VILNIAUS UNIVERSITETO
FIZIKOS FAKULTETO
TEORINĖS FIZIKOS IR ASTRONOMIJOS INSTITUTAS

Lina Liaudanskaitė

ŽVAIGŽDŽIŲ SU EGZOPLANETOMIS DETALI CHEMINĖS SUDĖTIES ANALIZĖ

Bakalauro studijų baigiamasis darbas

Kompiuterinės fizikos ir modeliavimo studijų programa

Studentas Lina Liaudanskaitė

Darbo vadovas dr. Edita Stonkutė

Instituto atstovas prof. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2022

TURINYS

ĮVADAS 3

1. LITERATŪROS APŽVALGA 5

2. TYRIMO METODIKA 7

2.1 Stebėjimų duomenys 7

2.2 Žvaigždės spektras ir spektrinių linijų formavimasis 7

2.3 Linijų profiliai ir ekvivalentiniai pločiai 8

2.4 Pagrindiniai atmosferos parametrai 8

2.4.1 Efektinė temperatūra 9

2.4.2 Gravitacijos pagreitis 9

2.4.3 Mikroturbulencija 10

2.4.4 Metalingumas 10

2.5 Žvaigždžių atmosferų modeliai 10

2.6 Sintetinių spektrų metodas 11

2.7 Paklaidos 12

3. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS 13

3.1 Žvaigždės atmosferos pagrindinių fizikinių parametrų nustatymas 13

3.2 Nustatytų fizikinių atmosferos parametrų palyginimas su kitais autoriais 17

3.3 Cheminė žvaigždžių sudėtis 18

3.4 Cheminių elementų gausų priklausomybė nuo kondensacijos temperatūros 23

IŠVADOS 26

SANTRAUKA 27

SUMMARY 28

LITERATŪRA 29

PRIEDAI 33

ĮVADAS

Jau seniausios civilizacijos domėjosi, tyrė dangaus kūnus, jų išsidėstymą bei judėjimą. Šis natūralus žmogaus noras suprasti kas vyksta žemėje ir už jos ribų skatino kurti technologijas, padėsiančias geriau suprasti dangaus objektus. Iš smalsumo pažinti gimė astronomija – fizikos srities mokslas, tiriantis dangaus kūnus.

Vienas būdų tyrinėti visatą yra spektroskopija. Ši astronomijos sritis stebi ir tiria elektromagnetinės spinduliuotės spektrą, kuris sklinda iš dangaus kūnų. Spektroskopijos dėka galima sužinoti apie objekto cheminę sudėtį ir fizikinius parametrus, tokius kaip: temperatūra, slėgis, metalingumas.

Viena iš šiuo metu populiariausių temų astronomijoje yra planetos už Saulės sistemos ribų, taip pat žinomos kaip egzoplanetos. 1995 metais atradus pirmą planetą prie Saulės tipo žvaigždės [1] susidomėjimas jomis vis augo. Iki šiol, t. y. iki 2022 m. gegužės mėn. 19 d., žmonės patvirtino 5030-ies egzoplanetų egzistavimą [2].

Norint surasti ir analizuoti planetas prie kitų žvaigždžių reikia suprasti, kas lemia jų formavimąsi. Vienas iš tokių netiesioginių būdų yra žvaigždės, aplink kurią skrieja planeta, detali cheminės sudėties analizė. Žvaigždės ir jų planetos formuojasi iš to paties dujų ir dulkių debesies, o jų cheminė sudėtis laikoma tokia pati arba dalinai susijusi. Cheminių elementų gausų, tokių kaip ličio, magnio, silicio, deguonies, anglies ir azoto bei jų santykių, spektroskopiniai tyrimai suteikia papildomų žinių apie planetas prie kitų žvaigždžių. King ir kt. 1997 [3] pirmieji nustatė ryšį tarp ličio gausos sumažėjimo ir planetų egzistavimo prie kitų žvaigždžių. Anglies ir deguonies gausų spektroskopiniai tyrimai žvaigždėse yra labai svarbūs, nes šie cheminiai elementai yra gana paplitę Galaktikoje ir vaidina svarbų vaidmenį žvaigždžių gelmėse generuodami energiją termobranduolinėse reakcijose. Anglies ir deguonies gausos gali turėti įtakos vandens egzistavimui. Planetose C/O santykis kontroliuoja karbidų ir silikatų formavimąsi, o Mg/Si santykis suteikia informaciją apie silikatų mineralizaciją. Silikatai yra svarbus ingredientas uolėtų planetų formavimuisi, jie yra labiausiai paplitę planetų mantijoje ir plutoje [4]. Šie cheminiai elementai taip pat vaidina svarbų vaidmenį norint sukonstruoti planetų formavimosi modelius [5].

Darbo tikslas:

Atlikti detalią žvaigždžių su egzoplanetomis cheminės sudėties analizę: nustatyti ličio, anglies, azoto, deguonies, magnio ir silicio gausas sintetinių spektrų metodu.

Darbo uždaviniai:

- Susipažinti su mokslinėmis publikacijomis, aprašančiomis žvaigždžių su planetomis ir egzoplanetų tyrimus;
- Ekvivalentinių linijų pločių metodu nustatyti pagrindinius žvaigždžių atmosferos fizikinius parametrus: efektinę temperatūrą T_{eff}, gravitacinio pagreičio žvaigždės paviršiuje logaritmą log g, mikroturbulencijos greitį v_t, bei metalingumą: geležies gausą vandenilio atžvilgiu [Fe/H], o gautus rezultatus palyginti su kitų autorių rezultatais;
- Sintetinių spektrų metodu nustatyti cheminių elementų anglies, azoto, deguonies, ličio, magnio, silicio gausas. Gautus rezultatus palyginti su kitų autorių rezultatais;
- Pristatyti rezultatus ir suformuoti darbo išvadas.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Moksliniuose tyrimuose apie žvaigždes su egzoplanetomis skiriamas didelis dėmesys cheminiams elementams C, N, O, Mg, Si ir Li. Šie elementai yra svarbūs, nes žvaigždžių ir proplanetinio disko sudėtys tarpusavyje yra susijusios, nustatytos elementų gausos ir jų santykiai žvaigždėse turėtų pasakyti, kokia yra apie ją skriejančios planetos sudėtis ir struktūra. Iš anglies ir deguonies santykio C/O galima nusakyti iš anglies, silicio susidarančių mineralų kiekį planetose. Yra pastebimas sąryšis tarp magnio ir silicio santykio Mg/Si ir planetų dydžio: didesnių planetų savininkės turi mažesnius Mg/Si santykius [6]. Taip pat yra prielaidų, kad Mg/Si santykis žvaigždėse su mažomis planetomis yra didesnis už žvaigždžių, kurios neturi planetų [7].

Skirtumas tarp mažą ir didelę kondensacijos temperatūrą turinčių elementų gausų taip pat yra dažnai nagrinėjama tema tarp egzoplanetas tyrinėjančių mokslininkų. Mažą kondensacijos temperatūrą turintys elementai, tokie kaip deguonis, anglis, azotas, dar vadinami lakiais (angl. *volatile*), didelę kondensacijos temperatūrą turintys elementai (magnis, silicis) – sunkiai lydžiais (angl. *refractory*). Tiksliai ištyrus elementų gausas Saulėje buvo pastebėta, kad palyginus su žvaigždėmis panašiomis į Saulę, bet kurios neturi planetų, sunkiai lydžių elementų gausos Saulėje yra mažesnės. Taip pat pastebėta, kad skirtumai tarp elementų gausų žvaigždėse su bent viena egzoplaneta ir žvaigždėse be jų koreliuoja su tų elementų kondensacijos temperatūromis [6].

G. Tautvaišienė ir kt. 2022 [8] moksliniame darbe nagrinėjo ryškių žvaigždžių, matomų iš šiaurinio pusrutulio, cheminę sudėtį. Jie išanalizavo 848-ių žvaigždžių spektrus ir nustatė jų pagrindinius atmosferos parametrus bei 24-ių cheminių elementų gausas. Tyrimams naudojo MOOG [9] ir Turbospectrum [10] kodus. Į tyrinėtų žvaigždžių tarpą pateko ir 25 žvaigždės su egzoplanetomis. Analizuojant jas G. Tautvaišienė ir kt. [8] priėjo kelias išvadas. Viena iš jų yra tai, kad žvaigždės nykštukės, turinčios didelės masės planetas, yra metalingesnės, nei mažos masės planetas turinčios nykštukės. Taip pat, kad žvaigždžių su didelės masės planetomis C/O ir Mg/Si santykių vertės yra mažesnės, nei mažos masės planetas turinčių žvaigždžių. Lyginant elementų kondensacijos temperatūras su gausų skirtumu tarp žvaigždžių su planetomis ir be jų, pastebėta, kad tiesinės priklausomybės krypties koeficientai žvaigždėms su mažos masės planetomis yra teigiami.

Taip pat, 2021 metų straipsnyje T. Mishenina ir kt. [6] tyrė žvaigždžių su didelėmis planetomis cheminę sudėtį. Dvidešimt penkioms žvaigždėms buvo nustatytos cheminių elementų gausos, tarp kurių buvo ir Li, C, O, N, Mg, Si. Straipsnyje analizuotos nustatytų elementų gausų priklausomybės

nuo tokių parametrų, kaip metalingumas, efektinė temperatūra ir elementų kondensacijos temperatūra. Jų tyrimas parodė, kad žvaigždžių, kurios turi didelės masės planetas, magnio ir silicio santykis, Mg/Si yra mažesnis. Nustatytos anglies bei deguonies gausos ir jų santykis, C/O parodė, kad tirtose žvaigždėse anglies gausa mažesnė nei Saulėje ir kad žvaigždės su didelės masės planetomis nebūtinai turės didelę anglies gausą [6].

2. TYRIMO METODIKA

2.1 Stebėjimų duomenys

Tyrimo metu nagrinėti spektrai buvo gauti Molėtų astronomijos observatorijos 165 cm teleskopo (MAO 1.65 m) VUES spektrografu [11]. Stebėjimai buvo atlikti 2021 liepos – lapkričio mėnesiais. Ekspozicijos trukmės buvo nuo 1200 – 3600 s.

VUES spektrografu užfiksuoto spektro bangos ilgių intervalas yra nuo 400 nm iki 880 nm. Skiriamoji geba $R \sim 36000$.

