

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Vidas Dobrovolskas

KONVEKCIJOS  
IR NEPUSIAUSVIROSIOS SPINDULIUOTĖS PERNAŠOS  
EFEKTAI ŽVAIGŽDŽIŲ ATMOSFEROSE

Daktaro disertacijos santrauka

Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2013

Disertacija rengta 2008–2013 metais Vilniaus universitete.

Mokslinis vadovas:

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

**Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:**

Pirmininkas:

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

Nariai:

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

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

Prof. dr. Paulius Miškinis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Prof. dr. Aloyzas Girgždys (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Oponentai:

Habil. dr. Gražina Tautvaišienė (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Habil. dr. Lyudmila Mashonkina (Rusijos mokslų akademijos astronomijos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2013 m. gruodžio mėn. 13 d. 14:00 val. Vilniaus universiteto Astronomijos observatorijoje.

Adresas: M. K. Čiurlionio 29, LT-03100, Vilnius, Lietuva

Telefonas: (+370-5) 239 8760; Faksas: (+370-5) 239 8767

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2013 m. lapkričio mėn. 12 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto ir Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose.

VILNIUS UNIVERSITY  
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Vidas Dobrovolskas

EFFECTS OF CONVECTION  
AND NON-EQUILIBRIUM RADIATION TRANSFER  
IN STELLAR ATMOSPHERES

Summary of Doctoral Dissertation

Physical sciences, Physics (02 P)

Vilnius, 2013

Doctoral Dissertation was completed during 2008–2013 at Vilnius University.

Scientific supervisor:

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

**Council of the doctoral dissertation defense:**

Chairman:

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

Members:

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

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

Prof. dr. Paulius Miškinis (Vilnius Gediminas Technical university, Physical sciences, Physics – 02 P)

Prof. dr. Aloyzas Girgždys (Vilnius Gediminas Technical university, Physical sciences, Physics – 02 P)

Opponents:

Habil. dr. Gražina Tautvaišienė (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P)

Habil. dr. Lyudmila Mashonkina (Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Physical sciences, Physics – 02 P)

Doctoral dissertation will be defended at the public meeting of the Physical Sciences Council held at Vilnius University Observatory at 2:00 p.m. on 13 December, 2013.

Address: M. K. Čiurlionio 29, LT–03100, Vilnius, Lithuania

Tel.: (+370–5) 239 8760; Fax.: (+370–5) 239 8767

Summary of the doctoral dissertation was mailed on 12 November 2013.

The dissertation is available at the libraries of Vilnius University and the Center for Physical Sciences and Technology.

## Tyrimo motyvacija

Žinios apie žvaigždžių, priklausančių skirtingoms mūsų bei kitų galaktikų populiacijoms, cheminę sudėtį itin svarbios tiriant Visatos cheminę raidą. Žvaigždžių cheminės sudėties tyrimai remiasi spektro linijų interpretavimu ir prielaidomis apie fizines sąlygas žvaigždžių atmosferų modeliuose, naudojamuose stebėjimų duomenų analizėje. Šios prielaidos (artiniai) – jų tarpe ir lygtys, siejančios įvairius termodinaminius (pvz., temperatūra, slėgis, tankis ir pan.) ir hidrodinaminius (pvz., greitis) dydžius ir aprašančios jų kitimą erdvėje ir laike – apsprendžia atmosferos modelio savybes. Taigi, žvaigždžių atmosferų modeliuose naudojamų artinių fizikinis realumas lemia mūsų turimų žinių apie žvaigždžių cheminę sudėtį patikimumą.

Pirmuosiuose žvaigždžių atmosferų modeliuose, skaičiavimų apimties sumažinimui, aprašant realius fizinius reiškinius buvo naudojama daug supaprastinimų: termodinaminiai kintamieji buvo laikomi tik žvaigždės spindulio funkcijomis (iš čia kilęs jų pavadinimas – vienmačiai arba 1D modeliai), neatsižvelgiant į jų kitimą laike bei erdvinius nehomogeniškumus. Tuo tarpu, net trumpai žvilgtelėjus į didelės skyros Saulės fotosferos nuotraukų seką, galima pastebėti nuolat besikeičiančių konvekcinių granulių raštą. Taigi, išorinės žvaigždžių atmosferų dalys nėra nei statiškos, nei homogeniškos dėl jose vykstančios konvekcijos – pagrindinio energijos pernašos mechanizmo išoriniuose mažos masės pagrindinės, submilžinių ir milžinių sekų žvaigždžių sluoksniuose – kuri sukuria erdvinius temperatūros nehomogeniškumus, smūgines bangas ir yra laike kintantis procesas.

