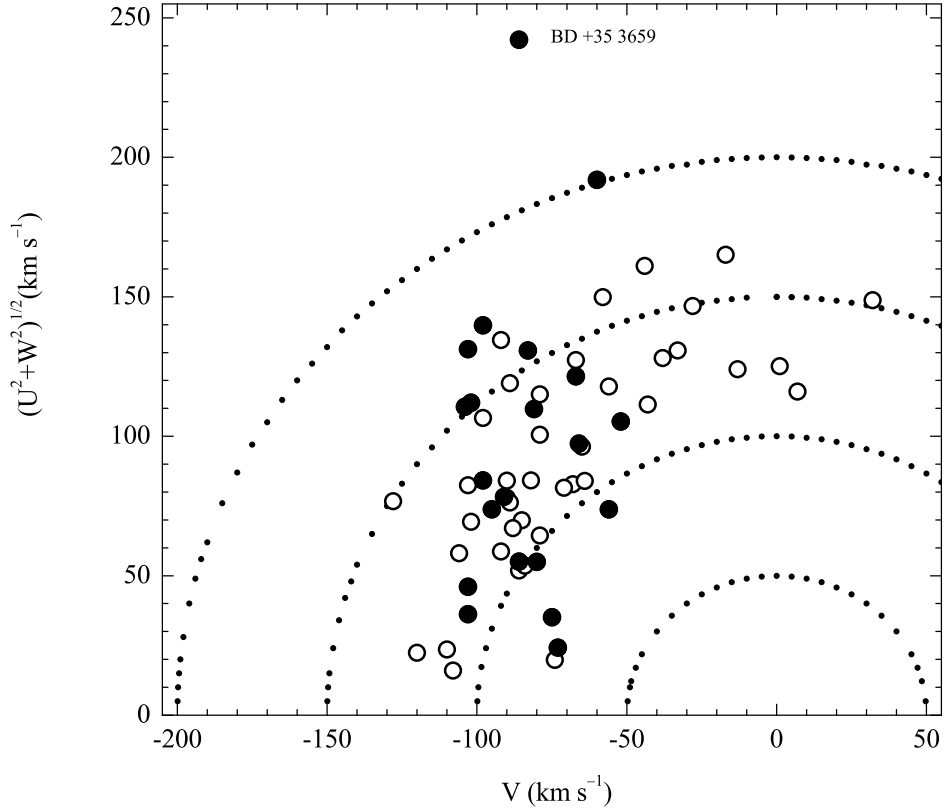
$[\text{Fe}/\text{H}] = -1.45$. Ši nemetalingiausia 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždė išsiskiria ir kinematiniais parametrais. Žvaigždė išsiskiria ekscentricitetu, greičiu ir amžiumi (žiūrėti 2.2 lentelę bei 1.2, 3.1 ir 3.2 paveikslus).

3.1 paveiksle atidėta ekscentriciteto priklausomybė nuo metalingumo $[\text{Fe}/\text{H}]$. Metalingumas žvaigždėms, kurios tiriamos šiame darbe, nustatytas mūsų, o ekscentriciteto reikšmės paimtos iš Holmberg ir kt. (2009) katalogo. ŽKA kinematinės grupės ekscentriciteto vidurkis yra 0.40 ± 0.07 , tuo tarpu, kaip matome iš 3.1 paveikslo, žvaigždės BD +35 3659 ekscentricitetas yra $e = 0.65$. Šios žvaigždės ekscentricitetas yra didesnis, o tokios ekscentriciteto reikšmės pastebimos sferoido žvaigždėms (Sales ir kt. 2009). Šie skirtumai leidžia daryti išvadą, kad žvaigždė BD +35 3657 nėra 3-osios ŽKA kinematinės grupės narė.

Ekscentricitetas yra apibrėžiamas kaip:

$$e = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max} + R_{min}}, \quad (3.1)$$

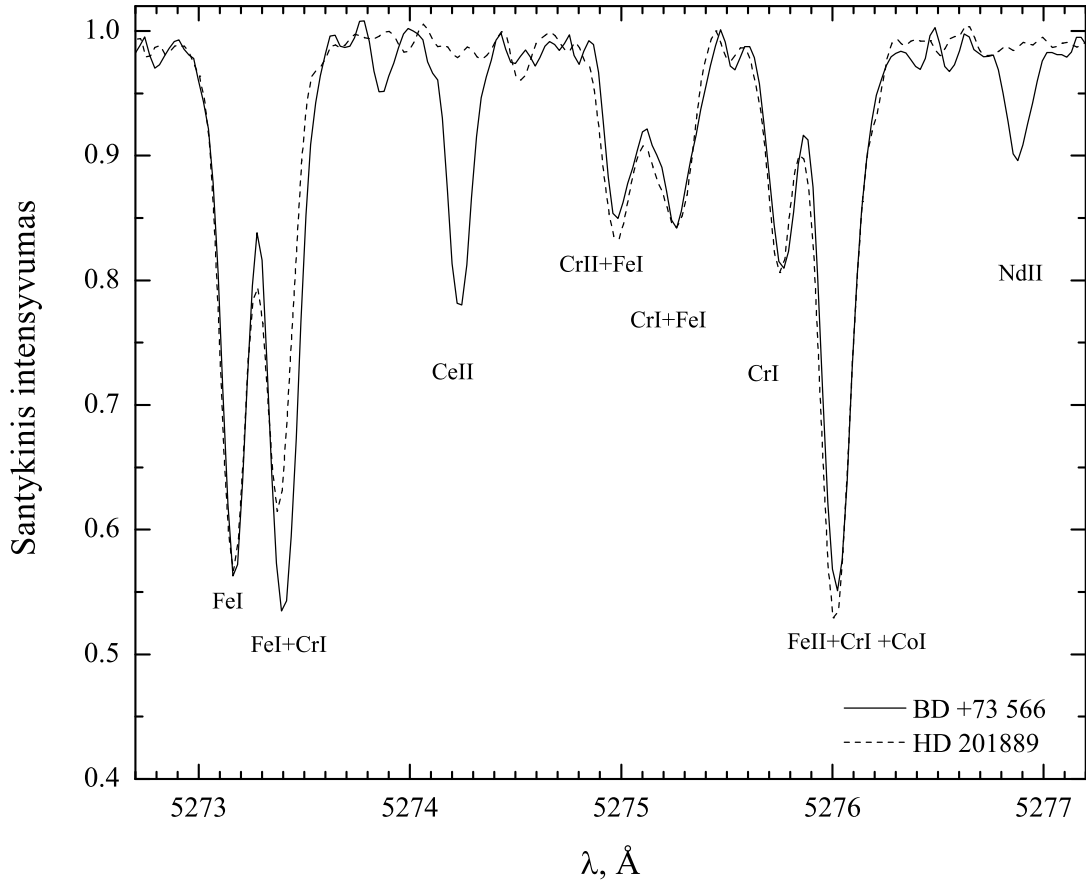
čia R_{max} , R_{min} yra apogalaktinis ir perigalaktinis atstumai.



3.2 pav.: 3-osios ŽKA kinematinės grupės (apskritimai) ir žvaigždžių, nagrinėtų šiame darbe (pilnaviduriai apskritimai), Toomre diagrama.

3.1 paveiksle matyti, kad analizuojamos 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių ekscentricitetas ($0.28 < e < 0.55$) nepriklauso nuo metalingumo.

3.2 paveiksle atidėta taip vadinama Toomre diagrama. ŽKA kinematinės grupės žvaigždės BD +35 3659 vertikaliosios ir radialiosios greičių komponentių vertė yra didesnė nei kitų 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių. Visos 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždės, išskyrus žvaigždę BD +35 3659, Saulės aplinkoje juda panašiu greičiu kaip ir storojo Galaktikos disko žvaigždės. Tačiau identifikuotos kinematinės grupės žvaigždės skiriasi savo kinematika nuo disko žvaigždžių, ypač vertikaliaja (z) greičio komponente (žiūrėti 1.4, 1.5 paveikslus). Kaip pastebėjo ir Helmi ir kt. (2006), naujai identifikuotos kinematinės žvaigždžių grupės negali būti priskiriamos kuriai nors vienai tradicinei Galaktikos komponentei. Išvada padaryta remiantis metalingumo pasiskirstymu ir kinematika.



3.3 pav.: NOT–FIES spektrų fragmentai žvaigždei HD201889 bei *s*- ir *r*-procesų elementais praturtintai žvaigždei BD +73 566. Spektrai yra nubrėžti vienas ant kito, kad matytųsi spektrinių linijų gylių skirtumai.

Nustatėme, kad viena 3-osios ŽKA grupės žvaigždė yra praturtinta *s*- ir *r*-procesų elementais. 3.3 paveiksle matoma, kad žvaigždė BD +73 566 turi daug stipresnes *s*- ir *r*-procesų elementų linijas (žiūrėti 3.3 paveiksle Ce II, Nd II) ir yra gausesnė šiais cheminiais elementais, nei kitos 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždės (žiūrėti A priede lentelę A.2). Remiantis Beers ir kt. (2005) darbu, žvaigždė BD +73 566, kurios bario gausa atžvilgiu geležies $[Ba/Fe] = 1.62$ ir atžvilgiu europio $[Ba/Eu] = 0.98$, yra priskiriama prie *s*-proceso elementais praturtintų žvaigždžių.

3.4. Lengvieji ir geležies grupės cheminiai elementai

Deguonis ir α -elementai (Mg, Si, Ca, Ti) yra pagrindiniai galaktikų nukleosintezės ir evoliucijos tyrimuose naudojami cheminiai elementai. Tarpžvaigždinė medžiaga deguonimi ir α -elementais daugiausia yra praturtinama sprogstant masyvioms žvaigždėms ($M \gtrsim 10 M_{\odot}$). Šios, taip vadinamos II tipo supernovos (SN II), evoliucionuoja ir sprogs per labai trumpą laiko intervalą ($\tau \lesssim 3 \cdot 10^7$ metų).

Masyviose žvaigždėse vyksta anglies degimo reakcija, kurios metu susidaro neonas ir magnis, o deguonies degimo metu – fosforas, silicis ir siera. Evoliucijos pabaigoje galiausiai prasideda silicio degimas. Silicio degimo grandinėje greitai susiformuoja siera, argonas, kalcis, titanas, chromas, geležis ir nikelis. O tuo tarpu didžioji dalis geležies pagaminama vidutinės masės žvaigždžių, kurios evoliucionuoja ir sprogs kaip Ia tipo supernovos (SN Ia), bet jau per ilgesnį laiko intervalą: $\tau \gtrsim 10^7 - 10^9$ metų (Tinsley 1976; Wyse ir Gilmore 1988; Nissen ir Edvardsson 1992; Matteucci 2003). Kiti lengvieji geležies grupės ($21 \leq Z \leq 28$) elementai (Sc, V, Cr, Co, Ni) yra tiek SN Ia, tiek SN II tipo supernovų produktai.