2.2 Žvaigždės spektras ir spektrinių linijų formavimasis

Žvaigždžių atmosferų aukštos skiriamosios gebos spektrai suteikia daug informacijos apie žvaigždes. Spektras - tai žvaigždės spinduliuojamos energijos intensyvumo pasiskirstymas pagal bangos ilgius. Ištisiniuose žvaigždžių spektruose matoma įvairaus tamsio sugerties linijų. Jos susidaro, kai žvaigždės gelmėse išspinduliuotas ištisinis spektras praeina pro retesnius išorinius atmosferos sluoksnius, kurie yra sudaryti iš neutralių arbą jonizuotų įvairių cheminių elementų atomų. Atomai peršokdami į aukštesnius energijos lygmenis sugeria tam tikrų bangos ilgių fotonus. Po tam tikro laiko, atomai grįždami į žemesnį energijos lygmenį išspinduliuoja sugerto bangos ilgio fotoną, bet šis spinduliavimas jau vyksta į visas puses. Dėl šių priežasčių mus pasiekia mažesnis kiekis fotonų ir ištisiniame spektre atsiranda tamsus tarpas, kuris yra cheminiam elementui būdinga spektro sugerties linija [12, p. 189].

Skirtingų žvaigždžių spektro linijos skiriasi. To pačio elemento linijos vienos žvaigždės spektre gali būti skirtingos palyginus su kitos žvaigždės spektru. Spektro sugerties linijų skirtumai reiškia, kad žvaigždės turi kitokią cheminę sudėtį ir galimai skirtingas fotosferos temperatūras. Įtaką spektro linijoms daro ir slėgis žvaigždžių fotosferoje, kuris priklauso nuo gravitacijos pagreičio [12, p. 189].

2.3 Linijų profiliai ir ekvivalentiniai pločiai

Norint išmatuoti spektro linijų stiprumą reikia įvertinti linijų profilius. Linijų profiliu vadinama spektrinės linijos forma. Spektrinės sugerties linijos teoriškai turėtų būti siauros, bet realybėje jos praplatėja dėl kelių priežasčių. Viena iš jų yra Doplerio efektas, kiekvienas greitai judantis atomas praplatina linijos profilį. Taip atsitinka todėl, kad žvaigždės spinduliuojamos bangos juda į visas puses, o dėl Doplerio efekto jos visos šiek tiek pasislenka į raudonąją ar mėlynąją spektro pusę nuo išspinduliuotos bangos centrinio bangos ilgio. Kuo didesnė temperatūra, tuo didesnis atomų judėjimo greitis, tuo labiau pasislinkusios bangos ir išsiplėtusios linijos. Doplerio poslinkį sukelia ir turbulenciniai masių judėjimo greičiai, kurie taip pat kaip šiluminis judėjimas praplatina linijų profilius [13, p. 107-108].

Ekvivalentinis plotis yra būdas išmatuoti sugerties linijos stiprumą. Tai stačiakampis, kurio plotas yra lygus visos linijos sugertam energijos srautui. Šituo būdu galima išmatuoti spektro linijos energiją nepaisant linijos profilio formos. Ekvivalentinis linijos plotis W_λ apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_\lambda = \sum \frac{F_c - F_\lambda}{F_c} d\lambda \qquad (1)$$

kur F_c yra spektro kontinuumo intensyvumas, F_λ intensyvumas tam tikrame bangos ilgyje, $d\lambda$ bangos ilgių intervalas [12, p. 108].

Šiame darbe linijų ekvivalentiniai pločiai automatiškai buvo išmatuoti naudojant DAOSPEC [14] programą.

2.4 Pagrindiniai atmosferos parametrai

Pagrindiniai šiame tyrime nustatomi atmosferos parametrai yra efektinė temperatūra T_{eff} (K), gravitacijos pagreitis log g, mikroturbulencija v_t (km/s) ir metalingumas [Fe/H]. Spektrai analizuoti diferencialiniu atmosferų modelių metodu naudojant programinį paketą MOOG [9], kuris naudojamas teorinių žvaigždžių fizikinių parametrų ir cheminių elementų gausų nustatymui. Analizės diferencialinio metodo esmė ta, kad cheminių elementų gausa nustatoma palyginamosios žvaigždės (Saulės) atžvilgiu. Atominiai linijų duomenys paimti iš Gaia-ESO spektrinės apžvalgos [15], o atmosferų modeliai – MARCS [16]. Šiame tyrime naudotas spektrinis ekvivalentinių pločių metodas $T_{eff.}$ log g, v_t ir [Fe/H] nustatymui.

2.4.1 Efektinė temperatūra

Žvaigždės atmosferos temperatūrą apibūdina efektinė temperatūra $T_{eff.}$ Ji yra nustatoma lyginant žvaigždę su idealiu spinduoliu. Tai idealaus spinduolio temperatūra, kurio paviršiaus vienetinis plotas skleidžia tiek pat energijos, kiek ir žvaigždės vienetinis paviršiaus plotas. Žvaigždės efektinė temperatūra nustatoma pagal Stefano-Bolcmano dėsnį, kuris teigia, kad žvaigždės vienetinio ploto skleidžiama energija visais bangos ilgiais yra proporcinga efektinei temperatūrai ketvirtuoju laipsniu:

$$E = \sigma T_{ef}^4 = \int_0^\infty F_v dv \qquad (2)$$

E – žvaigždės vienetinio ploto skleidžiama energija, σ – Bolcmano konstanta ($\sigma = 5{,}67032 \cdot 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$). Energiją E gaunama integruojant idealaus spinduolio energijos pasiskirstymo visame spektre kreivę [12, p. 182]. Efektinė temperatūra yra svarbus parametras, nes pagal ją nustatomas spektrinis tipas, žvaigždės spalva ir kiti pagrindiniai parametrai. Nustatyti efektinę temperatūrą galima keliais metodais, pavyzdžiui fotometrija.

2.4.2 Gravitacijos pagreitis

Gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje log g yra laisvojo kritimo sukeltas žvaigždės paviršiuje esančių dalelių pagreitis. Gravitacijos pagreitis g žvaigždės paviršiuje aprašomas:

$$g = \frac{GM}{R^2} \qquad (3)$$

G – gravitacijos konstanta, M – žvaigždės masė, R – žvaigždės spindulys.

Pagal viršuje pateiktą formulę galima teigti, kad kuo mažesnis gravitacijos pagreitis - tuo didesnis žvaigždės spindulys, todėl retėja žvaigždės atmosfera. Retesnė atmosfera reiškia tai, kad yra didesni tarpai tarp atomų, todėl mažėja susidūrimų skaičius tarp dalelių. Šis faktas matomas ištisiniame spektre ir sugerties linijose. Taip pat galima pastebėti, kad pagal 3 formulę gravitacijos pagreičiui nustatyti yra reikalinga žvaigždės masė ir spindulys. Šiuos parametrus yra pakankamai sunku išmatuoti, todėl yra naudojami kiti metodai norint nustatyti log g. Šiame tyrime naudojamas spektrinis metodas, kuris remiasi geležies linijų jonizacijos pusiausvyros principu [12, p. 210-211].

2.4.3 Mikroturbulencija

Turbulencija yra žvaigždės fotosferos dujų kolektyvinis judėjimas. Mikroturbulencija, žymima v_t, skirta apibūdinti mažų atstumų mastelių judėjimus. Dirbant su spektrais į mikroturbulenciją atsižvelgiama todėl, kad ji išplečia spektro linijas. Tai vyksta dėl dujų judėjimo sukelto Doplerio efekto. Šio tyrimo metu mikroturbulencija buvo nustatinėta žinant, kad silpnos spektro linijos nėra jautrios turbulencijai, todėl matuojant v_t dėmesys buvo kreipiamas į stipriąsias linijas [17].

2.4.4 Metalingumas

Metalingumas, [Fe/H] apibūdina žvaigždės atmosferos cheminę sudėtį, elementų sunkesnių už H ar He gausą. Metalingumas nustatomas lyginant žvaigždės elemento E ir vandenilio H gausų santykį su to pačio elemento ir vandenilio gausos santykiu Saulėje. Šis santykis išreiškiamas formule:

$$[E/H] = \lg([E/H])_* - \lg([E/H])_\odot \qquad (4)$$

Kadangi yra lyginama su Saulėje esančia elemento gausa, tai visados Saulės santykinis metalingumas [Fe/H] = 0, o absoliutinis A(Fe) yra 7,45 [18]. Vandenilis parinktas kaip atskaitos elementas, nes jo žvaigždėse yra daugiausia. Santykis [Fe/H] dažniausiai naudojamas todėl, kad iš spektro lengviausia nustatyti geležies gausą. Metalingesnės už Saulę žvaigždės turi [Fe/H] > 0, mažiau metalingos - [Fe/H] < 0 [12, p. 254].

2.5 Žvaigždžių atmosferų modeliai

Žvaigždės atmosfera yra jos išoriniai sluoksniai, kurie skleidžia elektromagnetinius spindulius į kosminę erdvę. Fotosfera yra giliausias atmosferos sluoksnis, kuriame susidaro ištisinis žvaigždės spektras ir spektrinės sugerties linijos. Atmosferos modelis parodo, kokia yra fizikinių parametrų priklausomybė nuo optinio gylio. Naudojantis atmosferos modeliu galima apskaičiuoti žvaigždės pagrindinius parametrus.

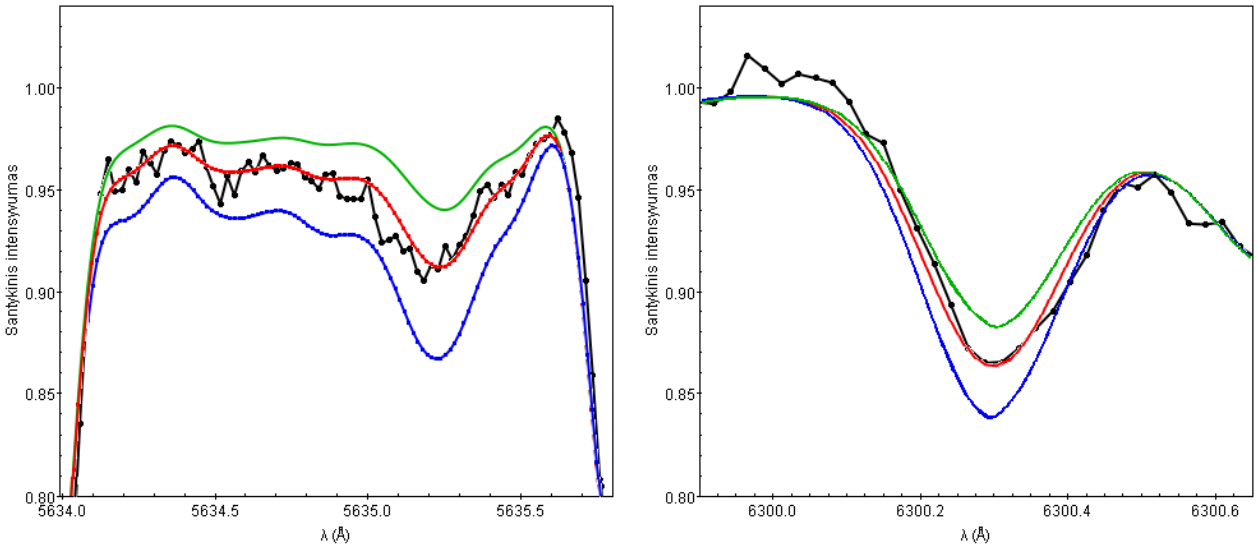
Šiame tyrime buvo naudojami MARCS atmosferos modeliai [16]. MARCS apima 52000 atmosferinių modelių F, G, K žvaigždžių spektriniams tipams. MARCS modelių parametrų diapazonas efektinei temperatūrai yra nuo 2500 K iki 8000 K, paviršiaus gravitacijai nuo -1,0 iki 5,5, santykiniam metalingumui -5,0 iki 1,0.