Konvekcija yra nelokalus procesas, t.y., konvekcinio srauto fizinės savybės bei greitis priklauso ne tik nuo fizinių sąlygų artimiausioje aplinkoje, bet ir nuo sąlygų gilesniuose bei aukščiau esančiuose atmosferos sluoksniuose. Nepaisant to, vienas iš labiausiai paplitusių konvekcijos aprašymo būdų klasikiniuose 1D atmosferų modeliuose – maišymosi ilgio teorija (Böhm-Vitense 1958) – konvekciją laiko griežtai lokaliu procesu. Nenuostabu, kad jau pirmieji bandymai modeliuoti konvekciją naudojant 3D hidrodinaminius atmosferų modelius (pvz., Nordlund 1982) atskleidė, jog egzistuoja dideli skirtumai tarp temperatūros profilių, prognozuojamų toms pačioms žvaigždėms pasitelkiant 3D hidrodinaminius bei 1D hidrostatinius žvaigždžių atmosferų modelius.

Spektro linijos, besiformuojančios konvektyvioje žvaigždės atmosferoje, bus asimetriškos ir pasislinkusios į mėlynąją spektro dalį dėl didesnio kylančių karštų konvekcinių granulių indėlio į spinduliuotės srautą lyginant su vėsesnėmis grimz-

tančiomis tarpgranulinėmis sritimis. Saulės bei kitų žvaigždžių aukštos spektrinės skyros stebėjimai rodo, kad spektro linijos iš tiesų yra asimetriškos bei pasislinkusios į mėlynąją spektro dalį (Gray 2005, 2012; Gray ir kt. 2008). Klasikiniai 1D atmosferų modeliai negali prognozuoti asimetriškų spektro linijų, tačiau hidrodinaminių 3D atmosferų modelių pagalba apskaičiuotos asimetriškos spektro linijos puikiai dera su linijomis, stebimomis realių žvaigždžių atmosferose. Pavyzdžiui, Ramírez ir kt. (2010) ir Klevas ir kt. (2013), panaudodami 3D hidrodinaminius atmosferų modelius, sėkmingai atkūrė ryškios nemetalingos raudonosios milžinės HD 122563 neutralios (Fe I) ir jonizuotos (Fe II) geležies spektro linijų bisektorius bei jų Doplerio poslinkius.

Vienas iš būdų patikrinti žvaigždžių atmosferų modelių patikimumą – ištirti, kiek tiksliai jie gali atkurti realiai stebimų žvaigždžių regimojo disko patamsėjimą į kraštą (*ang. limb darkening*). Regimojo disko patamsėjimas į kraštą yra visoms žvaigždėms būdinga savybė: stebint nuo žvaigždės disko centro vis labiau nutolusį tašką, stebėtoją pasiekia spinduliuotė iš aukštesnių ir šaltesnių žvaigždės atmosferos sluoksnių ir todėl sumažėja spinduliuotės intensyvumas. Tokiu būdu, žvaigždės regimojo disko patamsėjimas į kraštą yra jautrus temperatūros gradiento žvaigždės atmosferoje rodiklis. Išsamiausi regimojo disko patamsėjimo į kraštą dėsnio stebėjimai yra atlikti Saulei, tačiau šiuolaikiniai žvaigždžių interferometrai leidžia atlikti panašius ir kitų žvaigždžių stebėjimus. Pvz., Asplund ir kt. (2009) parodė, kad 3D hidrodinaminių modelių prognozuojamas Saulės regimojo disko patamsėjimas į kraštą labai gerai dera su stebėjimais. Hayek ir kt. (2012) ištyrė dvi vėlyvo spektrinio tipo pagrindinės sekos žvaigždes ir nustatė, jog lyginant su 1D atmosferų modelių teikiamomis prognozėmis, 3D hidrodinaminių atmosferos modelių prognozuojamas regimojo disko patamsėjimo į kraštą dėsnis daug geriau dera su stebėjimais.

Nemažai pastaruoju metu atliktų darbų rodo, kad cheminių elementų gausų analizės darbuose taikant 3D ir 1D žvaigždžių atmosferų modelius tikėtini dideli skirtumai tarp šių modelių pagalba nustatomų cheminių elementų gausos (Collet ir kt. (2007, 2009); González Hernández ir kt. (2009); Ramírez ir kt. (2009); Behara ir kt. (2010); Kučinskas ir kt. (2013); Dobrovolskas ir kt. (2013); žr. Asplund (2005) ankstesnių darbų apžvalgai). Šie skirtumai didėja, mažėjant žvaigždės metalingumui (sunkesnių už helį cheminių elementų koncentracijai) ir mažiausio metalingumo žvaigždžių atveju ( $[M/H]^1 < -2$ ) gali siekti iki dešimties kartų (t.y.,  $\approx 1$  dex).

