

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Jonas Klevas

KONVEKCIJOS
IR NELOKALIAUS SPINDULIUOTĖS LAUKO
ĮTAKA SPEKTRO LINIJŲ FORMAVIMUISI ŽVAIGŽDŲ
ATMOSFEROSE

Daktaro disertacijos santrauka

Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2017

Disertacija rengta 2012–2016 metais Vilniaus universitete, Teorinės fizikos ir astronomijos institute, studijuojant doktorantūroje.

Mokslinis vadovas – Dr. Arūnas Kučinskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

Disertacija ginama viešame disertacijos gynimo tarybos posėdyje:

Pirmininkas:

Prof. dr. Vladas Vansevičius (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Nariai:

Dr. Donatas Narbutis (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Dr. Julius Sperauskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Dr. Laimons Začs (Latvijos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Dr. Kastytis Zubovas (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje, 2017 m. rugsėjo mėn. 26 d. 15:00 val., Nacionaliniame fizinių ir technologijos mokslų centre, D401 auditorijoje.

Adresas: Saulėtekio al. 3, LT–10257, Vilnius, Lietuva

Kontaktinis telefonas: (+370–5) 223 4636; Faksas: (+370–5) 223 4637

Disertacijos santrauka išsiuntinėta: 2017 m. rugpjūčio 25 d.

Disertaciją galima peržiūrėti bibliotekoje ir Vilniaus universiteto interneto svetainėje adresu: www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

VILNIUS UNIVERSITY

CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Jonas Klevas

THE INFLUENCE OF CONVECTION
AND NON-LOCAL RADIATION FIELD
ON SPECTRAL LINE FORMATION IN STELLAR ATMOSPHERES

Summary of Doctoral Dissertation

Physical sciences, Physics (02 P)

Vilnius, 2017

Doctoral Dissertation was completed during doctorate studies at Vilnius University, Institute of Theoretical Physics and Astronomy, in 2012-2016.

Scientific supervisor:

Dr. Arūnas Kučinskas (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P)

Council of the doctoral dissertation defense:

Chairman:

Prof. dr. Vladas Vansevicius (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P).

Nariai:

Dr. Donatas Narbutis (Center for Physical Sciences and Technology, Physical sciences, Physics – 02 P),

Dr. Julius Sperauskas (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P),

Dr. Laimons Začs (University of Latvia, Physical sciences, Physics – 02 P),

Dr. Kastytis Zubovas (Center for Physical Sciences and Technology, Physical sciences, Physics – 02 P).

Doctoral dissertation will be defended at the public meeting of the Physical Sciences Council held at the National Centre of Physical and Technological Sciences (room D401) at 3:00 p.m. on 26th September, 2017.

Adress: Saulėtekio al. 3, LT-10257, Vilnius, Lithuania

Contact Tel.: (+370-5) 223 4636; Fax.: (+370-5) 223 4637

Summary of the doctoral dissertation was mailed on 25th August 2017.

The dissertation is available at the Vilnius University internet site:

www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

Tyrimo motyvacija

Energijos pernaša konvekcijos būdu vyksta daugelio mažos ir vidutinės masės žvaigždžių atmosferose. Saulės paviršiuje konvekcijos pasekmes galima stebėti tiesiogiai (pvz., granuliacija), tačiau tai neįmanoma tiriant tolimesnes žvaigždes (išskyrus kelis pavienius atvejus), kadangi tam reikalinga gerokai didesnė kampinė skyra, nei ta, kurią galima pasiekti naudojant geriausias šiuolaikinių interferometrinių stebėjimų priemones. Konvekcija daro įtaką žvaigždžių atmosferų struktūrai, todėl ją būtina vienaip ar kitaip įskaityti kuriant teorinius žvaigždžių atmosferų modelius, kurie vėliau taikomi interpretuojant stebimas žvaigždžių atmosferų savybes. Dažniausiai iki šiol moksliniuose tyrimuose naudojami vienmačiai (1D) hidrostatiniai žvaigždžių atmosferų modeliai, todėl juose konvekcija gali būti įskaitoma tik parametrizuotai. Naujos kartos, trimačiai (3D) hidrodinaminiai žvaigždžių atmosferų modeliai leidžia konvekciją modeliuoti tiesiogiai, t.y., netaikant supaprastinimų, kurie būtini 1D hidrostatinėms modeliams atveju. Nepaisant to, tiriant žvaigždžių atmosferas 3D hidrodinaminiai modeliai kol kas dar nėra plačiai taikomi (modelių skaičiavimai sudėtingi ir trunka daug laiko), todėl vis dar dažnai naudojami ir 1D hidrostatiniai modeliai. Visgi, 3D hidrodinaminiai žvaigždžių atmosferų modeliai vis plačiau taikomi atliekant įvairių spektro klasių žvaigždžių atmosferų vidinės sandaros ir stebimų savybių tyrimus (žr., pvz., Asplund ir kt. 2000; Caffau ir kt. 2008; González Hernández ir kt. 2009; Behara ir kt. 2010). Disertacijoje buvo tiriama konvekcijos įtaka raudonųjų milžinių atmosferų struktūroms ir šių žvaigždžių stebimoms savybėms. Raudonosios milžinės yra didelio šviesio objektai, todėl jų tyrimai įmanomi net ir tolimiausiose žvaigždžių populiacijose, kur raudonosios milžinės dažnai yra vieninteliai informacijos apie šių populiacijų formavimąsi ir raidą šaltiniai.

Žvaigždžių atmosferos nėra homogeniškos, todėl spinduliuotės laukas konvektyvioje žvaigždžių atmosferose taip pat nehomogeniškas. Tai reiškia, kad tiriamo atomo (ar jono, molekulės) lygmenų užpildos realių žvaigždžių atmosferose, ypač išoriniuose pastarųjų sluoksniuose, gali gerokai skirtis nuo tų, kurios būtų prognozuojamos taikant lokaliai termodinaminės pusiausvyros artinį (angl. *local thermodynamic equilibrium*, *LTE*). Būtent dėl šios priežasties, tiriant žvaigždžių atmosferas ir modeliuojant jose vykstančią spinduliuotės pernašą, būtina taikyti nelokaliai termodinaminės pusiausvyros artinį (angl. *non-local thermodynamic equilibrium*, *NLTE*), nes tokiu atveju gerokai tiksliau atsižvelgiama į atomo lygmenų užpildas lemiančius reiškinius (nelokalią spinduliuotės pernašą, neelastinius susidūrimus su vandenilio atomais, elektronais, ir pan.). Tokie skaičiavimai sudėtingi, ypač jei jie atliekami taikant 3D hidrodinaminis atmosferų modelius, todėl, pvz., tiriant žvaigždžių atmosferų che-

minę sudėtį, paprastai naudojamos 1D NLTE analizės priemonės, arba tiesiog apjungiami 1D NLTE ir 3D LTE analizės rezultatai. Šie supaprastinimai dažniausiai nėra pakankamai realistiški (žr., pvz., Steffen ir kt. 2015; Amarsi ir kt. 2016), todėl žvaigždžių atmosferų tyrimuose reikėtų naudoti 3D NLTE analizės metodus. Tai leistų gauti patikimesnius žvaigždžių cheminės sudėties įverčius, kuriais remiasi mūsų žinios apie žvaigždžių, jų populiacijų ir galaktikų struktūrą bei evoliuciją. Siekiant geriau suprasti 3D hidrodinaminių bei NLTE efektų svarbą, disertacijoje buvo tiriama konvekcijos bei nepusiausvirošios spinduliuotės pernašos įtaka ličio spektro linijų formavimuisi įvairių tipų žvaigždžių atmosferose. Šis cheminis elementas yra vienas Didžiojo sprogo relikto, tad žinios apie jo gausą seniausių Galaktikos žvaigždžių populiacijų atmosferose gali suteikti vertingos informacijos apie pirminę nukleosintezę (angl. *primordial* arba *Big Bang nucleosynthesis*), kuri vyko ankstyviausiuose Visatos raidos etapuose.

Tyrimo tikslas

Ištirti konvekcijos ir nelokalaus spinduliuotės lauko įtaką spektro linijų formavimuisi skirtingų tipų žvaigždžių atmosferose.

Uždaviniai

1. Panaudojant 3D–1D LTE gausos pataisas, ištirti konvekcijos įtaką Li I, Na I, Mg I, Mg II, Al I, K I, Ca I, Ca II spektro linijų formavimuisi raudonųjų milžinių atmosferose.
2. Ištirti konvekcijos ir nelokalaus spinduliuotės lauko įtaką Li I 670,8 nm rezonansinio dubleto formavimuisi pagrindinės, submilžinių ir raudonųjų milžinių sekų žvaigždžių atmosferose.

Ginami teiginiai

1. Skirtumai tarp vidutinio stiprumo ($5 \text{ pm} < W < 11 \text{ pm}$) Fe I spektro linijų poslinkių, stebimų mažo metalingumo raudonosios milžinės HD 122563 spektre ir prognozuojamų naudojant 3D hidrodinaminį šios žvaigždės atmosferos modelį, kinta intervale tarp $-0,21 \text{ km/s}$ ir $+0,33 \text{ km/s}$. Vidutinė šių skirtumų vertė yra $+0,015 \pm 0,076 \text{ km/s}$ (paklaida žymi standartinį nuokrypį).
2. 3D LTE–1D LTE gausos pataisos neutralių elementų Li I, Na I, Mg I, Al I, K I linijoms, apskaičiuotos naudojant $T_{\text{eff}} = 3660 \text{ K}$, $\log g = 1,0 \text{ [cgs]}$, $[M/H] = 0,0$ atmosferos parametrų žvaigždės atmosferos modelius, neviršija $\pm 0,06 \text{ dex}$.
3. 3D LTE–1D LTE gausos pataisos jonizuoto elemento Mg II linijoms, apskaičiuotos naudojant $T_{\text{eff}} = 3660 \text{ K}$, $\log g = 1,0 \text{ [cgs]}$, $[M/H] = 0,0$ atmosferos parametrų žvaigždės atmosferos modelius, kinta nuo $-0,08 \text{ dex}$ ($\chi = 0,0 \text{ eV}$) iki $-0,42 \text{ dex}$ ($\chi = 10,0 \text{ eV}$).
4. 3D LTE–1D LTE gausos pataisos neutralių elementų Li I, Na I, Mg I, Al I, K I, Ca I linijoms, apskaičiuotos naudojant $T_{\text{eff}} = 5000 \text{ K}$, $\log g = 2,5 \text{ [cgs]}$, $[M/H] = 0,0$ atmosferos parametrų žvaigždės atmosferos modelius, neviršija $\pm 0,06 \text{ dex}$.
5. Gausos pataisų neutralių elementų spektro linijoms, apskaičiuotų naudojant $T_{\text{eff}} = 5000 \text{ K}$, $\log g = 2,5 \text{ [cgs]}$, $[M/H] = 0,0; -1,0; -2,0; -3,0$ atmosferos parametrų žvaigždžių atmosferų modelius, absoliutinė vertė didėja mažėjant žvaigždės metalingumui: Mg I atveju ($\chi = 0,0 \text{ eV}$, $\lambda = 850 \text{ nm}$) 3D LTE–1D LTE gausos pataisa padidėja nuo $-0,02 \text{ dex}$ ($[M/H] = 0,0$) iki $-0,78 \text{ dex}$ ($[M/H] = -3,0$).