2.6 Sintetinių spektrų metodas

Šiame darbe buvo tirtos cheminių elementų C, N, O, Mg, Si, Li gausos. Gausų matavimui buvo naudojamas sintetinių spektrų metodas pasinaudojant Turbospectrum [10] kodu. 1 pav. parodyti sintetinių spektrų pavyzdžiai.

Sintetinio spektro metodu matuojant elementų gausas pirmiausia yra nustatomas žvaigždės sukimosi greitis *v*sin*i*, kuris parodo kiek yra išplatėjusios spektro linijos. Įvedus į programą nustatytą *v*sin*i* vertę pasirenkama spektro dalis, kurioje yra norima pamatuoti spektro linija ir suskaičiuojamas sintetinis spektras. Pataisomas lokalus kontinuumas ir keičiant gausos vertes žiūrima, kad sintetinio spektro raudona linija (1 pav.) atitiktų stebėtą spektrą. 1 pav. žvaigždžių TYC 1193-2072-1 ir TYC 1058-3400-1 spektro spektrinės sintezės pavyzdžiai. Juodos taškuotos linijos yra stebėtas žvaigždės spektras, raudonos linijos yra geriausias sintetinio spektro atitikmuo, žalios ir mėlynos linijos rodo gausų pasikeitimą per ±0,1.

Deguonies gausa buvo nustatyta iš 6300,3 Å bangos ilgio linijos, anglies gausa iš 5135,7 Å, 5635,2 Å linijų. Azoto gausa iš 6477,1 Å, 6478,7 Å, 6480,9 Å, 7992,2 Å, 7995,1 Å, 7995,6 Å, 8003,2 Å, 8003,5 Å, 8003,9 Å linijų. Magnio gausa iš 5711,1 Å, 6318,7 Å, 6319,2 Å, 5528,4 Å linijų. Ličio gausa iš 6707,8 Å linijos. Silicio gausa iš 5645,6 Å, 5665,5 Å, 5684,5 Å, 5690,4 Å, 5701,1 Å, 5708,4 Å, 5772,1 Å, 5780,4 Å, 5793,1 Å, 5948,5 Å, 6299,6 Å, 6555,5 Å, 6721,8 Å, 6741,6 Å linijų.



1 pav. Sintetinių spektrų pavyzdžiai. Kairėje C linijos 5635 Å pavyzdys, dešinėje uždraustos [OI] linijos 6300 Å. Juodos taškuotos linijos yra stebėtas spektras, raudonos linijos yra geriausias sintetinio spektro atitikmuo, žalios ir mėlynos linijos rodo gausų pasikeitimą per ±0,1.

2.7 Paklaidos

Paklaidos yra kelių rūšių. Vienos rūšies paklaidos, kurios atsiranda dėl atominių parametrų netikslumų, naudojamų matavimo metodų, ištisinio spektro įvertinimo, vertinamos kiekvienai linijai atskirai. Kitos rūšies paklaidos veikia visas linijas vienu metu, šio tyrimo atveju tai atmosferos parametrų paklaidos. Daugiau apie paklaidas 3.1 skyrelyje.

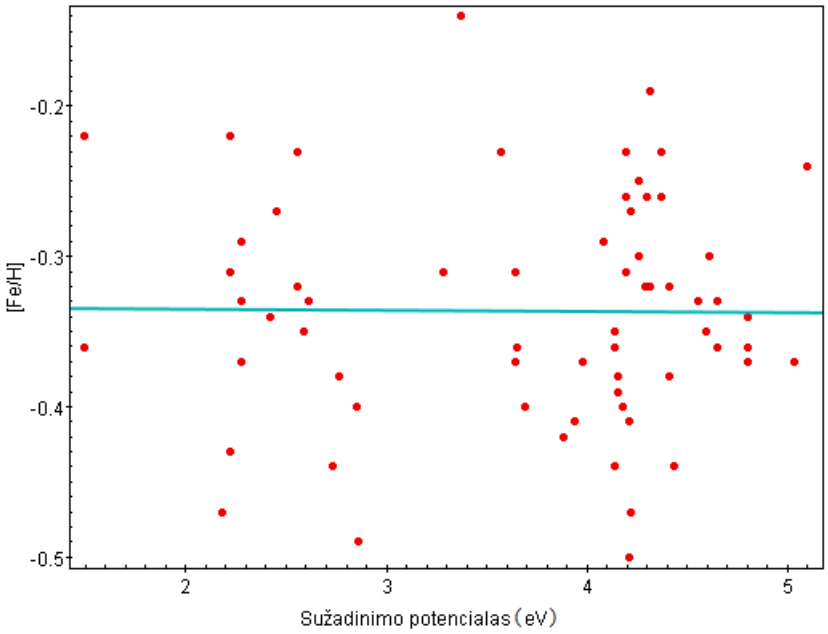
3. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

3.1 Žvaigždės atmosferos pagrindinių fizikinių parametrų nustatymas

Ekvivalentiniai linijų pločiai buvo suskaičiuoti naudojantis DAOSPEC [14] programa. Ji automatiškai randa spektro linijas, išmatuoja jų ekvivalentinius pločius ir nustato radialinį greitį. FeI gausai išmatuoti buvo naudojamos 67 spektro linijos, FeII – 9 spektro linijos.

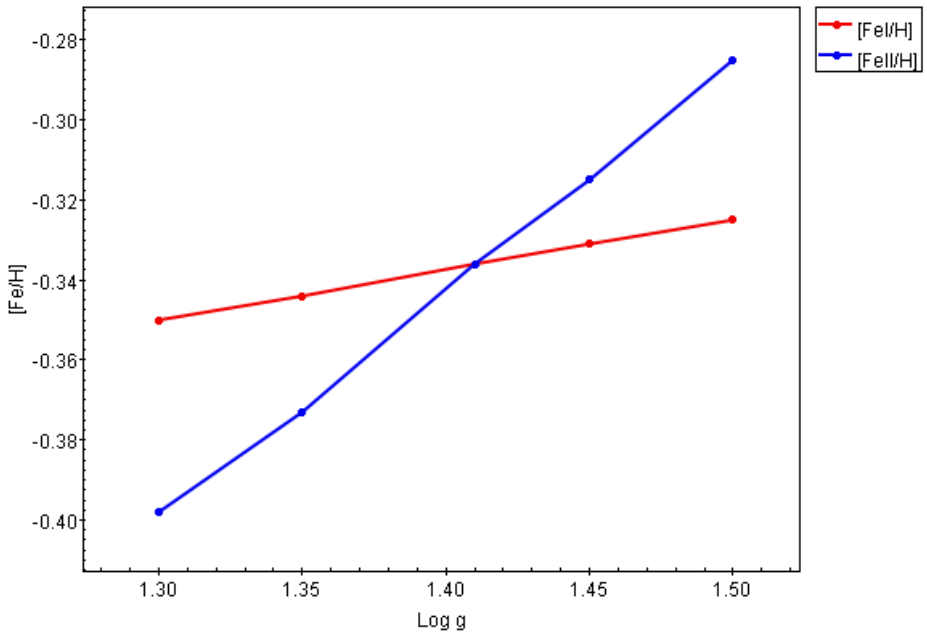
Žvaigždės atmosferos pagrindinių fizikinių parametrų nustatymui buvo naudojamas MOOG kodas [9] ir MARCS atmosferų modeliai [16]. MOOG automatiškai iteraciniu būdu nustato atmosferos parametrus pagal toliau aprašytus kriterijus.

Kadangi visos sugerties linijos turi tokią pačią gausą žvaigždėje, keičiant pagrindinius atmosferos parametrus MOOG [9] ieško tokios temperatūros, su kuria elemento gausa nepriklausytų nuo atskirų linijų apatinio lygmens sužadinimo potencialo. 2 pav. pavaizduota, kad su tinkama efektinės temperatūros verte tarp geležies gausos ir sužadinimo potencialo verčių nėra priklausomybės.



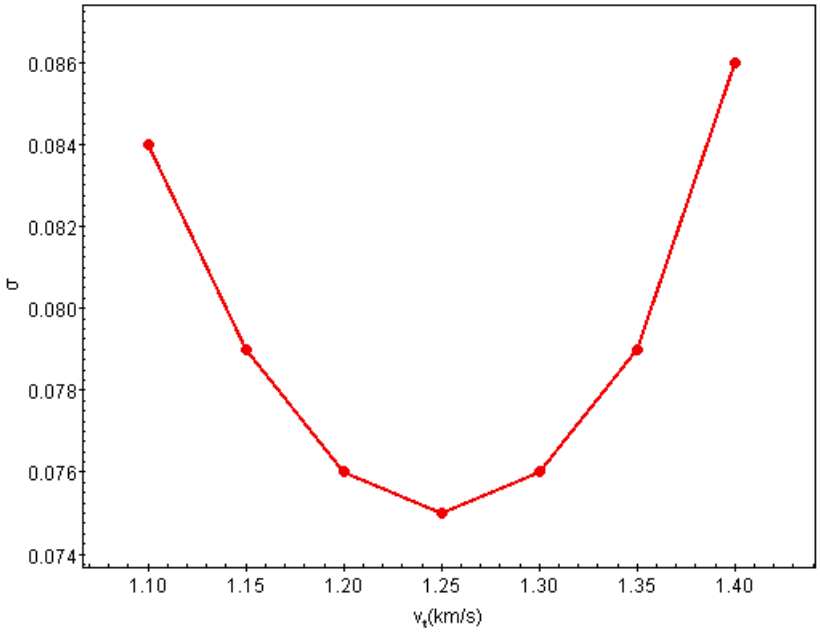
2 pav. Geležies gausų [Fe/H] priklausomybė nuo sužadinimo potencialo.