Vienas iš detaliausių iki šiol atliktų konvekcijos įtakos spektro linijų formavimuisi

---

<sup>1</sup> $[M/H] = \log[N(M)/N(H)]_{\star} - \log[N(M)/N(H)]_{\odot}$ , kur  $\star$  – žvaigždės parametrai,  $\odot$  – Saulės parametrai.

tyrimų buvo pateiktas Collet ir kt. (2007) darbe, kur parodyta, jog gausos įverčių skirtumas, gaunamas cheminių elementų gausų analizėje taikant 3D ir 1D žvaigždžių atmosferų modelius, esant  $[M/H] = -3$  metalingumui gali siekti iki  $-1$  dex. 3D hidrodinaminiai atmosferų modeliai prognozuoja žemesnę temperatūrą išoriniuose žvaigždės atmosferos sluoksniuose, kur formuojasi atomų bei molekulių spektro linijos, todėl šių elementų ir jų junginių spektro linijos (bei, atitinkamai, iš šių linijų nustatomi gausų įverčiai) turėtų būti ypatingai jautrūs konvekcijos efektams (Asplund 2005; Collet ir kt. 2007; Kučinskas ir kt. 2013; Dobrovolskas ir kt. 2013).

Apibendrinant, galima būtų teigti, jog platesni 3D atmosferų modelių taikymai tiriant žvaigždžių atmosferų cheminę sudėtį būtų itin pageidautini. Tai turėtų būti ypač svarbu analizuojant mažiausio metalingumo (seniausių) žvaigždžių populiacijų – Galaktikos halo ir kamuolinių spiečių – cheminės raidos aspektus. Šiems objektams skirtumai tarp 3D hidrodinaminių ir klasikinių 1D atmosferų modelių prognozuojamų gausos įverčių yra didžiausi, todėl tikėtina, kad 3D hidrodinaminių modelių taikymai tokių tyrimų kontekste galėtų suteikti kokybiškai naujos informacijos ir netgi pakeisti mūsų šiuolaikinę sampratą apie mūsų bei kitų galaktikų cheminę raidą.

Kita vertus, daugelis šiuolaikinių cheminės gausos analizės darbų buvo atlikti remiantis lokaliais termodinaminės pusiausvyros (LTP, *angl. local thermodynamic equilibrium*) artiniu, taikomu sintetinių spektro linijų skaičiavimuose. Nepusiausvirięji efektai spinduliuotės pernašoje gali tapti ypač svarbūs mažėjant metalingumui, dėl mažesnio medžiagos neskaidrumo (pvz., perteklinė jonizacija UV fotonais; žr., pvz., Thévenin & Idiart 1999; Asplund 2005; Mashonkina ir kt. 2011). Dėl mažesnės sunkesnių už helį cheminių elementų koncentracijos mažo metalingumo žvaigždžių atmosferose, sumažėja ir laisvųjų elektronų koncentracija, o tai, savo ruožtu, sumažina elektronų susidūrimo su atomais bei jonais dažnį ir sukelia atomų bei jonų energijos lygmenų užpildos nuokrypius nuo LTP. Kadangi seniausių Galaktikos žvaigždžių populiacijų metalingumas gali būti dešimtis, šimtus ir daugiau kartų mažesnis negu Saulės, tiriant cheminių elementų gausas tokiais atvejais itin pageidautina taikyti nelokalios termodinaminės pusiausvyros (NLTP, *angl. non-local thermodynamic equilibrium*) artinį.

Siekiant įvertinti konvekcijos bei nepusiausvirošios spinduliuotės pernašos efektų svarbą spektro linijų formavimuisi bei cheminių elementų gausos įverčiams, disertacijoje buvo atliktas teorinis konvekcijos įtakos spektro linijų formavimuisi pagrindinės sekos posūkio taško (PSPT) bei raudonųjų milžinių sekos (RMS) žvaigždžių atmosferose, panaudojant šiam tikslui 3D hidrodinaminius bei 1D hidrostatinius žvaigždžių

atmosferų modelius, tyrimas. Taip pat, naudojant dviejų kamuolinių spiečių – 47 Tuc (tipinis Galaktikos centrinio telkinio spiečius) ir NGC 6752 (tipinis Galaktikos halo spiečius) – spektrus, gautus Europos pietinėje observatorijoje, bei taikant 3D hidrodinaminius atmosferų modelius ir NLTP artinį, nustatytos lengvųjų cheminių elementų (ličio, deguonies ir natrio) ir bario gausos minėtų spiečių žvaigždžių atmosferose.

## Mokslinis naujumas

Disertacijoje pateiktų rezultatų naujumą sudaro:

1. Sistemingas teorinis konvekcijos įtakos spektro linijų formavimuisi žvaigždžių, esančių nuo pagrindinės sekos posūkio taško iki raudonųjų milžinių sekos viršūnės, atmosferose tyrimas buvo atliktas pirmą kartą. Mes ištyrėme kol kas didžiausią cheminių elementų bei jų spektro linijų, charakterizuojamų skirtingais sužadavimo potencialais ir bangos ilgiais, imtį esant skirtingiems žvaigždžių metalingumams.
2. Esant mažiausiam metalingumui, horizontalios erdvinės temperatūros fluktuacijos, atsirandančios dėl konvekcijos, daro didžiausią įtaką spektro linijų formavimuisi raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių atmosferose. Tuo tarpu pagrindinės sekos žvaigždžių atmosferose vidutinio 3D bei 1D atmosferų modelių temperatūros profilių skirtumai tampa tokie pat svarbūs (kai kuriais atvejais netgi dominuojantys).
3. Darbe parodyta, jog 3D hidrodinaminių ir klasikinių 1D hidrostatiinių atmosferų modelių prognozuojamų spektro linijų stiprumo skirtumai stipriai priklauso nuo linijos sužadavimo potencialo ir bangos ilgio; be to, esant bet kokiai metalingumo vertei, šių skirtumų dydis skirtingiems elementams gali labai skirtis.
4. Darbe pirmą kartą nustatytos Li, O, Na, ir Ba 3D+NLTE (gautos prie 1D NLTE gausos pridedant 3D–1D gausos pataisą) gausos pagrindinės sekos posūkio taško ir raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių, priklausančių Galaktikos kamuoliniams spiečiams 47 Tuc ir NGC 6752, atmosferose. Tai kol kas didžiausios Galaktikos kamuoliniams spiečiams priklausančių žvaigždžių imtys (110 žvaigždžių 47 Tuc ir 8 žvaigždės NGC 6752), kurioms cheminių elementų gausos nustatytos panaudojant 3D hidrodinaminius žvaigždžių atmosferų modelius.



5. Nustatyta, kad 3D hidrodinaminių ir 1D hidrostatiinių atmosferų modelių prognozuojamų O, Na ir Ba spektro linijų stiprumo skirtumai pagrindinės sekos posūkio taško ir raudonųjų milžinių sekos žvaigždėms, priklausančioms 47 Tuc ir NGC 6752, yra maži ir neviršija  $\sim 0.1$  dex. Šie skirtumai gerokai mažesni nei 1D NLTE–LTE gausos pataisos, kurios, pvz., 47 Tuc pagrindinės sekos posūkio taško žvaigždžių atmosferose gali siketi  $-0.20$  dex ir  $-0.35$  dex, atitinkamai, deguoniui ir natriui.

## Tyrimo tikslas

Ištirti konvekcijos ir nepusiausvriosios spinduliuotės pernašos efektų pobūdį spektro linijų formavimosi procese pagrindinės sekos posūkio taško (PSPT) ir raudonųjų milžinių sekos (RMS) žvaigždžių atmosferose.

## Uždaviniai

1. Taikant 3D hidrodinaminius žvaigždžių atmosferų modelius, ištirti konvekcijos įtaką įvairių cheminių elementų spektro linijų formavimuisi skirtingo metalingumo pagrindinės sekos posūkio taško ir raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių atmosferose.
2. Įvertinti 3D ir NLTP efektų svarbą spektro linijų formavimuisi, nustatyti lengvųjų ir sunkiųjų cheminių elementų gausas Galaktikos kamuolinių spiečių NGC 6752 ir 47 Tuc pagrindinės bei raudonųjų milžinių sekų žvaigždžių atmosferose.

## Ginami teiginiai

1. Konvekcijos įtaka Si I, Ti I, Fe I ir Ni I spektro linijų formavimuisi yra didžiausia, mažiausio metalingumo PSPT ir RMS žvaigždžių atmosferose: 3D–1D gausos pataisos mažiausio sužadavimo potencialo ( $< 2$  eV) Fe I ir Ni I spektro linijoms siekia, atitinkamai,  $-0.7$  dex ir  $-0.6$  dex esant  $[M/H] = -3$  (RMS žvaigždėms) ir  $-1.1$  dex Fe I ir Ti I linijoms  $[M/H] = -2$  atveju (PSPT žvaigždėms).
2. NLTP efektai yra svarbesni nei konvekcijos įtaka deguonies 777 nm tripleto ir natrio 818 ir 819 nm spektro linijų formavimosi procese Galaktikos kamuolinio spiečiaus 47 Tuc pagrindinės sekos posūkio taško žvaigždžių atmosferose.

ferose: vidutinė 1D NLTE–LTE gausos pataisos vertė siekia  $-0.35$  dex natrio 818 ir 819 nm spektro linijoms ir  $-0.20$  dex deguonies 777 nm tripleto linijoms, tuo tarpu vidutinės šių elementų 3D–1D LTE gausos pataisos yra gerokai mažesnės ir siekia, atitinkamai,  $+0.02$  dex and  $+0.05$  dex.