6. Gausos pataisos jonizuotų elementų Mg II ir Ca II linijoms, apskaičiuotos naudojant $T_{\text{eff}} = 5000$ K, $\log g = 2,5$ [cgs], $[M/H] = 0,0; -1,0; -2,0; -3,0$ atmosferos parametrų žvaigždės atmosferos modelius, neviršija $\pm 0,12$ dex.
7. 3D NLTE–1D LTE gausos pataisa Li I 670,8 nm rezonansiniam dubletui, apskaičiuota naudojant $4500 \leq T_{\text{eff}} \leq 6500$ K, $2,5 \leq \log g \leq 4,5$ [cgs], $[M/H] = 0,0; -2,0$ atmosferos parametrų žvaigždžių atmosferų modelius, kinta intervale nuo $+0,27$ dex ($T_{\text{eff}} = 4480$ K, $\log g = 2,5$ [cgs], $[M/H] = 0,0$) iki $-0,06$ dex ($T_{\text{eff}} = 6320$ K, $\log g = 4,5$ [cgs], $[M/H] = -2,0$). Saulės metalingumo atveju gausos pataisos yra didesnės už gausos pataisas, apskaičiuotas naudojant $[M/H] = -2,0$ modelius.
8. Apskaičiuotas 3D NLTE–1D LTE gausos pataisų Li I 670,8 nm rezonansiniam dubletui bankas, naudojant $4500 \leq T_{\text{eff}} \leq 6500$ K, $2,5 \leq \log g \leq 4,5$ [cgs], $[M/H] = 0,0; -2,0$ atmosferos parametrų žvaigždžių atmosferų modelius (viso 16 žvaigždžių atmosferų parametrų kombinacijų).

Publikacijos disertacijos tema Clarivate Analytics WoS

žurnaluose

1. **Klevas, J.**, Kučinskas, A., Steffen, M., Caffau, E., Ludwig, H.-G. 2016, *Lithium spectral line formation in stellar atmospheres. The impact of convection and NLTE effects* // Astronomy and Astrophysics, 586, A156.
2. Dobrovolskas, V., Kučinskas, A., **Klevas, J.**, Caffau, E., Ludwig, H.-G., Steffen, M. 2013, *Three-dimensional hydrodynamical CO⁵BOLD model atmospheres of red giant stars III. Line formation in the atmospheres of giants located close to the base of RGB* // Astronomy and Astrophysics, 559, A102.
3. Kučinskas, A., Steffen, M., Ludwig, H.-G., Dobrovolskas, V., Ivanauskas, A., **Klevas, J.**, Prakupavičius, D., Caffau, E., Bonifacio, P. 2013, *Three-dimensional hydrodynamical CO⁵BOLD model atmospheres of red giant stars. II. Spectral line formation in the atmosphere of a giant located near the RGB tip* // Astronomy and Astrophysics, 549, A14.

Kitos publikacijos Clarivate Analytics WoS žurnaluose

1. Prakupavičius, D., Kučinskas, A., Dobrovolskas, V., **Klevas, J.**, Bonifacio, P., Ludwig, H.-G., Steffen, M., Spite, M. *Three-dimensional hydrodynamical CO⁵BOLD model atmospheres of red giant stars V. Oxygen abundance in the metal-poor giant HD 122563 from OH UV lines* // Astronomy and Astrophysics, 599, A128.
2. Černiauskas, A., Kučinskas, A., **Klevas, J.**, Dobrovolskas, V., Prakupavičius, D., Korotkin, S., Bonifacio, P., Ludwig, H.-G., Caffau, E., Steffen, M. *Abundances of Na, Mg, and K in the atmospheres of red giant branch stars of Galactic globular cluster 47 Tucanae* // Astronomy and Astrophysics, 604, A35.
3. Wedemeyer, S., Kučinskas, A., **Klevas, J.**, Ludwig, H.-G. *Three-dimensional hydrodynamical CO⁵BOLD model atmospheres of red giant stars VI. First chromosphere model of a late-type giant* // Astronomy and Astrophysics, spaudoje, DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730405>.

Pranešimai konferencijose disertacijos tema

1. **Klevas, J.**, Kučinskas, A., Prakupavičius, D., *CO⁵BOLD simulations across the HR diagram* // "CO⁵BOLD Workshop 2016". Neapolis (Italija), 2016 m. balandžio mėn. 11–13 d., Memorie della Societa Astronomica Italiana, 88, 100 (žodinis pranešimas).
2. Prakupavičius, D., Steffen, M., **Klevas, J.**, Kučinskas, A. *Non-LTE spectral line synthesis with CO⁵BOLD model atmospheres* // "CO⁵BOLD Workshop 2016". Neapolis (Italija), 2016 m. balandžio mėn. 11–13 d., Memorie della Societa Astronomica Italiana, 88, 77 (D. Prakupavičiaus žodinis pranešimas).
3. **Klevas, J.**, Kučinskas, A., Ludwig, H.-G., Bonifacio, P., Steffen, M., Prakupavičius, D., *Predicting Asymmetries And Shifts Of Spectral Lines In The Metal-Poor Red Giant HD 122563 Spectrum* // „Open Readings 2013“, Vilnius, 2013 m. kovo 20–23 d., Programa ir pranešimų tezės, Vilniaus universitetas, 164 p. (stendinis pranešimas).

4. **Klevas, J.**, Kučinskas, A., Ludwig, H.-G., Bonifacio, P., Steffen, M., Prakapavičius, D., *Velocity fields in the atmosphere of the metal-poor red giant HD 122563* // „40th Lithuanian National Physics Conference“, Vilnius, 2013 m. birželio 10–12 d., Programa ir pranešimų tezės, Vilniaus universitetas, 240 p. (stendinis pranešimas).
5. **Klevas, J.**, Kučinskas, A., Ludwig, H.-G., Bonifacio, P., Steffen, M., Prakapavičius, D., *Spectral line asymmetries in the metal-poor red giant HD 122563: CO⁵BOLD predictions versus observations* // „CO⁵BOLD Workshop 2012“, Heidelbergas (Vokietija), 2012 m. spalio 01–03 d., Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi, 24, 78 (žodinis pranešimas).
6. Kučinskas, A., Ludwig, H.-G., Steffen, M., Dobrovolskas, V., **Klevas, J.**, Prakapavičius, D., Caffau, E., Bonifacio, P., *The influence of convection on the atmospheric structures and observable properties of red giant stars* // „CO⁵BOLD Workshop 2012“, Heidelbergas (Vokietija), 2012 m. spalio 01–03 d., Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi, 24, 68 (A. Kučinsko žodinis pranešimas).

Asmeninis indėlis

Disertacijos autorius atliko visus mažo metalingumo raudonosios milžinės HD 122563 Fe I spektro linijų 3D LTE sintezės skaičiavimus, išmatavo spektro linijų poslinkius ir bisektorius, atliko teorinių prognozių ir stebėjimų duomenų analizę. Šio tyrimo rezultatai pristatyti trijose tarptautinėse konferencijose (trečias, ketvirtas ir penktas darbai pranešimų konferencijose disertacijos tema sąrašė: bendraautorai dalyvavo kuriant tyrimo metodiką, apskaičiavo 3D hidrodinaminius žvaigždės atmosferos modelius, bendradarbiavo aliekant gautų rezultatų analizę). Autorius atliko Li I, Na I, Mg I, Mg II, Al I, K I, Ca I, Ca II linijų, stebimų raudonųjų milžinių spektruose, spektro sintezės skaičiavimus, apskaičiavo šių elementų 3D–1D gausos pataisas, atliko dalį gautų rezultatų analizės darbų. Šie rezultatai apibendrinami dviejuose moksliniuose straipsniuose: Kučinskas ir kt. (2013) ir Dobrovolskas ir kt. (2013), antras ir trečias straipsniai publikacijų disertacijos tema Clarivate Analytics WoS žurnaluose sąrašė. Šių straipsnių bendraautorai sukūrė tyrimo metodiką, apskaičiavo žvaigždžių atmosferų modelius, atliko kitų cheminių elementų spektro linijų skaičiavimus bei gautų rezultatų analizę. Taikydamas teorinius žvaigždžių atmosferų modelius ($T_{\text{eff}} = 4500 - 6500$ K, $\log g = 2.5 - 4.5$ [cgs], $[M/H] = 0,0; -2,0$), autorius apskaičiavo teorinius 3D/1D NLTE/LTE Li I 670,8 nm rezonansinio dubleto profilius. Autorius sukonstravo naują Li I atomo modelį ir apskaičiavo atomo lygmenų užpildų nuokrypių nuo LTE koeficientus, kurie panaudoti Li I 670,8 nm rezonansinio dubleto sintezės skaičiavimuose. Rezultatai buvo apibendrinti Klevas ir kt. (2016) darbe (pirmas straipsnis publikacijų disertacijos tema Clarivate Analytics WoS žurnaluose sąrašė). Kartu su straipsnio bendraautoriais, autorius ištyrė konvekcijos ir nuokrypių nuo lokalsios termodinaminės pusiausvyros įtaką Li I 670,8 nm rezonansinio dubleto

formavimuisi. Autorius kartu su tyrimo bendraautoriais sukūrė metodiką automatizuotam 3D hidrodinaminių atmosferos modelių struktūrų atrinkimui spektro linijų sintezės skaičiavimams.

Disertacijos santraukos struktūra

Disertacijos santrauką sudaro įvadas, 4 skyriai, išvados ir naudotos literatūros šaltinių sąrašas.

1 skyriuje aprašomi darbe naudoti žvaigždžių atmosferų modeliai ir spektro sintezės programų paketai.

2 skyriuje apibendrinami konvekcijos įtakos neutralios geležies linijų formavimuisi raudonosios milžinės HD 122563 atmosferoje tyrimo rezultatai, analizuojama konvekcijos įtaka Fe I linijų profilių asimetrijai ir Doplerio poslinkiams. Tyrimo rezultatai pristatyti trijose tarptautinėse mokslinėse konferencijose ir paskelbti jų darbuose (pirmasis, trečiasis ir ketvirtasis įrašai pranešimų mokslinėse konferencijose disertacijos tema sąrašė).