Žinant α -elementų gausą, galime nusakyti pradinių masių funkcijos (angl. initial mass function, IMF) kitimą. Daugėjant masyvių žvaigždžių sprogiams, gausėja ir α -elementų. Remiantis α -elementų gausa taip pat galime nusakyti žvaigždžių formavimosi greitį (angl. stars formation rate, SFR) (McWilliam 1997).

Edvardsson ir kt. (1993) aukštos skiriamosios gebos ($R \approx 60000$) spektriniai tyrimai pateikė įrodymų, kad α -elementų ir geležies gausos santykis $[\alpha/\text{Fe}]$ disko žvaigždėms su tuo pačiu metalingumu yra skirtingas. Tačiau šį $[\alpha/\text{Fe}]$ išsibarstymą Edvardsson ir kt. (1993) susiejo su žvaigždžių formavimosi greičiu, kuris mažėja priklausomai nuo galaktocetrinio atstumo. Kitaip tariant, SN Ia tipo supernovos geležimi praturtina Galaktikos vidinį diską daugiau nei išorinį.

Gratton ir kt. (1996) buvo vieni pirmųjų, kurie α -elementų ir geležies gausos santykio $[\alpha/\text{Fe}]$ išsibarstymą prie to pačio $[\text{Fe}/\text{H}]$ įvardijo, kaip dviejų skirtingų

Galaktikos disko komponentių (storajo ir plonojo) žvaigždžių cheminių sudėčių pasiskirstymą. Po metų Gratton ir kt. detaliau tyrė šiuos skirtumus ir interpretavo tai, kaip staigaus žvaigždžių formavimosi greičio sumažėjimą pereinamuoju storajo ir plonojo disko fazių laikotarpiu, leidžiantį SN Ia tipo supernovoms tarpžvaigždines dujas praturtinti geležimi, nedidinant α -elementų ir geležies gausos santykio $[\alpha/\text{Fe}]$, dėl SN II tipo supernovų trūkumo.

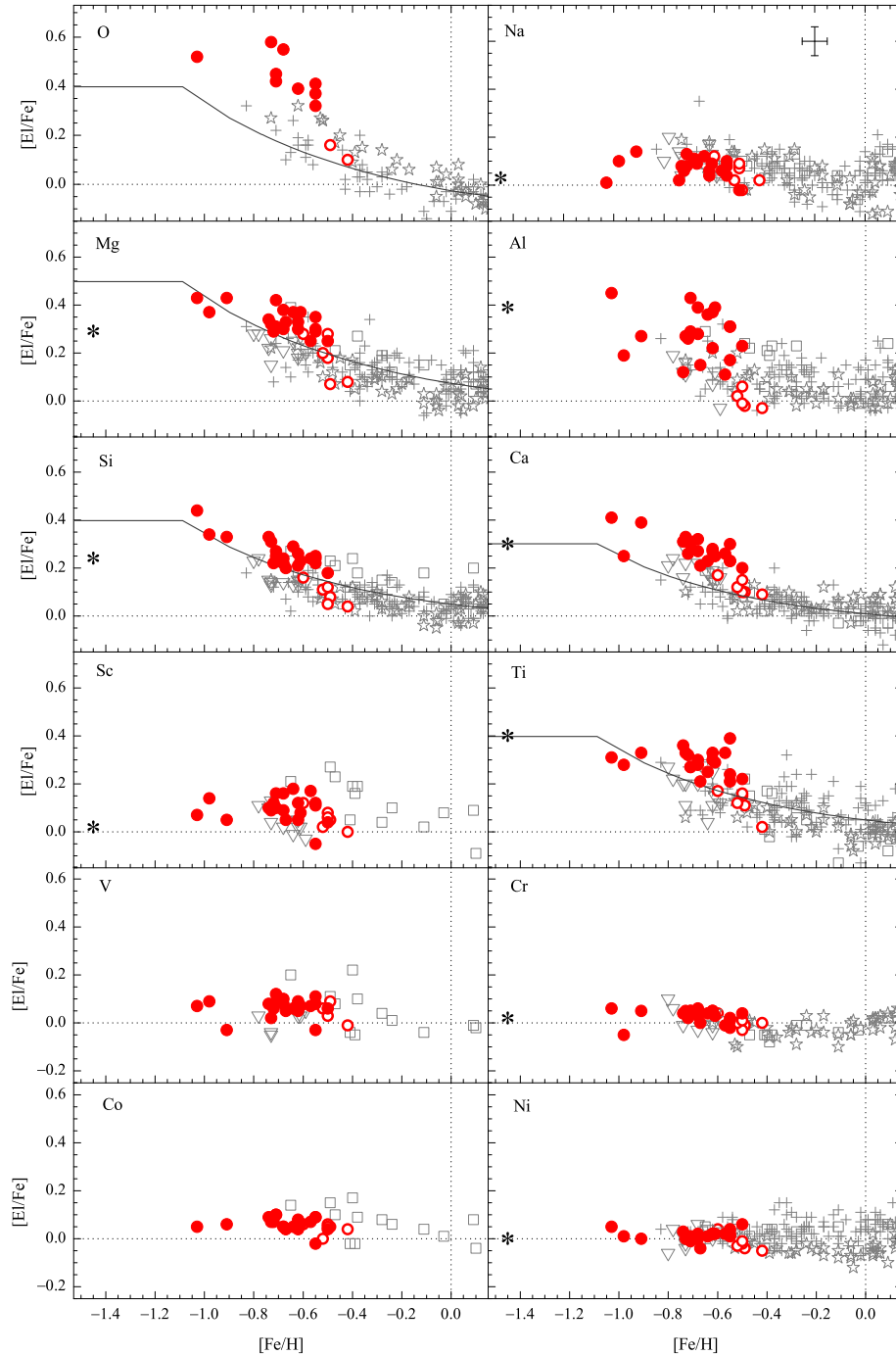
Vėlesni cheminės žvaigždžių atmosferų sudėties tyrimo darbai suteikė daug aiškesnį, storajo ir plonojo Galaktikos diskų cheminės sudėties pasiskirstymo vaizdą (Fuhrmann 1998; Prochaska ir kt. 2000; Tautvaišienė ir kt. 2001; Reddy ir kt. 2003, 2006; Bensby ir kt. 2005; Zhang ir Zhao 2006).

Taigi α -elementų ir geležies gausos santykis $[\alpha/\text{Fe}]$ parodo žvaigždžių formavimosi greitį ir laiko skalę. Jei žvaigždės susiformavo skirtingose tarpžvaigždinėse aplinkose, jos turės skirtingą α -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).

3.4 paveiksle pateikiame 3-osios ŽKA kinematinės grupės ir plonojo Galaktikos disko nykštukių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausų palyginimus. Plonojo Galaktikos disko nykštukių gausų rezultatai 3.4 paveiksle yra paimti iš Edvardsson ir kt. (1993), Bensby ir kt. (2005), Reddy ir kt. (2006), Zhang ir Zhao (2006) darbų, o Galaktikos cheminės evoliucijos modeliai Saulės aplinkoje – iš Pagel ir Tautvaišienė (1995) darbo.

Edvardsson ir kt. (1993) bei Zhang ir Zhao (2006) darbuose, kitaip nei plonojo disko Bensby ir kt. (2005) bei Reddy ir kt. (2006) darbuose, žvaigždės nebuvo suskirstytos, kuriai Galaktikos komponentei (plonajam, storajam ar sferoidui) priklauso. Informaciją apie žvaigždžių priklausomybę Galaktikos komponentėms paimta iš Trevisan ir kt. (2011) darbo, kuriame naudojamas toks pat kinematinis žvaigždžių pasiskirstymo metodas kaip ir Bensby ir kt. (2005) bei Reddy ir kt. (2006) darbuose. Pagal šį metodą, norint priskirti žvaigždes kuriai nors Galaktikos komponentei, remiamasi šiomis formulėmis:

$$p_{\text{plonasis}} = f_1 \frac{p_1}{p}, \quad p_{\text{storasis}} = f_2 \frac{p_2}{p}, \quad p_{\text{sferoidas}} = f_3 \frac{p_3}{p}, \quad (3.2)$$



3.4 pav.: 3-osios ŽKA kinematinės grupės (pilnaviduriai apskritimai) ir plonojo Galaktikos disko žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės elementų gausų palyginimai. Plonojo galaktikos disko rezultatai: Edvardsson ir kt. (1993, plusai), Bensby ir kt. (2005, žvaigždės), Reddy ir kt. (2006, kvadratai), Zhang ir Zhao (2006, trikampiai). Galaktikos cheminės evoliucijos modelis – Pagel ir Tautvaišienė (1995) Saulės aplinkoje pavaizduotas ištisine linija. Palyginamųjų plonojo disko žvaigždžių rezultatai pavaizduoti tuščiaviduriais apskritimais. Vidutinės paklaidos pavaizduotos natrio grafike. Žvaigždute pavaizduota žvaigždė BD +35 3659, kuri nėra priskiriama kinematinei grupei.

čia p_{plonasis} , p_{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:

$$p_i = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{U_i} \sigma_{V_i} \sigma_{W_i}} \exp \left[-\frac{U^2}{2\sigma_{U_i}^2} - \frac{(V - V_{\text{lag}})^2}{2\sigma_{V_i}^2} - \frac{W^2}{2\sigma_{W_i}^2} \right], \quad (3.3)$$

čia V_{lag} yra žvaigždžių asimetrinis greitis.

Taigi, visos plonojo disko žvaigždės, naudojamos palyginimui su 3-ąja ŽKA kinematinė grupė, yra atrinktos taikant vienodus atrankos kriterijus.

3.4 paveiksle matyti, kad 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių atmosferų deguonies ir α -elementų gausos yra padidėjusios, lyginant su plonojo Galaktikos disko žvaigždžių gausomis. Panašus deguonies ir α -elementų gausos padidėjimas stebimas ir storjo Paukščių Tako galaktikos disko žvaigždėms (Fuhrmann 1998; Prochaska ir kt. 2000; Tautvaišienė ir kt. 2001; Bensby ir kt. 2005; Reddy ir kt. 2006).

Helmi ir kt. (2006), naudodami teorines izochronas HR diagramoje buvo įtarę, kad identifikuotos kinematinės grupės gali būti praturtintos α -elementais. Mūsų darbo rezultatai 3-ajai ŽKA kinematinėi grupei patvirtina šią Helmi ir kt. išvadą.

O tuo tarpu geležies grupės elementų gausos (žiūrėti 3.4 paveikslą), nustatytos 3-ajai ŽKA kinematinėi grupei mūsų darbe, sutampa su plonojo Galaktikos disko nustatytomis gausomis.

3.5. Sunkieji cheminiai elementai

Sunkiųjų cheminių elementų „gamyba“ vyksta geležies grupės elementų branduoliams „užgrobiant“ neutronus (n -pagavimo reakcijos). Neutronų pagavimo

reakcijos išskiriamos į du procesus. s -procesas (taip vadinamas lėtasis procesas) vyksta, kai neutronai pagaunami lėtai, o jų srautas mažas. Kitas procesas yra greitis r -procesas, kuriame neutronų srautas yra labai didelis.