3. Nustatytos lengvųjų cheminių elementų 3D+NLTE gausos (gautos prie 1D NLTE gausos pridedant 3D–1D gausos pataisą) Galaktikos kamuolinio spiečiaus 47 Tuc posūkio taško žvaigždžių atmosferose. Vidutinės gausos vertės yra:  $\langle \log \epsilon(\text{Li}) \rangle = 1.78 \pm 0.18$  (94 žvaigždės),  $\langle [\text{O}/\text{Fe}] \rangle = 0.28 \pm 0.16$  ir  $\langle [\text{Na}/\text{Fe}] \rangle = 0.11 \pm 0.15$  (110 žvaigždžių paskutiniams dviems atvejams), kur skaičiai po  $\pm$  ženklo žymi tirtos žvaigždžių imties gausos verčių dispersiją.
4. Nustatytos ličio, natrio ir bario 3D+NLTE gausos 8 Galaktikos kamuolinio spiečiaus NGC 6752 raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių atmosferose. Vidutinės gausos vertės yra:  $\langle \log \epsilon(\text{Li}) \rangle = 0.74 \pm 0.23$ ,  $\langle [\text{Na}/\text{Fe}] \rangle = 0.03 \pm 0.28$  ir  $\langle [\text{Ba}/\text{Fe}] \rangle = 0.10 \pm 0.06$ .

## Asmeninis indėlis

Autorius atliko 1D LTE, 1D NLTE, ir 3D LTE spektro sintezės skaičiavimus ir apskaičiavo 3D–1D gausos pataisas šiems neutraliems ir jonizuotiems atomams: C I, N I, O I, Si I, Si II, Ti I, Ti II, Fe I, Fe II, Ni I, Ni II, Ba II, ir Eu II; autorius prisidėjo prie šių elementų spektro linijų formavimosi ypatybių, vykstant konvekcijai žvaigždžių atmosferose, analizės (2 skyrius). Autorius atliko ličio, deguonies ir natrio gausos analizę, panaudodamas 110 pagrindinės sekos posūkio taško žvaigždžių, priklausančių Galaktikos kamuoliniam spiečiui 47 Tuc, spektrus, atliko 1D LTE, 1D NLTE ir 3D LTE spektro sintezės skaičiavimus, apskaičiavo 3D–1D gausos pataisas, išnagrinėjo 3D hidrodinaminių ir NLTP efektų įtaką Li, O ir Na spektro linijų formavimuisi šių žvaigždžių atmosferose (3 skyrius). Autorius taip pat atliko ličio, natrio ir bario gausos spektroskopinę analizę 20 raudonųjų milžinių, priklausančių kamuoliniam spiečiui NGC 6752, atmosferose, atliko 1D LTE ir 3D LTE spektro sintezės skaičiavimus, apskaičiavo 3D–1D gausos pataisas, išnagrinėjo 3D hidrodinaminių ir NLTP efektų įtaką Li, Na ir Ba spektro linijų formavimuisi šių žvaigždžių atmosferose (3 skyrius).

## Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, išvados ir literatūros šaltinių sąrašas.

**1 skyriuje** aprašomi darbe naudoti žvaigždžių atmosferų modelių ir spektro sintezės programų paketai. Šiame skyriuje taip pat pateikiamas 3D–1D gausos pataisų, kurios vėliau naudojamos konvekcijos įtakos spektro linijų formavimuisi analizėje, apibrėžimas.

**2 skyriuje** pateikiama konvekcijos įtakos spektro linijų formavimuisi ir gausos įverčiams PSPT bei RMS žvaigždžių atmosferose analizė. Tyrimo dalies, susijusios su RMS žvaigždžių analize, rezultatai paskelbti Dobrovolskas ir kt. (2013) ir Kučinskas ir kt. (2013) darbuose (antrasis ir trečiasis straipsniai publikacijų sąrašė skyriuje "Publikacijos disertacijos tema ISI WoS žurnaluose").

**3 skyriuje** aptariami 3D hidrodinaminių žvaigždžių atmosferų modelių bei 1D NLTP spektro linijų sintezės metodikos taikymo cheminių elementų gausos įverčių nustatymui Galaktikos kamuolinių spiečių 47 Tuc ir NGC 6752 žvaigždžių atmosferose rezultatai. Bario gausos analizės NGC 6752 žvaigždžių atmosferose rezultatai paskelbti Dobrovolskas ir kt. (2012) (ketvirtasis straipsnis publikacijų sąrašė skyriuje "Publikacijos disertacijos tema ISI WoS žurnaluose"). Lengvųjų cheminių elementų gausos tyrimo 47 Tuc PSPT žvaigždėse rezultatai apibendrinami straipsnyje, kuris įteiktas spaudai žurnale "Astronomy & Astrophysics".