3 skyriuje apibendrinami spektro linijų formavimosi raudonųjų milžinių atmosferose tyrimo, kurio metu buvo tiriama konvekcijos įtaka neutralių ir jonizuotų cheminių elementų spektro linijų formavimuisi, rezultatai. Tyrimo rezultatai buvo paskelbti Dobrovolskas ir kt. (2013) ir Kučinskas ir kt. (2013) darbuose (antrasis ir trečiasis įrašai straipsnių, paskelbtų disertacijos tema, sąrašė).

4 skyriuje aprašomi, konvekcijos ir nelokalaus spinduliuotės lauko įtakos Li I 670,8 nm rezonansinio dublėto formavimuisi skirtingų tipų žvaigždžių atmosferose tyrimo rezultatai. Šie rezultatai buvo paskelbti Klevas ir kt. (2016) darbe (pirmasis įrašas straipsnių, paskelbtų disertacijos tema, sąrašė).

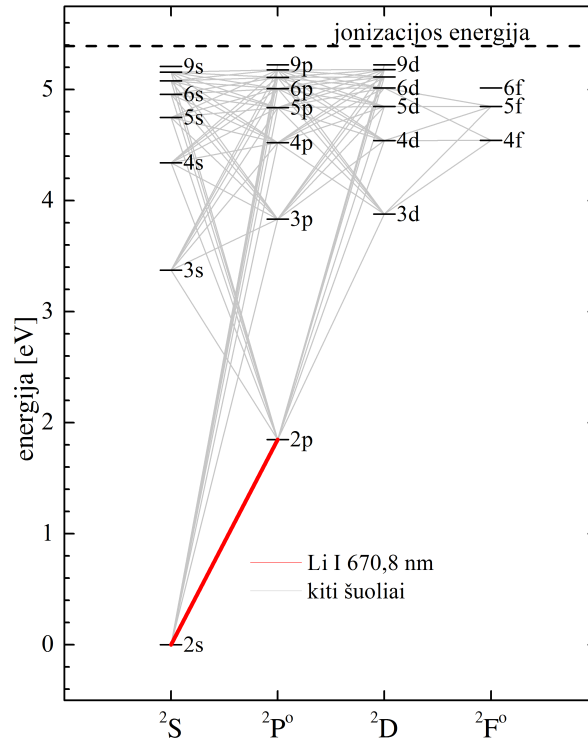
1. Žvaigždžių atmosferų modeliai ir spektro linijų sintezės skaičiavimai

Rengiant disertaciją buvo naudojami 3D hidrodinaminiai CO⁵BOLD ir 1D hidrostatiniai LHD žvaigždžių atmosferų modeliai.

CO⁵BOLD žvaigždžių atmosferų modelių skaičiavimo paketas (Freytag ir kt. 2012) skirtas spręsti hidrodinamikos lygtis esant išoriniam gravitaciniam laukui, kartu sprendžiant ir spinduliuotės pernašos uždavinį. Naudojant CO⁵BOLD paketą modeliuojamas medžiagos judėjimas ir spinduliuotės lauko kitimas 3D Dekarto koordinatinių sistemoje. Hidrodinaminių lygčių sistemą sudaro masės tvermės, judesio kiekio tvermės ir energijos tvermės lygtys. Sprendžiant spinduliuotės pernašos uždavinį naudojami monochromatiniai MARCS neskaidrumai (angl. *opacities*; Gustafsson ir kt. 2008), sugrupuoti į 5-6 neskaidrumų grupes (Vögler ir kt. 2004). Skaičiuojant modelius naudota Grevesse ir Sauval (1998) Saulės cheminės sudėties lentelė, išskyrus anglies, azoto ir deguonies atvejus, kuomet naudotos tokios gausos vertės: $A(C)=8,41$, $A(N)=7,8$ ir $A(O)=8,67$ (Caffau ir kt. 2008). Mažesnių už Saulės metalingumo modelių ($[M/H] \leq -1,0$) α -elementų gausa padidinta +0,4 dex. Modelių skaičiavimai buvo atliekami taikant lokalią termodinaminę pusiausvyros (angl. *local thermodynamic equilibrium* – LTE) prielaidą (detaliau žr. Ludwig ir Kučinskas 2012). 3D hidrodinaminis CO⁵BOLD modelis yra skirtingais laiko momentais suskaičiuotų atmosferos struktūrų seka. Šios struktūros charakterizuojamos modelio koordinatėmis, tankiu, vidine energija, ir medžiagos judėjimo greičio vektoriaus komponentėmis x - y - z ašyse, kiekviename modelio taške. Panaudojant šiuos dydžius, būsenos lygtį ir neskaidrumus, galima apskaičiuoti kitus reikalingus termodinaminius dydžius (pvz., dujų temperatūrą ir slėgį, įvairių cheminių elementų koncentraciją ir pan.).

Spektro linijų sintezės skaičiavimuose buvo naudojami ir suvidurkinti 3D modeliai, $\langle 3D \rangle$, kurie buvo gauti apskaičiuojant vidutines 3D modelių struktūras ties vienodais Rosseland'o optiniais gyliais. Šiame tyrime naudotuose modeliuose buvo naudojami temperatūros ketvirtame laipsnyje ($\langle T(\tau_{\text{Ross}})^4 \rangle^{1/4}$) ir slėgio pirmame laipsnyje ($\langle P_{\text{gas}}(\tau_{\text{Ross}}) \rangle$) vidurkiai (žr. Steffen ir kt. 1995).

LHD yra 1D hidrostatinių žvaigždžių atmosferų modelių skaičiavimo paketas (Caffau ir kt. 2008). Jo pagrindinis privalumas yra tas, kad naudojami tie patys fiziniai įvesties duomenys (cheminė sudėtis, būsenos lygtis, neskaidrumai) kaip ir 3D hidrodin-



1 pav. Ličio atomo modelis, naudotas 3D NLTE Li I 670,8 nm rezonansinio dubleto linijų formavimosi tyrime (4 skyrius). Raudona linija žymi šuolį, kurio metu susiformuoja Li I 670,8 nm dubleto šuolius. Šuoliai, kurių metu vyksta spinduliuotės emisijos arba sugerties procesai (angl. *radiative transitions*), pažymėti pilkomis linijomis.

naminiuose CO⁵BOLD žvaigždžių atmosferų modeliuose. Tai leidžia tiesiogiai tarpusavyje lyginti 3D hidrodinaminių ir 1D hidrostatinių modelių prognozes, minimizuojant galimų skirtumų priežasčių skaičių. LHD modelių parametrai yra efektinė temperatūra, T_{eff} , gravitacinio pagreičio logaritmas, $\log g$, ir cheminė sudėtis. Konvekcija įskaitoma remiantis Mihalas (1978) maišymosi ilgio teorijos (MLT) formuluoje.

Spektro linijų sintezei naudotas Linfor3D¹ spektro sintezės paketas, suderinamas tiek su CO⁵BOLD, tiek su LHD žvaigždžių atmosferų modeliais. Nelokalaus spinduliuotės lauko skaičiavimams buvo papildomai naudotas NLTE3D spektro sintezės paketas, kuris konkrečiam atomo modeliui leidžia apskaičiuoti atomo lygmenų užpildų nukrypimo nuo LTE koeficientus. Šie koeficientai naudojami Linfor3D programų pakete, kaip papildomi įvesties duomenys, reikalingi skaičiuojant NLTE spektro linijų profilius.

Siekiant sukurti naują ličio atomo modelį, naudotas paprastesnis Cayrel ir kt. (2007) ir Sbordone ir kt. (2010) darbuose pateiktas Li I atomo modelis (8 energijos lygmenys, 11 šuolių, kurių metu vyksta spinduliuotės emisija arba sugertis). Naują atomo modelį sudaro 26 Li I energijos lygmenys, pagrindinis Li II energijos lygmuo,

¹http://www.aip.de/Members/msteffen/linfor3d/files/linfor_3d_manual_6_1_0

šuočiai, kurių metu vyksta spinduliuotės emisijos arba sugerties procesai: 123 tarp Li I energijos lygmenų ir 26 tarp Li I ir Li II energijos lygmenų (1 pav., atomo modelis detaliau aprašomas Klevas ir kt. 2016). Atomo modeliui atnaujinti naudoti naujausi šuočių, kurių metu vyksta spinduliuotės emisija/sugertis, parametrai iš NIST ir TOPBASE (Cunto ir kt. 1993) duomenų bazių bei naujausios smūginių šuočių spartos, kurios buvo apskaičiuotos Barklem ir kt. (2003) bei Osorio ir kt. (2011) darbuose.

2. Konvekcijos įtaka spektro linijų profilių Doplerio poslinkiams

Greičių laukas, sukeliantis spektro linijų Doplerio poslinkius žvaigždžių spektruose, gali būti modeliuojamas taikant 3D hidrodinaminius žvaigždžių atmosferų modelius. Šio greičių lauko poveikį būtina įskaityti atliekant spektro linijų sintezės skaičiavimus, kadangi dėl medžiagos judėjimo žvaigždės atmosferoje spektro linijos profilis gali keisti savo formą, o linijos centras pasislinkti į trumpesnių arba ilgesnių bangų sritį. Kadangi skirtingos spektro linijos formuojasi skirtinguose atmosferos sluoksniuose, jų profilių forma taip pat gali pakisti skirtingai.

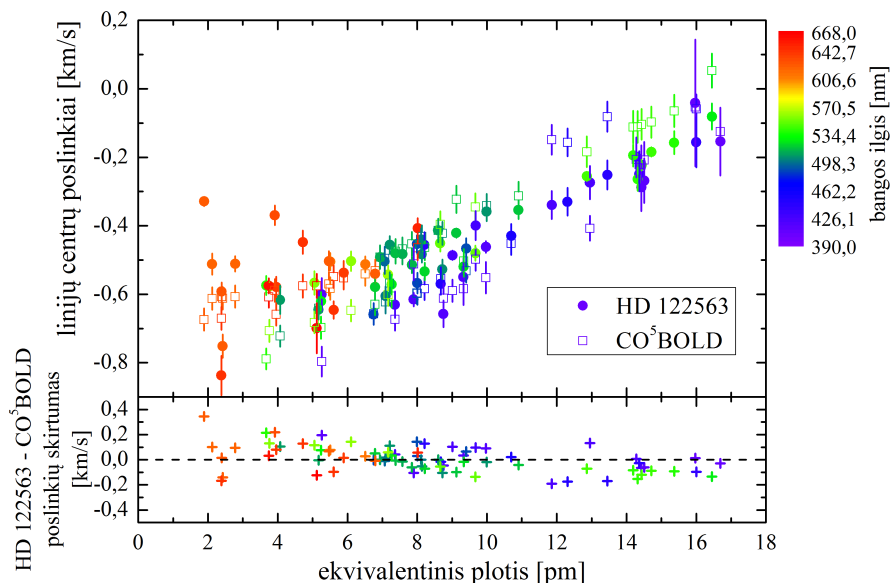
Vienas tyrimo uždavinių buvo įvertinti, kokią įtaką konvekcija ir jos kuriamas greičių laukas daro stebimų spektro linijų profilių formai ir Doplerio poslinkiams. Tyrimas buvo atliekamas lyginant Fe I linijų, stebimų mažo metalingumo raudonosios milžinės HD 122563 spektre, profilių formas bei Doplerio poslinkius su analogiškais dydžiais, prognozuojamais taikant 3D hidrodinaminį CO⁵BOLD atmosferos modelį.

