

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Teorinės fizikos ir astronomijos institutas

Emilė Jasaitė

ŽVAIGŽDŽIŲ ATMOSFERŲ SPEKTROSKOPINIS TYRIMAS

BAKALAURO STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Fizikos studijų programa

Studentas

Emilė Jasaitė

Leista gintis

2023-05-22

Darbo vadovas

dr. Šarūnas Mikolaitis

Instituto direktorius

dr. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2023

Turinys

Įvadas.....	4
1. Metodika.....	5
1.1. Stebėjimų medžiaga bei tyrimo įrankiai.....	6
1.2. Radialinio greičio nustatymas.....	7
1.3. Ekvivalentinių plokčių matavimas.....	9
1.4. MARCS atmosferos modelis.....	11
1.5. Atmosferos parametrų nustatymas.....	11
1.5.1. Efektinės temperatūros radimas.....	13
1.5.2. Laisvojo kritimo pagreičio radimas.....	13
1.5.3. Mikroturbulentinio greičio radimas.....	14
1.5.4. Metalingumas.....	16
2. Rezultatai.....	16
2.1. Radialinis greitis.....	16
2.2. Atmosferų parametrai.....	19
2.3. Rezultatų aptarimas.....	23
2.4. Paklaidos.....	25
Išvados.....	26
Literatūra:	27
Priedai.....	28

Tikslūs atmosferos parametrai ir žvaigždžių cheminė sudėtis yra svarbūs faktoriai tyrinėjant žvaigždes – pasitelkus juos galima kaupti informaciją apie žvaigždžių klases bei spektrų tipus. Ši informacija leidžia charakterizuoti žvaigždes, tirti jų evoliuciją. Siekiant nustatyti žvaigždžių atmosferų parametrus ir cheminę jų sudėtį naudojami įvairūs įrankiai: šiame tyrime buvo pasinaudota *SPLAT – VO* programa bei *Python 3* programavimo kalba ir *MOOG* kodu. Nustatyti žvaigždžių ekvivalentiniai pločiai šiems elementams: Fe I, Fe II, Na I, Mg I, Al I, Si I, Si II, Ca I, Sc I, Sc II, Ti I, Ti II, V I, Cr I, Cr II, Mn I, Co I, Ni I, Cu I, Zn I. Taip pat, buvo nustatyti tokie žvaigždžių atmosferų parametrai, kaip efektinė temperatūra, paviršiaus gravitacija, metalingumas ir mikroturbulentinis greitis. Tyrimo metu gauti rezultatai rodo koreliaciją tarp žvaigždės efektinės temperatūros bei laisvojo kritimo pagreičio ir žvaigždės evoliucijos stadijos.

Precise atmospheric parameters and the chemical composition of stars are important factors for studying stars, i. e. for collecting information on stellar classes and spectral types. This information allows us to characterize stars and study their evolution. Various tools are used to determine the parameters of stellar atmospheres and their chemical composition: the *SPLAT-VO* program and the *Python 3* programming language and the *MOOG* code were used in this study. The stellar equivalent width was determined for the following elements: Fe I, Fe II, Na I, Mg I, Al I, Si I, Si II, Ca I, Sc I, Sc II, Ti I, Ti II, V I, Cr I, Cr II, Mn I, Co I, Ni I, Cu I, and Zn I. In addition, the stellar atmospheres were characterized by the determination of the effective temperature, the surface gravity, the metallicity, and the micro-turbulence velocity. The results obtained show a correlation between the stellar effective temperature and free-fall acceleration and the evolution state of the star.

Įvadas

Žvaigždžių atmosferų parametrai: efektinė temperatūra, laisvojo kritimo pagreitis paviršiuje, metalingumas (metalų gausa), mikroturbulentinis greitis – svarbūs astrofizikos požiūriu. Jie ne tik leidžia analizuoti žvaigždes, jų atmosferas, evoliuciją, bet ir yra glaudžiai susiję su žvaigždžių bendra charakteristika: mase, radiusu, ryškumu. Šių parametrų nustatymas yra būtinas išsamiai žvaigždės gausų analizei (Smalley & Dworetsky 1993). Tiriamajame bakalauro baigiamajame darbe buvo tirtos trys atsitiktinės žvaigždės: TYC2957-1441-1, TYC4536-346-1 ir TYC4536-468-1. Dviejų iš jų cheminė sudėtis ir detalūs parametrai anksčiau tirti dar nebuvo. Tai, kad dviejų iš trijų tirtų žvaigždžių atmosferų parametrai dar nebuvo tirti nurodo, jog šis tyrimas buvo pirmoji TYC4536-346-1 ir TYC4536-468-1 žvaigždžių atmosferų spektroskopinė analizė.

Atliekant tyrimą buvo pasinaudota *SIMBAD* duomenų baze (Wenger et al. 2000), programavimo kalba *Python 3* ir *AstroPy* paketu (Robitaille et al. 2013) bei *MOOG* (Snedden 1973) programine įranga. Taip pat žvaigždėse esančių neutralių bei vieną kartą jonizuotų elementų gausų radimui buvo pasinaudota *SPLAT-VO* (Škoda et al. 2014) programa.

Šio darbo tikslas - spektroskopiškai ištirti TYC2957-1441-1 žvaigždės atmosferos parametrus bei palyginti juos su *SIMBAD* duomenų bazėje pateikta informacija bei sužinoti TYC4536-346-1 ir TYC4536-468-1 žvaigždžių atmosferų charakteristikas.

1. Metodika

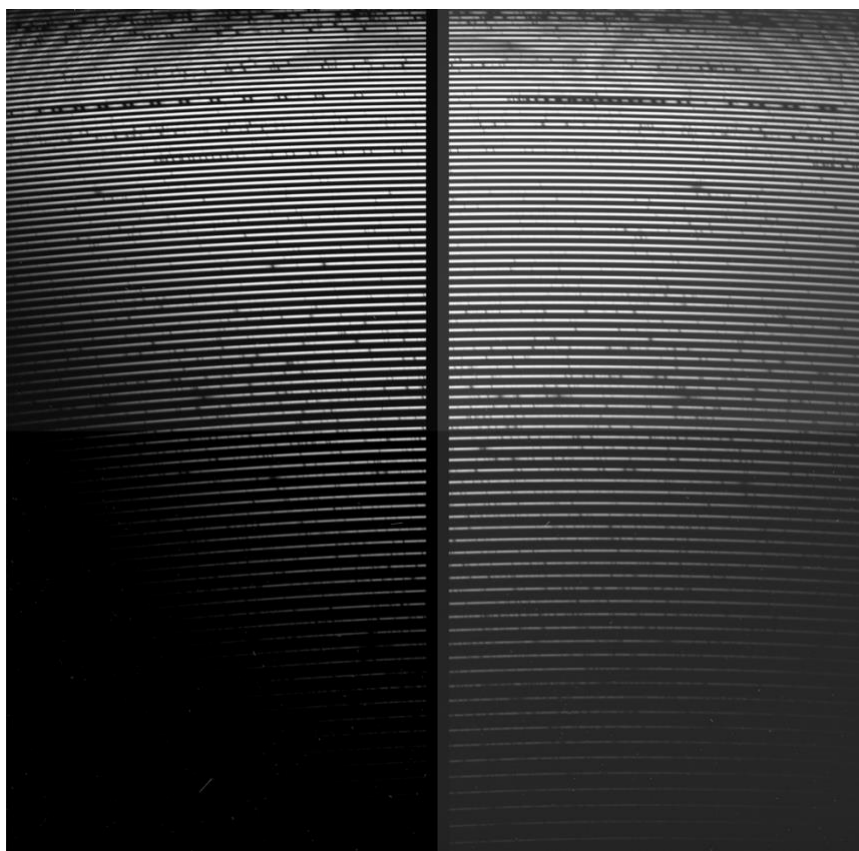
Tyrimo metu analizuoti trijų žvaigždžių atmosferų spektrai. Žvaigždės atmosfera, tai pereinamoji sritis iš žvaigždės vidaus iki tarpžvaigždinės terpės. Kaip pavyzdį galime paimti Saulę: Saulės spindulys yra $R_{\odot} \approx 695236$ km, tuo tarpu jos atmosferos gylis yra ~ 2092 km (Zell 2017). Be to, Saulė taip pat yra ir G spektrinės klasės nykštukė, kurios metalingumas yra 4.4 dex. Tai, jog ji yra nykštukė, nusako jos metalingumas, nes peržengus 3.5 dex ribą žvaigždės yra priskiriamos nykštukėms.

Tyrimui pasirinktos trys atsitiktinės Saulės aplinkos žvaigždės:

- didelio savojo judesio žvaigždė TYC2957-1441-1 (HD 59058) (atstumas nuo mūsų yra 32.45 pc, o jos koordinatės – RA $7^{\circ}29'57''$, Dec $+38^{\circ}26'17''$ (Prusti et al. 2020) – žvaigždė, kurios judėjimas yra žymus, lyginant su žvaigžde, kurios atžvilgiu vyksta lyginimas (šiuo atveju – Saulės), be to, didelis savasis judėjimas indikuoja ir tai, kad stebima žvaigždė yra netoli nuo Saulės (Lepine et al. 2002);
Tai - žvaigždė – nykštukė, jos spektro tipas yra G5V (Cannon & Pickering 1989), iš Harvardo spektrinės klasifikacijos galime numatyti, kad šio tyrimo objekto efektinė temperatūra bus nuo 5000 K iki 6000 K. Taip pat, šios žvaigždės ryškis mėlynos šviesos spektre yra 8.46, regimosios šviesos spektre - 7.71 (Hog et al. 2000).
- Žvaigždė TYC4536-346-1 (HD 38126) (atstumas nuo mūsų – 87.91 pc, o jos koordinatės – RA $5^{\circ}58'11''$, Dec $+81^{\circ}21'50''$ (Prusti et al. 2020); kintamoji žvaigždė TYC4536-468-1 (HD 34506) – žvaigždė, kurios ryškis matomas iš Žemės ir keičiasi bėgant laikui (Fraknoi et al. 2022). TYC4536-346-1: milžinė, kurios spektro tipas yra G5 (Cannon & Pickering 1989), ši informacija apie ją nurodo, kokios efektinės temperatūros galima tikėtis, atliekant spektro analizę (tipinė G5 žvaigždės T_{eff} yra nuo 5000 K iki 6000 K) (Harvardo spektrinė klasifikacija). Šios žvaigždės ryškis mėlynos šviesos spektre yra 8.78, regimosios šviesos spektre – 7.89 (Hog et al. 2000).
- Kintamoji žvaigždė TYC4536-468-1 (HD 34506), kuri yra 385.76 pc atstumu nuo mūsų ir jos koordinatės yra RA $5^{\circ}31'56''$, Dec $+81^{\circ}03'24''$ (Prusti et al. 2020). Žvaigždė taip pat yra milžinė, jos spektro tipas yra K0 (Cannon & Pickering 1989), tai nurodo, kad tikimasi gauti efektinę temperatūrą, kurios vertė bus nuo 3500 K iki 5000 K; ryškis ultravioletinės šviesos spektre yra 10.85, mėlynos šviesos spektre – 9.10, o regimosios šviesos spektre – 7.62 (Oja 1984).

1.1. *Stebėjimų medžiaga bei tyrimo įrankiai.*

Baigiamajame tiriamajame darbe tirtų žvaigždžių duomenys buvo gauti Vilniaus universiteto Ešėlės spektrografu (VUES), suprojektuotu ir surinktu Jeilio (Yale) universiteto Egzoplanetų laboratorijoje (Jurgenson et al. 2014, 2016) ir sumontuotu ant Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos instituto Molėtų astronomijos observatorijos Ritchey-Chretien teleskopo (Mikolaitis et al., 2018). VUES galima stebėti spektrus $4000 \text{ \AA} - 8000 \text{ \AA}$ diapazone. Skiriamoji geba, stebint pasirinktas žvaigždes, buvo $R = 30000$. Tai, kaip atrodo neapdorotas spektras, galima pamatyti 1 pav..



1 pav. Neapdorotas TYC2957-1441-1 žvaigždės spektras.