## Analizės metodai ir programinė įranga

Žvaigždžių cheminės sudėties įvertinimui būtini žvaigždžių atmosferų modeliai, aprašantys fizines sąlygas, žvaigždžių atmosferose. Šiuolaikiniai žvaigždžių atmosferų modeliai – klasikiniai 1D hidrostatiniai ir gerokai tobulesni 3D hidrodinaminiai – gerokai skiriasi įvairių fizinių procesų modeliavimo būdais. Skirtingos prielaidos, naudojamos abiejų rūšių modeliuose aprašant konvekciją (pagrindinį energijos pernašos būdą išoriniuose mažos masės pagrindinės, submilžinių ir raudonųjų milžinių sekų žvaigždžių atmosferų sluoksniuose), gali lemti nemažus rezultatų skirtumus, modelius taikant tų pačių stebėjimų duomenų analizėje. Konvekcija yra nelokalus ir daugiamatis procesas, kurio metu atsiranda erdviniai termodinaminių parametrų (temperatūros, slėgio ir pan.) nehomogeniškumai, savo ruožtu, darantys įtaką žvaigždės spinduliuotės srautui ir spektro linijų formavimuisi. Dėl šių priežasčių, konvekcijos aprašymas naudojant laisvuosius parametrus, kaip tai daroma klasikiniuose vien-

mačiuose žvaigždžių atmosferų modeliuose, nėra pageidautinas sprendimas. Siekiant geriau suprasti konvekcijos įtaką spektro linijų formavimuisi ir gausos įverčiams, būtina konvekciją modeliuoti išreikštu pavidalu, t.y., sprendžiant hidrodinamikos ir spinduliuotės pernašos lygtis, kuriose esantys kintamieji priklauso tiek nuo erdvinių, tiek nuo laiko koordinačių.

Disertacijoje atliktame darbe konvekcijos įtakos spektro linijų formavimuisi tyrime buvo naudojamas hidrodinaminių žvaigždžių atmosferų modelių programų paketas CO<sup>5</sup>BOLD (Freytag ir kt. 2012). Naudojamuose modeliuose aprašoma tik nedidelė išorinė žvaigždės atmosferos dalis (<1% žvaigždės spindulio), todėl nepaisoma žvaigždės sferiškumo ir naudojama Dekarto koordinačių sistema. Modelio apatinė ir viršutinė dalys laikomos atviromis, t.y., medžiaga gali laisvai patekti į modeliuojamą tūrį ir iš jo išeiti, o kraštinės sąlygos modelio šonuose laikomos periodinėmis, t.y., medžiaga, išėjusi pro vieną šoną, patenka į modeliuojamą tūrį iš priešingos pusės. Medžiagos neskaidrumas spinduliuotės pernašos lygties sprendimo pagreitimui buvo aprašomas naudojant grupavimo metodiką (Nordlund 1982; Ludwig 1992; Ludwig ir kt. 1994).

Žvaigždės atmosferos struktūra (termodinaminių ir hidrodinaminių parametrų rinkinys, pilnai apibūdinantis žvaigždės atmosferą), apskaičiuota tam tikram laiko momentui, vadinama modelio momentine realizacija (*angl. snapshot*). Konkrečios žvaigždės, aprašomos pasirinktais atmosferos parametrais, CO<sup>5</sup>BOLD modelių seką sudaro keli šimtai momentinių realizacijų. Spektro sintezės skaičiavimams mūsų darbe paprastai buvo atrenkama iki 20 CO<sup>5</sup>BOLD modelių momentinių realizacijų. Momentinių realizacijų atranka buvo atliekama taip, kad atrinktos imties vidutinės parametrų vertės (vidutinė temperatūra, ir pan.) būtų kuo artimesnės pilnos 3D modelių sekos vidutinėms vertėms.

Darbe taip pat buvo naudojamas klasikinių vienmačių atmosferos modelių programų paketas LHD (Caffau & Ludwig 2007). Kaip ir CO<sup>5</sup>BOLD modeliuose, LHD aprašoma nedidelė, lyginant su žvaigždės spinduliu, išorinė žvaigždės atmosferos dalis, todėl laikoma, jog žvaigždės atmosfera yra plokščia. Pasirinktos žvaigždės LHD modelis pilnai charakterizuojamas efektine temperatūra, laisvojo kritimo pagreičio logaritmu ir chemine sudėtimi. LHD modeliuose, kaip ir visuose klasikiniuose 1D hidrostatiškuose modeliuose, konvekcija aprašoma parametrizuota forma, naudojant maišymosi ilgio teorijos artinį (Mihalas (1978) formuluotė). Svarbu pažymėti, kad LHD ir CO<sup>5</sup>BOLD skaičiavimams buvo naudojamos tos pačios neskaidrumų lentelės, būsenos lygtis ir cheminė sudėtis, todėl buvo galima atlikti griežtai diferencialinę

spektro linijų formavimosi analizę.