2.1 Stebėtas HD 122563 spektras

Šiame tyrime naudotas HARPS HD 122563 spektras iš ESO mokslinių duomenų archyvo¹ (angl. *Science Archive Facility*; mokslinio tyrimo programos numeris 080.D-0347(A)). Spektras apima 380 – 680 nm bangos ilgių intervalą, vidutinis signalo ir triukšmo santykis $S/N \approx 310$, skyra $R = 115\,000$. Spektras automatiškai apdorotas panaudojant HARPS duomenų apdorojimo programinę įrangą² (angl. *Data Reduction Software*). Kontinumas buvo nustatytas priderinant antros eilės polinomą, šiam

¹http://archive.eso.org/eso/eso_archive_main.html

²<https://www.eso.org/sci/facilities/lasilla/instruments/harps/doc.html>



2 pav. Viršuje: stebimų ir teorinių Fe I spektro linijų centrų poslinkių priklausomybė nuo spektro linijos ekvivalentinio pločio, W . Apačioje: stebimų ir teoriškai prognozuojamų spektro linijų centrų poslinkių skirtumai.

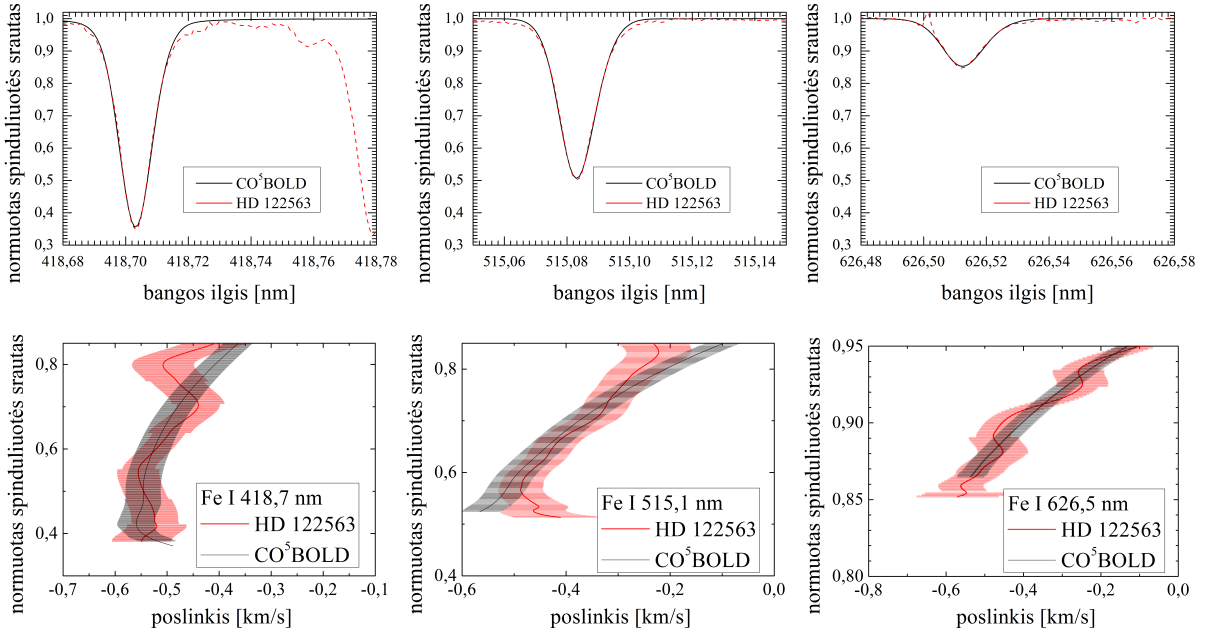
tikslui naudojant Dech20T spektro analizės paketą³.

2.2 3D hidrodinaminiai CO⁵BOLD žvaigždžių atmosferų modeliai ir spektro sintezė

Fe I spektro linijų sintezei buvo naudoti du 3D hidrodinaminiai CO⁵BOLD žvaigždžių atmosferų modeliai, kurių efektinės temperatūros ir gravitacijos pagreičio vertės atitinka taikant interformetrinį bei astrometrinį metodus nustatytus HD 122563 atmosferos parametrus ($T_{\text{eff}} = 4590$ K ir $\log g = 1,6$ [cgs], Creevey ir kt. 2012). Tyrime naudoti du skirtingo metalingumo modeliai, $[M/H] = -2,0$ ir $-3,0$. Žvaigždės metalingumas $[Fe/H] = -2,6$ (Mashonkina ir kt. 2011) užima tarpinę padėtį tarp naudotų modelių metalingumų.

Fe I spektro sintezės skaičiavimai buvo aliekami taikant LTE prielaidą. Panaudojant teoriškai apskaičiuotas spektro linijas, buvo sukonstruotos augimo kreivės, kurios buvo interpoliuotos HD 122563 metalingumui, $[Fe/H] = -2,6$. Tyrime naudota 81 Fe I spektro linija $\sim 400 - 670$ nm bangos ilgių intervale. Spektro linijų bangos ilgiai paimti iš Nave ir kt. (1994), sužadavimo potencialai, osciliatorių stipriai ir linijų išplitimo parametrai – iš VALD duomenų bazės (Kupka ir kt. 1999).

³<http://www.gazinur.com/DECH-software.html>



3 pav. Viršuje: teorinių (juodos išitisinės linijos) ir stebėtų (raudonos punktyrinės linijos) Fe I linijų profiliai raudonosios milžinės HD 122563 spektre. Apačioje: viršuje esančių spektro linijų profilių bisektoriai (štrichuotos zonos žymi 1σ paklaidų ribas: raudona spalva – stebėtų, pilka – teorinių bisektorių).

2.3 Rezultatai

Teoriškai prognozuojami spektro linijų poslinkiai daugeliu atvejų paklaidų ribose sutampa su stebėtais (2 pav.). Teorinių skaičiavimų prognozės ir stebėjimų rezultatai gerai dera vidutinėms ir stiprioms spektro linijoms ($5 \text{ pm} < W < 11 \text{ pm}$), vidutinis poslinkių skirtumas šiuo atveju siekia $0,015 \pm 0,076 \text{ km/s}$. Spektro linijų centrų poslinkiai prasčiau dera silpniausių ($W < 5 \text{ pm}$) ir stipriausių ($W > 11 \text{ pm}$) spektro linijų atvejais: vidutinis teoriškai prognozuojamų ir stebimų poslinkių skirtumas, atitinkamai, $+0,09 \pm 0,13 \text{ km/s}$ ir $-0,088 \pm 0,081 \text{ km/s}$. Pastebima labai panaši tiek stebimo, tiek teoriškai prognozuojamo spektro linijos centro poslinkio priklausomybė nuo bangos ilgio.

Spektro linijų profilių bisektorių⁴ poslinkiai atsiranda dėl to, kad skirtingos spektro linijos profilio (bisektoriaus) dalys formuojasi skirtinguose atmosferos sluoksniuose, kuriems būdingi skirtingi medžiagos judėjimo greičiai. Tiek stebimų, tiek teoriškai prognozuojamų bisektorių forma priklauso nuo linijos ekvivalentinio pločio: stipriausių spektro linijų bisektorių poslinkis panašus ties visais bisektoriaus gyliais, silpniausių – giliausia bisektoriaus dalis pasisilinkusi į mėlynąją spektro dalį viršutinės bisektoriaus dalies atžvilgiu (3 pav.).

⁴Bisektorius yra linija, sujungta iš taškų, kurie horizontalias linijas, jungiančias vienodo srauto vertes skirtinguose linijos profilio sparnuose, padalina į dvi lygias dalis.

3. Konvekcijos įtaka spektro linijų formavimuisi raudonųjų milžinių atmosferose

Spektro linijų formavimasis raudonųjų milžinių atmosferose yra mažai ištirtas – pavieniai tyrimai, kuriuose nagrinėjama spektro linijų formavimuisi daroma konvekcijos įtaka, pvz., Collet ir kt. (2007), rodo, kad konvekcija gali sustiprinti spektro linijas daugiau nei 10 kartų. Norint geriau suprasti konvekcijos įtaką spektro linijų formavimuisi, disertacijoje buvo siekiama atlikti išsamų šių efektų tyrimą plačiame spektro linijas charakterizuojančių parametru (bangos ilgis, sužadavimo potencialas) intervale. Tyrime naudoti 3D hidrodinaminiai CO⁵BOLD, suvidurkinti ⟨3D⟩ ir 1D hidrostatiniai LHD žvaigždžių atmosferų modeliai, kurie buvo apskaičiuoti naudojant tokius pačius atmosferos parametrus ($T_{\text{eff}} = 3660$ K, $\log g = 1,0$ [cgs], $[M/H] = 0,0$; $T_{\text{eff}} = 5000$ K, $\log g = 2,5$ [cgs], $[M/H] = 0,0; -1,0; -2,0; -3,0$), cheminę sudėtį, neskaidrumus ir būsenos lygtį.

Disertacijoje buvo ištirtas šių cheminių elementų spektro linijų formavimasis raudonųjų milžinių atmosferose:

- neutralių atomų: Li I, Na I, Mg I, Al I, K I, Ca I;
- jonizuotų atomų: Mg II, Ca II.

Tyrimui parinktas spektro linijų parametru diapazonas, kuris kai kuriais atvejais buvo platesnis, nei tas, kurį apima realių elemento spektro linijų parametrai. Tai leido ištirti spektro linijų stiprio priklausomybę nuo spektro linijos parametru skirtingiems cheminiams elementams. Šis metodas pirmiausiai taikytas Steffen ir Holweger (2002), vėliau Collet ir kt. (2007) ir mūsų grupės darbuose (Kučinskas ir kt. 2013; Dobrovolskas ir kt. 2013). Disertacijoje nagrinėta konvekcijos įtaka neutralių atomų ir jonų spektro linijų formavimuisi raudonųjų milžinių atmosferose ($\lambda = 400, 850$ ir 1600 nm). Tiriamų spektro linijų sužadavimo potencialų apimami intervalai buvo $\chi = 0 - 6$ ir $\chi = 0 - 10$ eV, atitinkamai neutralių atomų ir jonų spektro linijoms (abiem atvejais $\Delta\chi = 2$ eV zingsniu).