Sunkiųjų cheminių elementų kaip ir α -elementų gausos, yra jautrūs Galaktikos evoliucijos indikatoriai (Pagel ir Tautvaišienė 1997; Tautvaišienė ir kt. 2007; Sneden ir kt. 2008; Tolstoy ir kt. 2009).

Neutronų pagavimo reakcijos sukuria daugiau nei 50 periodinės lentelės elementų, kurie yra tarp geležies grupės ir aktinidų. Pirmą kartą detali Paukščių Tako galaktikos n -pagavimo elementų cheminė evoliucija Saulės aplinkoje buvo sumodeliuota Pagel ir Tautvaišienės (1997). n -pagavimo cheminiai elementai yra gaminami abiejuose s - ir r -procesuose (Burbidge ir kt. 1957). Neutronų tankis yra skirtingas tarp s - ir r -procesų. Tipinės neutronų tankio reikšmės s -proceso metu yra $N_n \lesssim 10^8 \text{ ncm}^{-3}$ (Busso ir kt. 1999). Daug didesni neutronų tankiai ($10^{24} - 10^{28} \text{ ncm}^{-3}$) yra r -procesu (Kratz ir kt. 2007). Neutronų tankių skirtumai reikalauja skirtingų astrofizikinių terpių s - ir r -procesų cheminių elementų sintezei.

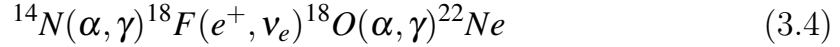
Stiprus neutronų srautas, reikalingas r -procesui, ir kaip manoma, vykstantis supernovų sprogo metu, kyla iš dviejų šaltinių. Neutronų srautas susidaro aplink atsiskiriančią nuo išsisklaidančio apvalkalo neutroninę žvaigždę, o kitas šaltinis atsiranda smūginės bangos įkaintintame helio sluoksnyje, kuriame yra sužadinas neutronų pagaminimas.

s -procesui vykti reikia mažos ($1-3 M_{\odot}$) ir vidutinės masės ($4-7 M_{\odot}$) žvaigždžių, o n -pagavimas vyksta daugybę metų. Mažos masės žvaigždėse ši reakcija vyksta raudonųjų milžinių gelmėse, o vidutinės masės žvaigždėse n -pagavimas vyksta, kai žvaigždės yra asimptotinėje milžinių sekoje su pasikartojančia helio degimo pulsacija vidiniame žvaigždės sluoksnyje.

s -procesas yra išskiriamas į dvi dedamąsias – silpnąją ir pagrindinę komponentes. Yra gerai žinoma, kad masyvos žvaigždės yra atsakingos už silpnosios komponentės s -proceso branduolių sintezę (pvz.: Sr, Y ir Zr) (Lamb ir kt. 1977; Raiteri ir kt. 1991, 1993; The ir kt. 2000). O mažos masės žvaigždės yra atsakingos už pagrindinės komponentės s -proceso sunkesniųjų elementų (pvz.: Ba ir sunkesni) gamybą (Busso ir kt. 1999).

Peters (1968) buvo pirmasis, kuris pasiūlė idėją, kad pagrindinį neutronų

srautą sukeliantis s -procesas masyviose žvaigždėse yra $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reakcija. ^{22}Ne susidaro iš CNO ciklo produkto ^{14}N . Azoto 14 izotopas žybsnio metu susimaišo su sluoksniu, kuriame dega helis, reakcijų grandinėle:



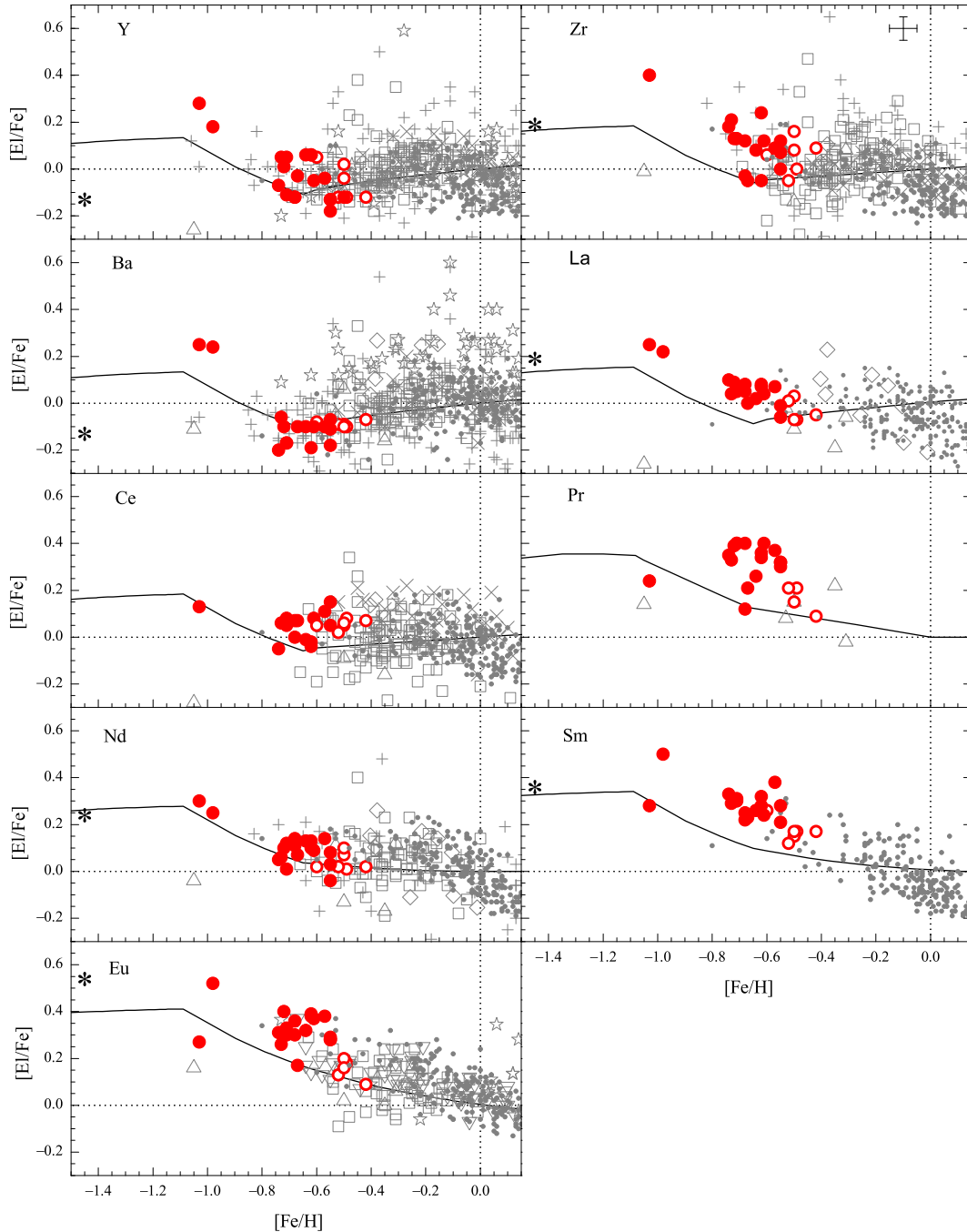
Helinėje šerdyje, kylant temperatūrai $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ reakcijoje susidariusius neutronus užgrobia geležies grupės branduoliai, ir taip s -procesu pagaminami masyviausi stabilių cheminių elementų branduoliai.

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

3-osios ŽKA kinematinės grupės ir palyginamųjų plonojo Galaktikos disko žvaigždžių gausų $[\text{El}/\text{Fe}]$ rezultatai yra pavaizduoti 3.5 paveiksle. Rezultatų palyginimui tuščiaviduriais apskritimais atidėjome palyginamąsias plonojo disko žvaigždes, nustatytas šiame darbe. Sunkiųjų cheminių elementų gausų rezultatus lyginame su plonojo disko gausų rezultatais iš 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) darbų. Taip pat nustatytas gausas lyginome su Galaktikos cheminės evoliucijos modeliu Saulės aplinkoje iš Pagel ir Tautvaišienė (1997) darbo.

3.5 paveiksle matyti, kad 3-osios ŽKA grupės žvaigždžių cheminių elementų ($[\text{Y}/\text{Fe}]$, $[\text{Ba}/\text{Fe}]$), daugiausia pagaminamų s -procesu, gausos yra panašios į plonojo Galaktikos disko nykštukių su tuo pačiu metalingumu cheminių elementų gausas, bei Galaktikos cheminės evoliucijos modeliu Saulės aplinkoje. Tačiau elementų ($[\text{Pr}/\text{Fe}]$, $[\text{Sm}/\text{Fe}]$, $[\text{Eu}/\text{Fe}]$), daugiausia pagaminamų r -procesu, gausos yra padidėjusios lyginant su plonuoju Galaktikos disku ir Galaktikos cheminės evoliucijos modeliu Saulės aplinkoje. 3-osios ŽKA kinematinės grupės ir palyginamųjų plonojo Galaktikos disko žvaigždžių cirkonio, lantano, cerio ir neodimio gausos yra apytikriai vienodos.

Panašus cheminių elementų gausų pasiskirstymas yra nustatytas ir storjo Paukščių Tako galaktikos disko žvaigždėms (Mashonkina ir Gehren 2000; Prochaska ir kt. 2000; Tautvaišienė ir kt. 2001; Bensby ir kt. 2005; Reddy ir kt.



3.5 pav.: 3-osios ŽKA kinematinės grupės (pilnaviduriai apskritimai) ir palyginamųjų plonojo disko žvaigždžių (tuščiaviduriai apskritimai) atmosferų sunkiųjų elementų gausių rezultatai. Plonojo Galaktikos disko rezultatai iš: Edvardsson ir kt. (1993, plusai), Gratton ir Sneden (1994, trikampiai), Koch ir Edvardsson (2002, žemyn paversti trikampiai), Bensby ir kt. (2005, žvaigždės), Reddy ir kt. (2006; 2003, kvadratai), Brewer ir Carney (2006, rombais), Mashonkina ir kt. (2007, kryželiai), Mishenina ir kt. (2013, taškai) darbų. Galaktikos cheminės evoliucijos modelis – Pagel ir Tautvaišienė (1997) Saulės aplinkoje pavaizduotas ištisine linija. Vidutinės paklaidos pavaizduotos cirkonio grafike. Žvaigždute pavaizduota žvaigždė BD +35 3659, kuri nėra priskiriama kinematinei grupei.

2006; Reddy ir Lambert 2008; Mishenina ir kt. 2013).

3.5 paveiksle žvaigždės BD +35 3659 gausos yra pažymėtos žvaigždute ir laikoma, kad ši žvaigždė nėra kinematinės grupės narė. Žvaigždė BD +73 566 yra praturtinta s - ir r -procesų elementais, o šios žvaigždės gausos nėra atidėtos 3.5 paveiksle.