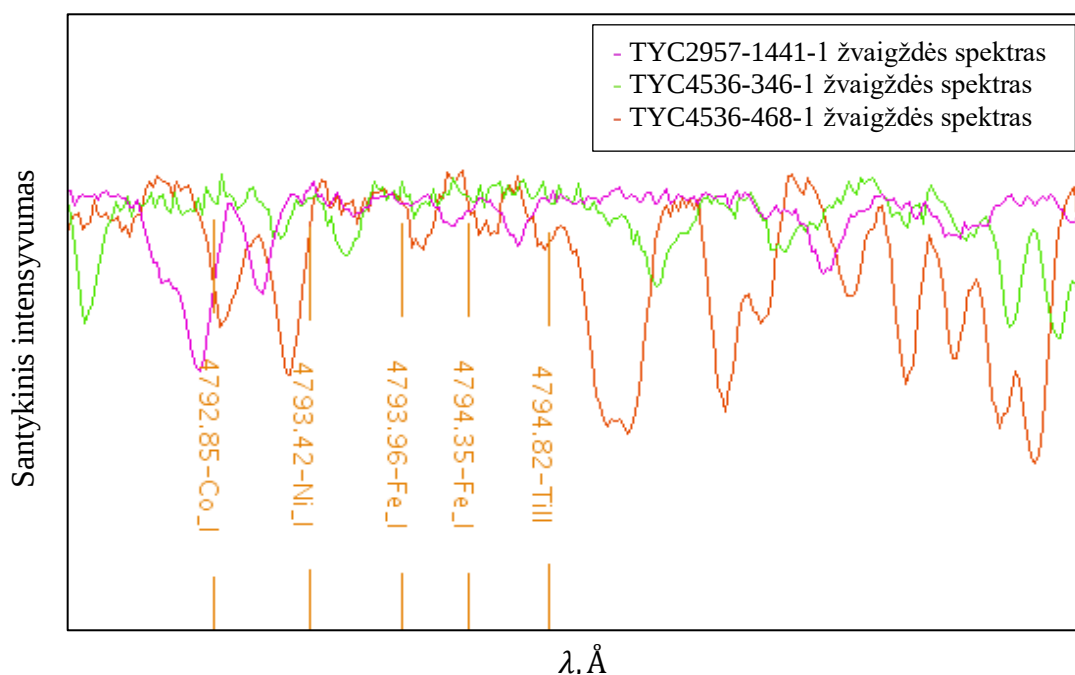
1 lentelėje yra pateikti žvaigždžių stebėjimo duomenys (buvo panaudoti trijų žvaigždžių atmosferų spektrai iš Molėtų astronomijos observatorijos archyvo). Taip pat, 2 paveiksle (2 pav.) pavaizduotas tirtų žvaigždžių spektrų fragmentas (su identifikacinėmis linijomis; spektrai pateikti neatsižvelgiant į jų radialinę greitį, t.y. nepaslinkti Saulės atžvilgiu).

1 lentelė. Tirtų žvaigždžių stebėjimo registracijos duomenys.

Žvaigždė	Data	Laikas, h:m:s	Ekspozicijos trukmė, s
TYC2957-1441-1	2017-04-06	23:24:30	1200
TYC4536-356-1	2018-02-27	17:55:16	1200
TYC4536-468-1	2018-11-30	04:56:39	1200

Analizei buvo naudojamos laboratorijoje gauti cheminių elementų bei jų jonų linijų atominiai duomenys: ekvivalentiniai pločiai (EW) ir osciliatoriaus stipris ($\log(gf)$) iš VALD duomenų bazės (Ryabchikova et al. 2015).

Taip pat buvo naudoti MARCS (Plez 2008) atmosferų modeliai. Analizė buvo atlikta pasinaudojus Python 3 programavimo kalba, SIMBAD duomenų baze, SPLAT-VO programa bei MOOG kodu.



2 pav. Tirtų žvaigždžių spektrų ir identifikacinių linijų fragmentas.

1.2. Radialinio greičio nustatymas.

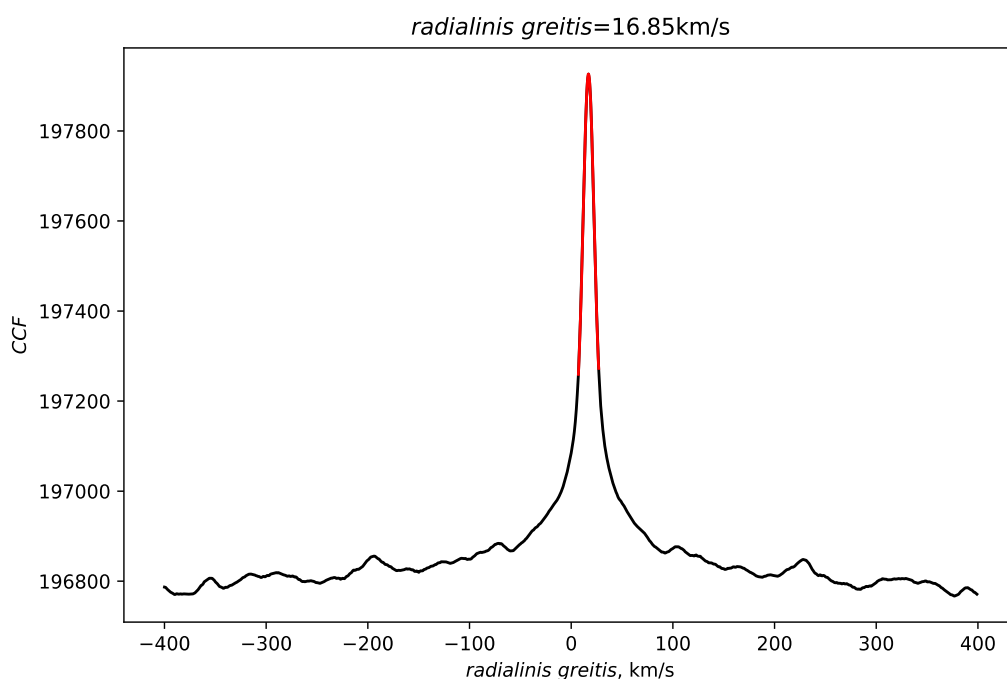
Analizuojant žvaigždžių atmosferų spektrus, svarbu rasti žvaigždžių radialinį greitį. Radialinis greitis – bendras žvaigždės greitis išilgai mūsų matymo linijos (judėjimas vyksta link mūsų arba nuo mūsų). Šį dydį yra lengva išmatuoti ir iš vienos žvaigždės spektro: žvaigždės spektre dėl

Doplerio efekto pasislenka absorbcijos linijos. Dėka Doplerio efekto galime išmatuoti reikiamų elementų bangų ilgius, kurie pasislenka per $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda v_R}{c}. \quad (1)$$

(1) formulėje esantis dydis λ yra elemento bangos ilgis; atitinkamai $\Delta\lambda$ yra bangos ilgio Doplerio poslinkis, kurio vertė kinta nuo žvaigždės radialinio greičio. (Gray 2005).

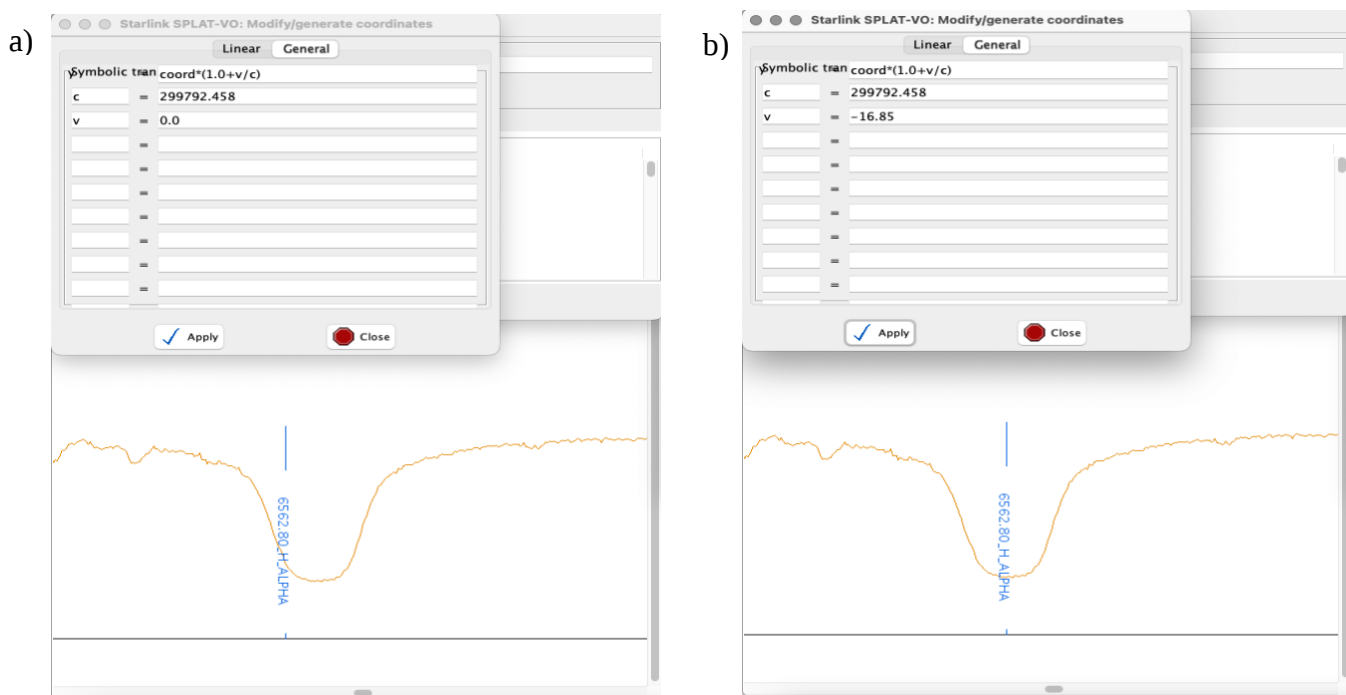
Aptartas v_R gali būti rastas ir pasinaudojus programavimo kalba *Python 3*. Kodas, parašytas tyrimo metu, skirtas rasti radialiniam žvaigždės greičiui, yra pateiktas bakalauro darbo priedų skiltyje (1 priedas). Kode buvo panaudota kroskoreliacijos funkcija. Kroskoreliacijos funkcija – koherentiškumo matmuo tarp signalo ir laike atsilikusio signalo, kuriame matuojami tie patys dydžiai (Prieto 2007). Kode nuskaitomas sumodeliuotas spektras, tada nuskaitomas tiriamosios žvaigždės spektras ir duomenys pavaizduojami grafiškai (3 pav.). Svarbiausia analizės dalis – rasti maksimumo tašką. Šis taškas ir yra ieškomas žvaigždės radialinis greitis. Kad pavyktų gauti kuo tikslesnę reikšmę, ant pavaizduoto grafiko (3 pav. esanti juoda kreivė) yra brėžiama dar viena kreivė: pasirenkami duomenys, esantys arčiau maksimumo, ir nustatomas didesnis tikslumas (mažesnis „žingsnis“) – šios analizės dalies kreivė 3 pav. pavaizduota raudona spalva.



3 pav. Kroskoreliacijos funkcija (CCF) (TYC2957-1441-1 žvaigždės pavyzdys).

1.3. Ekvivalentinių plokčių matavimas.

Siekiant surasti atmosferos parametrus iš pradžių reikia sužinoti mus dominančių cheminių elementų bei jų jonų (vieną kartą jonizuotų elementų) gausas. Tyrimo metu reikiami duomenys buvo gauti naudojantis *SPLAT-VO* programa. Ši programa yra spektrinės analizės įrankis, kuris turi sąsają su virtualia observatorija.