Konvekcijos įtaka spektro linijų formavimuisi buvo analizuojama naudojant 3D–1D gausos pataisas. 3D–1D gausos pataisa, Δ_{3D-1D} , apibrėžiama kaip cheminio elemento X_i gausos $A(X_i)$ skirtumas, kuris gaunamas naudojant 3D hidrodinaminis ir 1D hidrostatinius atmosferų modelius (tiriamo elemento gausa nustoma nau-

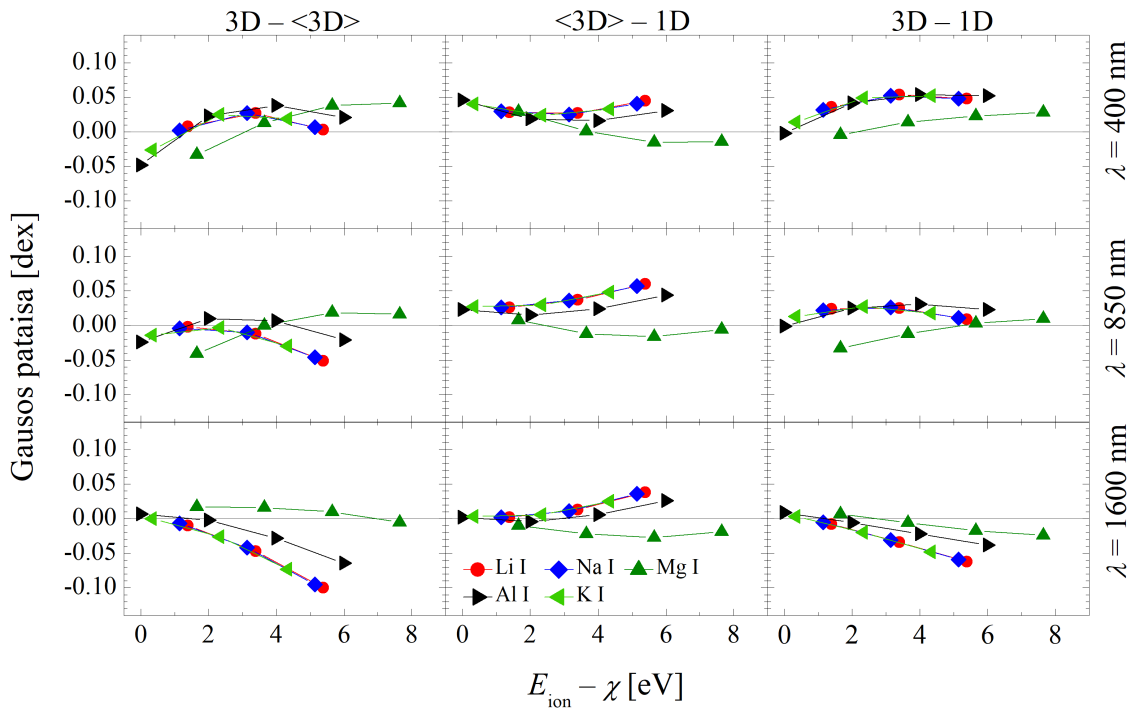
dojant konkrečią spektro liniją, kurios ekvivalentinis plotis W ; žr., pvz., Caffau ir kt. 2011). Gausos pataisą Δ_{3D-1D} sudaro dvi dedamosios: (a) pataisa, kuri atsiranda dėl termodinaminių bei hidrodinaminių dydžių (temperatūros, medžiagos judėjimo greičio ir pan.) nehomogeniškumų horizontalioje plokštumoje, $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle} = A(X_i)_{3D} - A(X_i)_{\langle 3D \rangle}$; ir (b) pataisa, kurios dydį lemia skirtumai tarp temperatūros profilių suvidurkintame $\langle 3D \rangle$ ir 1D modeliuose, $\Delta_{\langle 3D \rangle-1D} = A(X_i)_{\langle 3D \rangle} - A(X_i)_{1D}$. Pilna gausos pataisa yra šių komponentų suma, $\Delta_{3D-1D} = \Delta_{3D-\langle 3D \rangle} + \Delta_{\langle 3D \rangle-1D}$. Kadangi 1D hidrostatiinių modelių pagalba apskaičiuotų įsisotinusių spektro linijų stipris priklauso nuo laisvo parametro – mikroturbulencijos greičio, 3D–1D gausos pataisos buvo skaičiuojamos silpnoms spektro linijoms (ekvivalentiniai pločiai $< 0,5$ pm), nes naudojant šias linijas gaunami 1D gausos įverčiai nepriklauso nuo mikroturbulencijos greičio.

Kadangi 3D hidrodinaminio modelio struktūra kinta laike, tiriamo elemento gausa, nustatyta naudojant modelio struktūras, kurios buvo apskaičiuotos skirtingais laiko momentais, bus šiek tiek skirtinga. Dėl šios priežasties atsirandanti gausos pataisos paklaida buvo įvertinta kaip σ / \sqrt{N} , kur σ yra gausos įverčio, gauto naudojant 3D hidrodinaminius modelius, dispersija, N – modelių struktūrų, naudotų nustatant tiriamo elemento gausą, skaičius. 3D gausos įverčio tikslumas visais tirtais atvejais geresnis nei 0,01 dex, todėl šiame darbe laikoma, kad gausos pataisos paklaida yra $\pm 0,01$ dex.

3.1 Spektro linijų formavimasis žvaigždės, esančios raudonųjų milžinių sekos viršutinėje dalyje, atmosferoje

Šioje disertacijos dalyje buvo atliktas įvairių cheminių elementų spektro linijų formavimosi ypatumų raudonosios milžinės atmosferoje tyrimas. Tyrime buvo naudotas 3D hidrodinaminis modelis, kurio atmosferos parametrai $T_{\text{eff}} = 3660$ K, $\log g = 1,0$ [cgs], $[M/H] = 0,0$. Šios žvaigždės termodinaminės ir hidrodinaminės savybės buvo iširtos Ludwig ir Kučinskas (2012) darbe. Konvekcijos įtaka spektro linijų formavimuisi buvo įvertinta naudojant gausos pataisas (žr. 3 skyrių). Neutralių atomų spektro linijoms suminė gausos pataisa, Δ_{3D-1D} , ir jos komponentės, $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle}$ ir $\Delta_{\langle 3D \rangle-1D}$, yra $-0,1 \dots +0,05$ dex dydžio, su skirtingo ženklo $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle}$ ir $\Delta_{\langle 3D \rangle-1D}$ komponentių vertėmis (4 pav.).

Gausos pataisų vertės jonizuotų cheminių elementų spektro linijoms priklauso nuo spektro linijos sužadavimo potencialo χ : mažo sužadavimo potencialo spektro linijoms

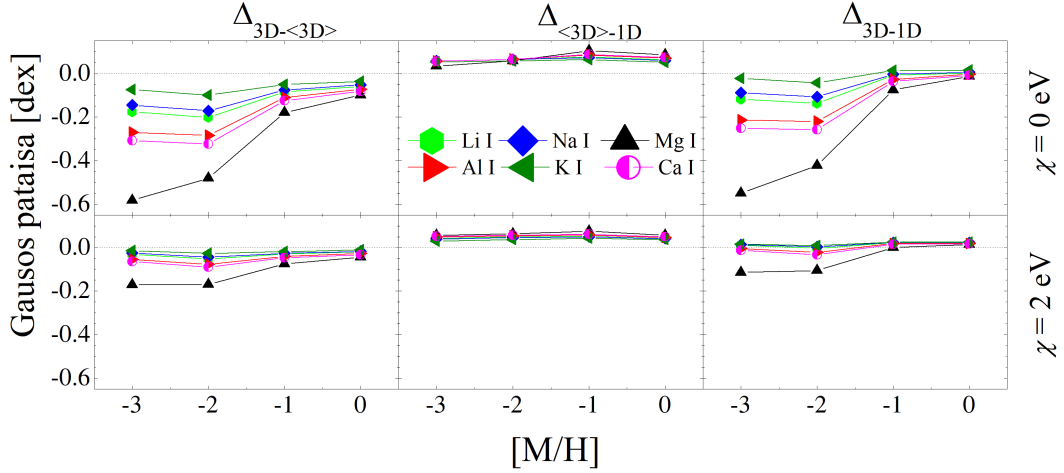


4 pav. Gausos pataisų neutralių cheminių elementų spektro linijoms priklausomybė nuo atomo jonizacijos energijos ir spektro linijos sužadavimo potencialo skirtumo, $E_{\text{ion}} - \chi$. Paveiksle pateikiamos trys gausos pataisos: $\Delta_{3\text{D}-\langle 3\text{D} \rangle}$ (kairiaime stulpelyje), $\Delta_{\langle 3\text{D} \rangle-1\text{D}}$ (viduriniame stulpelyje), and $\Delta_{3\text{D}-1\text{D}}$ (dešiniame stulpelyje). Gausos pataisos pateikiamos trimis bangos ilgiais: 400 nm (viršuje), 850 nm (vidurinėje eilėje) ir 1600 nm (apačioje). Žvaigždės atmosferos modelio parametrai: $T_{\text{eff}} = 3660$ K, $\log g = 1,0$ [cgs], $[M/H] = 0,0$.

3D–1D gausos pataisos mažiausios ir išauga iki $\sim -0,4$ dex, kai linijos sužadavimo potencialo vertė yra $\chi = 10$ eV. Pastarąją gausos pataisos vertę sudaro $\Delta_{3\text{D}-\langle 3\text{D} \rangle} \sim -0,6$ dex ir $\Delta_{\langle 3\text{D} \rangle-1\text{D}} \sim +0,2$ dex gausos pataisos komponentės.

3.2 Spektro linijų formavimasis žvaigždės, esančios raudonųjų milžinių sekos apatinėje dalyje, atmosferoje

Šioje tyrimo dalyje buvo analizuojama konvekcijos daroma įtaka įvairių cheminių elementų formavimuisi skirtingo metalingumo raudonųjų milžinių atmosferose. Tyrime buvo naudoti 3D hidrodinaminiai ir 1D hidrostatiniai žvaigždžių atmosferų modeliai, apskaičiuoti naudojant CO⁵BOLD ir LHD žvaigždžių atmosferų modeliavimo programų paketus. Visais atvejais naudoti tie patys modelių atmosferos parametrai: $T_{\text{eff}} = 5000$ K, $\log g = 2,5$ [cgs], $[M/H] = 0,0; -1,0; -2,0; -3,0$. Tyrimo metu nustatyta, kad gausos pataisos, apskaičiuotos taikant skirtingo metalingumo modelius, gerokai skiriasi. Saulės metalingumo modelių atveju, gausos pataisos yra mažos ($< \pm 0,1$ dex). Mažesnio metalingumo žvaigždėms gausos pataisos yra didesnės: pvz., Mg I atveju, gausos pataisa siekia -0.8 dex, kai metalingumas $[M/H] = -3,0$



5 pav. Gausos pataisų neutralių atomų spektro linijoms priklausomybė nuo metalingumo (linijų bangų ilgis $\lambda = 400$ nm): $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle}$ (kairiame stulpelyje), $\Delta_{\langle 3D \rangle-1D}$ (viduriniame stulpelyje) ir Δ_{3D-1D} (dešiniame stulpelyje). Gausos pataisos pateikiamos dviem spektro linijų sužadavimo potencialo vertėms, kurios pažymėtos kiekvienos eilutės dešinėje. Žvaigždės atmosferos modelių parametrai: $T_{\text{eff}} = 5000$ K, $\log g = 2,5$ [cgs], $[M/H] = 0,0; -1,0; -2,0; -3,0$.