3.6. Amžiaus pasiskirstymas

Kinematiškai identifikuotai ŽKA žvaigždžių grupei taip pat patiksliname ir amžiaus įvertinimą. Holmberg ir kt. (2007) katalogo duomenimis 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių amžiaus vidurkis yra apie 14 mlrd. m.

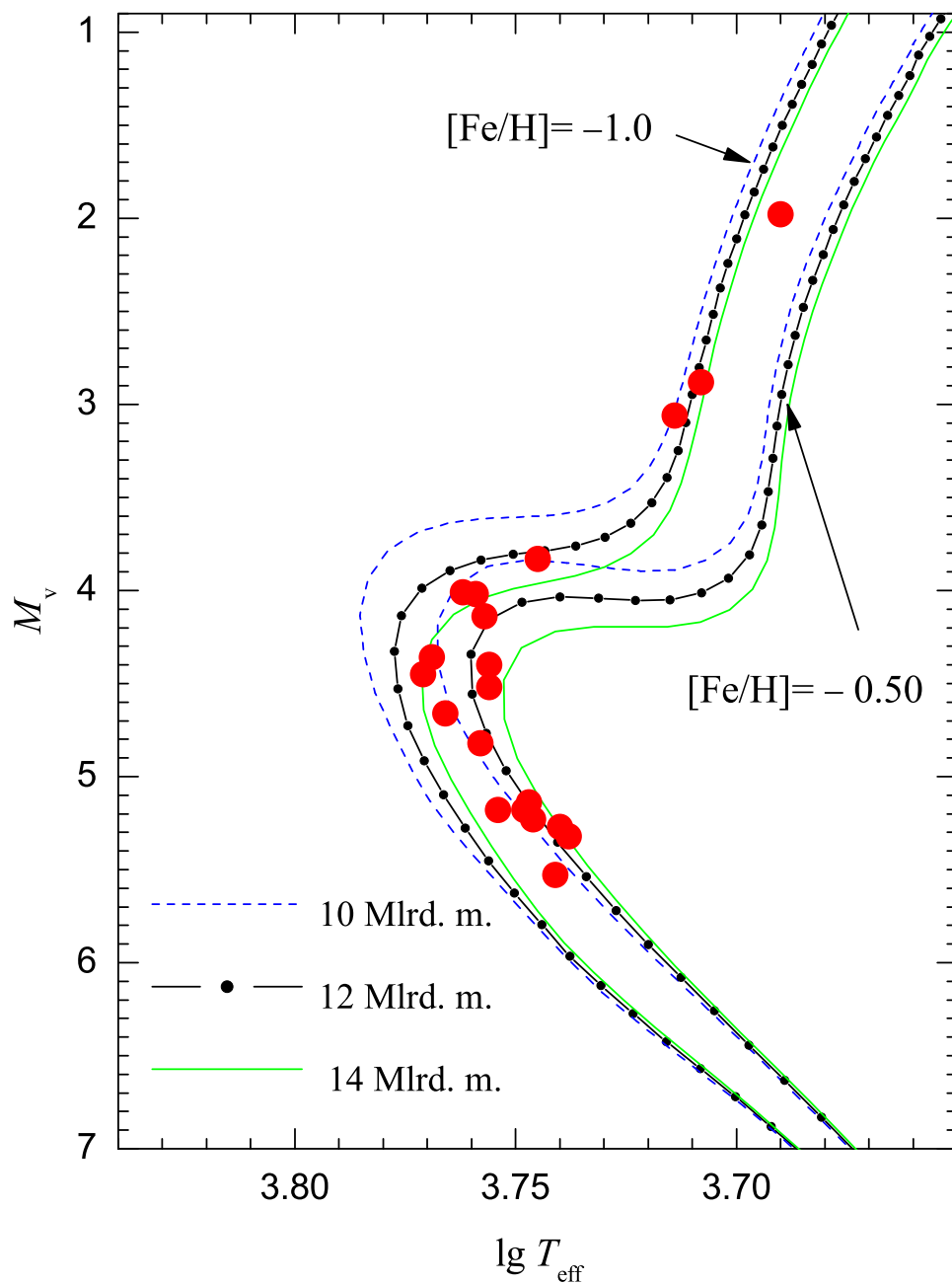
Paanalizavus skirtingas duomenų bazes pasirinkome Yonsei – Yale¹ izochronų duomenų bazę (Yi ir kt. 2001; Demarque ir kt. 2004). Yonsei – Yale izochronų bazėje galima pasirinkti izochronas su įvairiomis $[\text{Fe}/\text{H}]$ bei $[\alpha/\text{Fe}]$ vertėmis.

3.6 paveiksle pavaizduota 3-osios ŽKA kinematinės grupės HR diagrama. Ordinačių ašyje atidėtas žvaigždžių atmosferų efektinės temperatūros logaritmas. Kaip jau minėjome, darbe T_{eff} nustatyta remiantis aukštos skiriamosios gebos spektrų analize. Abscisių ašyje atidėtas absoliutinis ryškis M_V iš Holmberg ir kt. (2009) katalogo. Naudojome trijų skirtingų amžių (10, 12 ir 14 mlrd. metų) žvaigždžių evoliucijos izochronas su metalingumais $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.00$ ir $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.50$, bei $[\alpha/\text{Fe}] = 0.40$. Pasirinkome būtent tokias $[\text{Fe}/\text{H}]$ reikšmes, nes jos apibrėžia 3-osios ŽKA kinematinės grupės mažiausią ir didžiausią metalingumą, o $[\alpha/\text{Fe}]$ reikšmė – praturtintą alfa elementais populiaciją. 3-osios ŽKA kinematinės grupės metalingumo vidurkis $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle = 0.69 \pm 0.05$.

3.6 paveiksle analizuojant HR diagramą, matoma, kad 3-osios ŽKA kinematinės žvaigždžių grupės amžių geriausiai reprezentuoja 12 mlrd. m. teorinė Yonsei – Yale žvaigždžių evoliucijos izochrona.

HR diagramoje paklaidos yra susijusios su T_{eff} ir M_V nustatymo paklaidomis, kurios darbe nėra didelės (Stonkutė ir kt. 2012). Maksimali $\log T_{\text{eff}}$ paklaida yra apie 0.01. Vidutinės atstumo nustatymo paklaidos Holmberg ir kt. (2009) kataloge yra apie 10 % ($\sigma_{M_V} < 0.20$ mag).

¹<http://www.astro.yale.edu/demarque/yyiso.html>



3.6 pav.: 3-osios ŽKA kinematinės grupės 20 žvaigždžių HR diagrama. Skirtingų amžių (10, 12, 14 mlrd. metų) Yonsei – Yale izochronos su metalingumais $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.00$ ir $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.50$. Izochronos yra su $[\alpha/\text{Fe}] = 0.40$.

3.4 lentelė: 3-osios ŽKA grupės palyginimas su storuoju Galaktikos disku.

[El/Fe]	Mūsų–B05 ^(a)	Mūsų–R06 ^(b)	Mūsų–M13 ^(c)
[O/Fe]	0.00	...	−0.03
[Mg/Fe]	−0.01	0.02	0.01
[Si/Fe]	0.03	0.03	−0.03
[Ca/Fe]	0.06	0.10	0.03
[Ti/Fe]	0.05	0.09	...
[Y/Fe]	0.05	−0.08	−0.08
[Zr/Fe]	...	...	−0.06
[Ba/Fe]	−0.10	0.00	−0.12
[La/Fe]	...	...	0.04
[Ce/Fe]	...	−0.02	0.04
[Nd/Fe]	...	−0.11	−0.10
[Sm/Fe]	...	...	0.06
[Eu/Fe]	−0.05	−0.03	−0.06

- (a) B05 – 10 storjo disko žvaigždžių iš Bensby ir kt. (2005);
(b) R06 – 44 storjo disko žvaigždės iš Reddy ir kt. (2006);
(c) M13 – 6 storjo disko žvaigždės iš Mishenina ir kt. (2013).

3.7. Sąsaja su storuoju Galaktikos disku

3-osios ŽKA kinematinės grupės deguonies, α elementų ir r -proceso elementų gausos yra padidėjusios lyginant su plonuoju Galaktikos disku. Kaip jau minėjome, panašus gausų pasiskirstymas pastebimas ir storajame Galaktikos diske. 3.4 lentelėje pateikiame 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių vidutinių gausų $\langle [El/Fe] \rangle$ reikšmių skirtumus nuo storjo Galaktikos disko gausų metalingumo intervale $-0.80 < [Fe/H] < -0.50$. Šiame metalingumo intervale yra 85 % 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių. Storjo Galaktikos disko žvaigždžių vidutinės gausos nurodytame metalingumo intervale buvo paimtos iš Bensby ir kt. (10 storjo disko žvaigždžių, 2005), Reddy ir kt. (44 storjo disko žvaigždės, 2006) bei Mishenina ir kt. (6 storjo disko žvaigždės, 2013) darbų. Palyginus vidutinių gausų skirtumus, matoma, kad 3-osios ŽKA kinematinės grupės ir storjo Galaktikos disko žvaigždės, metalingumo intervale $-0.80 < [Fe/H] < -0.50$, yra vienodos cheminės sudėties. Skirtumų nuokrypiai nesiekia žvaigždžių atmosferų cheminės sudėties nustatymo paklaidų.

Ką galėtų reikšti šis deguonies, α -elementų ir r-proceso elementų gausų panašumas į storojo Galaktikos disko žvaigždžių atmosferų gausas? Lengviau į šį klausimą galima būtų atsakyti, jeigu būtų žinoma storojo Galaktikos disko kilmė. Iki šiol Galaktikos storojo disko kilmė yra diskusijų objektas (van der Kruit ir Freeman 2011).

Storojo disko žvaigždės yra senos, palyginus su plonojo Galaktikos disko žvaigždžių amžiumi, o žvaigždžių prigimtis iki šiol nėra aiški. Žvaigždės galėjo susiformuoti Paukščių Tako galaktikoje, bet taip pat galėjo atkelti iš kitų galaktikų, kai jos įkrito į mūsų Galaktiką, evoliucijos eigoje. Yra ir mokslininkų grupių, kurie teigia, kad iš viso nereikėtų išskirti tokios disko komponentės, kaip storasis diskas (Bovy ir kt. 2012).

Remiantis stebėjimų ir modeliavimų duomenimis nustatyta, kad Galaktikos diskas sudarytas iš storojo ir plonojo diskų. Galaktikos disko komponentių žvaigždės pasižymi skirtingomis chemodinaminėmis savybėmis (Gratton ir kt. 1996; Tautvaišienė ir kt. 2001; Bensby ir kt. 2005; Reddy ir kt. 2003, 2006; Ramírez ir kt. 2007). Toliau apžvelgsime siūlomus storojo Galaktikos disko formavimosi scenarijus.