Gravitacijos pagreitis žvaigždės paviršiuje log *g*, nustatomas pagal skirtingas jonizacijos būsenas turinčios geležies gausas. Tam, kad būtų rastas log *g*, MOOG [9] keičia gravitacijos pagreičio vertes kol yra pasiekiama vienoda neutralios ir jonizuotos geležies (FeI ir FeII) gausos vertė. 3 pav. pavaizduotas FeI ir FeII gausos kitimas priklausomai nuo skirtingų gravitacijos pagreičio verčių. Grafike log *g* vertė, kurioje FeI ir FeII gausos tokios pačios, yra tinkamiausia žvaigždės gravitacijos pagreičio vertė. Šiuo atveju matoma, kad tokia log *g* vertė yra lygi 1,41.



3 pav. Žvaigždės gravitacijos pagreičio nustatymas pagal jonizacijos principą.

Mikroturbulencijos vertė ieškoma remiantis faktu, kad stiprios neutralios geležies linijos yra jautrios turbulencijai, o silpnos – ne. Dėl šios priežasties, keičiant mikroturbulencijos vertę MOOG [9] ieško tokio atmosferos parametrų modelio, su kuriuo geležies gausos nuokrypis nuo vidutinės vertės σ yra mažiausias. 4 pav. grafike pavaizduota, kad mikroturbulencijos vertė su mažiausiu nuokrypiu σ = 0,75 yra kai v_t = 1,25 km/s.



4 pav. Mikroturbulencijos greičio nustatymas.

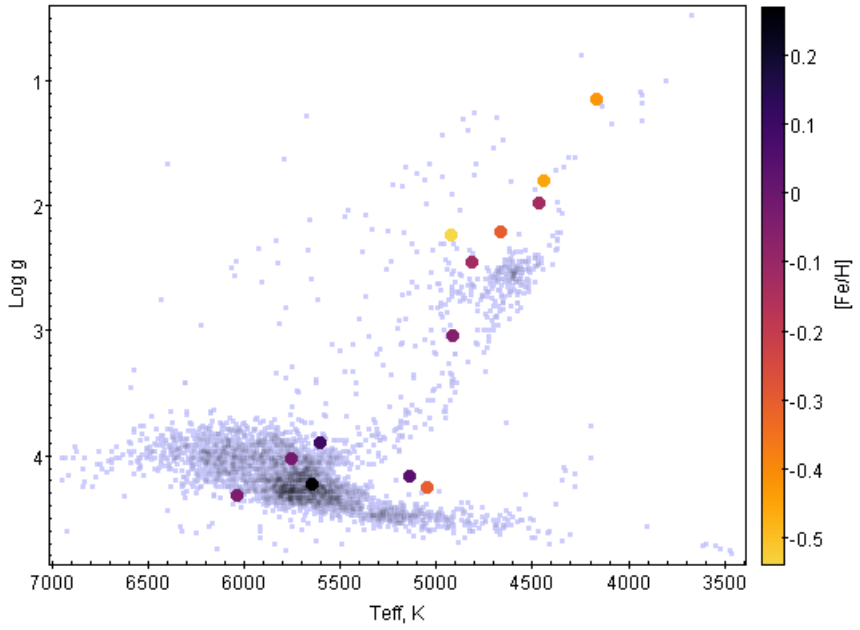
Paskutinis nustatomas parametras yra metalingumas. Jis yra laikomas teisingu tik tada, jei kiti parametrai – efektinė temperatūra, gravitacijos pagreitis ir miktoturbulencija – nustatyti teisingai.

Atmosferos parametrai buvo nustatyti keturiolikai žvaigždžių. Septynios iš jų yra žvaigždės milžinės, septynios nykštukės. Nustatytos efektinės temperatūros vertės buvo nuo 4166 K iki 6028 K, gravitacijos pagreičio logaritmo vertės – nuo 1,15 iki 4,32, metalingumo vertės – nuo -0,54 iki 0,27, mikroturbulencijos greičio vertės – nuo 0,86 iki 1,45 km/s. Žvaigždžių fizikiniai atmosferos parametrai pateikti 1 lentelėje. 5 pav. pavaizduota HR diagrama, kurioje pažymėtos šiame tyrime ištirtos žvaigždės, palyginimui paimti Gaia-ESO apžvalgos idr6 duomenys [19].

Įvertintos atmosferos parametrų paklaidos yra dviejų rūšių. Pirmos rūšies paklaidos yra vertinamos kiekvienai linijai atskirai, nes jos atsiranda dėl atominių parametrų netikslumų, ištisinio spektro įvertinimo, ekvivalentinių pločių matavimo. Šios paklaidos nustatomos apskaičiuojant atskirų linijų rezultatų sklaidą, gauti rezultatai pateikti 1 lentelėje $\sigma_{[Fe/H]}$. Antros rūšies paklaidos veikia visas linijas vienu metu, pvz. žvaigždžių atmosferos parametrų paklaidos. Atmosferos parametrų paklaidos buvo nustatytos naudojantis Turbospectrum [10] programiniu paketu.

1 lentelė. Pagrindinių atmosferos parametrų vertės su paklaidomis.

	T_{eff} (K)	$err_{T_{eff}}$(K)	log g	$err_{\log g}$	[Fe/H]	$\sigma_{[Fe/H]}$	v_t (km/s)	err_{v_t} (km/s)
TYC1058-3400-1	4665	48	2,22	0,15	-0,3	0,08	1,31	0,14
TYC1193-2072-1	5132	55	4,17	0,17	0,04	0,08	0,93	0,29
TYC1211-1730-1	5599	55	3,9	0,2	0,1	0,08	1,24	0,26
TYC1681-1751-1	4908	50	3,05	0,17	-0,05	0,08	1,02	0,19
TYC1688-1821-1	6028	72	4,32	0,21	-0,04	0,08	0,85	0,49
TYC1761-192-1	5643	60	4,23	0,2	0,27	0,08	0,98	0,28
TYC1765-1369-1	4808	45	2,46	0,15	-0,12	0,08	1,34	0,15
TYC2037-1826-1	4460	52	1,99	0,13	-0,13	0,07	1,42	0,14
TYC2313-437-1	4166	72	1,15	0,17	-0,42	0,09	1,45	0,18
TYC2842-200-1	5748	62	4,03	0,2	-0,02	0,08	1,00	0,3
TYC4222-2311-1	4435	50	1,81	0,14	-0,45	0,08	1,36	0,13
TYC4494-1346-1	5136	55	4,17	0,17	-0,32	0,08	0,86	0,32
TYC4620-542-1	4915	40	2,24	0,17	-0,54	0,08	1,32	0,16
TYC4650-917-1	5043	55	4,26	0,16	-0,3	0,08	0,82	0,34



5 pav. Spektroskopinė HR diagrama. Didesni taškai žymi šiame darbe tirtas žvaigždes. Pilkai pažymėti Gaia-ESO idr6 apžvalgos duomenys [19].

3.2 Nustatytų fizikinių atmosferos parametrų palyginimas su kitais autoriais

Gauti rezultatai buvo palyginti su kitų autorių rezultatais iš SIMBAD astronominės duomenų bazės [20]. Palyginimui buvo ieškomi straipsniai, kuriuose būtų naudotas spektroskopinis atmosferos parametrų nustatymo metodas. Žvaigždė TYC4620-542-1 SIMBAD duomenų bazėje neturėjo kitų darbų palyginimui.

2 lentelė. Atmosferos parametrų rezultatų palyginimas.

TYC ID	T_{eff} (K)	T_{eff} (K) palyginimas	log g	log g palyginimas	[Fe/H]	[Fe/H] palyginimas	Šaltinis
1058-3400-1	4665	4714	2,22	2,53	-0,30	-0,27	1
1193-2072-1	5132	5129	4,17	4,19	0,04	0,12	2
1211-1730-1	5599	5600	3,90	3,96	0,10	0,13	3
1681-1751-1	4908	4967	3,05	3,19	-0,05	0,01	4
1688-1821-1	6028	6052	4,32	4,34	-0,04	0,05	3
1761-192-1	5643	5655	4,23	4,25	0,27	0,30	3
1765-1369-1	4808	4883	2,46	2,76	-0,12	-0,08	5
2037-1826-1	4460	4436	1,99	1,94	-0,13	-0,22	1
2313-437-1	4166	4062	1,15	1,44	-0,42	-0,32	6
2842-200-1	5748	5830	4,03	4,30	-0,02	0,03	7
4222-2311-1	4435	4359	1,81	1,86	-0,45	-0,49	6
4494-1346-1	5136	5165	4,17	4,40	-0,32	-0,22	8
4620-542-1	4915	...	2,24	...	-0,54	...	...
4650-917-1	5043	5082	4,26	4,54	-0,30	-0,17	3

Straipsniai iš kurių buvo paimtos atmosferos parametrų vertės: 1. N. C. Santos ir kt. 2013 [21], 2. R. DA Silva ir kt. 2015 [22], 3. J. M. Brewer ir kt. 2016 [23], 4. Y. J. Liu ir kt. 2014 [24], 5. S. G. Sousa ir kt. 2018 [25], 6. M. Lomaeva ir kt. 2019 [26], 7. J. A. Valenti ir D. A. Fischer 2005 [27], 8. T. V. Mishenina ir kt. 2008 [28].

Taigi, 3 lentelėje matoma, kad šiame darbe nustatytos atmosferos parametrų vertės dažniausiai yra mažesnės už kitų autorių nustatytas vertes. Taip gali būti dėl skirtingų naudojamų metodų, atmosferos modelių, įrangos.