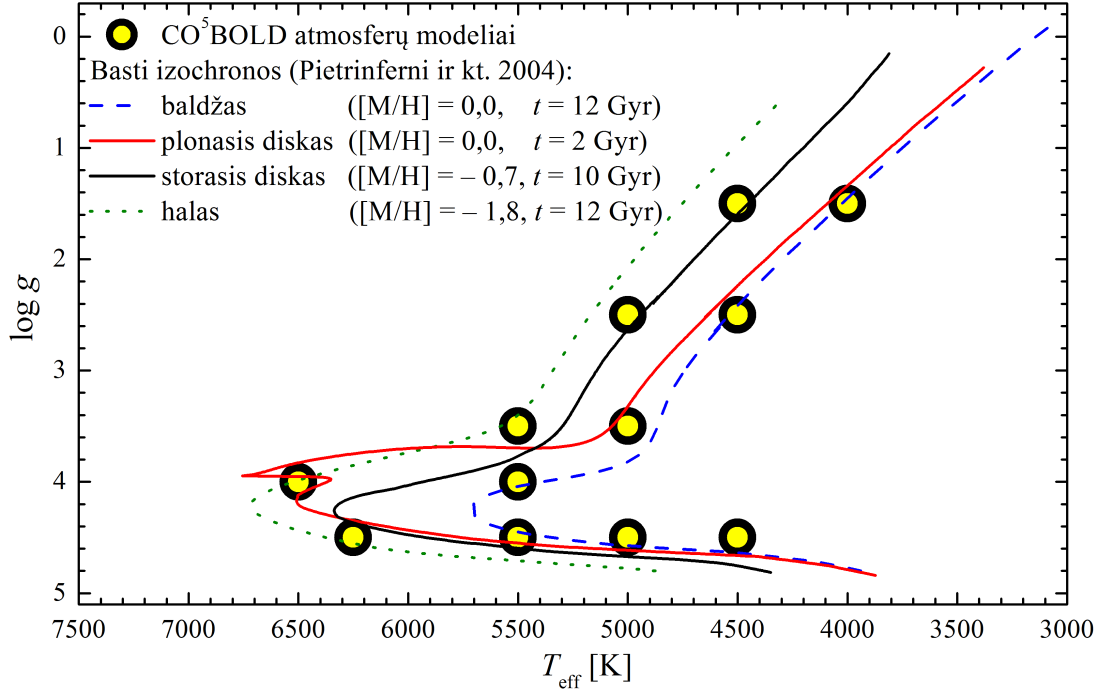
(5 pav.). Nustatyta, kad gausos pataisos yra didžiausios rezonansinėms spektro linijoms. Didesnio sužadavimo potencialo spektro linijoms gausos pataisos yra mažesnės (iki $< \pm 0,1$ dex ir nepriklauso nuo žvaigždės atmosferos metalingumo). Jonizuotų atomų linijoms gausos pataisos mažos visais tirtais atvejais ir neviršija $\pm 0,01$ dex. Gausos pataisos priklausomybė tiek nuo metalingumo, tiek nuo sužadavimo potencialo yra silpna ir gausos pataisos $0,0 \geq [M/H] \geq -3,0$, $0,0 \leq \chi \leq 10,0$ eV intervaluose neviršija $\pm 0,12$ dex.

4. Konvekcijos ir spinduliuotės lauko įtaka

Li I 670,8 nm rezonansinio dubleto formavimuisi

Siekiant ištirti ne tik konvekcijos, bet ir nelokalaus spinduliuotės lauko įtaką spektro linijų formavimuisi, buvo analizuojamas Li I 670,8 nm rezonansinio dubleto formavimasis skirtingo tipo žvaigždžių atmosferose (6 pav.).

Daugelio žvaigždžių spektrų optinėje srityje stebima vienintelė ličio spektro linija yra Li I 670,8 nm rezonansinis dubletas. Naudojant 3D hidrodinaminius ir 1D hidrostatinius žvaigždžių atmosferų modelius, tyrime buvo apskaičiuoti šios spektro linijos profiliai, taikant tiek LTE, tiek NLTE spektro sintezės priemones (žvaigždžių atmosferų modelių parametrai pateikiami 4.1 lentelėje). Atliekant spektro linijų sin-



6 pav. 3D hidrodinaminių CO⁵BOLD žvaigždžių atmosferų modelių, naudotų tiriant konvekcijos ir nelokalaus spinduliuotės lauko įtaką Li I 670,8 nm rezonansinio dublėto formavimuisi, atmosferos parametrai $\log g - T_{\text{eff}}$ plokštumoje (apskritimai). Linijos žymi izochronas, kurių parametrai atitinka pagrindinių Galaktiką sudarančių komponentų (storasis, plonasis diskas, halas, baldžas) parametrus.

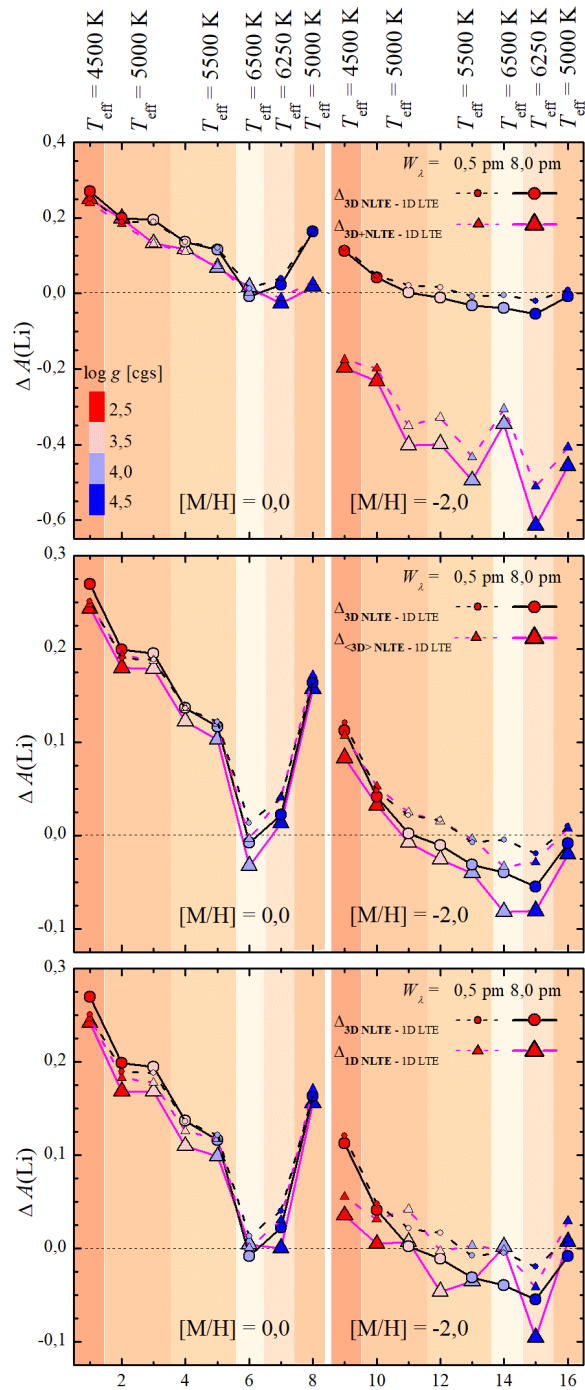
4.1 lentelė. 3D hidrodinaminiai CO⁵BOLD žvaigždžių atmosferų modeliai, kurie buvo naudojami tiriant Li I 670,8 nm spektro linijos formavimosi ypatumus skirtingų tipų žvaigždžių atmosferose.

#	Modelis	T_{eff} K	$\log g$ [cgs]	[M/H]	Tinklelio dydis $x \times y \times z$ Mm	Tinklelio skyra $x \times y \times z$
1	RGB #1	4480	2,5	0,0	851×851×295	140×140×150
2	RGB #2	4970	2,5	0,0	573×573×243	160×160×200
3	SGB #1	4920	3,5	0,0	59,7×59,7×30,2	140×140×150
4	SGB #2	5430	3,5	0,0	49,0×49,0×35,9	140×140×150
5	TO #1	5480	4,0	0,0	20,3×20,3×10,6	140×140×150
6	TO #2	6490	4,0	0,0	29,0×29,0×14,9	140×140×150
7	MS #1	6230	4,5	0,0	7,00×7,00×4,02	140×140×150
8	MS #2	4980	4,5	0,0	4,94×4,94×2,48	140×140×141
9	RGB #3	4480	2,5	-2,0	851×851×292	140×140×150
10	RGB #4	5020	2,5	-2,0	584×584×245	160×160×200
11	SGB #3	4980	3,5	-2,0	59,7×59,7×30,2	140×140×150
12	SGB #4	5500	3,5	-2,0	49,0×49,0×35,9	140×140×150
13	TO #3	5470	4,0	-2,0	20,1×20,1×10,6	140×140×150
14	TO #4	6530	4,0	-2,0	29,6×29,6×14,9	140×140×150
15	MS #3	6320	4,5	-2,0	7,00×7,00×4,02	140×140×150
16	MS #4	5010	4,5	-2,0	5,08×5,08×2,49	140×140×141

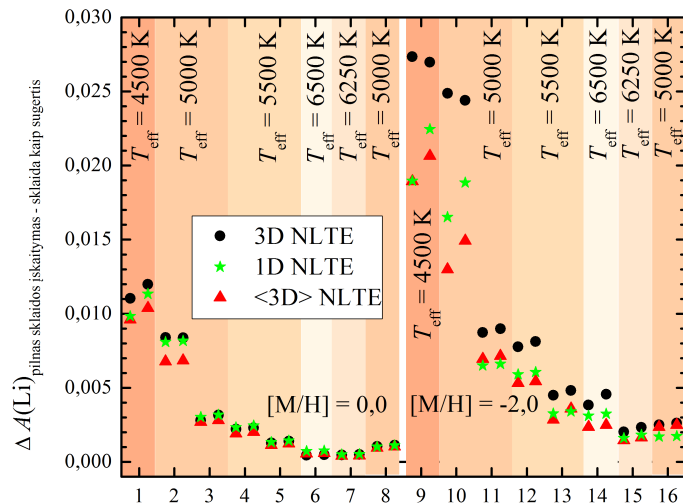
tezės skaičiavimus buvo įskaityta 670,8 nm rezonansinės spektro linijos viršutinio lygmens (2p) smulkioji struktūra, lemianti tai, kad ši linija stebima kaip dubletas, kuris realių žvaigždžių spektruose į atskiras komponentes nėra išskiriamas (skirtumas tarp komponentių centrinių bangos ilgių yra 0,02 nm). Dėl šios priežasties, šį dubletą toliau vadinsime tiesiog rezonansine Li I 670,8 nm linija. Spektro sintezės skaičiavimai buvo atlikti dviejų stiprių spektro linijoms: silpnoms ($W = 0,5$ pm) ir stiprioms ($W = 8$ pm). Linijų stipriai parinkti taip, kad jie apytikriai atitiktų didžiausią ir mažiausią ekvivalentinio pločio vertes, stebimas realių žvaigždžių spektruose.