Vienas iš pirmųjų scenarijų, bandantis paaiškinti storojo disko žvaigždžių chemodinaminius skirtumus nuo plonojo disko žvaigždžių, yra nykštukinių palydovinių galaktikų akrecija Galaktikos formavimosi pradžioje (angl. *accretion*) (Abadi ir kt. 2003; Martin ir kt. 2004; Meza ir kt. 2005; Helmi ir kt. 2006). Šis scenarijus vadovaujasi Λ CDM hierarchiniu galaktikų formavimosi modeliu, kuris numato, kad pirmiausia susidarė mažos struktūros, kurios vėliau susijungė, sudarydamos didesnes. Žvaigždžių kinematika šiame scenarijuje priklausys nuo įsiliejančių objektų polinkio kampo bei jų masės. Pagal Abadi ir kt. (2003), apie 60 % storojo disko žvaigždžių yra atkeliavusių iš palydovinių galaktikų, o jų orbitos dėl dinaminės trinties pasidarė ovalios.

Kitame scenarijuje storasis diskas susiformavo tuomet, kai jau egzistuojantis plonasis Galaktikos diskas pamažu susijungė su mažos masės nykštukinėmis galaktikomis (angl. *minor – mergers*). Nykštukinės galaktikos, veikiamos disko gravitacijos, įsiliejo į plonąjį diską, taip jį „storindamos“ (Quinn ir kt. 1993; Kazantzidis ir kt. 2008; Villalobos ir Helmi 2008, 2009).

Kitas pasiūlytas formavimosi scenarijus, kuriame bandoma paaiškinti sto-

rojo Galaktikos disko susiformavimą atakuojant nykštukinėms galaktikoms, yra plačiai diskutuojamas Jones ir Wyse (1983); Brook ir kt. (2004, 2005); Dierickx ir kt. (2010); Wilson ir kt. (2011) darbuose. Jame Galaktikos storasis diskas formavosi iš praturtintų dujomis galaktikų įsiliejimų (angl. *gas-rich mergers*). Šis scenarijus numato, kad Galaktikos evoliucijos eigoje, storojo disko žvaigždės yra gimusios *in situ*², tačiau jų formavimasis vyksta iš užgrobtų negalaktinės kilmės praturtintų dujų. Taip susiformuoja žvaigždės iš „šviežiai“ įkritusių dujų. Natūralu, kad tuomet tarpžvaigždinė medžiaga nebus praturtinta SN Ia tipo supernovų sprojimais, o pagrindiniai tarpžvaigždinės medžiagos „teršėjai“ bus masyvių žvaigždžių galutiniai produktai – SN II tipo supernovos. Vėliau likusios dujos, veikiamos Galaktikos gravitacijos ir sukimosi, sukris į plokštumą, kurioje susidarys plonojo disko žvaigždės. Taip galėtų įvykti po keleto milijardų metų, kai pirma susiformuoja storasis diskas. Per šį laiką, mažų masių žvaigždės suspės susiformuoti ir susprogti kaip Ia tipo supernovos. Tuomet tarpžvaigždinė medžiaga bus praturtinta dideliais kiekiais geležies ir [O/Fe] gausų santykis staigiai sumažės dėl masyvių žvaigždžių trūkumo.

Čia aprašyti formavimosi scenarijai, kuriems įvykti reikalinga išorinė sistema, šaltinis. Tačiau būta ir kitų galimų storojo disko susiformavimo scenarijų, kuriems paaiškinti išoriniai trikdžiai (šaltiniai) nėra reikalingi. Storojo disko žvaigždės yra gimusios plonajame Galaktikos diske arba centriniame telkinyje ir vėliau, veikiant vidiniams mechanizmams, keliauja toliau nuo Galaktikos plokštumos (Bournaud ir kt. 2009; Forbes ir kt. 2012). Bournaud ir kt. (2009) straipsnyje teigiama, kad audringi, turbulentiniai pirmaprūdžiai diskai išsklaidė toli nuo plokštumos dalį dujų ir žvaigždžių, taip sudarydami storuosius galaktikų diskus, tokius, kokius šiandien mes stebime. Įdomu yra tai, kad ši, iš vidaus į išorę vykstanti plonojo disko evoliucija, yra mažesnio storojo disko skersmens susiformavimo pasekmė. Scenarijus numato, kad storasis diskas yra chemiškai homogeniškas, taip pat kaip ir akrecijos, ir praturtintų dujomis nykštukinių galaktikų įsiliejimų scenarijuose.

Radialinė žvaigždžių migracija (angl. *radial migration*) yra dar vienas pasiūlytas storojo Galaktikos disko formavimosi scenarijus, kuriame taip

² „toje vietoje“ (lot. k.)

pat nėra išorinių veiksnių. Galaktikoje žvaigždės migruoja dėl spiralinių vijų ar skersės sukkelto rezonanso (Roškar ir kt. 2008; Schönrich ir Binney 2009; Minchev ir kt. 2009). Šis procesas yra susijęs su žvaigždžių kampinio judesio kiekio momento persiskirstymu diske. Jo pasekmė – disko skersmens padidėjimas. Pagal šį scenarijų, dauguma Saulės aplinkoje esančių žvaigždžių į dabartinę savo vietą Galaktikoje atkeliavo iš vidinio Galaktikos skersmens, įgydamos didesnę vertikalųjį greitį, esant silpnesniam Galaktikos potencialui pakraščiuose, ir taip išlaikydamos pradinę cheminę sudėtį iš tos tarpžvaigždinės medžiagos, kurioje šios žvaigždės buvo susiformavusios. Šiame pasiūlytame scenarijuje Galaktikos diskas yra apibūdinamas tolygiomis chemodinaminėmis savybėmis, neišskiriant plonojo ir storąjo Galaktikos diskų.

Sales ir kt. 2009 atliko paprastą testą, kuris remiasi Saulės aplinkoje esančių storąjo Galaktikos disko žvaigždžių ekscentricitetų pasiskirstymu, leidžiančiu įvertinti dominuojantį storąjo disko formavimosi mechanizmą.

Dierickx ir kt. (2010) bei Lee ir kt. (2011) analizuodami Sloan apžvalgos SEGUE šešiamatės fazinės erdvės informaciją ir metalingumus, nustatė storąjo Galaktikos disko žvaigždžių ekscentricitetų pasiskirstymus, pagal kuriuos galima atskirti, koks scenarijus galėjo suformuoti storąjį diską.

Abiejų grupių (Dierickx ir kt. bei Lee ir kt.) rezultatai parodė, kad nustatytas ekscentricitetų pasiskirstymas yra nesuderinamas su radialinės migracijos scenarijumi, nes stebėjimų duomenys rodo, kad yra daugiau žvaigždžių su didesniais arba labai mažais ekscentricitetais. Analogišką išvadą padarė ir radialinio žvaigždžių greičio eksperimento RAVE apžvalgos duomenis analizavę Wilson ir kt. (2011) bei Di Matteo ir kt. (2011), kurie rėmėsi modeliavimais.

Pasak Dierickx ir kt. (2010), nustatytas ekscentricitetų pasiskirstymas gerai sutampa su praturtintų dujomis galaktikų įsiliejimų scenarijaus numatomais žvaigždžių ekscentricitetais, o dauguma storąjo disko žvaigždžių yra gimusios *in situ*.

Praturtintų dujomis galaktikų įsiliejimų (angl. *gas-rich mergers*) scenarijus numato storąjo disko žvaigždžių ekscentricitetų pasiskirstymo maksimumą ties $e = 0.25$, o pasiskirstymo „šleifas“ tęsiasi link didesnių ekscentriciteto verčių, kur išsidėsto įkritusių galaktikų žvaigždės (Sales ir kt. 2009; Dierickx ir kt. 2010). Tuo tarpu 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių, tiriamų mūsų

darbe, ekscentriciteto vidurkis yra 0.40 ± 0.07 (žiūrėti 3.1 paveikslą).

Darbe nustatyta 3-osios ŽKA kinematinės žvaigždžių grupės detali cheminė atmosferų sudėtis ir analizuota kinematika bei amžiaus pasiskirstymas palaiko šios kinematinės grupės kilmės scenarijų, susijusi su praturtintų dujomis galaktikų akrecija. Pagal šį scenarijų, 3-oji ŽKA kinematinė žvaigždžių grupė gali būti siejama su praturtintos dujomis nykštukinės galaktikos, susijungusios su Paukščių Tako galaktika, liekanomis.

Didžiųjų spektrinių apžvalgų (SEGUE, RAVE) dėka, šiandien yra manoma, kad greičiausiai visi išvardyti scenarijai turėjo įtakos Galaktikos storojo disko formavimuisi. Panaši 3-osios ŽKA kinematinės grupės ir storojo Galaktikos disko žvaigždžių atmosferų cheminė sudėtis rodo, kad kinematinės žvaigždžių grupės ir storojo Galaktikos disko žvaigždžių formavimasis yra galimai susijęs (Stonkutė ir kt. 2012, 2013). Galutinis atsakymas apie šios kinematinės grupės kilmę paaiškės išsiaiškinus storojo Galaktikos disko kilmę.

Skyrius 4

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

Nustatėme detalią 21-os Ženevos – Kopenhagos apžvalgoje kinematiškai identifikuotos 3-osios grupės ir 6 palyginamųjų plonojo Galaktikos disko žvaigždžių cheminę sudėtį. Šioms žvaigždėms nustatėme pagrindinius fizikinius parametrus (efektinę temperatūrą, gravitacijos pagreitį žvaigždės paviršiuje, metalingumą bei mikroturbulencijos greitį) ir deguonies, alfa – elementų, geležies grupės bei *r*- ir *s*-procesų cheminių elementų gausas. Rezultatus palyginome su Galaktikos disku ir cheminės evoliucijos modeliais. Pagal gautus rezultatus padarėme išvadas, kad:

1. Kinematinės žvaigždžių grupės cheminė sudėtis yra homogeniška. Nustatytas dvidešimties žvaigždžių vidutinis metalingumas yra $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.69 \pm 0.05$.
2. Deguonies ir α -elementų gausos yra padidėjusios lyginant su plonu ju Galaktikos disku ir yra panašios į Galaktikos storjo disko žvaigždžių atmosferų cheminę sudėtį.
3. Cheminių elementų, daugiausia gaminamų *r*-procesu, gausos yra padidėjusios lyginant su plonu ju Galaktikos disku. Labiausiai padidėjusios yra europio, samario ir prazeodimio gausos.
4. Cheminių elementų, daugiausia gaminamų *s*-procesu ir geležies grupės elementų, gausos yra panašios į to paties metalingumo plono ju Galaktikos disko nykštukių cheminių elementų gausas.
5. Žvaigždė BD +35 3657 nėra 3-osios ŽKA kinematinės grupės narė, o žvaigždė BD +73 566 yra praturtinta *s*-proceso elementais.