3.3 Cheminė žvaigždžių sudėtis

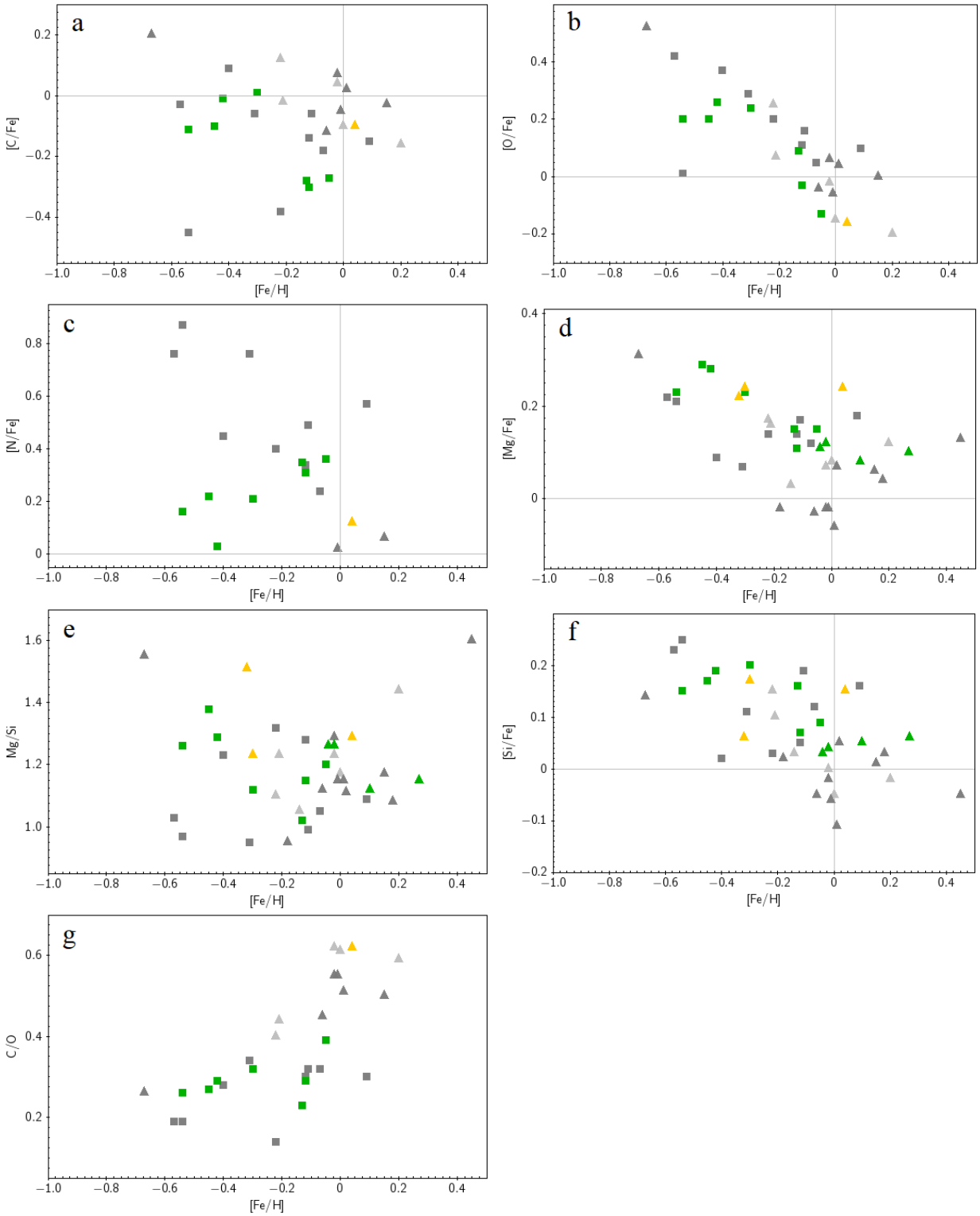
Šiame darbe buvo apskaičiuotos 14 žvaigždžių su egzoplanetomis elementų gausos. Gausos buvo nustatytos spektrinės sintezės metodu naudojant Turbospectrum [10] programinį paketą ir MARCS [16] atmosferų modelius. Gausos nustatytos cheminiams elementams: C(C_2), N(CN), [OI], Mg, Si, Li. Anglies, azoto ir deguonies gausos iteraciniu būdu buvo nustatytos 8 žvaigždėms, 7 iš jų yra milžinės ir viena nykštukė. Litis nustatytas tik 4 žvaigždėms, todėl šio cheminio elemento rezultatai pateikti tik lentelėje. Magnis ir silicis nustatytas visose tyrimo imties žvaigždėse. Cheminių elementų gausos [El/Fe] surašytos 3 lentelėje. Elementų gausos [El/H], išmatuotų linijų skaičius ir paklaidos pateiktos 1 ir 2 prieduose.

3 lentelė. Cheminių elementų gausos [El/Fe].

TYC ID	[C/Fe]	[N/Fe]	[O/Fe]	[Mg/Fe]	[Si/Fe]	Mg/Si	C/O	A(Li)
1058-3400-1	0,01	0,21	0,24	0,23	0,2	1,12	0,32	...
1193-2072-1	-0,1	0,12	-0,16	0,24	0,15	1,29	0,62	...
1211-1730-1	...	...	...	0,08	0,05	1,12	...	1,97
1681-1751-1	-0,27	0,36	-0,13	0,15	0,09	1,20	0,39	...
1688-1821-1	...	...	...	0,11	0,03	1,29	...	2,57
1761-192-1	...	...	...	0,1	0,06	1,15	...	...
1765-1369-1	-0,3	0,31	-0,03	0,11	0,07	1,15	0,29	...
2037-1826-1	-0,28	0,35	0,09	0,15	0,16	1,02	0,23	...
2313-437-1	-0,01	0,03	0,26	0,28	0,19	1,29	0,29	...
2842-200-1	...	...	...	0,12	0,04	1,26	...	1,67
4222-2311-1	-0,1	0,22	0,2	0,29	0,17	1,38	0,27	...
4494-1346-1	...	...	...	0,22	0,06	1,51	...	...
4620-542-1	-0,11	0,16	0,2	0,23	0,15	1,26	0,26	0,87
4650-917-1	...	...	...	0,24	0,17	1,23	...	...

6 pav. pavaizduotos elementų gausų [El/Fe] priklausomybės nuo metalingumo [Fe/H]. Šio darbo metu tirtos žvaigždės su mažos masės planetomis pažymėtos geltona spalva, žvaigždės su didelės masės planetomis pažymėtos žalia spalva. Gauti rezultatai buvo lyginami su G. Tautvaišienės ir kt. [8] 2022 metų straipsniu, kuriame analizuotos dvidešimt penkios egzoplanetas turinčios žvaigždės (šviesiai

pilka spalva pažymėtos žvaigždės su mažos masės planetomis, tamsiai pilka – su didelės masės planetomis). Žvaigždės nykštukės pažymėtos trikampiais, milžinės – kvadratais.



6 pav. [El/Fe]; Mg/Si; C/O priklausomybė nuo metalingumo [Fe/H]. Daugiau informacijos apie žymėjimą 3.3 skyriuje.

6 pav. a grafike pavaizduota anglies gausos [C/Fe] priklausomybė nuo metalingumo [Fe/H]. Duomenys rodo, kad žvaigždžių su didelėmis planetomis (nuo 217 iki 3480 $M_{žemės}$) anglies gausos yra mažesnės negu Saulėje, tokios pat tendencijos matomos ir T. Mishenina ir kt. 2021 [6] rezultatuose.

6 pav. b grafike pavaizduota deguonies gausos [O/Fe] priklausomybė nuo metalingumo [Fe/H]. Matome, kad nemetalingos žvaigždės turi didesnes deguonies gausas už metalingas žvaigždes. Taip yra todėl, kad deguonis daugiausiai yra gaminamas masyviose žvaigždėse. Šios žvaigždės gyvuoja trumpiau nei mažos masės žvaigždės, nes masyvios žvaigždės sprogsta kaip II tipo supernovos. Mažos žvaigždės yra metalingesnės daugiausia dėl Ia tipo supernovų. Rezultatai sutampa su G. Tautvaišienės ir kt. [8] rezultatais.

6 pav. c grafike pavaizduota azoto gausos [N/Fe] priklausomybė nuo metalingumo [Fe/H]. Palyginus su G. Tautvaišienės ir kt. [8] rezultatais, šiame darbe tirtos žvaigždės milžinės turi mažesnes azoto gausas. Tokioms žvaigždėms reikalinga papildoma analizė.

Analizuojant [Mg/Fe] ir [Si/Fe] gausas nuo metalingumo (6 pav. d ir f grafikai) galima pastebėti, kad nykštukės su mažomis planetomis turi didesnes šių elementų gausas, nei nykštukės, kurios turi dideles planetas. Tokia koreliacija nebuvo pastebėta ir G. Tautvaišienės ir kt. [8] rezultatuose. T. Mishenina ir kt. [6] pastebėjo, kad Mg/Si santykių vertės žvaigždėms su didelėmis planetomis patenka į intervalą nuo 1 iki 2, į tokį patį diapazoną patenka ir šio tyrimo rezultatai (6 pav e grafikas). Šio tyrimo imties vidutinė <Mg/Si> santykio vertė yra lygi 1,23, o minimali Mg/Si min = 1,02 ir Mg/Si max = 1,51.

G. Tautvaišienė ir kt. [8] pastebėjo, kad nykštukės su mažomis planetomis turi šiek tiek didesnius C/O santykius nei nykštukės su didėlėmis planetomis. 6 pav. g dalyje pavaizduotame grafike matoma C/O priklausomybė nuo [Fe/H]. Jame galima pastebėti, kad nors C, N, O gausa buvo nustatyta tik vienai nykštukei, ji turi mažos masės egzoplanetą (69,99 $M_{žemės}$) ir turi didžiausią C/O santykį (0,69) iš visų šiame darbe tirtų žvaigždžių. Taigi, rezultatai atitinka G. Tautvaišienės ir kt. [8] pastebėjimą, kad didesnį C/O santykį turi būtent nykštukės su mažomis planetomis.