Tyrime nustatyta, kad pilna $\Delta_{3DNLTE - 1DLTE}$ gausos pataisa skiriasi nuo $\Delta_{3D + NLTE}$ ($\equiv \Delta_{1DNLTE - 1DLTE} + \Delta_{3DNLTE - 1DLTE}$) gausos pataisos visais tirtais atvejais (7 pav.). Pažymėtina, kad nors šie skirtumai nedideli Saulės metalingumo modelių atveju (išskyrus $T_{\text{eff}} = 5000$ K, $\log g = 4,5$ [cgs], $[M/H] = 0,0$), jie gerokai padidėja, kai $[M/H] = -2,0$. Pastaruoju atveju, pilna 3D NLTE gausos pataisa yra maža ir, priklausomai nuo linijos stiprio, siekia $-0,06 \leq \Delta_{3DNLTE - 1DLTE} \leq +0,12$ dex, tuo tarpu, $\Delta_{3D + NLTE}$ gausos pataisa yra neigiama, jos vertė didesnė ir kinta intervale $-0,23 \leq \Delta_{3D + NLTE} \leq -0,18$ dex ir $-0,50 \leq \Delta_{3D + NLTE} \leq -0,31$ dex atitinkamai RGB ir TO žvaigždėms. Kitos gausos pataisos, pvz., $\Delta_{\langle 3D \rangle NLTE - 1DLTE}$ ir $\Delta_{1DNLTE - 1DLTE}$, daugeliu atvejų yra panašaus dydžio kaip ir $\Delta_{3DNLTE - 1DLTE}$ pataisa, t.y., skirtumai tarp jų yra nedideli: $|\Delta_{3DNLTE - 1DLTE} - \Delta_{\langle 3D \rangle NLTE - 1DLTE}| \leq 0,04$ dex ir $|\Delta_{3DNLTE - 1DLTE} - \Delta_{1DNLTE - 1DLTE}| \leq 0,08$ dex. Verta pažymėti, kad $\Delta_{3DNLTE - 1DLTE}$ gausos pataisos taip pat mažos, ypač $[M/H] = -2,0$ atveju, todėl mažo metalingumo žvaigždėms skirtumai tarp šių gausos pataisų gali būti panašaus dydžio ar netgi viršyti pilną $\Delta_{3DNLTE - 1DLTE}$ gausos pataisą.

Gausos pataisų dydį lemia žvaigždės atmosferos termodinaminė struktūra, kuri, savo ruožtu, priklauso nuo žvaigždės metalingumo. Pvz., Saulės metalingumo atveju, temperatūros fliktuacijos raudonosios milžinės atmosferos modelyje nevirsija $\Delta T_{\text{RMS}} < 350$ K ($\Delta T_{\text{RMS}} = \sqrt{\langle (T - T_0)^2 \rangle_{x,y,t}}$, čia T yra 3D hidrodinaminio atmosferos modelio skaitmeninės gardelės taško, charakterizuojamo erdvinėmis koordinatėmis x, y, z , temperatūra, T_0 – vidutinė temperatūra ties konkrečiu optiniu gyliu, $\langle \dots \rangle_{x,y,t}$ žymi vidurkinimą horizontalioje plokštumoje ir laike), o skirtumai tarp 3D modelio vidutinės temperatūros ir 1D modelio temperatūros tame pačiame modelio taške yra santykinai nedideli (iki 200 K). Mažesnio metalingumo atveju ($[M/H] = -2,0$), ΔT_{RMS} gali padidėti iki 800 K, o vidutinių temperatūros struktūrų skirtumai – iki 700 K. Nehomogeniška atmosferos termodinaminė struktūra ir skirtumai tarp $\langle 3D \rangle$ ir 1D modelių temperatūros profilių LTE atveju lemia tai, kad spektro linijos prognozuojamos taikant 3D hidrodinaminis modelius yra gerokai stipresnės, nei tos, kurios apskaičiuojamos naudojant 1D hidrostatinis modelius. NLTE atveju,



7 pav. Li I 670,8 nm spektro linijos gausos pataisos (y ašis), apskaičiuotos taikant skirtingus pagrindinės, submilžinių ir raudonųjų milžinių sekų žvaigždžių atmosferų modelius (t.y., 3D hidrodinaminį, suvidurkintą ⟨3D⟩ bei 1D hidrostatinį modelius), bei NLTE/LTE spektro linijų sintezės metodiką (modelio/metodikos kodas pateikiamas x asyje, parametrai - 4.1 lentelėje). Rezultatai, gauti taikant $[M/H] = 0,0$ modelius, pateikiami kairiame stulpelyje, $[M/H] = -2,0$ - dešiniame. Paveiksle pavaizduotos šios gausos pataisos: $\Delta_{3D\text{NLTE} - 1D\text{LTE}}$ (visose paveikslo dalyse), $\Delta_{3D+NLTE - 1D\text{LTE}}$ (viršutinė eilutė), $\Delta_{(3D)\text{NLTE} - 1D\text{LTE}}$ (vidurinė eilutė) ir $\Delta_{1D\text{NLTE} - 1D\text{LTE}}$ (apatinė eilutė). Kiekvienam modeliui apskaičiuotos dviejų ekvivalentinių pločių spektro linijos: mažesni simboliai žymi $W = 0,5$ pm, didesni - $W = 8,0$ pm ekvivalentinio pločio spektro linijas. Tokios pačios spalvos vertikalios juostos žymi vienodos efektyvios temperatūros modelius.



8 pav. Sklaidos įtaka Li I 670,8 nm spektro linijos formavimuisi skirtingų tipų žvaigždžių atmosferose. Paveiksle pavaizduotos gausos pataisos Li I 670,8 nm spektro linijai (y ašis), kurios buvo apskaičiuotos taikant skirtingus atmosferų modelius (modelio kodas pateikiamas x ašyje, parametrai - 4.1 lentelėje). Kiekvienam modeliui apskaičiuotos dviejų ekvivalentinių pločių spektro linijos: mažesni simboliai žymi $W = 0,5$ pm, didesni – $W = 8,0$ pm ekvivalentinio pločio spektro linijas. Tokios pačios spalvos vertikalios juostos žymi vienodos efektinės temperatūros modelius.

Li I koncentracijai įtaką daro ir spinduliuotės lauko savybės. Sluoksniuose, kuriuose 3D ir 1D modelių skirtumai lemia didžiausias 3D LTE–1D LTE gausos pataisas, spinduliuotės laukas jonizuoja Li I ir 3D NLTE spektro linijų stipriai yra mažesni nei 3D LTE atveju, be to, jie yra panašaus dydžio į <3D> NLTE, 1D NLTE spektro linijų stiprius.

Svarbu pažymėti, kad skaičiuojant 3D hidrodinaminius žvaigždžių atmosferų modelius ir taikant juos cheminių elementų gausos analizėje dažniausiai supaprastintai laikoma, kad spinduliuotės sklaida veikia tik kaip sugertis (arba sklaidos įtaka spinduliuotės laukui išvis neįskaitoma). Nors šiame darbe sklaidos įtaka Li I spektro linijos sintezės skaičiavimuose buvo įskaityta taikant koherentinės izotropinės sklaidos artinį, buvo atliktas sklaidos įtakos Li I 670,8 nm linijos formavimuisi tyrimas. Šio tyrimo metu buvo siekiama įvertinti, kiek supaprastintas sklaidos įskaitymas spektro sintezės skaičiavimuose, t.y., laikant, kad sklaida veikia tik kaip sugertis, gali pakeisti prognozuojamą Li I 670,8 nm linijos stipri ir kokią įtaką šie pokyčiai gali turėti Li gausos įverčiams. Gauti rezultatai rodo, jog sklaidos įtaka Li I 670,8 nm linijos formavimuisi yra nedidelė. Pvz., Saulės metalingumo atveju, gausos įverčio skirtumai siekia nuo 0,001 dex pagrindinės sekos žvaigždėms iki 0,012 dex raudonosioms milžinėms, tuo tarpu mažo metalingumo žvaigždžių atveju efektas kiek didesnis: gausos pataisos siekia nuo 0,005 dex pagrindinės sekos žvaigždėms iki 0,028 dex raudonosioms milžinėms (8 pav.). Li I atveju, spinduliuotės sklaida kontinume nedaro reikšmin-

gos įtakos 670,8 nm Li I spektro linijos formavimuisi pagrindinės sekos, submilžinių sekos ir raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių atmosferose. Ypač mažo metalingumo raudonųjų milžinių atmosferose ($[M/H] \leq -4,0$), sklaidos įtaka Li I 670,8 nm linijos formavimuisi gali būti didesnė, tačiau, siekiant įvertinti šių efektų dydį, būtini detalūs tyrimai, kuriuos reikėtų atlikti taikant 3D hidrodinaminius atmosferų modelius bei 3D NLTE spektro sintezės priemones.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

Disertacijoje tirta konvekcijos ir spinduliuotės pernašos įtaka spektro linijų formavimuisi pagrindinės sekos (MS), posūkio taško (TO), submilžinių sekos (SGB), raudonųjų milžinių sekos (RGB) žvaigždžių atmosferose. Tyrimas buvo atliktas naudojant 3D hidrodinaminius atmosferų modelius, kuriuose konvekcija modeliuota sprendžiant hidrodinamikos lygtis. Palyginimui buvo naudojami 1D hidrostatiniai žvaigždžių atmosferų modeliai, kuriuose konvekcija įskaitoma parametrizuotai.

Fe I spektro linijų formavimosi raudonosios milžinės HD 122563 spektre tyrimo rezultatai rodo, kad Fe I spektro linijų centrų poslinkiai ir bisektoriai, prognozuojami 3D hidrodinaminių CO⁵BOLD žvaigždžių atmosferų modelių, gerai dera su poslinkiais, stebimais šios žvaigždės spektre.