6. 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių amžius yra apie 12 mlrd. m.
7. Panaši cheminė tirtos kinematinės grupės bei storjo Galaktikos disko žvaigždžių sudėtis parodo, kad kinematinės žvaigždžių grupės ir storjo Galaktikos disko žvaigždžių formavimasis yra galimai susijęs.
8. Detalus 3-osios ŽKA kinematinės grupės žvaigždžių atmosferų cheminės sudėties tyrimas bei kinematika ir amžiaus pasiskirstymas palaiko Paukščių Tako galaktikos evoliucijos scenarijų, kuris numato susiliejamą su praturtinta dujomis nykštukine galaktika.

Literatūra

- Abadi M. G., Navarro J. F., Steinmetz M., Eke V. R., 2003, *ApJ*, 597, 21
- Alonso A., Arribas S., Martinez-Roger C., 1996, *A&A*, 313, 873
- Alonso A., Arribas S., Martinez-Roger C., 1995, *A&A*, 297, 197
- Anstee S. D., O'Mara B. J., 1995, *MNRAS*, 276, 859
- Antoja T., ir kt., 2012, *MNRAS*, 426, L1
- Arifyanto M. I., Fuchs B., 2006, *A&A*, 449, 533
- Barklem P. S., O'Mara B. J., 1997, *MNRAS*, 290, 102
- Barklem P. S., O'Mara B. J., Ross J. E., 1998, *MNRAS*, 296, 1057
- Barklem P. S., Stempels H. C., Allende Prieto C., Kochukhov O. P., Piskunov N., O'Mara B. J., 2002, *A&A*, 385, 951
- Beers T. C., Barklem P. S., Christlieb N., Hill V., 2005, *NuPhA*, 758, 595
- Belokurov V., ir kt., 2009, *MNRAS*, 397, 1748
- Belokurov V., ir kt., 2006, *ApJ*, 642, L137
- Bensby T., Feltzing S., Lundström I., 2003, *A&A*, 410, 527
- Bensby T., Feltzing S., Lundström I., Ilyin I., 2005, *A&A*, 433, 185
- Biehl D., 1976, *Daktaro disertacija, Kylio universitetas, Vokietija*
- Bournaud F., Elmegreen B. G., Martig M., 2009, *ApJ*, 707, L1
- Bovy J., Rix H.-W., Hogg D. W., 2012, *ApJ*, 751, 131
- Boyajian T. S., ir kt., 2012, *ApJ*, 746, 101
- Brewer M.-M., Carney B. W., 2006, *AJ*, 131, 431
- Brook C. B., Gibson B. K., Martel H., Kawata D., 2005, *ApJ*, 630, 298
- Brook C. B., Kawata D., Gibson B. K., Freeman K. C., 2004, *ApJ*, 612, 894

Brown T. M., 2010, ApJ, 709, 535

Burbidge E. M., Burbidge G. R., Fowler W. A., Hoyle F., 1957, RvMP, 29, 547

Busso M., Gallino R., Wasserburg G. J., 1999, ARA&A, 37, 239

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

Castelli F., Kurucz R. L., 2004, astro, arXiv:astro-ph/0405087

Cheng J. Y., ir kt., 2012, ApJ, 746, 149

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

Datson J., Flynn C., Portinari L., 2012, MNRAS, 426, 484

Dehnen W., Binney J. J., 1998, MNRAS, 298, 387

Demarque P., Woo J.-H., Kim Y.-C., Yi S. K., 2004, ApJS, 155, 667

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

Edvardsson B., Andersen J., Gustafsson B., Lambert D. L., Nissen P. E., Tomkin J., 1993, A&A, 275, 101

Fellhauer M., ir kt., 2006, ApJ, 651, 167

Fellhauer M., ir kt., 2007, MNRAS, 375, 1171

Flynn C., Sommer-Larsen J., Christensen P. R., 1996, MNRAS, 281, 1027

Forbes J., Krumholz M., Burkert A., 2012, ApJ, 754, 48

Fuhrmann K., 1998, A&A, 338, 161

Gratton R. G., Carretta E., Eriksson K., Gustafsson B., 1999, A&A, 350, 955

Gratton R. G., Sneden C., 1994, A&A, 287, 927

Gratton R., Carretta E., Matteucci F., Sneden C., 1996, ASPC, 92, 307

Gray D. F., 2005, knyga „The observation and analysis of stellar photospheres”, Kembridžas

- Grevesse N., Asplund M., Sauval A. J., 2007, *SSRv*, 130, 105
- 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
- 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
- Høg E., ir kt., 2000, *A&A*, 355, L27
- Hauschildt P. H., Allard F., Ferguson J., Baron E., Alexander D. R., 1999, *ApJ*, 525, 871
- Heiter U., Eriksson K., 2006, *A&A*, 452, 1039
- Helmi A., 2008, *A&ARv*, 15, 145
- Helmi A., Navarro J. F., Nordström B., Holmberg J., Abadi M. G., Steinmetz M., 2006, *MNRAS*, 365, 1309
- Holmberg J., Nordström B., Andersen J., 2009, *A&A*, 501, 941
- Holmberg J., Nordström B., Andersen J., 2007, *A&A*, 475, 519
- Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J., 1994, *Natur*, 370, 194
- Ibata R. A., Irwin M. J., Lewis G. F., Ferguson A. M. N., Tanvir N., 2003, *MNRAS*, 340, L21
- Ibata R., Irwin M., Lewis G., Ferguson A. M. N., Tanvir N., 2001, *Natur*, 412, 49
- 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
- Jones B. J. T., Wyse R. F. G., 1983, *A&A*, 120, 165

- Kazantzidis S., Bullock J. S., Zentner A. R., Kravtsov A. V., Moustakas L. A., 2008, ApJ, 688, 254
- Klement R., *ir kt.*, 2009, ApJ, 698, 865
- Koch A., Edvardsson B., 2002, A&A, 381, 500
- Kratz K.-L., Farouqi K., Pfeiffer B., Truran J. W., Sneden C., Cowan J. J., 2007, ApJ, 662, 39
- Kurucz R. L., 2002, BaltA, 11, 101
- Kurucz R. L., 1996, ASPC, 108, 160
- 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
- Lamb S. A., Howard W. M., Truran J. W., Iben I., Jr., 1977, ApJ, 217, 213
- Lawler J. E., Bonvallet G., Sneden C., 2001, ApJ, 556, 452
- Lawler J. E., Den Hartog E. A., Sneden C., Cowan J. J., 2006, ApJS, 162, 227
- Lawler J. E., Wickliffe M. E., den Hartog E. A., Sneden C., 2001, ApJ, 563, 1075
- Lee Y. S., *ir kt.*, 2011, ApJ, 738, 187
- Mäcke R., Griffin R., Griffin R., Holweger H., 1975, A&AS, 19, 303
- Martínez-Delgado D., Peñarrubia J., Gabany R. J., Trujillo I., Majewski S. R., Pohlen M., 2008, ApJ, 689, 184
- Martínez-Delgado D., Pohlen M., Gabany R. J., Majewski S. R., Peñarrubia J., Palma C., 2009, ApJ, 692, 955
- Martin N. F., Ibata R. A., Conn B. C., Lewis G. F., Bellazzini M., Irwin M. J., McConnachie A. W., 2004, MNRAS, 355, L33
- Mashonkina L., Gehren T., 2000, A&A, 364, 249
- Mashonkina L. I., Vinogradova A. B., Ptitsyn D. A., Khokhlova V. S., Chernetsova T. A., 2007, ARep, 51, 903
- Matteucci F., 2003, Ap&SS, 284, 539

- McConnachie A. W., ir kt., 2009, *Natur*, 461, 66
- McWilliam A., 1997, *ARA&A*, 35, 503
- Meza A., Navarro J. F., Abadi M. G., Steinmetz M., 2005, *MNRAS*, 359, 93
- Minchev I., Quillen A. C., Williams M., Freeman K. C., Nordhaus J., Siebert A., Bienaymé O., 2009, *MNRAS*, 396, L56
- Mishenina T. V., Pignatari M., Korotin S. A., Soubiran C., Charbonnel C., Thielemann F.-K., Gorbaneva T. I., Basak N. Y., 2013, arXiv, arXiv:1303.1730
- McWilliam A., 1998, *AJ*, 115, 1640
- Momany Y., Zaggia S. R., Bonifacio P., Piotto G., De Angeli F., Bedin L. R., Carraro G., 2004, *A&A*, 421, L29
- Moore C. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J., 1966, knyga „The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å”, Vašingtonas
- Niederste-Ostholt M., Belokurov V., Evans N. W., Peñarrubia J., 2010, *ApJ*, 712, 516
- Nissen P. E., Edvardsson B., 1992, *A&A*, 261, 255
- Nissen P. E., Schuster W. J., 2010, *A&A*, 511, L10
- Nordström B., ir kt., 2004, *A&A*, 418, 989
- Olsen E. H., 1994b, *A&AS*, 106, 257
- Olsen E. H., 1994a, *A&AS*, 104, 429
- Olsen E. H., 1993, *A&AS*, 102, 89
- Olsen E. H., 1984, *A&AS*, 57, 443
- Olsen E. H., 1983, *A&AS*, 54, 55
- Pagal B. E. J., Tautvaisiene G., 1997, *MNRAS*, 288, 108
- Pagal B. E. J., Tautvaisiene G., 1995, *MNRAS*, 276, 505
- Pasetto S., ir kt., 2012, *A&A*, 547, A70
- Peñarrubia J., ir kt., 2005, *ApJ*, 626, 128

- Peñarrubia J., Navarro J. F., McConnachie A. W., Martin N. F., 2009, *ApJ*, 698, 222
- Peters J. G., 1968, *ApJ*, 154, 225
- 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
- Quinn P. J., Hernquist L., Fullagar D. P., 1993, *ApJ*, 403, 74
- Raiteri C. M., Busso M., Picchio G., Gallino R., Pulone L., 1991, *ApJ*, 367, 228
- Raiteri C. M., Gallino R., Busso M., Neuberger D., Kaeppler F., 1993, *ApJ*, 419, 20
- Ramírez I., Allende Prieto C., Lambert D. L., 2007, *A&A*, 465, 271
- Reddy B. E., Lambert D. L., 2008, *MNRAS*, 391, 95
- Reddy B. E., Lambert D. L., Allende Prieto C., 2006, *MNRAS*, 367, 1329
- Reddy B. E., Tomkin J., Lambert D. L., Allende Prieto C., 2003, *MNRAS*, 340, 304
- Roškar R., Debattista V. P., Stinson G. S., Quinn T. R., Kaufmann T., Wadsley J., 2008, *ApJ*, 675, L65
- 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
- Sales L. V., *ir kt.*, 2008, *MNRAS*, 389, 1391
- Schönrich R., Binney J., 2009, *MNRAS*, 399, 1145
- Schlesinger K. J., *ir kt.*, 2012, *ApJ*, 761, 160
- Schuster W. J., Nissen P. E., 1989, *A&A*, 222, 69
- Sesar B., *ir kt.*, 2012, *ApJ*, 755, 134
- Simmons G. J., Blackwell D. E., 1982, *A&A*, 112, 209