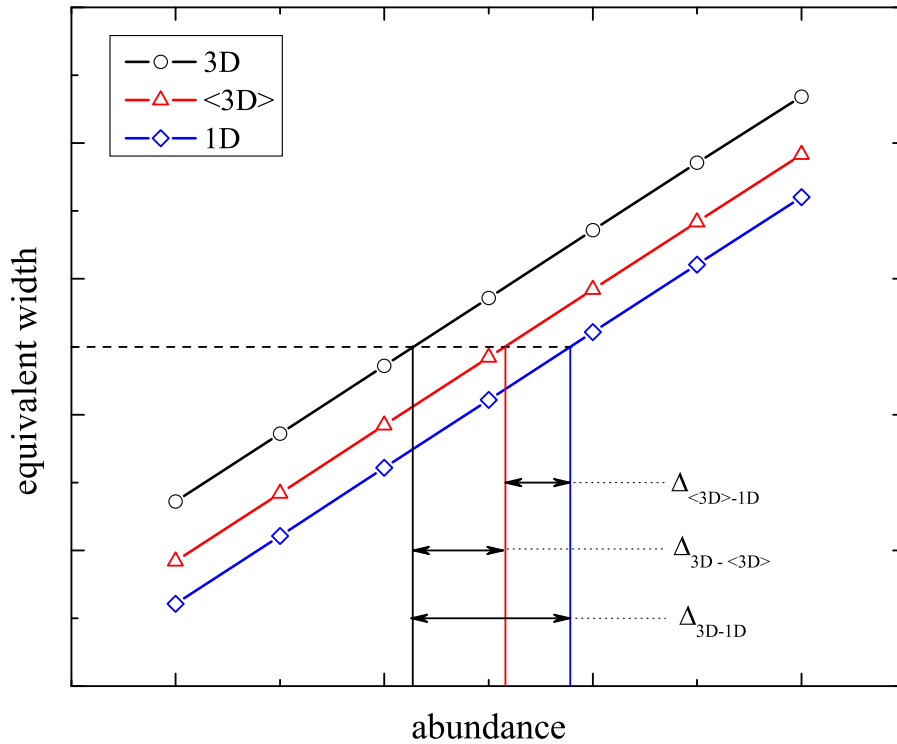
Turint žvaigždės atmosferos modelį, sprendžiama spinduliuotės pernašos lygtis ir apskaičiuojamas sintetinis spektras, atitinkantis nagrinėjamą atmosferos modelį. Šie sintetiniai spektrai gali būti naudojami realių žvaigždžių spektrų analizėje, pvz., siekiant nustatyti žvaigždės cheminę sudėtį. Spektro sintezės skaičiavimuose buvo naudojamas Linfor3D<sup>2</sup> programų paketas, kurio pagalba lokali termodinaminės pusiausvyros artinyje buvo atliekami spektro sintezės skaičiavimai, panaudojant šiam tikslui CO<sup>5</sup>BOLD ir LHD atmosferų modelius. Spinduliuotės pernašos uždavinys buvo sprendžiamas atmosferos dalyje, kurioje vyksta spektro linijų formavimasis, šiame darbe pasirinktos vidinė bei išorinė optinio gylio vertės atitiko  $\log \tau_{\text{Ross}} = 2.0$  ir  $\log \tau_{\text{Ross}} = -6.0$ , o spektro linijų skaičiavimai buvo atliekami panaudojant  $\Delta \log \tau_{\text{Ross}} = 0.08$  žingsnį. Spinduliuotės pernaša buvo vienu metu sprendžiama vertikalia, dviems pasvirusioms ir keturioms azimutinėms kryptims.

Kiekybinė konvekcijos įtakos spektro linijų formavimuisi analizė buvo atliekama panaudojant augimo kreivių metodą. Cheminio elemento 3D–1D gausos pataisa šiuo atveju buvo apibrėžiama kaip gausos skirtumas tarp 3D ir 1D modeliais apskaičiuotų augimo kreivių ties fiksuotu ekvivalentiniu pločiu (1 pav.).

Siekiant suskaičiuoti dominančios spektro linijos profilį, būtina žinoti atomo energijos lygmenų užpildas. LTP artinyje atomų energijos lygmenų užpildos apskaičiuojamos naudojant Bolcmano-Saha (Boltzmann-Saha) lygtį. Kadangi realių žvaigždžių atmosferose fizinės sąlygos sluoksniuose, kuriuose formuojasi spektro linijos, gali stipriai skirtis nuo LTP, norint apskaičiuoti atomų energijos lygmenų užpildą, būtina spręsti statistinio balanso lygtis. Nepusiausvirošios spinduliuotės pernašos efektų spektro linijų formavimuisi įtakos įvertinimui buvo naudojamas spektro sintezės programų paketas MULTI (Carlsson 1986; Korotin ir kt. 1999). Šiame pakete nagrinėjamo atomo lygmenų užpilda apskaičiuojama sprendžiant statistinio balanso lygtis, panaudojant šiam tikslui 1D hidrostatinis žvaigždžių atmosferų modelius, taip pat yra laikoma, kad energijos lygmenų užpilda nekinta laike. Taikant NLTP artinį, cheminių elementų gausos įverčiai buvo nustatomi priderinant sintetinių spektro linijų profilius prie stebimų tiriamuose žvaigždžių spektruose.