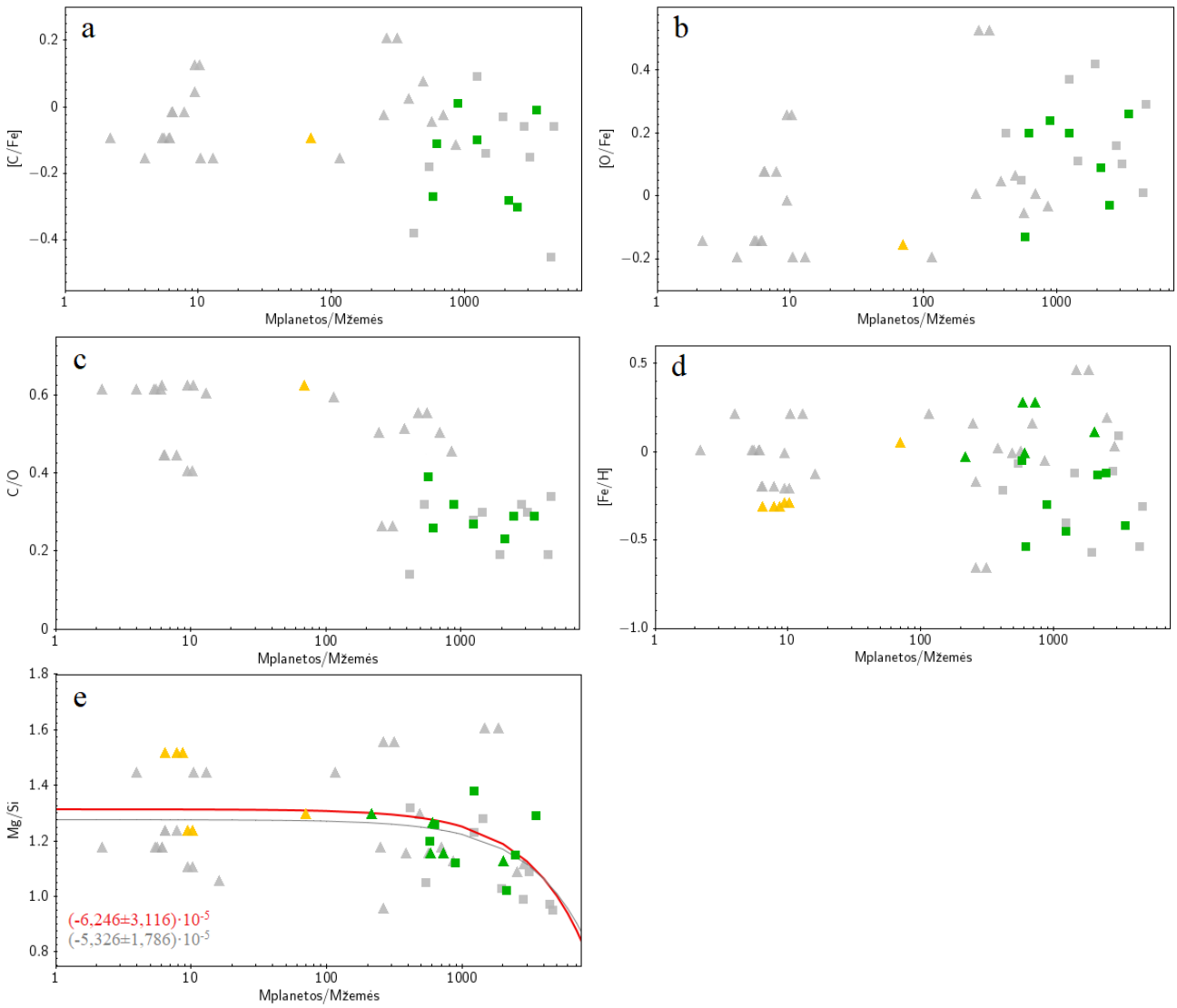
7 pav. pavaizduotos cheminių elementų gausų priklausomybės nuo planetų masių. Planetos pagal mases buvo suskirstytos į mažas planetas nuo 6,44 iki 69,9 $M_{žemės}$, ir į dideles nuo 217 iki 3480 $M_{žemės}$. Tiriamų žvaigždžių imtyje nebuvo milžinių žvaigždžių su mažomis planetomis. Kai kurios tiriamos žvaigždės turėjo po kelias patvirtintas planetas. TYC 1761-192-1 ir TYC 4650-917-1 turi po dvi didelės masės ir mažos masės planetas, TYC 4494-1346-1 – tris mažos masės patvirtintas planetas.

Planetų masės ir kiti planetų duomenys yra surašyti 5 lentelėje remiantis NASA egzoplanetų archyvu [29] gegužės 2 d. 2022 metais.

5 lentelė. Egzoplanetų duomenys. Paimti iš NASA egzoplanetų archyvo gegužės 2 d. 2022 m.

TYC ID	Planetos pavadinimas	Planetos masė (Žemės masėmis)	Orbitos periodas (dienos)	Didysis pusašis (au)	Šaltinis
1058-3400-1	1058-3400-1 b	890	136,75±0,25	0,68	1
1193-2072-1	1193-2072-1 b	$69{,}99^{+2{,}48}_{-2{,}42}$	62,24±0,01	$0{,}295^{+0{,}004}_{-0{,}004}$	2
1211-1730-1	1211-1730-1 b	2031±41	1075,65±0,64	2,156±0,020	2
1681-1751-1	1681-1751-1 b	574,6±30,8	354,1±0,7	1,148±0,057	3
1688-1821-1	1688-1821-1 b	217^{+4}_{-5}	3,52±0,01	$0{,}04707^{+0{,}00045}_{-0{,}00047}$	4
1761-192-1	1761-192-1 b	$725{,}6^{+19{,}4}_{-19{,}7}$	$262{,}360^{+0{,}017}_{-0{,}016}$	0,824±0,011	2
	1761-192-1 c	589,6±17,2	$1696{,}7^{+2{,}3}_{-2{,}4}$	$2{,}861^{+0{,}038}_{-0{,}039}$	2
1765-1369-1	1765-1369-1 b	2479±222,5	1455^{+13}_{-12}	3,4±0,1	5
2037-1826-1	2037-1826-1 b	2129±95	417,9±0,5	1,3	6
2313-437-1	2313-437-1 b	3480±928	471,6±6,0	1,25±0,08	7
2842-200-1	2842-200-1 b	$607{,}4^{+24{,}5}_{-24{,}2}$	4449^{+54}_{-50}	$5{,}323^{+0{,}090}_{-0{,}091}$	2
4222-2311-1	4222-2311-1 b	1233,13±270,14	479,1±6,2	1,19±0,01	8
4494-1346-1	4494-1346-1 b	$8{,}68^{+0{,}52}_{-0{,}51}$	5,39792±0,00025	$0{,}05664^{+0{,}00067}_{-0{,}00069}$	9
	4494-1346-1 c	$7{,}86^{+0{,}73}_{-0{,}71}$	$15{,}29^{+0{,}0032}_{-0{,}0033}$	$0{,}1134^{+0{,}0013}_{-0{,}0014}$	9
	4494-1346-1 d	$6{,}44^{+0{,}79}_{-0{,}78}$	$24{,}451^{+0{,}015}_{-0{,}017}$	$0{,}1551^{+0{,}0018}_{-0{,}0019}$	9
4620-542-1	4620-542-1 b	623±70	133,6±0,5	0,54±0,02	7
4650-917-1	4650-917-1 b	10,26±0,99	35,45±0,01	0,1980±0,0004	10
	4650-917-1 c	9,44±1,63	154,43±0,44	0,528±0,010	10

Šaltiniai: 1. B. Sato ir kt. 2008 [30], 2. L. J. Rosenthal ir kt. 2021 [31], 3. J. K. Luhn ir kt. 2019 [32], 4. A. S. Bonomo ir kt. 2017 [33], 5. L. Wang ir kt. 2014 [34], 6. B. C. Lee ir kt. 2012 [35], 7. K. G. Stassun ir kt. 2017 [36], 8. M. P. Dölnger ir kt. 2009 [37], 9. B. J. Fulton ir kt. 2015 [38], 10. J. Burt ir kt. 2020 [39].



7 pav. [El/Fe]; [Fe/H]; Mg/Si; C/O priklausomybė nuo egzoplanetų masių. Raudona linija pažymėta tiesinė šio darbo metu nustatytų Mg/Si santykių priklausomybė nuo planetų masių. Pilka linija pažymėta tiesinė šio bei G. Tautvaišienės ir kt. [8] darbų metu nustatytų santykių priklausomybė nuo planetų masių. Sutartiniai žymėjimai tokie pat, kaip ir 6 pav.

Palyginus šio tyrimo metu nustatytas ir 7 pav. a, b grafikuose pavaizduotas [C/Fe], [O/Fe] vertes su G. Tautvaišienės ir kt. [8] tyrimo metu gautais rezultatais matoma, kad jie atitinka. G. Tautvaišienė ir kt. [8] nerado jokios reikšmingos koreliacijos tarp C, O gausų ir planetų masės. Azotas nėra pateiktas G. Tautvaišienė ir kt. [8] darbe, dėl to jo nėra ir 7 pav.

Kadangi tyrimo imtyje yra tik viena nykštukė žvaigždė su mažos masės planeta, kuriai buvo išmatuotos deguonies ir anglies gausos, vien iš nustatytų gausų [C/Fe], [O/Fe] ir C/O santykio (7 pav. c

grafikas) negalime palyginti priklausomybės nuo planetų masės. C ir O gausos milžinėse kinta dėl žvaigždžių evoliucijos, todėl milžinėms netikrinome C, O ir C/O koreliacijos su planetų mase.

Lyginant metalingumą [Fe/H] su planetų mase (7 pav. d grafikas) galima pastebėti, kad nykštukės su mažomis planetomis vidutiniškai yra mažiau metalingos, nei nykštukės su didelėmis planetomis. Tokia pati koreliacija buvo pastebėta ir G. Tautvaišienės ir kt. [8] tyrime.

Kad būtų įvertinta koreliacija tarp Mg/Si ir planetų masių, buvo apskaičiuota tiesinė priklausomybė (7 pav. e grafikas). Grafike pavaizduotos raudonos linijos Pirsono koeficientas yra -0,447, o pilkos linijos – -0,376. Matoma, kad, didėjant planetų masei, Mg/Si tiesinės priklausomybės krypties koeficientas mažėja, todėl galima daryti prielaidą, kad didelės masės planetas turinčios žvaigždės turi mažesnį Mg/Si santykį. Toks pat dėsningumas aptiktas ir G. Tautvaišienės ir kt. [8] tyrime.

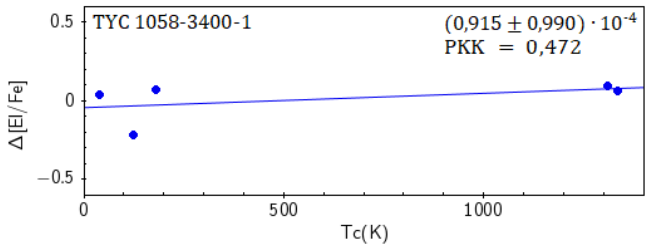
3.4 Cheminių elementų gausų priklausomybė nuo kondensacijos temperatūros

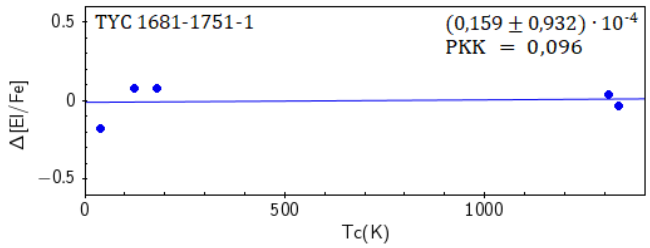
Mokslininkams detaliai ištyrus cheminių elementų gausas Saulėje buvo pastebėta, kad palyginus su žvaigždėmis panašiomis į Saulę, bet kurios neturi planetų, sunkiai lydžių elementų gausos yra mažesnės nei lakių. Melendez ir kt. 2009 [40] teigė, kad gal būt Saulės sistemoje sunkiai lydūs elementai sunaudoti planetų statyboje.