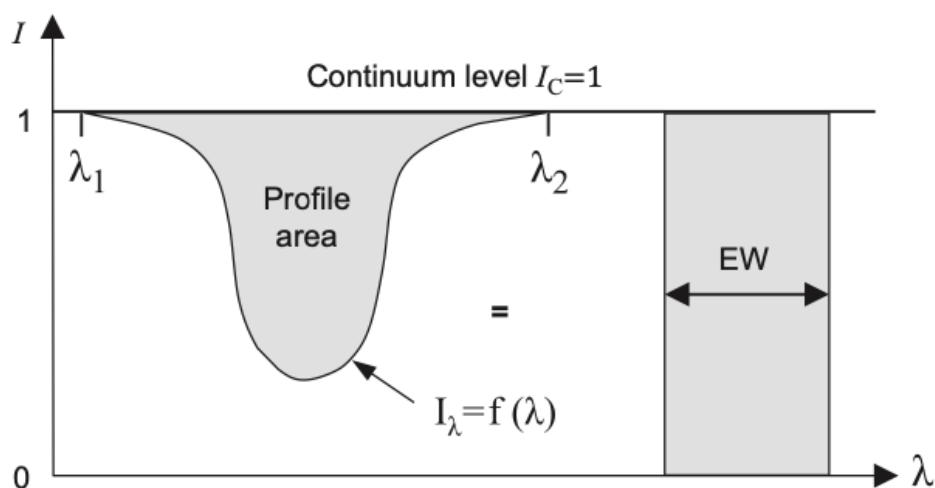
4 pav. Spektro poslinkis, atsižvelgiant į žvaigždės judėjimo greitį ir kryptį (TYC2957-1441-1 žvaigždės pavyzdys).

SPLAT-VO programoje atsidarius norimos žvaigždės spektrą, tame pačiame lange atidaromas ir modeliuotas spektras (laboratorijoje išmatuotas stabilių atominių linijų sąrašas). Kadangi žinoma, jog turimi žvaigždės spektrai pasislinkę dėl Doplerio efekto, atidarytas žvaigždės spektras buvo paslinktas per jos radialinio greičio priešingo ženklo vertę Saulės atžvilgiu. Ši tyrimo dalis pavaizduota 4 paveiksle (4 pav.): paveiksle matomas TYC2957-1441-1 žvaigždės spektras bei laboratorijoje gautos identifikacinės linijos (linija esanti paveiksle - 6562.8 Å H_α linija). 4 paveikslo (4 pav.) a) dalyje matomas nepaslinktas, atsižvelgiant į gautą žvaigždės radialinį greitį, spektras. Paveikslo b) dalyje matomas paslinktas spektras naudojantis (1) formule: $v_r = 16.85$ km/s (2 pav. duomenys); spektro poslinkis buvo atliktas per $v = -16.85$ km/s, nes iš 3 pav. duomenų matoma, kad žvaigždė tolsta nuo stebėtojo, todėl poslinkis atliekamas per rastą v_r vertę su priešingu ženklu.

Pasinaudojant turimo spektro vertėmis surasti dominančių cheminių elementų ir jų jonų linijų ekvivalentiniai pločiai. Ekvivalentinis plotis – spektrinės linijos ploto ar energijos srauto matas, kuris matuojamas Angstremais (Å). Skaičiuojant ekvivalentinį linijos plotį, reikia pasinaudoti (2) formule:

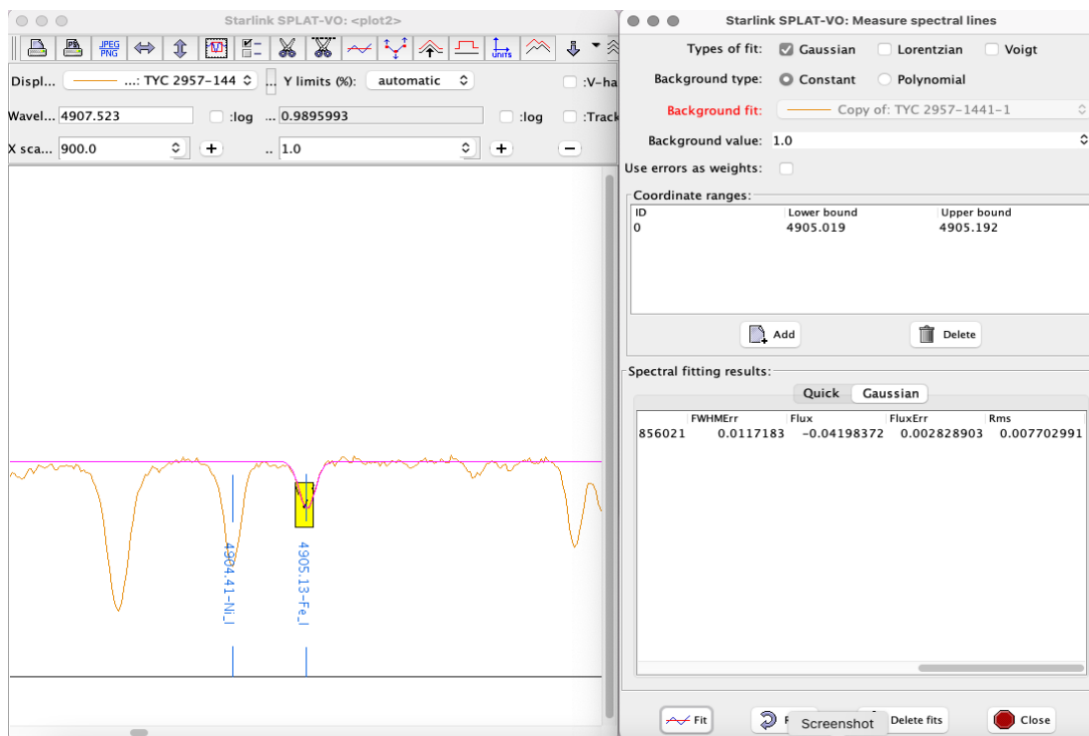
$$EW = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{I_c(\lambda) - I_A(\lambda)}{I_c(\lambda)} d\lambda. \quad (2)$$

Čia $\lambda_{1,2}$ – bangų ilgiai, $I_c(\lambda)$ – lokalus ištisinis srautas, $I_A(\lambda)$ – absorbcijos linija. 5 pav. matomas EW nustatymo principas, bei (2) formulės pritaikymas: EW – ekvivalentinis plotis, $\lambda_{1,2}$ – bangų ilgiai, I_c – kontinuumo lygis, I_λ – matuojamo bangos ilgio λ intensyvumas (Trypsteen & Walker 2017).



5 pav. Ekvivalentinio pločio radimo schema (Trypsteen, M. F. M. & Walker, R. 2017).

Ekvivalentinių pločių radimas pavaizduotas 6 pav.. Čia vaizduojama 4905.13 Å neutralios geležies linija. Rastas gausa ~ -0.04198 , tad ekvivalentinis plotis, pagal (2) formulę, gaunamas 41.98 mÅ.



6 pav. Ekvivalentinių pločių radimas (TYC2957-1441-1 žvaigždės pavyzdys).

1.4. MARCS atmosferos modelis.

Astrofizikoje MARCS (Model Atmospheres in radiative and Convective Series) modeliai naudojami atmosferoms aprašyti ir modeliuoti. Šioje duomenų bazėje yra apie 52 tūkstančiai F, G, K spektrinių klasių žvaigždžių atmosferų modelių. Šie modeliai apima išsamius žvaigždžių atmosferų temperatūros, tankio, cheminės sudėties ir kitų savybių duomenis, kurie suteikia galimybę tyrinėti žvaigždžių spektrus. MARCS modeliai plačiai naudojami tyrimuose, kuriuose siekiama tirti žvaigždžių evoliuciją, nustatyti jų gausas ir kt. (Plez 2008).

1.5. Atmosferos parametrų nustatymas.

Parametrų nustatyme itin svarbi yra MOOG kodo dalis. Šis kodas atlieka įvairias LTE linijų analizės bei spektro sintezės užduotis (Snedden 1973). Pasinaudojus šiuo kodu buvo gauti 4 priede pateikti duomenys.

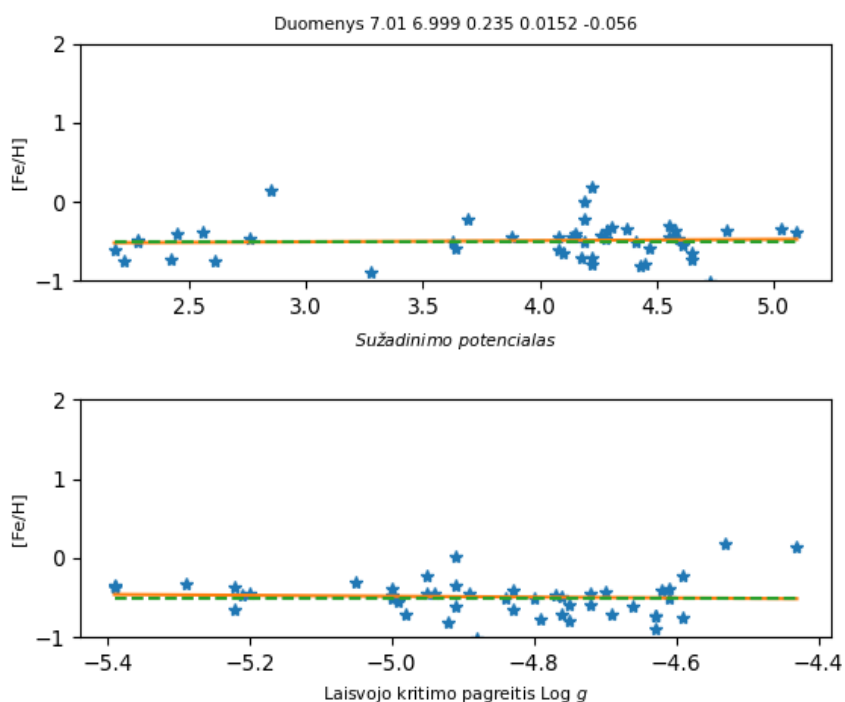
Šio tyrimo susidomėjimo objektas buvo kiekvienos tirtos žvaigždės atmosferos parametrai: žvaigždės efektinė temperatūra, T_{eff} , paviršiaus gravitacija, $\log g$, mikroturbulentinis greitis, v_t , bei žvaigždės metalingumas, $[Fe/H]$. Siekiant rasti šiuos parametrus buvo pritaikyti klasikiniai atomiškai neutralios ir jonizuotos geležies linijų ekvivalentiniai pločiai, kurie aprašyti aukščiau ir pateikti 5 pav. ir 6 pav..

Tyrimo metu buvo naudotas diferencialinis metodas gausoms tirti – visos gausos buvo skaičiuotos Saulės atžvilgiu: iš gaunamos žvaigždės gausos atimama Saulės gausa (Saulės gausų duomenys pateikti 2 lentelėje (2 lentelė)).

2 lentelė. Elementai ir jų gausos Saulėje (Lodders 2019).

Elementai ir jų gausos						
Fe	Mg	Al	Mn	Ni	Ca	Na
7.48	7.56	6.43	5.52	6.20	6.32	6.21
Elementai ir jų gausos						
Sc	V	Cr	Si	Zn	Cu	Co
3.16	3.89	5.62	7.51	4.56	4.18	4.93

Norint lengviau bei patogiau surasti ieškomus žvaigždės parametrus (7 pav.) buvo panaudota *Python 3* programavimo kalba rezultatų vaizdavimui (2, 3 ir 4 priedas).