- Snedden C., Cowan J. J., Gallino R., 2008, *ARA&A*, 46, 241
- Snedden C., Lawler J. E., Cowan J. J., Ivans I. I., Den Hartog E. A., 2009, *ApJS*, 182, 80
- Stonkutė E., Tautvaišienė G., Nordström B., Ženovienė R., 2013, *A&A*, 555, A6
- Stonkutė E., Tautvaišienė G., Nordström B., Ženovienė R., 2012, *A&A*, 541, A157
- Tautvaišienė G., Edvardsson B., Puzeras E., Ilyin I., 2005, *A&A*, 431, 933
- 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
- Thévenin F., Idiart T. P., 1999, *ApJ*, 521, 753
- The L.-S., El Eid M. F., Meyer B. S., 2000, *ApJ*, 533, 998
- Tinsley B. M., 1976, *ApJ*, 208, 797
- Tolstoy E., Hill V., Tosi M., 2009, *ARA&A*, 47, 371
- Trevisan M., Barbuy B., Eriksson K., Gustafsson B., Grenon M., Pompéia L., 2011, *A&A*, 535, A42
- Unsöld A., 1955, *Physik der Stern Atmosphären*. Springer-Verlag, Berlin
- van der Kruit P. C., Freeman K. C., 2011, *ARA&A*, 49, 301
- Villalobos Á., Helmi A., 2009, *MNRAS*, 399, 166
- Villalobos Á., Helmi A., 2008, *MNRAS*, 391, 1806
- Wilson M. L., *ir kt.*, 2011, *MNRAS*, 413, 2235
- Wyse R. F. G., 2009, *IAUS*, 258, 11
- Wyse R. F. G., Gilmore G., 1988, *AJ*, 95, 1404
- Yanny B., *ir kt.*, 2003, *ApJ*, 588, 824
- Yi S., Demarque P., Kim Y.-C., Lee Y.-W., Ree C. H., Lejeune T., Barnes S., 2001, *ApJS*, 136, 417
- Zhang H. W., Zhao G., 2006, *A&A*, 449, 127
- Zuckerman B., Song I., 2004, *ARA&A*, 42, 685

Priedas A

Cheminių elementų gausos

Šiame priede yra pateikiamos dvi lentelės:

Lentelėje A.1 yra pateikiamos 3-osios ŽKA kinematinės grupės ir palyginamųjų plonojo Galaktikos disko žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos, nustatytos disertacijos darbe.

Lentelėje A.2 yra pateikiamos sunkiųjų cheminių elementų gausos nustatytos darbe 3-ajai ŽKA kinematinei grupei ir palyginamosioms Galaktikos plonojo disko žvaigždėms.

Pirmuosiuose lentelių A.1 ir A.2 stulpeliuose yra pateikti žvaigždžių numeriai iš Henry Draper (HD) arba Bonner Durchmusterung (BD) žvaigždžių katalogų. Tolimesniuose stulpeliuose yra pateiktos cheminių elementų gausos $[El/Fe]$, vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai $\sigma_{[El/Fe]}$ bei linijų skaičius $n_{[El/Fe]}$.

Taip pat pirmuosiuose lentelių A.1 ir A.2 stulpeliuose simbolis ^(a) – žymi žvaigždę, kuri yra praturtinta *s*- ir *r*-procesų elementais, o simbolis ^(b) – žymi žvaigždę, kuri nėra 3-osios ŽKA kinematinės grupės narė.

A.1 lentelė: Tiriamųjų ir palyginamųjų žvaigždžių lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos.

HD/BD	[O/Fe]	[Na/Fe]	σ	n	[Mg/Fe]	σ	n	[Al/Fe]	σ	n
967	...	0.04	0.03	3	0.33	0.04	4	0.37	0.00	3
17820	...	0.06	0.04	3	0.25	0.06	3	0.11	0.05	3
107582	0.39	0.06	0.04	4	0.30	0.04	3	0.22	0.05	3
+73 566	...	0.14	0.03	2	0.43	0.05	3	0.27	0.04	2
+19 2646	0.55	0.10	0.08	3	0.38	0.06	4	0.28	0.08	2
114762	...	0.09	0.03	3	0.33	0.05	4	0.15	0.02	2
117858	0.32	0.08	0.02	3	0.29	0.04	3	0.31	0.06	3
+13 2698	...	0.02	0.02	2	0.34	0.05	4	0.12	0.05	2
+77 0521	...	-0.02	...	1	0.25	0.04	4	0.23	0.01	2
126512	0.41	0.10	0.02	3	0.30	0.07	3	0.17	0.06	2
131597	...	0.12	0.01	4	0.37	0.05	4	0.36	0.04	2
+67 925	0.37	0.04	0.02	2	0.35	0.06	3	0.31	0.00	2
159482	0.42	0.13	0.05	4	0.31	0.03	4	0.29	0.04	2
170737	...	0.11	0.02	4	0.30	0.07	3	0.39	...	1
+35 3659 ^(b)	...	0.04	0.05	3	0.30	0.06	3	0.40	0.01	2
201889	0.58	0.08	0.04	3	0.32	0.03	4	0.27	0.01	3
204521	...	0.06	0.02	3	0.29	0.04	3	0.26	0.02	2
204848	0.52	0.01	0.04	3	0.43	0.03	4	0.45	0.05	3
212029	...	0.10	0.04	3	0.37	0.07	4	0.19	0.05	2
222794	...	0.09	0.05	4	0.37	0.07	4	0.39	0.04	3
224930	0.45	0.08	0.04	3	0.42	0.04	4	0.43	0.08	3
17548	0.16	-0.02	0.04	3	0.07	0.06	4	-0.02	0.01	2
150177	...	0.07	0.02	3	0.18	0.04	3	0.06	0.04	2
159307	...	0.12	0.07	3	0.28	0.03	4	...	...	...
165908	...	0.02	0.02	3	0.20	0.07	4	0.02	0.02	2
174912	0.10	0.02	0.01	3	0.08	0.05	4	-0.03	0.04	2
207978	...	0.09	0.05	3	0.28	0.06	4	-0.01	0.02	2

^(b) Ne kinematinės grupės narė.

A.1 lentelė: Lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Si/Fe]	σ	n	[Ca/Fe]	σ	n	[Sc/Fe]	σ	n
967	0.26	0.05	17	0.28	0.04	8	0.12	0.04	9
17820	0.24	0.04	16	0.26	0.06	9	0.17	0.04	9
107582	0.21	0.05	16	0.27	0.06	5	0.05	0.05	8
+73 566	0.33	0.06	18	0.39	0.06	6	0.05	0.05	7
+19 2646	0.22	0.06	16	0.32	0.06	8	0.09	0.04	8
114762	0.20	0.05	17	0.21	0.05	7	0.05	0.05	10
117858	0.24	0.05	17	0.23	0.04	8	0.12	0.02	9
+13 2698	0.33	0.06	14	0.31	0.05	8	0.10	0.04	7
+77 0521	0.18	0.07	10	0.20	0.06	6	0.04	0.03	4
126512	0.25	0.05	16	0.23	0.04	6	0.11	0.02	8
131597	0.29	0.05	16	0.25	0.04	8	0.18	0.02	10
+67 925	0.22	0.08	17	0.30	0.06	8	-0.05	0.05	4
159482	0.27	0.06	15	0.31	0.06	7	0.16	0.03	8
170737	0.24	0.04	15	0.27	0.06	7	0.16	0.02	8
+35 3659 ^(b)	0.25	0.03	8	0.31	0.08	4	0.03	0.11	7
201889	0.31	0.05	15	0.33	0.08	6	0.09	0.03	9
204521	0.22	0.05	17	0.26	0.06	8	0.12	0.03	7
204848	0.44	0.05	16	0.41	0.05	8	0.07	0.03	11
212029	0.34	0.05	11	0.25	0.03	6	0.14	0.02	5
222794	0.23	0.05	16	0.25	0.04	7	0.08	0.04	8
224930	0.25	0.05	16	0.30	0.04	5	0.10	0.03	11
17548	0.08	0.05	17	0.10	0.04	7	0.05	0.04	10
150177	0.05	0.06	12	0.10	0.03	5	0.08	0.03	7
159307	0.16	0.02	9	0.17	0.04	5	0.12	0.06	7
165908	0.11	0.05	15	0.12	0.05	6	0.02	0.04	7
174912	0.04	0.04	17	0.09	0.05	6	0.00	0.04	12
207978	0.12	0.04	15	0.15	0.03	7	0.06	0.02	6

^(b) Ne kinematinės grupės narė.

A.1 lentelė: Lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[TiI/Fe]	σ	n	[TiII/Fe]	σ	n	[V/Fe]	σ	n
967	0.33	0.06	14	0.30	0.09	2	0.09	0.05	11
17820	0.33	0.05	9	0.30	0.01	3	0.07	0.04	5
107582	0.30	0.05	7	0.27	0.06	2	0.05	0.03	10
+73 566	0.33	0.05	9	0.35	0.06	3	-0.03	0.04	6
+19 2646	0.28	0.04	9	0.21	0.04	3	0.10	0.04	8
114762	0.21	0.03	8	0.21	0.05	3	0.05	0.05	4
117858	0.24	0.03	9	0.20	0.03	3	0.11	0.03	8
+13 2698	0.36	0.05	8	0.33	0.05	3	0.08	0.03	7
+77 0521	0.22	0.05	6	0.17	0.03	2	0.06	0.02	3
126512	0.21	0.04	7	0.29	0.02	2	0.08	0.03	7
131597	0.25	0.06	16	0.30	0.03	3	0.06	0.06	11
+67 925	0.39	0.03	3	0.43	...	1	-0.03	0.08	4
159482	0.27	0.02	4	0.23	0.01	3	0.09	0.03	7
170737	0.30	0.06	12	0.28	0.06	4	0.08	0.05	8
+35 3659 ^(b)	0.41	0.02	4	0.24	...	1	...	...	...
201889	0.33	0.05	9	0.33	0.05	3	0.02	0.08	4
204521	0.32	0.05	9	0.29	0.04	3	0.06	0.05	7
204848	0.31	0.07	18	0.26	0.07	3	0.07	0.03	13
212029	0.28	0.06	5	0.36	0.03	2	0.09	0.05	4
222794	0.29	0.04	11	0.27	0.04	3	0.07	0.05	10
224930	0.27	0.04	9	0.22	0.03	2	0.12	0.03	6
17548	0.11	0.06	7	0.08	0.03	3	0.09	0.04	4
150177	0.15	0.05	3	0.23	0.05	2	0.03	...	1
159307	0.17	0.07	3	0.18	0.05	2	...	...	...
165908	0.12	0.04	6	0.07	0.03	3	0.06	0.03	4
174912	0.02	0.05	9	0.00	0.03	3	-0.01	0.05	5
207978	0.16	0.06	3	0.07	0.06	3	...	...	...

^(b) Ne kinematinės grupės narė.