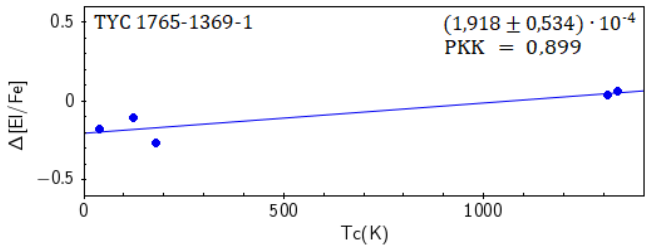
Šiame darbe taip pat buvo ištirta cheminių elementų gausų skirtumo priklausomybė nuo cheminio elemento kondensacijos temperatūros. Skirtumas matuojamas tarp žvaigždėje, kuri turi egzoplanetą, nustatytos elemento gausos ir žvaigždėje be egzoplanetos nustatytos elemento gausos. Šiam tikslui buvo ieškoma kuo panašesnių žvaigždžių į šiame darbe tiriamas žvaigždes, todėl jos buvo lyginamos pagal jų temperatūrą, paviršiaus gravitacijos pagreitį ir metalingumą. Atliekant tyrimą buvo nuspręsta, kad šie parametrai turi būti tyrimo metu nustatytų paklaidų ribose (parametrų paklaidos pateiktos 1 lentelėje). Tam buvo pasirinktos žvaigždės iš G. Tautvaišienės ir kt. 2022 [8], 2020 [41] metų darbų, Š. Mikolaičio ir kt. 2019 metų darbo [42] bei E. Stonkutės ir kt. 2020 metų darbo [43]. Kiekvienai žvaigždei rasta nuo 2 iki 5 panašių žvaigždžių. Tada buvo apskaičiuoti elementų C, O, N, Mg, Si gausų vidurkiai. Gauti vidurkiai buvo palyginti su atitinkamomis tiriamos žvaigždės, kuri turi planetą, gausos vertėmis.

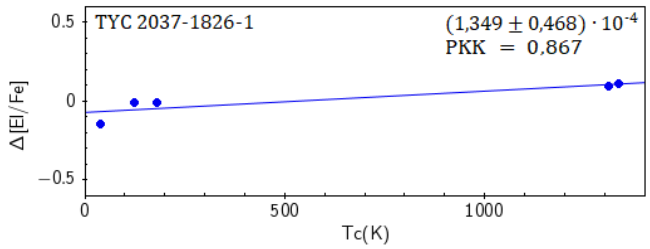
8 pav. pavaizduotos cheminių elementų gausų skirtumų tarp žvaigždžių su egzoplanetomis ir žvaigždžių be jų priklausomybės nuo cheminių elementų kondensacijos temperatūrų. Elementų kondensacijos temperatūrų vertės gautos remiantis K. Lodders 2003 m. straipsniu [44]. Rezultatai pateikti 7-ioms iš 14-os žvaigždžių. Septynioms imties žvaigždėms nepavyko nustatyti C, N, O gausų, nes deguonies linija buvo užteršta žemės atmosferos linija ir/arba dalis žvaigždžių buvo nykštukės. Taip pat, nors TYC 1193-2072-1 C, N, O gausų vertės buvo nustatytos, šios gausų vertės nebuvo lyginamos su atrankos kriterijus atitinkančiomis žvaigždėmis, nes joms nebuvo literatūroje nustatytos atitinkamos gausų vertės.

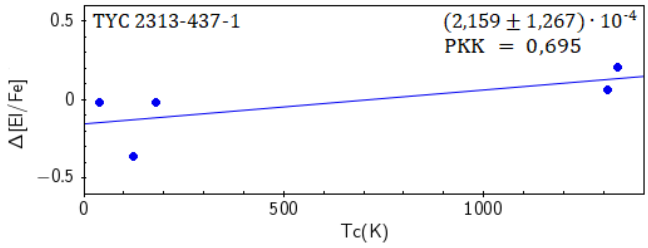
Visos 7 imties žvaigždės turi po vieną didelės masės egzoplanetą. Tiesinės priklausomybės tarp elementų gausų skirtumų ir kondensacijos temperatūros krypties koeficientai yra teigiami. Mažiausią krypties koeficientą ($(0{,}159\pm0{,}932)\cdot10^{-4}$) ir Pirsono koreliacijos koeficientą turi žvaigždė TYC 1681-1751-1 su didžiausia log *g* verte (3,05) iš visų imties žvaigždžių. Mano gauti rezultatai paneigia Melendez ir kt. 2009 [40] rezultatus. G. Tautvaišienė ir kt. 2022 [8] tyrimo metu pastebėjo, kad didžiausią teigiamą elementų gausų skirtumo tiesinės priklausomybės nuo kondensacijos temperatūros krypties koeficientą turėjo žvaigždė, aplink kurią skrieja kelios planetos. Visos mažų masių planetų savininkės rodė teigiamus tiesinės priklausomybės krypties koeficientus. Didelių masių planetų žvaigždės turėjo ir teigiamų, ir neigiamų tiesinės priklausomybės krypties koeficientų. G. Tautvaišienės ir kt. [8] tyrimų metu gauti rezultatai skiriasi nuo šio tyrimo metu gautų rezultatų, nes tiriant visas didelių planetų žvaigždes buvo gauti teigiami tiesinės priklausomybės krypties koeficientai. Nors vienareikšmiškų išvadų daryti negalima dėl sąlyginai mažos tyrimo imties (7 žvaigždės) bei žvaigždžių įvairovės trūkumo (trūko žvaigždžių su mažos masės planetomis), tačiau imties pakako tiesinės priklausomybės krypties koeficiento reikšmių dėsningumams pastebėti.

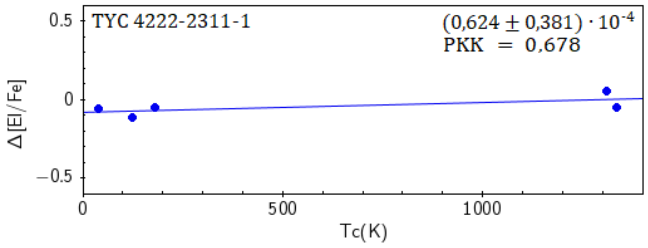


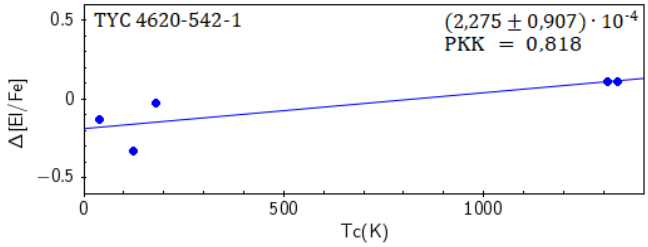












	T_c (K)
C	40
O	123
N	180
Mg	1336
Si	1310

8 pav. Elementų gausų skirtumo tarp žvaigždžių su egzoplanetomis ir žvaigždžių be jų priklausomybė nuo elemento kondensacijos temperatūros. Tiesinės priklausomybės krypties koeficientai ir Pirsono koreliacijos koeficientai parašyti dešinėje grafiko pusėje.

IŠVADOS

- Nustatyti pagrindiniai atmosferos parametrai 14-ai žvaigždžių su egzoplanetomis. Efektinės temperatūros vertės gautos nuo 4166 K iki 6028 K, gravitacijos pagreičio logaritmo vertės – nuo 1,15 iki 4,32, metalingumo [Fe/H] vertės – nuo -0,54 iki 0,27, mikroturbulencijos greičio vertės – nuo 0,86 iki 1,45 km/s.
- Magnio ir Silicio gausos buvo nustatytos 14-kai žvaigždžių. Deguonies, anglies ir azoto – 8-ioms žvaigždėms, ličio – 4-ioms žvaigždėms. Taip pat paskaičiuotas C/O ir Mg/Si santykių vertės. Vidutinė <Mg/Si> santykio vertė lygi 1,23. Ličio gausos yra intervale nuo 0,87 iki 2,57.
- Nustatytas C/O santykio padidėjimas C/O = 0,62 nykštukėje su mažos masės planeta. Reikalinga didesnė imtis patvirtinti šį rezultatą.
- Nustatyta Mg/Si santykio priklausomybė nuo egzoplanetų masių. Tiesinės priklausomybės krypties koeficientas yra $(-6{,}246 \pm 3{,}116)\cdot 10^{-5}$, Pirsono koreliacijos koeficientas -0,447. Pastebėta, kad didelės masės planetas turinčios žvaigždės turi mažesnį Mg/Si santykį.
- Nustatyta teigiama tiesinė priklausomybė tarp elementų (C; O; N; Mg; Si/H]) gausų skirtumų ir elementų kondensacijos temperatūros.

SANTRAUKA

Šiame darbe buvo atlikta detali žvaigždžių su egzoplanetomis cheminės sudėties analizė. Naudojant ekvivalentinių pločių metodą nustatyti pagrindiniai fizikiniai atmosferos parametrai: efektinė temperatūra, metalingumas, gravitacijos pagreitis ir mikroturbulencijos greitis. Spektrinės sintezės metodu 14-ai žvaigždžių su egzoplanetomis nustatytos anglies, azoto, deguonies, magnio, silicio, ličio gausos. Rezultatai palyginti su kitais moksliniais darbais.

Nustatytos efektinės temperatūros vertės gautos nuo 4166 K iki 6028 K, gravitacijos pagreičio logaritmo vertės – nuo 1,15 iki 4,32, metalingumo [Fe/H] vertės – nuo -0,54 iki 0,27, mikroturbulencijos greičio vertės – nuo 0,86 iki 1,45 km/s. Magnio ir Silicio gausos buvo nustatytos 14-ai žvaigždžių. Deguonies, anglies ir azoto – 8-ioms žvaigždėms, ličio – 4-ioms žvaigždėms. Nustatyta Mg/Si santykio tiesinė priklausomybė nuo egzoplanetų masių ir pastebėta, kad didelės masės planetas turinčios žvaigždės turi mažesnį Mg/Si santykį. Nustatyta teigiama tiesinė priklausomybė tarp elementų (C, O, N, Mg, Si) gausų skirtumų ir elementų kondensacijos temperatūros.

SUMMARY

The aim of this research is to do a detailed chemical composition analysis of planet-hosting stars. Main stellar atmospheric parameters (effective temperature, surface gravity, microturbulence velocity and metallicity) were determined using equivalent width method. Abundances of carbon, sodium, oxygen, magnesium, silicon, lithium were determined by applying spectral synthesis method. The results were compared with other scientific articles.