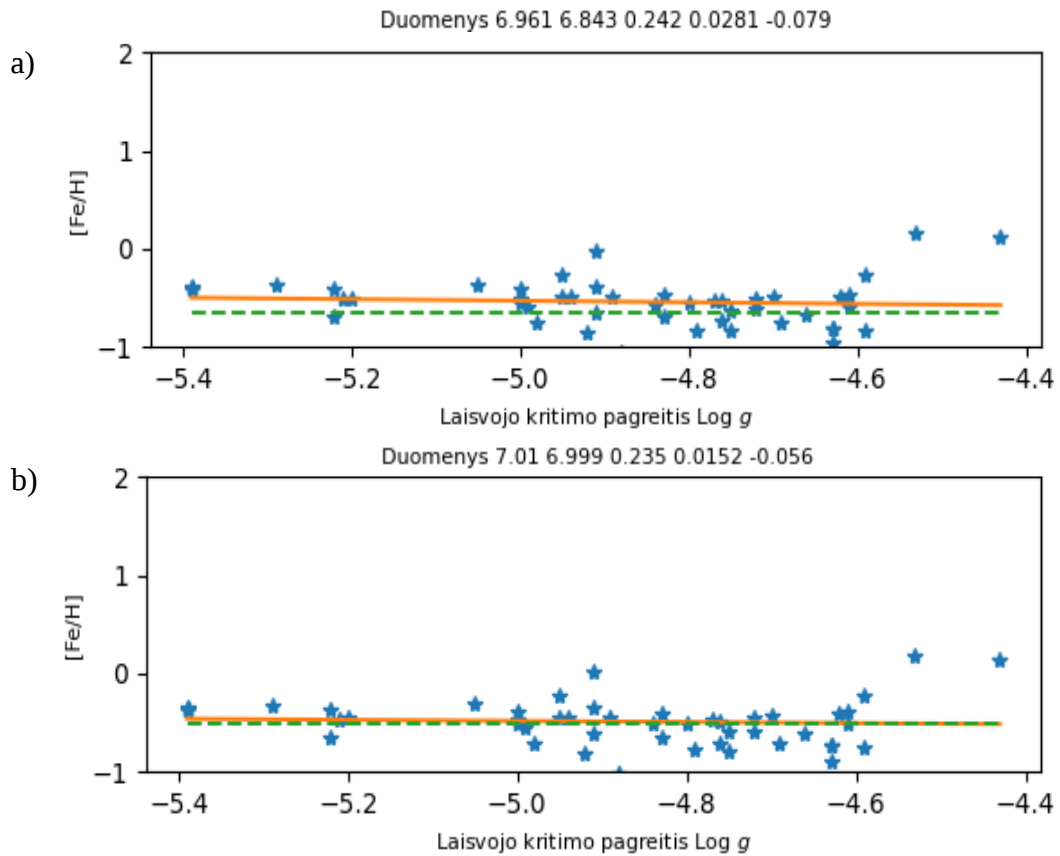
7 pav. MOOG ir *Python 3* kodų rezultatas: žvaigždžių atmosferų parametrų nustatymas (TYC4536-468-1 pavyzdys); skiltyje „Duomenys“ esančių skaičių reikšmės (atitinkamai iš eilės): vidutinė Fe I gausa; vidutinė Fe II gausa; Fe I standartinis nuokrypis; Fe I sužadavimo potencialo polinkis; Fe I redukuoto ekvivalentinio pločio polinkis.

1.5.1. *Efektinės temperatūros radimas.*

MOOG kodas apskaičiuoja ir palygina nustatytus ekvivalentinius pločius su paties apskaičiuotais ekvivalentiniais pločiais, šiuo atveju geležies, – taip, po keleto iteracijų, kai gausų nuokrypio koeficientas pasiekia reikšmę lygią 0, žinome, jog radome teisingą efektinės temperatūros vertę, t.y. 7 pav. esančiame sužadavimo potencialo ir $[Fe/H]$ grafike esantis nuokrypio koeficientas (Fe I sužadavimo potencialo polinkis) (priešpaskutinis „Duomenys“ skilties skaičius 7 pav.) yra mus dominantis kintamasis, ieškant efektinės temperatūros.

1.5.2. *Laisvojo kritimo pagreičio radimas.*

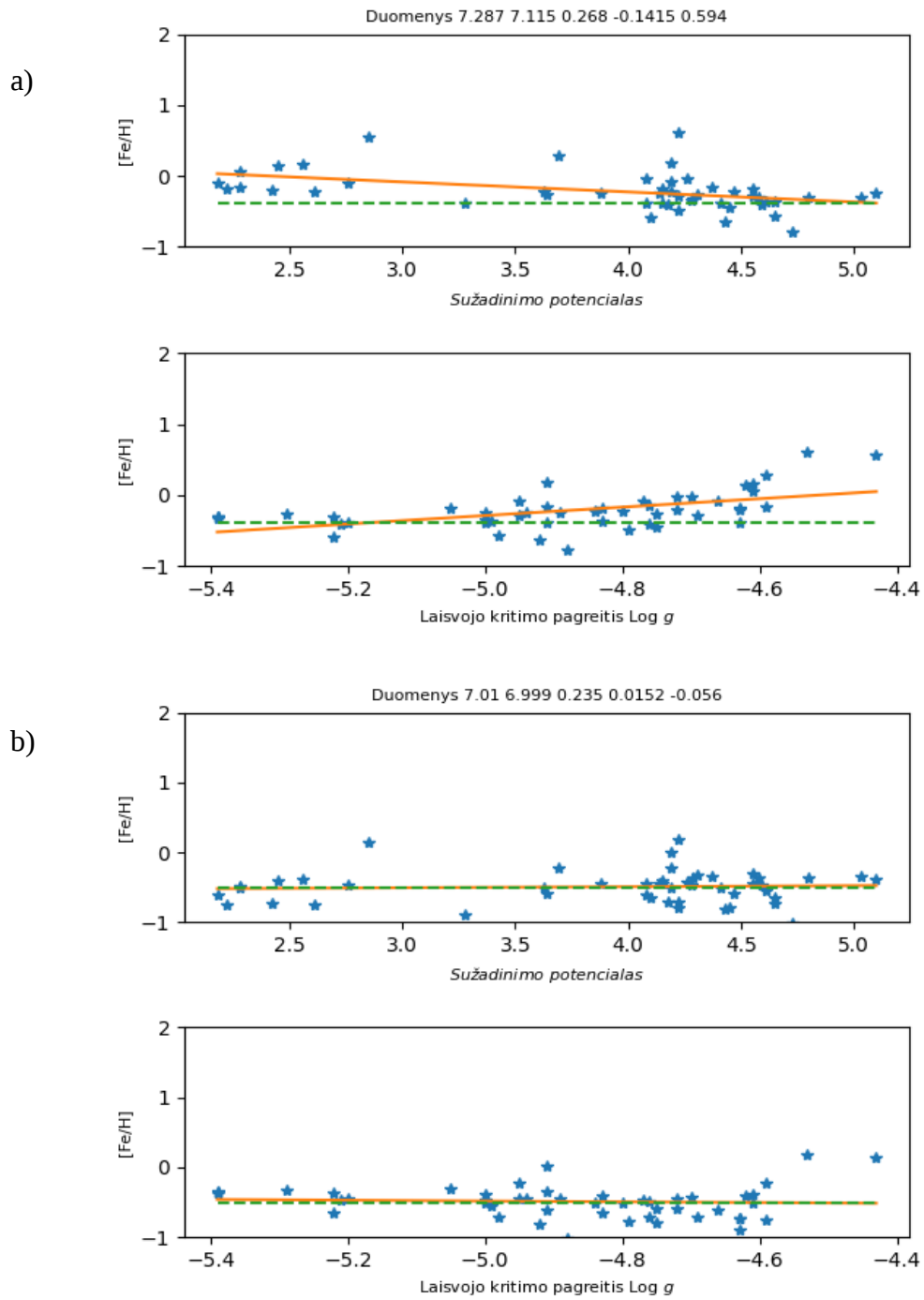
Žvaigždės paviršiaus laisvojo kritimo pagreitis koreliuoja su žvaigždės charakteristika: kuo šis pagreitis mažesnis, tuo žvaigždės spindulys didesnis, atmosfera darosi retesnė, o tai nurodo, kad susidūrimų skaičius tarp atomų ir jonų mažėja. Siekiant nustatyti $\log g$, buvo pasinaudota jonizacijos pusiausvyros principu (jonizuotų elementų linijų ekvivalentiniai pločiai priklauso nuo laisvojo kritimo pagreičio vertės, tuo tarpu neutralių elementų silpnos ir vidutinio stiprumo linijos yra nejautrios laisvojo kritimo pagreičio pokyčiams) (Stonkutė 2013). 8 pav. esantys pirmieji du skaičiai (skiltyje „Duomenys“) – vidutinės Fe I ir Fe II gausos. Kai jos yra sulyginamos, keičiant $\log g$ reikšmę, yra laikoma, jog $\log g$ buvo nustatytas (8 pav. a) dalis – $\log g = 1.5$, matome, kad teisinga dydžio vertė dar mūsų netenkina, todėl ji yra keičiama; b) dalyje $\log g = 2.15$ vertė mus tenkina ir matome iš Fe I ir Fe II verčių, jog laisvojo kritimo pagreitis teisingas).



8 pav. Laisvojo kritimo pagreičio vertės ieškojimas (TYC4536-468-1 žvaigždės pavyzdys); $[Fe/H]$ priklausomybės nuo $\log g$ grafikas, gautas 2 priede esančiu kodu; skiltyje „Duomenys“ esančių skaičių reikšmės (atitinkamai iš eilės): vidutinė Fe I gausa; vidutinė Fe II gausa; Fe I standartinis nuokrypis; Fe I sužadavimo potencialo polinkis; Fe I redukuoto ekvivalentinio pločio polinkis.

1.5.3. Mikroturbulentinio greičio radimas.

Mikroturbulentinis greitis – konvencinis srautų judėjimas. Neutralių elementų silpnos linijos yra beveik nejautrios mikroturbulentinio greičio pokyčiams, tuo tarpu stiprios linijos – yra jautrios (Stonkutė 2013). Siekiant sužinoti, koks yra tiriamosios žvaigždės mikroturbulentinis greitis, reikia keisti jo vertę (9 pav. a) dalyje matome, kad pasirinkta mikroturbulentinio greičio vertė ($v_t = 1.5$ km/s) yra netinkama), kol standartinis nuokrypis įgyja mažiausią vertę (9 pav. b) dalies skiltis „Duomenys“ – trečiasis skaičius iš kairės sumažėjo).



9 pav. Mikroturbulentinio greičio vertės ieškojimas (TYC4536-468-1 žvaigždės pavyzdys); grafikai gauti 2 priede esančiu kodu; skiltyje „Duomenys“ esančių skaičių reikšmės (atitinkamai iš eilės): vidutinė Fe I gausa; vidutinė Fe II gausa; Fe I standartinis nuokrypis; Fe I sužadavimo potencialo polinkis; Fe I redukuoto ekvivalentinio pločio polinkis.

1.5.4. Metalingumas.

Metalingumas – vienas pagrindinių parametru, nusakantis žvaigždžių cheminę sudėtį. Žvaigždės metalingumą galima apskaičiuoti remiantis formule:

$$[Fe/H] = \log_{10} \left[\frac{(Fe/H)}{(Fe/H)_{Saulės}} \right]. \quad (3)$$

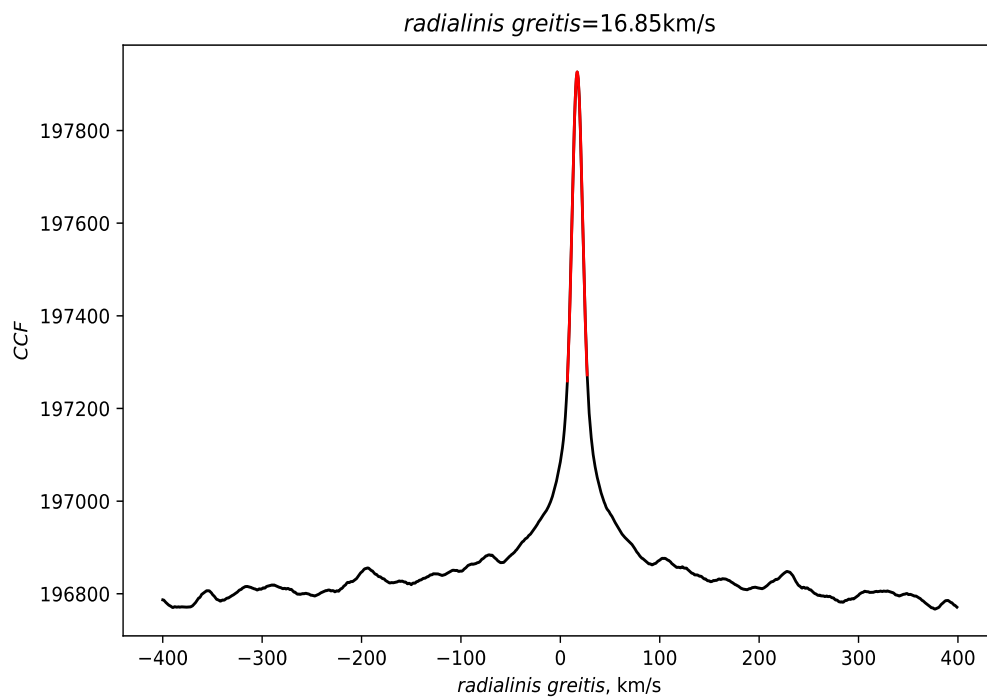
Čia (ir 1 lentelėje) metalingumas yra pažymėtas Fe/H , o $(Fe/H)_{Saulės}$ vertė yra žinoma, ir ji yra 7.5 dex (Lodders 2020). Šis dydis paprastai išreiškiamas kaip sunkesnių už helį elementų ir vandenilio atomų skaičiaus santykis žvaigždėje arba logaritmiškai, kaip matoma iš (3) formulės, kaip žvaigždės geležies ir Saulės geležies gausos santykis. Žvaigždės, kurių metalingumas yra toks pat kaip Saulės, turėtų tokią pat dalį elementų, sunkesnių už helį, kaip ir Saulė. Šiame darbe metalingumu laikoma geležies gausos vertė.