A.1 lentelė: Lengvųjų ir geležies grupės cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Cr/Fe]	σ	n	[Co/Fe]	σ	n	[Ni/Fe]	σ	n
967	0.05	0.08	17	0.08	0.04	5	0.02	0.07	26
17820	-0.01	0.08	14	0.07	0.01	3	0.02	0.04	22
107582	0.05	0.06	14	0.04	0.05	9	0.02	0.06	16
+73 566	0.05	0.05	11	0.06	0.04	3	0.00	0.05	17
+19 2646	0.06	0.10	15	0.05	0.06	7	0.00	0.05	18
114762	0.00	0.08	11	0.04	0.05	5	-0.04	0.04	16
117858	0.01	0.05	16	0.09	0.04	6	0.02	0.05	24
+13 2698	0.04	0.06	14	0.09	0.03	4	0.03	0.06	19
+77 0521	0.04	0.10	11	0.04	0.02	2	0.06	0.06	13
126512	0.02	0.06	14	0.09	0.04	5	0.01	0.05	17
131597	0.04	0.07	16	0.05	0.06	10	0.01	0.05	25
+67 925	-0.02	0.12	13	-0.02	0.01	2	0.04	0.06	14
159482	0.05	0.06	13	0.10	0.04	4	0.01	0.05	15
170737	0.03	0.09	16	0.05	0.04	6	0.02	0.07	23
+35 3659 ^(b)	0.03	0.11	12	...	...	...	0.01	0.08	7
201889	0.05	0.06	12	0.07	0.03	6	0.00	0.05	17
204521	0.02	0.06	13	0.07	0.05	6	0.00	0.05	18
204848	0.06	0.09	17	0.05	0.03	10	0.05	0.06	25
212029	-0.05	0.06	12	...	...	...	0.01	0.06	11
222794	0.03	0.07	16	0.06	0.03	8	0.02	0.06	18
224930	0.05	0.08	14	0.10	0.04	7	-0.01	0.06	21
17548	-0.01	0.05	13	0.05	0.03	3	-0.04	0.05	20
150177	-0.03	0.07	14	0.06	0.00	2	-0.02	0.06	12
159307	0.04	0.05	9	0.06	...	1	0.04	0.02	10
165908	0.00	0.04	10	0.00	0.08	5	-0.03	0.06	15
174912	0.00	0.08	14	0.04	0.00	4	-0.05	0.05	21
207978	0.01	0.07	11	0.05	0.06	5	-0.01	0.05	15

^(b) Ne kinematinės grupės narė.

A.2 lentelė: Tiriamųjų ir palyginamųjų žvaigždžių sunkiųjų elementų gausos.

HD/BD	[Y/Fe]	σ	n	[Zr I/Fe]	σ	n	[Zr II/Fe]	σ	n
967	0.06	0.05	4	0.24	0.03	4	0.24	0.00	2
17820	-0.04	0.04	4	0.09	...	1	0.09	0.03	2
107582	0.06	0.03	3	-0.05	0.07	2	-0.05	0.07	2
+73 566 ^(a)	0.88	0.10	6	1.02	0.05	4	0.88	0.00	2
+19 2646	-0.12	0.06	3	0.10	0.00	2	0.13	0.00	2
114762	-0.03	0.09	4	...	...	...	-0.05	...	1
117858	-0.13	0.10	4	0.12	0.00	3	...	...	...
+13 2698	-0.08	0.09	4	0.18	0.04	2	0.18	0.00	2
+77 0521	-0.12	0.00	3	...	...	...	...	...	...
126512	-0.13	0.10	4	0.07	0.00	2	0.07	0.00	2
131597	0.06	0.07	5	0.07	0.05	4	0.09	...	1
+67 925	-0.18	0.00	2	0.00	...	1	...	...	1
159482	-0.11	0.03	4	...	...	...	...	...	...
170737	-0.12	0.06	7	-0.03	0.04	7	-0.03	...	1
+35 3659 ^(b)	-0.12	0.12	3	0.20	...	1	0.20	...	1
201889	0.05	0.05	6	0.21	0.08	3	0.21	...	1
204521	0.01	0.05	6	0.13	0.08	3	0.13	0.00	2
204848	0.28	0.08	7	0.38	0.06	7	0.42	0.05	2
212029	0.18	0.05	4	...	...	...	...	...	...
222794	-0.05	0.05	5	0.12	0.06	3	...	...	...
224930	0.05	0.05	5	0.13	0.04	2	0.13	...	1
17548	-0.12	0.06	5	0.00	0.00	2	0.00	0.00	1
150177	0.02	0.07	5	0.10	0.09	3	0.06	0.01	2
159307	0.05	0.07	2	...	...	...	0.06	...	1
165908	-0.12	0.06	5	-0.05	0.00	2	-0.05	...	1
174912	-0.12	0.02	4	0.14	0.04	3	0.04	...	1
207978	-0.04	0.06	4	0.20	0.00	6	0.11	...	1

^(a) *s*- ir *r*-procesų elementais praturtinta žvaigždė.

^(b) Ne kinematinės grupės narė.

A.2 lentelė: Sunkiųjų cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Ba/Fe]	[La/Fe]	σ	n	[Ce/Fe]	σ	n	[Pr/Fe]	σ	n
967	-0.19	0.08	0.05	2	-0.02	0.04	2	0.36	0.08	2
17820	-0.10	0.07	0.03	3	0.11	...	1	0.37	0.00	2
107582	...	0.07	0.04	2	-0.04	0.06	5	0.34	...	1
+73 566 ^(a)	1.62	1.21	0.04	3	1.25	0.00	3	1.12	0.04	2
+19 2646	...	0.08	...	1	0.07	0.05	3	0.40	...	1
114762	-0.10	0.00	0.05	3	0.07	0.02	3	0.21	0.01	2
117858	-0.11	-0.01	0.08	2	0.15	0.00	3	0.32	0.03	2
+13 2698	-0.20	0.10	0.06	2	-0.05	0.00	2	0.35	...	1
+77 0521	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
126512	-0.18	-0.06	0.01	3	0.05	0.00	3	0.30	0.00	1
131597	-0.10	0.02	0.09	4	-0.01	0.06	5	0.26	0.02	2
+67 925	-0.07	...	...	...	...	...	...	0.32	0.04	2
159482	-0.17	0.05	0.00	3	0.05	0.00	2	0.40	...	1
170737	...	0.05	0.01	3	0.00	0.08	4	0.12	0.03	2
+35 3659 ^(b)	-0.12	0.20	...	1	...	...	...	...	...	...
201889	-0.06	0.04	0.07	4	0.06	0.08	4	0.33	0.05	2
204521	-0.10	0.09	0.01	3	0.06	0.09	2	0.39	0.00	2
204848	0.25	0.25	0.05	4	0.13	0.13	5	0.24	0.06	2
212029	0.24	0.22	0.00	3	...	...	...	...	...	...
222794	-0.10	0.04	0.02	3	0.08	0.05	3	0.40	0.02	2
224930	-0.17	0.07	0.03	3	0.08	0.11	2	0.40	...	1
17548	-0.10	-0.07	0.05	3	0.08	0.03	3	0.21	...	1
150177	-0.09	0.03	0.06	3	0.05	0.00	2	0.15	...	1
159307	-0.08	...	...	...	0.05	...	1	...	...	...
165908	-0.09	0.01	0.06	4	0.02	0.06	3	0.21	0.01	2
174912	-0.07	-0.05	0.03	3	0.07	0.03	3	0.09	0.07	2
207978	-0.10	-0.07	0.00	2	0.06	...	1	...	...	...

^(a) *s*- ir *r*-procesų elementais praturtinta žvaigždė.

^(b) Ne kinematinės grupės narė.

A.2 lentelė: Sunkiųjų cheminių elementų gausos – tęsinys.

HD/BD	[Nd/Fe]	σ	n	[Sm/Fe]	σ	n	[Eu/Fe]	σ	n
967	0.13	0.05	4	0.32	0.03	3	0.39	0.06	2
17820	0.14	0.05	5	0.38	0.06	3	0.38	0.07	2
107582	0.10	0.05	5	0.28	0.05	3	0.38	0.07	2
+73 566 ^(a)	1.33	0.07	7	1.00	0.15	3	0.64	0.29	2
+19 2646	0.11	0.04	5	0.22	0.03	3	0.30	...	1
114762	0.07	0.03	4	0.23	0.05	3	0.17	0.11	2
117858	-0.04	0.06	4	0.28	0.06	3	0.28	0.01	2
+13 2698	0.05	0.06	4	0.33	0.07	3	0.31	0.03	2
+77 0521	...	...	...	...	...	...	...	...	...
126512	0.03	0.06	5	0.21	0.14	3	0.28	0.02	2
131597	0.13	0.06	7	0.26	0.06	2	0.32	0.03	2
+67 925	0.08	0.05	6	...	...	...	0.29	0.07	2
159482	0.12	0.06	5	0.30	0.06	3	0.33	0.11	2
170737	0.14	0.05	7	0.25	0.11	2	0.35	0.03	2
+35 3659 ^(b)	0.25	0.00	3	0.37	...	1	0.55	...	1
201889	0.06	0.06	6	0.29	0.02	3	0.26	0.09	2
204521	0.10	0.05	5	0.30	0.05	3	0.40	0.04	2
204848	0.30	0.07	6	0.28	0.06	3	0.27	0.01	2
212029	0.25	0.09	3	0.50	0.00	2	0.52	0.10	2
222794	0.09	0.04	5	0.24	0.06	2	0.37	0.04	2
224930	0.01	0.02	3	0.31	0.06	3	0.30	0.08	2
17548	0.01	0.05	4	0.17	0.05	3	0.18	0.06	2
150177	0.07	0.06	6	0.15	0.02	3	0.20	...	1
159307	0.02	0.00	2	0.26	0.04	2	...	...	...
165908	0.02	0.09	6	0.12	0.03	3	0.13	0.07	2
174912	0.02	0.07	5	0.17	0.08	3	0.09	0.11	2
207978	0.10	0.00	3	0.17	0.03	3	0.16	0.04	2

^(a) *s*- ir *r*-procesų elementais praturtinta žvaigždė.

^(b) Ne kinematinės grupės narė.

Padėka

Dėkoju darbo vadovei habil. dr. Gražinai Tautvaišienei už pasitikėjimą ir kūrybingą vadovavimą, dirbant mokslinį darbą. Esu dėkinga Kopenhagos universiteto Nilso Boro instituto profesorei Birgittai Nordström už bendradarbiavimą ir mokslines diskusijas.

Taip pat dėkoju savo tėveliams ir Mantui už nuolatinę paramą ir patarimus. Ačiū Renatai, Gintarui ir Šarūnui už pagalbą ir gerą nuotaiką darbo metu. Esu dėkinga visiems Teorinės fizikos ir astronomijos instituto kolegoms už galimybę dirbti kartu.

Darbą rėmė Europos komisijos finansuojamas OPTICON projektas, Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas bei Lietuvos mokslo taryba.