Determined effective temperature values were between 4166 K and 6028 K, surface gravity values were between 1,15 and 4,32, metallicities values were from -0,54 and 0,27, microturbulence values were between 0,86 and 1,45 km/s. Abundances of magnesium and silicon were determined for 14 stars. Oxygen, carbon, and sodium were determined for 8 stars, lithium – for 4 stars. Linear fit of Mg/Si and planet mass showed that high-mass planet hosts have lesser Mg/Si values. Positive slopes were determined in elements (C, O, N, Mg, Si) abundance differences versus elements' condensation temperatures.

LITERATŪRA

1. MAYOR, Michel; QUELOZ, Didier. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 1995, 378.6555: 355-359.
2. *Exoplanet and Candidate statistics* <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html> [žiūr. 2022-05-19].
3. KING, Jeremy R., ir kt. Lithium abundances in the solar twins 16 CYG A and B and the solar analog alpha CEN A, calibration of the 6707 angstrom Li region linelist, and implications. *The Astronomical Journal*, 1997.
4. SUÁREZ-ANDRÉS, L., ir kt. CNO behaviour in planet-harbouring stars-I. Nitrogen abundances in stars with planets. *Astronomy & Astrophysics*, 2016, 591: A69.
5. DORN, Caroline, ir kt. Can we constrain the interior structure of rocky exoplanets from mass and radius measurements?. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, 577: A83.
6. MISHENINA, T., ir kt. Chemical composition of stars with massive planets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 504.3: 4252-4273.
7. ADIBEKYAN, V., ir kt. From stellar to planetary composition: Galactic chemical evolution of Mg/Si mineralogical ratio. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, 581: L2.
8. TAUTVAIŠIENĖ, Gražina, ir kt. Chemical Composition of Bright Stars in the Northern Hemisphere: Star–Planet Connection. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2022, 259.2: 45.
9. SNEDEN, Chris, ir kt. MOOG: LTE line analysis and spectrum synthesis. *Astrophysics Source Code Library*, 2012, ascl: 1202.009.
10. *Turbospectrum* <https://github.com/bertrandplez/Turbospectrum2019> [žiūr. 2022-05-19]
11. JURGENSON, Colby, ir kt. Design and construction of VUES: the Vilnius university echelle spectrograph. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 2016, 5.02: 1650003.
12. AŽUSIENIS, A.; PUČINSKAS, A.; STRAIŽYS, V. Astronomija. *Vilnius: Kultūra*, 2003, 606 p.
13. KARTTUNEN, Hannu, ir kt.. (ed.). *Fundamental astronomy*. Berlin: Springer, 2007.
14. STETSON, Peter B.; PANCINO, Elena. DAOSPEC: An Automatic Code for Measuring Equivalent Widths in High-Resolution Stellar Spectra1. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2008, 120.874: 1332.

15. HEITER, Ulrike, ir kt. Atomic data for the Gaia-ESO Survey. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 645: A106.
16. *MARCS* <https://marcs.astro.uu.se/> [žiūr. 2022-05-19].
17. MUCCIARELLI, Alessio. Microturbulent velocity from stellar spectra: a comparison between different approaches. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, 528: A44.
18. GREVESSE, Nicolas; ASPLUND, Martin; SAUVAL, A. J. The solar chemical composition. *Space Science Reviews*, 2007, 130.1-4: 105-114.
19. Gaia-ESO survey internal data release 6 <https://www.gaia-eso.eu/data-products/internal-data-releases/internal-data-release-6-idr6-parameters> [žiur. 2022-05-19].
20. SIMBAD Astronomical Database < http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/> [žiūr. 2022-05-19].
21. SANTOS, N. C., ir kt. SWEET-Cat: A catalogue of parameters for Stars With ExoplanETs-I. New atmospheric parameters and masses for 48 stars with planets. *Astronomy & Astrophysics*, 2013, 556: A150.
22. DA SILVA, Ronaldo; MILONE, André de C.; ROCHA-PINTO, Helio J. Homogeneous abundance analysis of FGK dwarf, subgiant, and giant stars with and without giant planets. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, 580: A24.
23. BREWER, John M., ir kt. Spectral properties of cool stars: extended abundance analysis of 1,617 planet-search stars. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2016, 225.2: 32.
24. LIU, Y. J., ir kt. The Lithium abundances of a large sample of red giants. *The Astrophysical Journal*, 2014, 785.2: 94.
25. SOUSA, S. G., ir kt. SWEET-Cat updated-New homogenous spectroscopic parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 2018, 620: A58.
26. LOMAEVA, M., ir kt. Abundances of disk and bulge giants from high-resolution optical spectra-III. Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 625: A141.
27. VALENTI, Jeff A.; FISCHER, Debra A. Spectroscopic properties of cool stars (SPOCS). I. 1040 F, G, and K dwarfs from Keck, Lick, and AAT planet search programs. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2005, 159.1: 141.
28. MISHENINA, T. V., ir kt. Spectroscopic investigation of stars on the lower main sequence. *Astronomy & Astrophysics*, 2008, 489.2: 923-930.
29. NASA exoplanet archive <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> [žiur. 2022-05-19].

30. SATO, Bun'ei, ir kt. Planetary Companions around Three Intermediate-Mass G and K Giants: 18 Delphini, ξ Aquilae, and HD 81688. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2008, 60.3: 539-550.
31. ROSENTHAL, Lee J., ir kt. The California Legacy Survey. I. A Catalog of 178 Planets from Precision Radial Velocity Monitoring of 719 Nearby Stars over Three Decades. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, 255.1: 8.
32. LUHN, Jacob K., ir kt. Retired A stars and their companions. VIII. 15 New planetary signals around subgiants and transit parameters for California planet search planets with subgiant hosts. *The Astronomical Journal*, 2019, 157.4: 149.
33. BONOMO, ALDO STEFANO, ir kt. The GAPS Programme with HARPS-N at TNG-XIV. Investigating giant planet migration history via improved eccentricity and mass determination for 231 transiting planets. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 602: A107.
34. WANG, Liang, ir kt. A long-period eccentric substellar companion to the evolved intermediate-mass star HD 14067. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2014, 66.6.
35. B.LEE, B.-C., ir kt. A planetary companion around the K giant ϵ Corona Borealis. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 546: A5.
36. STASSUN, Keivan G.; COLLINS, Karen A.; GAUDI, B. Scott. Accurate empirical radii and masses of planets and their host stars with Gaia parallaxes. *The Astronomical Journal*, 2017, 153.3: 136.
37. DÖLLINGER, M. P., ir kt. Planetary companion candidates around the K giant stars 42 Draconis and HD 139 357. *Astronomy & Astrophysics*, 2009, 499.3: 935-942.
38. FULTON, Benjamin J., ir kt. Three super-earths orbiting HD 7924. *The Astrophysical Journal*, 2015, 805.2: 175.
39. BURT, Jennifer, ir kt. A Collage of Small Planets from the Lick–Carnegie Exoplanet Survey: Exploring the Super-Earth and Sub-Neptune Mass Regime. *The Astronomical Journal*, 2020, 161.1: 10.
40. MELENDEZ, Jorge, ir kt. The peculiar solar composition and its possible relation to planet formation. *The Astrophysical Journal*, 2009, 704.1: L66.
41. TAUTVAIŠIENĖ, G., ir kt. Chemical Composition of Bright Stars in the Continuous Viewing Zone of the TESS Space Mission. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2020, 248.1: 19.

42. MIKOLAITIS, Šarūnas, ir kt. High-resolution spectroscopic study of dwarf stars in the northern sky-Na to Zn abundances in two fields with radii of 20 degrees. *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 628: A49.
43. STONKUTĖ, Edita, ir kt. High-resolution spectroscopic study of dwarf stars in the northern sky: lithium, carbon, and oxygen abundances. *The Astronomical Journal*, 2020, 159.3: 90.
44. LODDERS, Katharina. Solar system abundances and condensation temperatures of the elements. *The Astrophysical Journal*, 2003, 591.2: 1220.

PRIEDAI

1 priedas. Anglies [C/H], azoto [N/H], deguonies [O/H] išmatuotos gausos, išmatuotų linijų skaičius ir paklaidos.

	[C/H]	$n_{[C/H]}$	$\sigma_{[C/H]}$	[N/H]	$n_{[N/H]}$	$\sigma_{[N/H]}$	[O/H]	$n_{[O/H]}$	$\sigma_{[O/H]}$
1058-3400-1	-0,29	2	0,04	-0,09	7	0,1	-0,06	1	0,03
1193-2072-1	-0,06	2	0,03	0,16	7	0,08	-0,12	1	0,02
1211-1730-1	...	...	..	...	...	...	...	...	...
1681-1751-1	-0,32	2	0,03	0,31	5	0,06	-0,18	1	0,02
1688-1821-1	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1761-192-1	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1765-1369-1	-0,42	2	0,03	0,19	8	0,06	-0,15	1	0,02
2037-1826-1	-0,41	2	0,04	0,22	6	0,08	-0,04	1	0,03
2313-437-1	-0,43	1	0,03	-0,39	5	0,08	-0,16	1	0,03
2842-200-1	...	...	...	...	...	...	...	...	...
4222-2311-1	-0,55	2	0,03	-0,23	7	0,06	-0,25	1	0,02
4494-1346-1	...	...	...	...	...	...	...	...	...
4620-542-1	-0,65	2	0,04	-0,38	6	0,07	-0,34	1	0,03
4650-917-1	...	...	...	...	...	...	...	...	...

2 priedas. Magnio [Mg/H] ir silicio [Si/H] išmatuotos gausos, išmatuotų linijų skaičius ir paklaidos.

	[Mg/H]	$n_{[Mg/H]}$	$\sigma_{[Mg/H]}$	[Si/H]	$n_{[Si/H]}$	$\sigma_{[Si/H]}$
1058-3400-1	-0,07	3	0,06	-0,1	8	0,08
1193-2072-1	0,28	3	0,04	0,19	10	0,05
1211-1730-1	0,18	3	0,02	0,15	10	0,05
1681-1751-1	0,1	3	0,06	0,04	11	0,06
1688-1821-1	0,07	2	0,04	-0,01	11	0,08
1761-192-1	0,37	2	0,05	0,33	9	0,05
1765-1369-1	-0,01	3	0,02	-0,05	11	0,07
2037-1826-1	0,02	3	0,03	0,03	9	0,05
2313-437-1	-0,14	3	0,02	-0,23	10	0,08
2842-200-1	0,1	2	0,04	0,02	11	0,06
4222-2311-1	-0,16	3	0,07	-0,28	11	0,05
4494-1346-1	-0,1	2	0,02	-0,26	9	0,06
4620-542-1	-0,31	3	0,06	-0,39	11	0,06
4650-917-1	-0,06	2	0,02	-0,13	11	0,05