2. Rezultatai

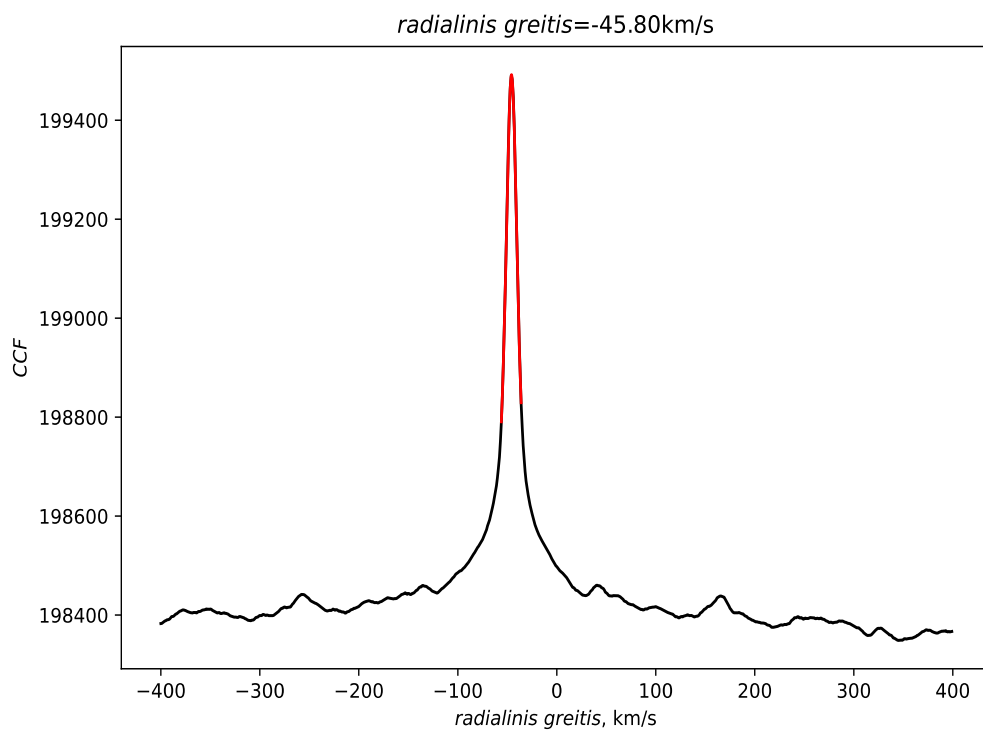
2.1. Radialinis greitis.

Pagal šio rašto darbo skyrelyje „1.2. radialinio greičio nustatymas“ nurodytą būdą buvo rasti visų trijų tirtų žvaigždžių radialiniai greičiai. Dešimtajame paveiksle, *a*), *b*) ir *c*) dalyse, pateikti gauti grafikai ir gauti radialiniai greičiai. 10 pav. *a*), *b*) ir *c*) dalyse esanti juodos spalvos kreivė – $CCF(r_v)$, raudonos spalvos kreivė – tikslesnė (mažesnio „žingsnio“) $CCF(r_v)$, siekiant rasti tikslų kroskoreliacijos funkcijos maksimumo tašką, kurios vertės projekcija abscisių ašyje yra ieškomas radialinis greitis. Jei radialinis greitis teigiamas – žvaigždė tolsta, jei neigiamas – artėja prie stebėtojo.

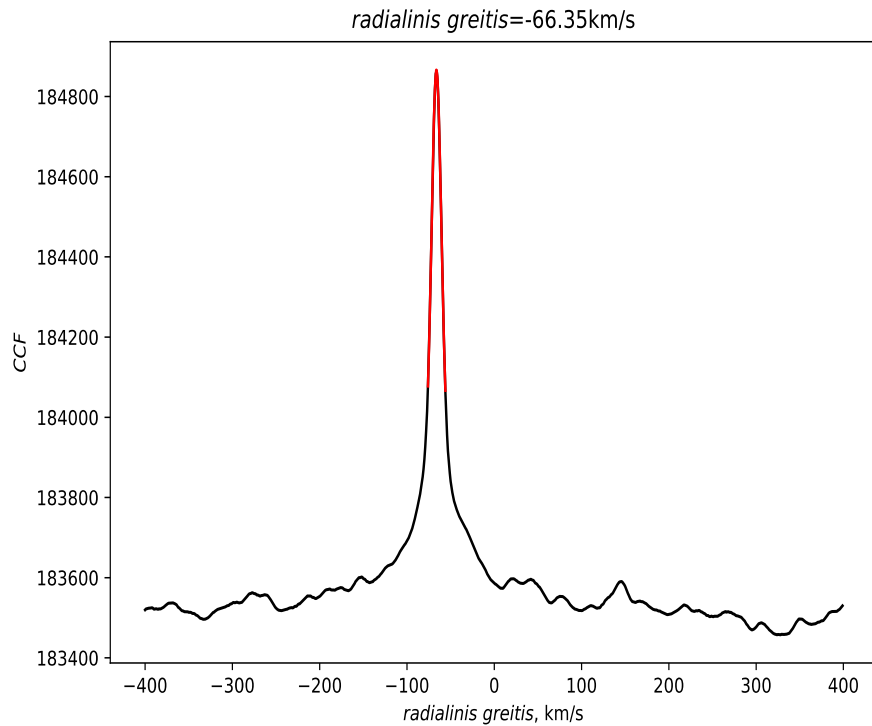
Rasti radialiniai greičiai:



a) TYC2975-1441-1 žvaigždė ir jos $r_v = 16.85 \text{ km/s}$.



b) TYC4536-346-1 žvaigždė ir jos $r_v = -45.80 \text{ km/s}$.



c) TYC4536-468-1 žvaigždė ir jos $v_r = -66.35 \text{ km/s}$.

10 pav. Tirtų žvaigždžių radialinio greičio nustatymas naudojant kroskoreliacijos funkciją (CCF).

- TYC2957-1441-1: $v_r = (16.85 \pm 0.18) \text{ km/s}$, gautąją dydžio vertę galime palyginti su *Gaia* misijos duomenimis (Prusti et al. 2018), kur šios žvaigždės gauta radialinio greičio vertė buvo 16.60 km/s . Matome, kad mūsų gauta radialinio greičio vertė yra 0.25 km/s didesnė – vertės paklaidų ribose sutampa. Taip pat, iš duomenų matome, kad ši žvaigždė tolsta nuo mūsų.
- TYC4536-468-1: $v_r = -66.35 \text{ km/s}$, palyginus su žinomais duomenimis apie šią žvaigždę, kur jos $v_r = (-66.46 \pm 0.15) \text{ km/s}$ (Prusti et al. 2018), mūsų gauta vertė yra 0.09 km/s mažesnė, nei paskutinė nustatyta šios žvaigždės radialinio greičio vertė – vertės sutampa paklaidų ribose; rasta radialinio greičio vertė nurodo, kad žvaigždė artėja link stebėtojo.
- TYC4536-346-1: $v_r = -45.80 \text{ km/s}$, palyginus su žinomais duomenimis apie šią žvaigždę, kur jos $v_r = (-45.83 \pm 0.14) \text{ km/s}$ (Prusti et al. 2018), mūsų gauta vertė yra vos 0.03 km/s mažesnė, nei paskutinė nustatyta šios žvaigždės radialinio greičio vertė, tad abi vertės sutampa paklaidų ribose. Taip pat, nustatyta vertė nurodo, kad žvaigždė artėja stebėtojo link.

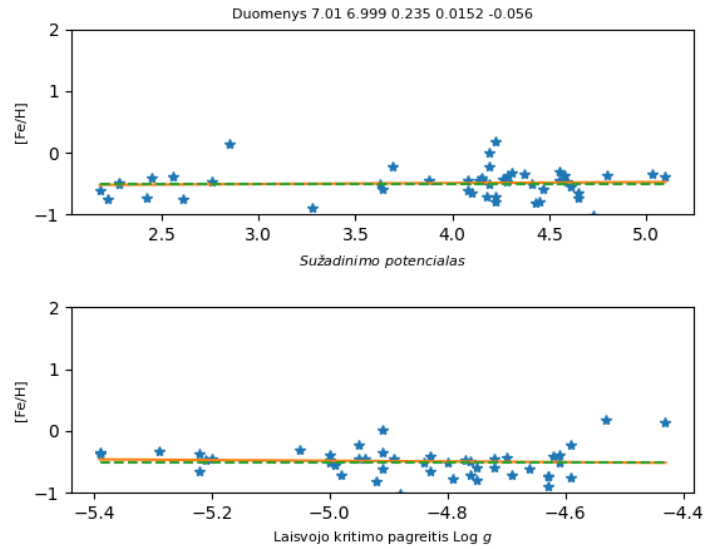
2.2. *Atmosferų parametrai.*

Pasinaudojus šio darbo skyreliu „1.5. Atmosferos parametrų nustatymas“ ir jame aprašytais matavimo metodais (rezultatai pateikti 11 pav.) buvo nustatyti trijų tirtų žvaigždžių atmosferų parametrai, duomenys pateikti 3 lentelėje.

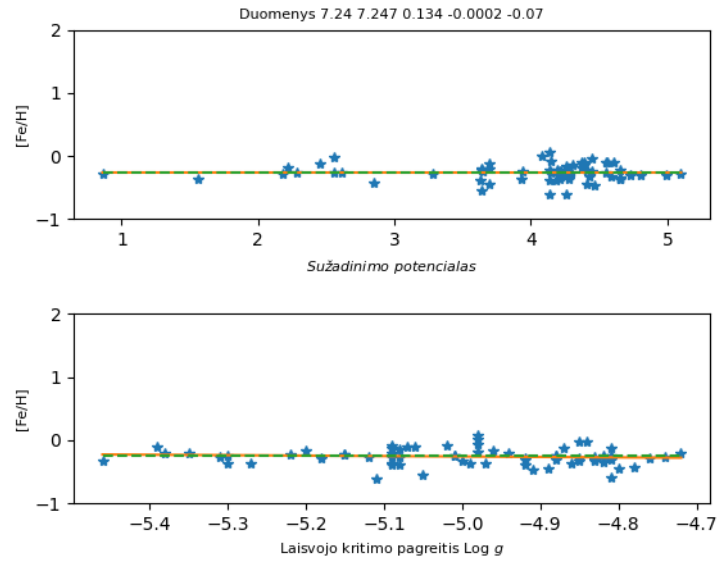
3 lentelė. Žvaigždžių atmosferų parametrai.