Disertacijoje buvo ištirta konvekcijos įtaka spektro linijų formavimuisi žvaigždės, esančios raudonųjų milžinių sekos viršūnėje ($T_{\text{eff}} = 3660$, $\log g = 1,0$, $[M/H] = 0,0$), bei keturių žvaigždžių raudonųjų milžinių sekos apačioje ($T_{\text{eff}} \approx 5000$ K, $\log g = 2,5$, $[M/H] = 0,0; -1,0; -2,0; -3,0$), atmosferose. Gausos pataisos apskaičiuotos šių cheminių elementų spektro linijoms: Li I, Na I, Mg I, Mg II, Al I, K I, Ca I, Ca II. Spektro linijų skaičiavimams pasirinkti trys bangos ilgiai (400, 850 ir 1600 nm) ir keturi sužadavimo potencialai (0, 2, 4, 6 eV) neutraliems cheminiams elementams bei šeši sužadavimo potencialai (0, 2, 4, 6, 8, 10 eV) vienažart jonizuotiems cheminiams elementams. Mažesnio negu 3 eV sužadavimo potencialo spektro linijų gausos pataisoms būdinga priklausomybė tiek nuo sužadavimo potencialo, tiek nuo žvaigždės metalingumo. Esant mažiausiam metalingumui, $[M/H] = -3,0$, Δ_{3D-1D} gausos pataisa rezonansinėms Mg I spektro linijoms ($\chi = 0,0$ eV) siekia $-0,8$ dex. Jonizuotų cheminių elementų spektro linijų gausos pataisos yra mažos, kai $T_{\text{eff}} \approx 5000$ K ($\lesssim \pm 0,1$ dex). Žvaigždės, kurios efektinė temperatūra $T_{\text{eff}} \approx 3660$ K, atveju, Mg II gausos pataisa svyruoja nuo $\sim 0,0$ dex ($\chi = 0,0$ eV) iki $\sim -0,4$ dex ($\chi = 10,0$ eV).

Disertacijoje ištirta, kaip konvekcija ir nelokalus spinduliuotės laukas veikia Li I rezonansinės 670,8 nm spektro linijos formavimąsi MS, TO, SGB ir RGB žvaigždžių atmosferose. Priklausomai nuo atmosferos modelio T_{eff} ir $\log g$ verčių, bei linijos ekvivalentinio pločio, W , vertės, gausos pataisų dydis svyruoja nuo $-0,06$ dex ($T_{\text{eff}} = 6320$ K, $\log g = 4,0$ [cgs], $[M/H] = -2,0$) iki $+0,27$ dex ($T_{\text{eff}} = 4480$ K, $\log g = 2,5$ [cgs], $[M/H] = 0,0$). Nustatyta, kad gausos pataisa $\Delta_{3D+NLTE-1DLTE}$, apskaičiuota atskirai atsižvelgiant į konvekcijos ir NLTE efektus, gali gerokai skirtis

nuo $\Delta_{3\text{DNLTE}-1\text{DLTE}}$ pataisos, apskaičiuotos taikant 3D NLTE metodą, ir šie skirtumai gali siekti 0,6 dex.

Šie efektai lemia ir gausos pataisų dydį: 3D NLTE–1D LTE gausos pataisų dydis svyruoja nuo $-0,06$ iki $+0,27$ dex. Nustatyta, kad $\Delta_{3\text{D} + \text{NLTE}}$ gausos pataisa, kuris apskaičiuojama atskirai įskaitant konvekcijos ir NLTE efektus, mažo metalingumo žvaigždžių atveju nuo $\Delta_{3\text{DNLTE}-1\text{DLTE}}$ pataisos ekstremaliais atvejais gali skirtis iki 0,6 dex. Taikant tiek $\langle 3\text{D} \rangle$ NLTE, tiek 1D NLTE metodus gauti gausos įverčiai gali skirtis nuo 3D NLTE įverčio iki 0,1 dex, todėl siekiant tiksliai ir patikimai nustatyti ličio gausą žvaigždžių atmosferose būtina taikyti 3D NLTE gausos analizės priemones.

Summary

We studied spectral line formation in different types of stellar atmospheres, focusing on the interplay between convection, radiative transfer, and spectral line formation. For this purpose we use three-dimensional (3D) hydrodynamic CO⁵BOLD model atmospheres which allow to model convection in an explicit way.

As a first step in this investigation, we studied the influence of convection on the asymmetries and Doppler shifts of Fe I spectral lines forming in the atmosphere of a metal-poor red giant HD 122563. In general, a good agreement between the theoretically predicted and observed Doppler shifts of Fe I line cores was found, with somewhat larger discrepancies seen in the case of weak (equivalent width $W < 5$ pm) and strong ($W > 11$ pm) lines.

We also investigated the influence of convection on the formation of spectral lines in the atmospheres of red giant stars located at the lower part and near the tip of the red giant branch (RGB). For the giant located at the RGB tip ($T_{\text{eff}} = 3660$ K, $\log g = 1.0$ [cgs], $[M/H] = 0.0$), we investigated weak fictitious spectral lines of Li I, Na I, Mg I, Mg II, and K I. While the 3D–1D abundance corrections for the neutral species were found to be small, $\approx \pm 0.1$ dex, the corrections for Mg II spanned over the range of $+0.2$ dex to -0.6 dex, with extreme values corresponding to the transitions originating at the highest atomic energy levels investigated (excitation potential of the lower level $\chi = 10$ eV).

For giants located near the lower part of the RGB ($T_{\text{eff}} = 5000$ K, $\log g = 2.5$ [cgs], $[M/H] = 0.0, -1.0, -2.0, -3.0$), we studied the formation of weak fictitious lines of Li I, Na I, Mg I, Mg II, K I, Ca I, and Ca II. At $[M/H] = 0.0$, 3D–1D corrections for neutral species were of the same order as for the giant located at the RGB tip and do not exceed $\approx \pm 0.1$ dex. Ionized species have 3D–1D corrections in the same range. However, the magnitude of 3D–1D corrections for neutral species changes with the metallicity, with the extreme correction in the case of Mg I reaching -0.7 dex at $[M/H] = -3.0$.

We also investigated the influence of convection and non-local thermodynamic equilibrium radiative transfer on the formation of Li I resonance doublet ($\lambda = 670.8$ nm) in the atmospheres of the main sequence (MS), main sequence turn-off point (TO), subgiant branch (SGB), and RGB stars, at two metallicities, $[M/H] = 0.0$ and -2.0 . This investigation was carried out using 3D hydrodynamical CO⁵BOLD and 1D hydrostatic LHD model atmospheres, with 3D NLTE spectral synthesis performed using NLTE3D code and a new model atom of Li I. In general, convection was found

to play a significant role in the formation of Li I 670.8 nm resonance line, mostly by making the line to appear stronger due to horizontal inhomogeneities of Li I number densities in the outer atmosphere. At the same time, we found that non-equilibrium radiative transfer, due to overionization of Li I, may lead to the formation of Li I lines that are significantly weaker than those that would be forming in LTE. Overall, the 3D NLTE–1D LTE abundance corrections for the resonance Li I line in MS, TO, SGB and RGB stars were found to be -0.06 to $+0.27$ dex.

Literatūra

- Amarsi, A. M., Asplund, M., Collet, R., ir Leenaarts, J. 2016, MNRAS, 455, 3735
- Asplund, M., Nordlund, Å., Trampedach, R., Allende Prieto, C., ir Stein, R. F. 2000, A&A, 359, 729
- Barklem, P. S., Belyaev, A. K., ir Asplund, M. 2003, A&A, 409, L1
- Behara, N. T., Bonifacio, P., Ludwig, H.-G., ir kt. 2010, A&A, 513, 72
- Caffau, E., Ludwig, H.-G., Steffen, M., ir kt. 2008, A&A, 488, 1031
- Caffau, E., Ludwig, H.-G., Steffen, M., Freytag, B., ir Bonifacio, P. 2011, SoPh, 268, 255
- Cayrel, R., Steffen, M., Chand, H., ir kt. 2007, A&A, 473, L37
- Collet, R., Asplund, M., ir Trampedach, R. 2007, A&A, 469, 687
- Creevey, O. L., Thévenin, F., Boyajian, T. S., ir kt. 2012, A&A, 545, A17
- Cunto, W., Mendoza, C., Ochsenbein, F., ir Zeipen, C. J. 1993, A&A, 275, L5
- Dobrovolskas, V., Kučinskis, A., Steffen, M., ir kt. 2013, A&A, 559, A102
- Freytag, B., Steffen, M., Ludwig, H.-G., ir kt. 2012, J. Comp. Phys., 231, 919
- González Hernández, J. I., Bonifacio, P., Caffau, E., ir kt. 2009, A&A, 505, 13
- Grevesse, N., ir Sauval, A.J. 1998, Space Sci. Rev., 85, 161
- Gustafsson, B., Edvardsson, B., Eriksson, K., ir kt. 2008, A&A, 486, 951
- Klevas, J., Kučinskis, A., Steffen, M., Caffau, E., ir Ludwig, H.-G. 2016, A&A, 586, A156
- Kučinskis, A., Steffen, M., Ludwig, H.-G., ir kt. 2013, A&A, 549, A14
- Kupka, F., Piskunov, N., Ryabchikova, T. A., Stempels, H. C., ir Weiss, W. W. 1999, A&AS, 138, 119
- Ludwig, H.-G., ir Kučinskis, A. 2012, A&A, 547, A118

- Mashonkina, L., Gehren, T., Shi, J.-R., Korn, A. J., ir Grupp, F. 2011, A&A, 528, A87
- Mihalas, D. 1978, Stellar Atmospheres, Freeman and Company, p. 186
- Nave, G., Johansson, S., Learner, R. C. M., Thorne, A. P., ir Brault, J. W. 1994, ApJS, 94, 221
- Osorio, Y., Barklem, P. S., Lind, K., ir Asplund, M. 2011, A&A, 529, A31
- Pietrinferni, A., Cassisi, S., Salaris, M., ir Castelli, F. 2004, ApJ, 612, 168
- Sbordone, L., Bonifacio, P., Caffau, E., ir kt. 2010, A&A, 522, 26
- Steffen, M., ir Holweger, H. 2002, A&A, 387, 258
- Steffen, M., Ludwig, H.-G., ir Freytag, B. 1995, A&A, 300, 473
- Steffen, M., Prakashavičius, D., Caffau, E., Ludwig, H.-G., Bonifacio, P., ir kt. 2015, A&A, 583, A57
- Vögler, A., Bruls, J. H. M. J., ir Schüssler, M. 2004, A&A, 421, 741

Jonas Klevas

Curriculum Vitae

Date and place of birth: 17 April 1987, Lithuania

E-mail: Jonas.Klevas@ff.vu.lt

Education:

B.S.	in Computational Physics at Vilnius University	2009
M.S.	in Theoretical Physics and Astronomy at Vilnius University	2012
Ph.D.	studies in Physical Sciences, Physics (02 P) at Vilnius University	2012-2016

Professional improvement:

- Spring School of Spectroscopic Data Analysis, Poland, 2013
- NordForsk Summer School, Lithuania, 2012
- 3rd Azarquiel School of Astronomy, Turkey, 2012