Žvaigždė	T_{eff} , K	$\text{Log } g$	Fe/H, dex	v_t , km/s
TYC2957-1441-1	5570.8	4.315	-0.090	1.229
TYC4536-346-1	5051.2	3.326	-0.241	1.100
TYC4536-468-1	4396.0	1.690	-0.482	2.150

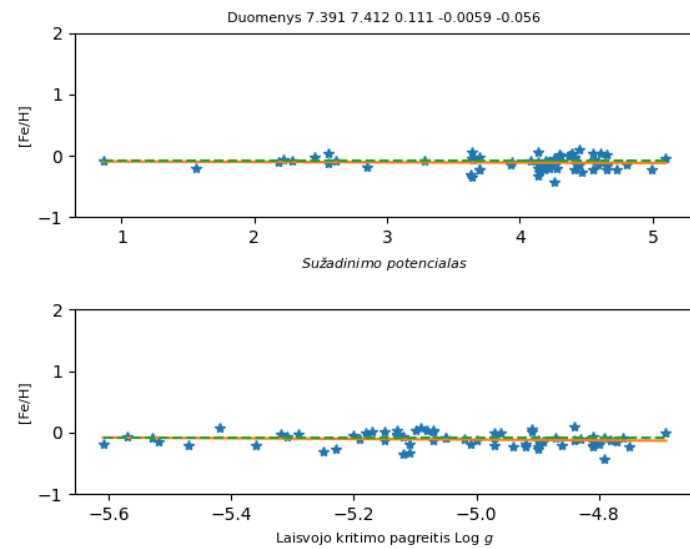
a) TYC4536-468-1



b) TYC4536-346-1



c) TYC2957-1441-1



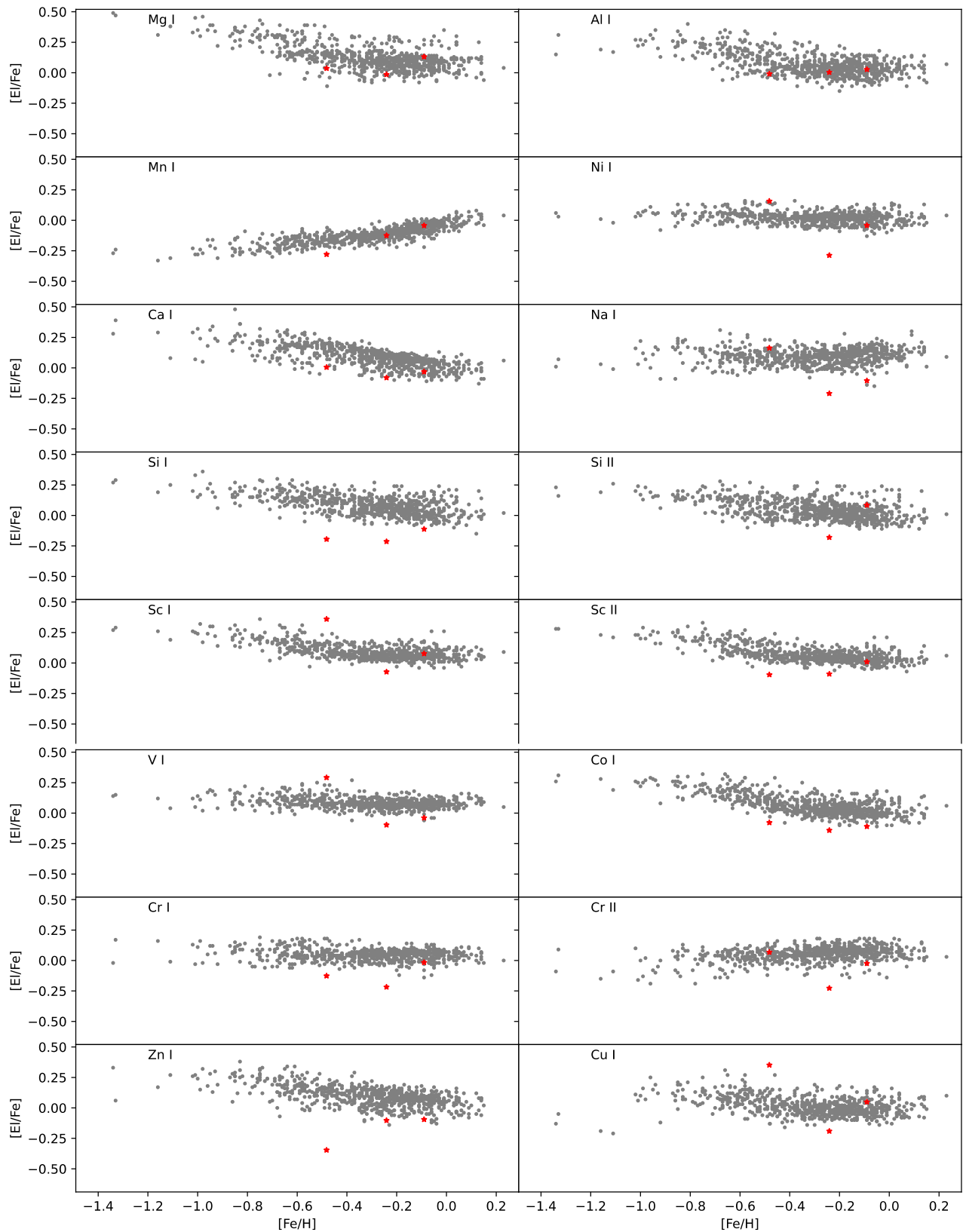
11 pav. MOOG ir Python 3 kodų rezultatas: žvaigždžių atmosferų parametrų nustatymas.

Svarbi šio darbo dalis – žvaigždžių cheminė sudėtis. Prieš tai („1.5. Atmosferos parametrų nustatymas“) buvo aptartas neutralios ir kartą jonizuotos geležies gausų nustatymo principas. Naudoti būdai buvo pritaikyti ir kitų elementų bei vieną kartą jonizuotų jų linijų ekvivalentinių pločių nustatymui. Iš gautų duomenų buvo rastos kiekvieno elemento vidutinės gausos bei jų paklaidos (standartiniai nuokrypiai). Duomenys pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Tirtų žvaigždžių metalingumas ir jo paklaida.

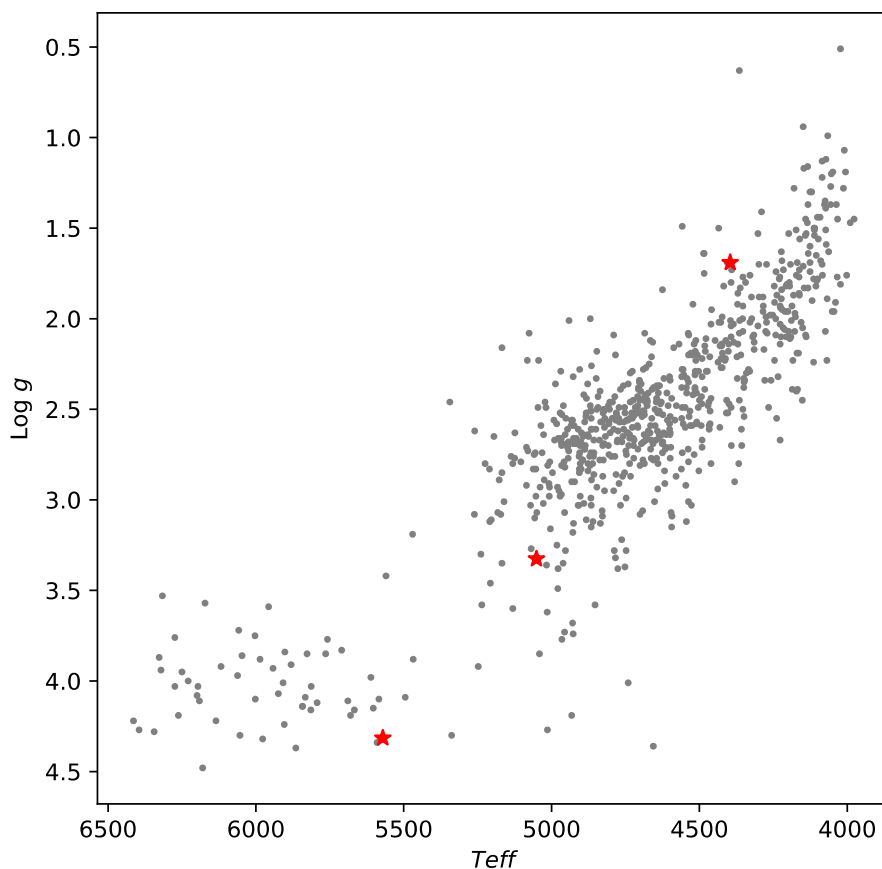
Elementas (El)	El/H, dex			$\Delta[\text{El}/\text{H}]$, dex		
	TYC2957- 1441-1	TYC4356- 346-1	TYC4356- 468-1	TYC2957- 1441-1	TYC4356- 346-1	TYC4356- 468-1
Na I	-0.105	-0.210	0.163	0.066	0.019	0.337
Mg I	0.131	-0.014	0.036	0.158	0.156	0.273
Al I	0.027	0.004	-0.009	0.005	0.101	0.001
Si I	-0.122	-0.214	-0.195	0.049	0.086	0.203
Si II	0.085	-0.180	-	0.157	0.193	-
Ca I	-0.032	-0.081	0.005	0.146	0.360	0.382
Sc I	0.077	-0.073	0.360	0.157	0.193	0.419
Sc II	0.010	-0.090	0.096	0.123	0.235	0.331
Ti I	-0.091	-0.305	-0.181	0.129	0.186	0.250
Ti II	-0.114	-0.333	0.525	0.096	0.127	0.218
V I	-0.039	-0.097	0.292	0.145	0.205	0.272
Cr I	-0.016	-0.218	-0.126	0.216	0.280	0.340
Cr II	-0.024	-0.227	0.068	0.173	0.167	0.346
Mn I	-0.043	-0.125	-0.279	0.230	0.381	0.341
Co I	-0.110	-0.141	-0.078	0.091	0.132	0.338
Ni I	-0.042	-0.287	0.157	0.215	0.117	0.335
Cu I	0.049	-0.191	0.352	0.024	0.193	0.419
Zn I	-0.095	-0.103	-0.346	0.157	0.193	0.419

Gauti rezultatai pavaizduoti 12 pav. (raudoni žymenys grafikuose). Prie cheminių elementų esantys žymėjimai: „I“ – neutralus atomas; „II“ – vieną kartą jonizuotas atomas. Grafikai gauti pasinaudojus *Python 3* programavimo kalba bei kodu, kuris pateiktas priedų skiltyje (5 priedas).



12 pav. Žvaigždžių cheminė sudėtis (metalingumas): cheminių elementų gausa, nustatyta šiame darbe, žymima raudona spalva, palyginimui paimtos Tautvaišienės et al. 2020 tyrimo duomenų vertės (fonas), kurios pažymėtos pilka spalva.

13 pav. pateikta diagrama gauta pasinaudojus programavimo kalba *Python 3* (6 priedas).



13 pav. Žvaigždės gravitacijos priklausomybė nuo efektinės temperatūros: tyrime gauti duomenys pažymėti raudona spalva, o fonas (kitų žvaigždžių duomenys palyginimui) pažymėti pilka spalva, jų duomenys paimti iš Tautvaišienės et al. 2020 metų tyrimo.

13 paveiksle (13 pav.) pateikta $\text{Log } g (T_{eff})$ priklausomybė: raudoni žymenys – tirtos žvaigždės (TYC4536-346-1, TYC4536-468-1 ir TYC2957-1441-1); pilkos spalvos žymenys yra Tautvaišienės et al. 2020 tyrimo duomenys, kurie buvo paimti kaip fonas, šiame darbe aprašomų žvaigždžių palyginimui.

2.3. Rezultatų aptarimas.

Gauti atmosferų parametrų duomenys (pateikti 3 lentelėje), kaip matome, efektinė temperatūra atitinka numanytas vertes:

- TYC4536-346-1 žvaigždės $T_{eff} = (5051.2 \pm 34.51)$ K, kai tikimasi buvo rasti $T_{eff} \approx 5010$ K, dėl žvaigždės spektro tipo;
- TYC4536-468-1 žvaigždės $T_{eff} = (4396 \pm 53.74)$ K, kai tikimasi buvo rasti $T_{eff} \approx 4700$ K, dėl žvaigždės spektro tipo;
- TYC2957-1441-1 žvaigždės $T_{eff} = (5570.8 \pm 30.55)$ K, kai tikimasi buvo rasti T_{eff} vertę, artimą 5614 K (Casagrande et al. 2011) – 5650 K (Guillout et al. 2009) (duomenys iš SIMBAD duomenų bazės), mat ši žvaigždė jau buvo tirta ir jos efektinės temperatūros vertė žinoma. Tyrimo metu rasta efektinės temperatūros vertė vos 43,2 K skiriasi nuo paskutinį kartą nustatytos šios žvaigždės temperatūros: 2011 m. $T_{eff} = 5614$ K (Casagrande et al. 2011).

12 pav. matome neutralių cheminių elementų bei jų jonų (vieną kartą jonizuotų elementų) metalingumą (El/H , čia El yra elemento simbolis): foniniai taškai – pilki taškai, kurių vertės paimtos iš Tautvaišienės et al. 2020 tyrimo; raudoni taškai – ištirtų žvaigždžių metalingumas (elemento atomų ar jo jonų skaičiaus santykis žvaigždėje). Prie kai kurių cheminių elementų ar jų jonų, pavyzdžiui, neutralaus nikelio (Ni I), neutralaus silicio (Si I), neutralaus cinko (Zn I), matomi dideli nuokrypiai nuo kitų Saulės aplinkos žvaigždžių gausų (Tautvaišienė et al. 2020). Tokie neatitikimai gali būti paaiškinami tuo, jog tam tikrų linijų (pvz.: Zn I ir t.t.) skaičius buvo mažas arba žvaigždės spektre buvo tik viena reikšminga elemento linija, spektro triukšmo arba matuojamų linijų blendavimas.

Kaip matome iš pasiskirstymo (13 pav.), kai mažėja laisvojo kritimo pagreitis ir efektinė temperatūra žvaigždėje, ji artėja į milžinių lasę. Taip pat ir atvirkščiai – kuo žvaigždės efektinė temperatūra didesnė bei žvaigždės gravitacija stiprėja, tuo žvaigždė artimesnė nykštukių klasei. Apskritai, diagrama esanti 13 pav. leidžia atskirti įvairių tipų žvaigždes, pavyzdžiui, pagrindinės sekos žvaigždes, raudonąsias milžines ir baltąsias nykštukes. Iš gautų rezultatų matome, kad:

- žvaigždė TYC2957-1441-1 yra G spektrinės klasės, tai galima pasakyti pagal gauta efektinę temperatūrą, kuri yra (5570.8 ± 41.30) K. G spektrinei klasei priklausančių žvaigždžių efektinė temperatūra turi būti diapazone nuo 5000 K iki 6000 K. Paviršiaus gravitacijos gautą rezultatą galima palyginti su Saulės. Saulės (tipinės sekos žvaigždės) paviršiaus gravitacija yra $\text{Log } g = 4.44$, o tiriamosios žvaigždės $\text{Log } g = 4.315$. Šio vertės yra itin artimos, tad galime daryti išvadą, kad tiriamoji žvaigždė taip pat yra nykštukė;
- TYC4536-346-1 yra milžinė. Žvaigždė, kurios $\text{Log } g$ vertė yra mažesnė, greičiausiai bus labiau evoliucionavusi ir turės didesnę spindulį nei žvaigždė, kurios $\text{Log } g$ vertė yra didesnė. Žvaigždė degindama vandenilį ir jungdama į sunkesnius elementus vėsta ir paviršiaus gravitacija mažėja, o, dėl sumažėjusios paviršiaus gravitacijos, žvaigždė didėja ir pasiekia milžinės stadiją. Kadangi tiriamoji žvaigždė yra milžinė, vadinasi, ši žvaigždė jau yra išdeginus didžiąją dalį vandenilio kuro savo šerdyje, galimai jau pradėjus helį naudoti termobranduolinės sintezės reakcijoms (Higby-Naquin 2005). Be to, ši žvaigždė priklauso G spektrinei klasei, nes nustatyta jos T_{eff} ,

kuri yra 5051.2 K, patenka į šios klasės efektinės temperatūros diapazoną - $5000 \text{ K} \leq T_{eff} \leq 6000 \text{ K}$;

- TYC436-468-1 žvaigždė taip pat milžinė. Nors ji patenka į K spektro klasę, nes jos $T_{eff} = 4396 \text{ K}$. Žvaigždės $\text{Log } g$ taip pat indikuoja, kokio dydžio ši žvaigždė – $\text{Log } g = 1.69$, o tai pasako, kad, lyginant tiriamosios žvaigždės paviršiaus gravitaciją su Saulės, matomas aiškus skirtumas, tad galime teigti, kad tirta žvaigždė – milžinė.

2.4. Paklaidos.

Matavimų paklaidos kyla dėl kiekvienos linijos gausų nustatymo netikslumo, kiekvienam elementui ar jo jonui tenkančių linijų skaičiaus: kuo didesnis skaičius, tuo paklaida didėja, nes yra didesnė tikimybė netiksliai išmatuoti gausas. Kita priežastis, dėl kurios atsiranda matavimų paklaidos, yra prietaisų netobulumas. Dėl šių priežasčių svarbu nustatyti, kokio dydžio netikslumai atsiranda tyrime.

Matuotų dydžių paklaidos pateiktos 4 lentelėje (detalesni duomenys apie skirtingų elementų, esančių žvaigždėse, metalingumo paklaidas yra pateikta 3 lentelėje):

- efektyvios temperatūros paklaida buvo įvertinta gavus galimos patenkinamos parametrų erdvės ribines temperatūros vertes, naudojant tiesinės regresijos paklaidą, atitinkančią geležies Fe I gausumą;
- paviršiaus gravitacijos paklaida buvo gauta ieškant $\text{Log } g$ ribinių verčių pagal standartinius gausos nuokrypius nuo Fe I ir Fe II linijų;
- mikroturbulentinio greičio paklaida buvo gauta pasinaudojus neutralios geležies gausos standartinio nuokrypio paklaida;
- Metalingumo standartinis nuokrypis yra metalingumo paklaida.

4 lentelė. Nustatytų parametrų matavimo paklaidos.

Dydžio paklaida / Žvaigždė	TYC2957-1441-1	TYC4536-346-1	TYC4536-468-1
$\Delta T_{eff}, \text{ K}$	± 41.30	± 34.51	± 53.74
$\Delta \text{Log } g$	± 0.07	± 0.25	± 0.42
$\Delta [\text{FeI}/\text{H}], \text{ dex}$	± 0.11	± 0.13	± 0.24
$\Delta [\text{FeII}/\text{H}], \text{ dex}$	± 0.11	± 0.15	± 0.42
$\Delta v_t, \text{ km/s}$	± 0.25	± 0.22	± 0.43

Išvados

Bakalauro baigiamajame darbe buvo spektroskopiškai ištirti trijų atsitiktinių žvaigždžių, stebėtų Molėtų astronominėje observatorijoje, atmosferų parametrai. Gauti TYC2957-1441-1 žvaigždės parametrai, juos palyginus su Guillout et al. 2009 nustatytais parametrais, jie sutampa paklaidų ribose. Be to, pirmą kartą buvo nustatyti TYC4536-346-1 ir TYC4536-468-1 žvaigždžių atmosferų parametrai bei jų cheminė sudėtis. Iš gautų rezultatų matome, kad TYC2957-1441-1 žvaigždė yra nykštukė (pagrindinės sekos žvaigždė), nes jos $\text{Log } g$ yra 4.315, be to, jos radialinis greitis, kuris yra $v_r = 16.85 \text{ km/s}$, nurodo, kad žvaigždė tokiu greičiu tolsta nuo mūsų; TYC4536-346-1 – dar patenka į milžinių klasę, nes jos $\text{Log } g$ yra 3.326 (riba tarp nykštukių ir milžinių yra $\text{Log } g = 3.5$), be to, jos radialinis greitis, kuris yra $v_r = -45.80 \text{ km/s}$, nurodo, kad žvaigždė tokiu greičiu artėja link mūsų; TYC4536-468-1 - milžinė, nes jos $\text{Log } g$ yra 1.69, be to, jos radialinis greitis, kuris yra $v_r = -66.35 \text{ km/s}$, nurodo, kad žvaigždė tokiu greičiu artėja link mūsų. Cheminių elementų gausų nustatymo dalyje pastebimi dideli kai kurių elementų nuokrypiai nuo Saulės gausų. Tam įtakos turi tai, jog vienų linijų, pavyzdžiui, Zn I, kiekis buvo itin mažas (1 linija), be to, tokiam rezultatų pasiskirstymui įtakos galėjo turėti ir matavimų netikslumai.

Literatūra:

- Cannon, A. J., & Pickering, E. C., 1989, VizieR On-line Data Catalog: III/135A
- Casagrande, L., Schönrich, R., Asplund, M., et al., 2011, [A&A](#), 530, A138
- Draper, P. W., Taylor, M., & Neves, M. C., SPLAT-VO-A-VO-enabled Spectral Analysis Tool 3.11-2 User's Manual. (Starlink Project)
- Fraknoi, A., Morrison, D. & Wolff, S., 2022, Astronomy 2e. (XanEdu Publishing Inc)
- Gray, D. F., 2005, The Observation and Analysis of Stellar Photospheres. (University of Western Ontario, Cambridge University Press)
- Guilout, P., Klutsch, A., Frasca, A., et al., 2009, [A&A](#), 504, p. 829-843
- Higby-Naquin, C., 2005, Browsing Swarthmore College
- Hog, E., Fabricius, C., Makarov, V. V., et al., 2000, [A&A](#), 355, p. 385
- Lepine, S. ir Sahara, M. M., 2002, [ApJ](#), 124, p. 1190-1212
- Lodders, K., 2020, Solar Elemental Abundances, in The Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science. (Oxford University Press)
- Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Drazdauskas, A., et al., 2018, [ASP](#), 130:074202, p. 12
- Oja, T., 1984, [A&A](#), 57, p. 357-359
- Plez, B., 2008, Cornell University
- Prieto, C. A., 2007, [ApJ](#), 134, p. 1843-1848
- Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Brown, A. G. A., et al., 2016, [A&A](#), 595, A1
- Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., Greenfield, P., et al., 2013, [A&A](#)
- Ryabchikova, T., Piskunov, N., Kurucz, R. L., et al., 2015, The Royal Swedish Academy of Science, Physica Scripta, 90
- Škoda, P., Draper, P. W., Neves, M. C., et al., 2014, Astronomy and Computing
- Smalley, B. & Dworetsky, M. M., 1993, [A&A](#), 271, p. 515-526
- Snedden, C., 1973, MOOG, (University of Texas at Austin)
- Stock, S., Kemmer, J., Kossakowski, D., et al., 2023, [A&A](#)
- Stonkutė, E., 2013, PhD thesis (Vilnius University)
- Tautvaišienė, G., Mikolaitis, Š., Drazdauskas, A., et al., 2020, [ApJ](#), 248, p. 19
- Trypsteen, M. F. M. & Walker, R., 2017, Spectroscopy for Amateur Astronomers. p. 76-84. (Cambridge University Press)
- Wenger, M., Ochsenbein, F., Egret, D., et al., 2000, [A&A](#), 143, p. 9-22
- Zell, H., 2017, [NASA](#), Layers of the Sun

Priedai

1 Priedas. *Python* 3 kodas radialinio greičio nustatymui.

```

from astropy.io import fits
import numpy as np
from sys import argv
import scipy.constants

import matplotlib.pyplot as plt

hdulist=fits.open(argv[1])

pradinis=hdulist[0].header['CRVAL1']
delta=hdulist[0].header['CDELT1']

print (pradinis)
print (delta)

data1=hdulist[0].data

xx=pradinis+(np.array(range(len(data1)))*delta)
yy=data1

filex = open('modeliuotas _spektras.txt', 'r')
xs = []
ys = []
for line in filex.readlines():
    linija=line.split( )
    xs.append(float(linija[0]))
    ys.append(float(linija[1]))

print('c=', (scipy.constants.c/1000), 'km/s;')

from PyAstronomy import pyasl

rv, cc = pyasl.crosscorrRV(np.array(xx), np.array(data1), np.array(xs), np.array(ys), -400., 400., 1.0, skipedge=100)
plt.plot(rv, cc, 'k')

radial=(rv[np.where(cc==cc.max())])[0]
rvv, ccc = pyasl.crosscorrRV(np.array(xx), np.array(data1), np.array(xs), np.array(ys), radial-10., radial+10., 0.05, skipedge=100)
radial=(rvv[np.where(ccc==ccc.max())])[0]

plt.plot(rvv, ccc, 'r')
plt.title('$radialinis\ greitis$'+str(format(radial, '.2f'))+'km/s')
plt.xlabel('$radialinis\ greitis$, km/s')
plt.ylabel('$CCF$')
plt.show()

print ('rv - žvaigždės radialinis greitis')
print ('rv=', rvv[np.where(ccc==ccc.max())], 'km/s')

```

2 priedas. Python 3 kodas žvaigždės atmosferos parametrų nustatymui.

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import re

filew=open('out_ALT', 'r')

i=0

for line in filew.readlines():
    i=i+1
    if (line[:35] == 'Abundance Results for Species Fe I '):
        pos1=i
        key = 1
    if (line[:35] == 'Abundance Results for Species Fe II '):
        pos2=i
        key = 2
    if re.search('#lines =', line):
        eilute=line.split();
        if(key==1):
            fe1_no=eilute[10]
            fe1_average=float(eilute[3])
            fe1_std=float(eilute[7])
            print(fe1_no)
        if(key==2):
            fe2_no=eilute[10]
            fe2_average=float(eilute[3])
            fe2_std=float(eilute[7])
            print(fe2_no)
    if re.search('E.P. correlation: slope', line):
        eilute=line.split();
        if (key==1):
            fe1_EPSlope=float(eilute[4])
            fe1_EPintercept=float(eilute[7])
        if (key==2):
            fe2_EPSlope=float(eilute[4])
            fe2_EPintercept=float(eilute[7])
    if re.search('R.W. correlation: slope', line):
        eilute=line.split();
        if (key==1):
            fe1_RWSlope=float(eilute[4])
            fe1_RWintercept=float(eilute[7])
        if (key==2):
            fe2_RWSlope=float(eilute[4])
            fe2_RWintercept=float(eilute[7])

fe1data=pd.read_csv("out_ALT", skiprows=pos1, nrows=int(fe1_no), delimiter=r"\s+")
fe2data=pd.read_csv("out_ALT", skiprows=pos2, nrows=int(fe2_no), delimiter=r"\s+")

x=np.linspace(min(fe1data['EP']), max(fe1data['EP']), 100)
y=x*fe1_EPSlope+fe1_EPintercept

figure, axis=plt.subplots(2,1)
axis[0].plot(fe1data['EP'], fe1data['abund']-7.5, '*')
axis[0].plot(x,y-7.5)
axis[0].plot(x,x*0+(fe2_average-7.5), '--')
axis[0].set_ylim(-1, 2)
axis[0].set_title('Duomenys'+ ' '+str(fe1_average)+' '+str(fe2_average)+' '+str(fe1_std)+' '+str(fe1_EPSlope)+' '+str(fe1_RWSlope))

x=np.linspace(min(fe1data['logRW']), max(fe1data['logRW']), 100)
y=x*fe1_RWSlope+fe1_RWintercept
axis[1].plot(fe1data['logRW'], fe1data['abund']-7.5, '*')
axis[1].plot(x,y-7.5)
axis[1].plot(x,x*0+(fe2_average-7.5), '--')
axis[1].set_ylim(-1, 2)

plt.savefig('pav_1')

```

3 priedas. Dokumentas iš kurio nuskaitomi žvaigždės neutralios ir vieną kartą jonizuotos geležies (ir kitų tirtų elementų) bangų ilgiai bei ekvivalentiniai pločiai (šiuo atveju TYC4536-468-1 žvaigždės duomenys).

```

1 abfind
2 terminal      x11
3 standard_out out1
4 summary_out  out_ALT
5 model_in     'Testout/test.alt'
6 lines_in     'TYC4536-468-1.ff'
7 atmosphere   1
8 molecules    2
9 plot         0
10 lines       1
11 strong      0
12 flux/int    0
13 damping     2
14 trudamp     1
15 freeform    1
16 units       0

```

4 priedas. out_ALT dokumentas, kuriame pateikti žvaigždės neutralios ir vieną kartą jonizuotos geležies bangų ilgiai bei ekvivalentiniai pločiai, matuotų dydžių standartinis nuokrypis („std. deviation“) ir kt. (šiuo atveju TYC4536-468-1 žvaigždės duomenys).

```

ALL abundances NOT listed below differ from solar by 0.00 dex
4905.13      26.0      3.93     -1.73      2.20      0.00
tempmodel                                vt= 2.15 M/H= 0.00

Abundance Results for Species Fe I      (input abundance = 7.47)
wavelength  EP      logGF      EW      logRW      abund      del avg
4961.91     3.63     -2.190     79.0     -4.80      7.00      -0.01
4962.57     4.18     -1.180     85.5     -4.76      6.79      -0.22
5044.21     2.85     -2.040    186.0     -4.43      7.65      0.64
5054.64     3.64     -1.920     90.5     -4.75      6.91      -0.10
5067.15     4.22     -0.970    148.1     -4.53      7.68      0.67
5088.15     4.15     -1.680     75.0     -4.83      7.09      0.08
5243.78     4.26     -1.050    105.8     -4.70      7.07      0.06
5253.02     2.28     -3.840     91.1     -4.76      7.02      0.01
5253.46     3.28     -1.580    122.9     -4.63      6.61      -0.40
5288.52     3.69     -1.490    136.0     -4.59      7.28      0.27
5373.71     4.47     -0.710    101.7     -4.72      6.92      -0.09
5398.28     4.45     -0.630     95.8     -4.75      6.71      -0.30
5406.77     4.37     -1.620     66.6     -4.91      7.16      0.15
5417.03     4.41     -1.580     54.5     -5.00      6.99      -0.02
5473.16     4.19     -2.040     61.2     -4.95      7.27      0.26
5491.83     4.19     -2.190     68.0     -4.91      7.51      0.50
5543.94     4.22     -1.040     89.5     -4.79      6.72      -0.29
5560.21     4.43     -1.090     66.3     -4.92      6.69      -0.32
5577.02     5.03     -1.540     22.6     -5.39      7.15      0.14
5587.57     4.14     -1.750     71.4     -4.89      7.06      0.05
5638.26     4.22     -0.720    115.0     -4.69      6.79      -0.22
5649.99     5.10     -0.820     56.9     -5.00      7.12      0.11
5661.34     4.28     -1.760     57.0     -5.00      7.03      0.02
5902.47     4.59     -1.710     36.2     -5.21      7.04      0.03
5905.67     4.65     -0.690     86.6     -4.83      6.85      -0.16
5916.25     2.45     -2.990    142.0     -4.62      7.09      0.08
5927.79     4.65     -0.990     61.4     -4.98      6.78      -0.23
5929.68     4.55     -1.310     66.9     -4.95      7.05      0.04
6034.04     4.31     -2.310     30.7     -5.29      7.18      0.17
6035.34     4.29     -2.400     24.8     -5.39      7.13      0.12
6056.00     4.73     -0.320     80.2     -4.88      6.48      -0.53
6151.62     2.18     -3.300    135.9     -4.66      6.89      -0.12
6157.73     4.08     -1.160    118.5     -4.72      7.05      0.04
6200.31     2.61     -2.430    145.4     -4.63      6.76      -0.25
6226.73     3.88     -2.120     72.2     -4.94      7.06      0.05
6297.79     2.22     -2.740    161.2     -4.59      6.75      -0.26
6315.81     4.08     -1.630     77.3     -4.91      6.89      -0.12
6380.74     4.19     -1.380     91.5     -4.84      6.99      -0.02
6481.87     2.28     -2.980    158.3     -4.61      7.00      -0.02
6609.11     2.56     -2.690    162.0     -4.61      7.12      0.11
6627.54     4.55     -1.590     58.9     -5.05      7.19      0.18
6653.85     4.15     -2.210     41.9     -5.20      7.05      0.04
6703.57     2.76     -3.060    112.7     -4.77      7.04      0.03
6713.74     4.80     -1.500     40.2     -5.22      7.13      0.12
6725.36     4.10     -2.100     41.0     -5.22      6.85      -0.16
6726.67     4.61     -1.130     69.5     -4.99      6.95      -0.06
6732.06     4.58     -2.020     27.6     -5.39      7.14      0.13
6750.15     2.42     -2.620    157.6     -4.63      6.77      -0.24
average abundance = 7.010      std. deviation = 0.235      #lines = 48
E.P. correlation: slope = 0.0152 intercept = 6.950 corr. coeff. = 0.054
R.W. correlation: slope = -0.056 intercept = 6.738 corr. coeff. = -0.056
wav. correl.: slope = -6.879E-05 intercept = 7.413 corr. coeff. = -0.166

Abundance Results for Species Fe II      (input abundance = 7.47)
wavelength  EP      logGF      EW      logRW      abund      del avg
5256.93     2.89     -4.180     53.3     -4.99      7.46      0.46
6084.10     3.20     -3.880     23.0     -5.42      6.90      -0.10
6247.56     3.89     -2.430     37.5     -5.22      6.63      -0.37
average abundance = 6.999      std. deviation = 0.424      #lines = 3
No statistics done for E.P. trends
No statistics done for R.W. trends
wav. correl.: slope = -7.864E-04 intercept = 11.610 corr. coeff. = -0.985

```

Pastaba: *wavelength* – bangos ilgis Angstremais; *EP* – sužadavimo potencialas; *logGF* – osciliatoriaus stiprumas; *EW* – ekvivalentinis linijos plotis Angstremais; *logRW* – redukuotas ekvivalentinis plotis (dydis randamas atsižvelgiant į sužadavimo potencialą ir ekvivalentinį linijos plotį); *abund* – gausa;

del avg – vidutinis nuokrypis; *average abundance* – vidutinė gausa; *std. deviation* – standartinis nuokrypis;

5 priedas. *Python 3* kodo dalis, skirta 12 pav. vaizdavimui.

```
1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import numpy as np
4 from numpy import arange, sin, pi
5 from matplotlib.backends.backend_pdf import PdfPages
6
7 failas=pd.read_csv("asu.tsv", sep = ";")
8
9 GAUSA_Fe=failas["[FeI/H]"]
10 GAUSA_V=failas["[VI/H]"]
11 GAUSA_Cr=failas["[CrI/H]"]
12 GAUSA_CrII=failas["[CrII/H]"]
13 GAUSA_Co=failas["[CoI/H]"]
14 GAUSA_Cu=failas["[CuI/H]"]
15 GAUSA_Zn=failas["[ZnI/H]"]
16
17 pp=PdfPages('piesinys2.pdf')
18 fig=plt.figure(figsize=(12, 4))
19
20 ax1=fig.add_axes([0, 0, 0.4, 0.4])
21 ax1.scatter(GAUSA_Fe, GAUSA_V-GAUSA_Fe, facecolors='grey', edgecolors='grey', s=4)
22 ax1.scatter([-0.090, -0.241, -0.482], [-0.039, -0.097, 0.292], facecolors='red', edgecolors='red', s=16,
23            marker='*')
24 ax1.axis([-1.49, 0.29, -0.69, 0.52])
25 ax1.set_ylabel('[El/Fe]', fontdict=None, labelpad=None)
26 ax1.text(-1.2, 0.4, "V I")
```

6 priedas. *Python 3* kodo dalis, skirta 13 pav. vaizdavimui.

```
1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import numpy as np
4 from numpy import arange, sin, pi
5 from matplotlib.backends.backend_pdf import PdfPages
6
7 failas=pd.read_csv("asu.tsv", sep = ";")
8
9 Teff=failas["Teff"]
10 logg=failas["logg"]
11
12 pp=PdfPages('teff_logg.pdf')
13 fig=plt.figure(figsize=(12, 12))
14
15
16 ax=fig.add_axes([0, 0, 0.4, 0.4])
17 ax.scatter(Teff, logg, facecolors='grey', edgecolors='grey', s=4)
18 ax.scatter([5570.8, 5051.2, 4396], [4.315, 3.326, 1.69], facecolors='red', edgecolors='red', s=50,
19            marker='*')
20 plt.gca().invert_xaxis()
21 plt.gca().invert_yaxis()
22 #ax.axis([-1.49, 0.29, -0.69, 0.52])
23 ax.set_ylabel('Log $g$', fontdict=None, labelpad=None)
24 ax.set_xlabel('$Teff$', fontdict=None, labelpad=None)
25
26 plt.savefig(pp, format='pdf', bbox_inches='tight')
27 pp.close()
```