---

<sup>2</sup>[http://www.aip.de/~mst/linfor3D\\_main.html](http://www.aip.de/~mst/linfor3D_main.html)

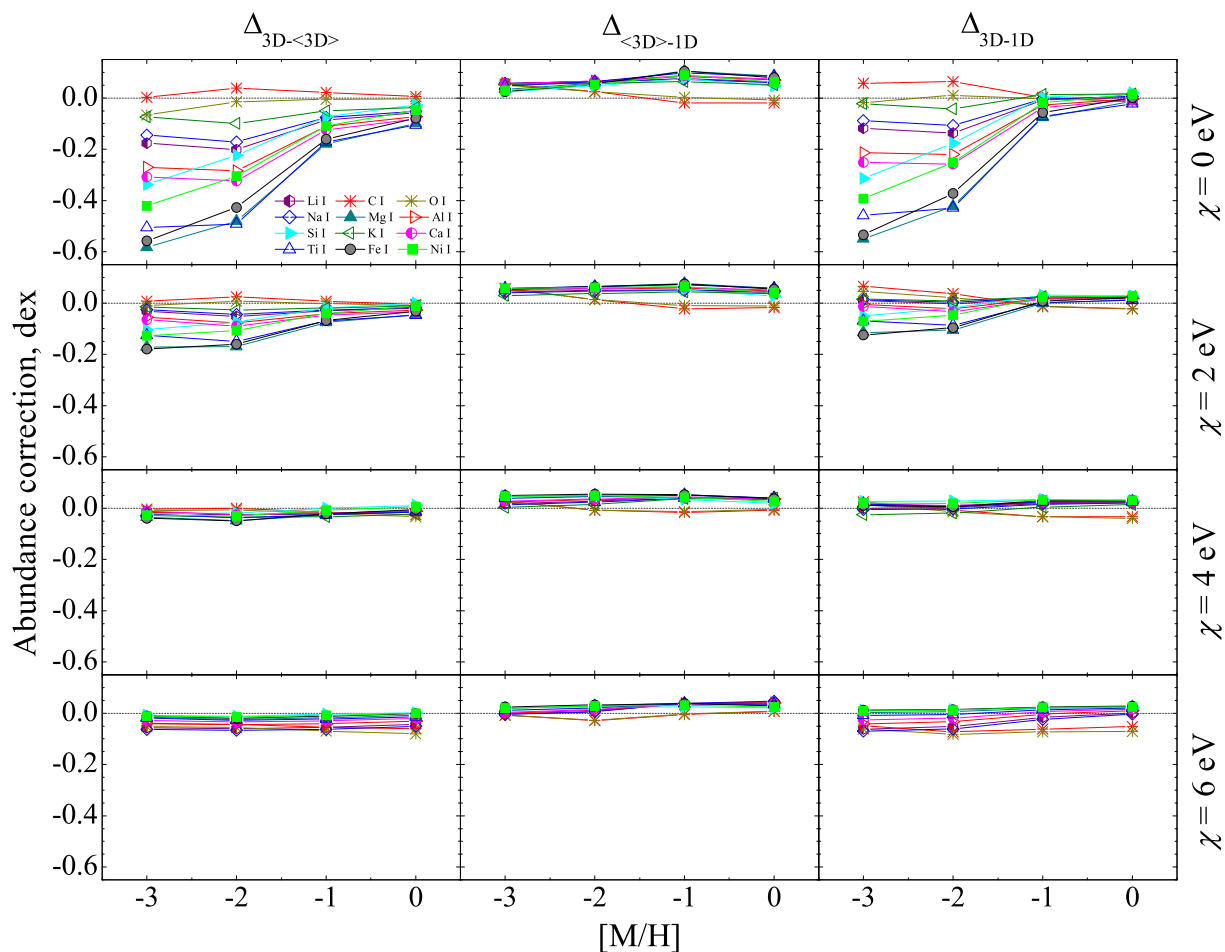


**1 pav.** 3D–1D gausos pataisų apibrėžimas. Ištininės linijos ir simboliai žymi 3D (juodi skrituliukai), vidutinio 3D ( $\langle 3D \rangle$ , raudoni trikampiai) ir 1D (mėlyni rombai) atmosferos modelių augimo kreivių dalis. Gausos pataisa apibrėžiama kaip gausos skirtumas tarp skirtingų atmosferos modelių augimo kreivių ties fiksuotu ekvivalentiniu pločiu.

## Konvekcijos efektai ir spektro linijų formavimasis žvaigždžių atmosferose

Pirmieji tyrimai, kuriuose panaudoti 3D hidrodinaminiai žvaigždžių atmosferų modeliai konvekcijos įtakos spektro linijų formavimuisi tyrimui, buvo paskelbti Collet ir kt. (2007) darbe. Šiame darbe autoriai nagrinėjo konvekcijos ir spektro linijų formavimosi sąveiką žvaigždžių, esančių žemutinėje raudonųjų milžinių sekos dalyje, atmosferose. Nors autoriai parodė, kad konvekcija daro didelę įtaką spektro linijų formavimuisi, darbai šia kryptimi kol kas praktiškai nebuvo tęsiami.

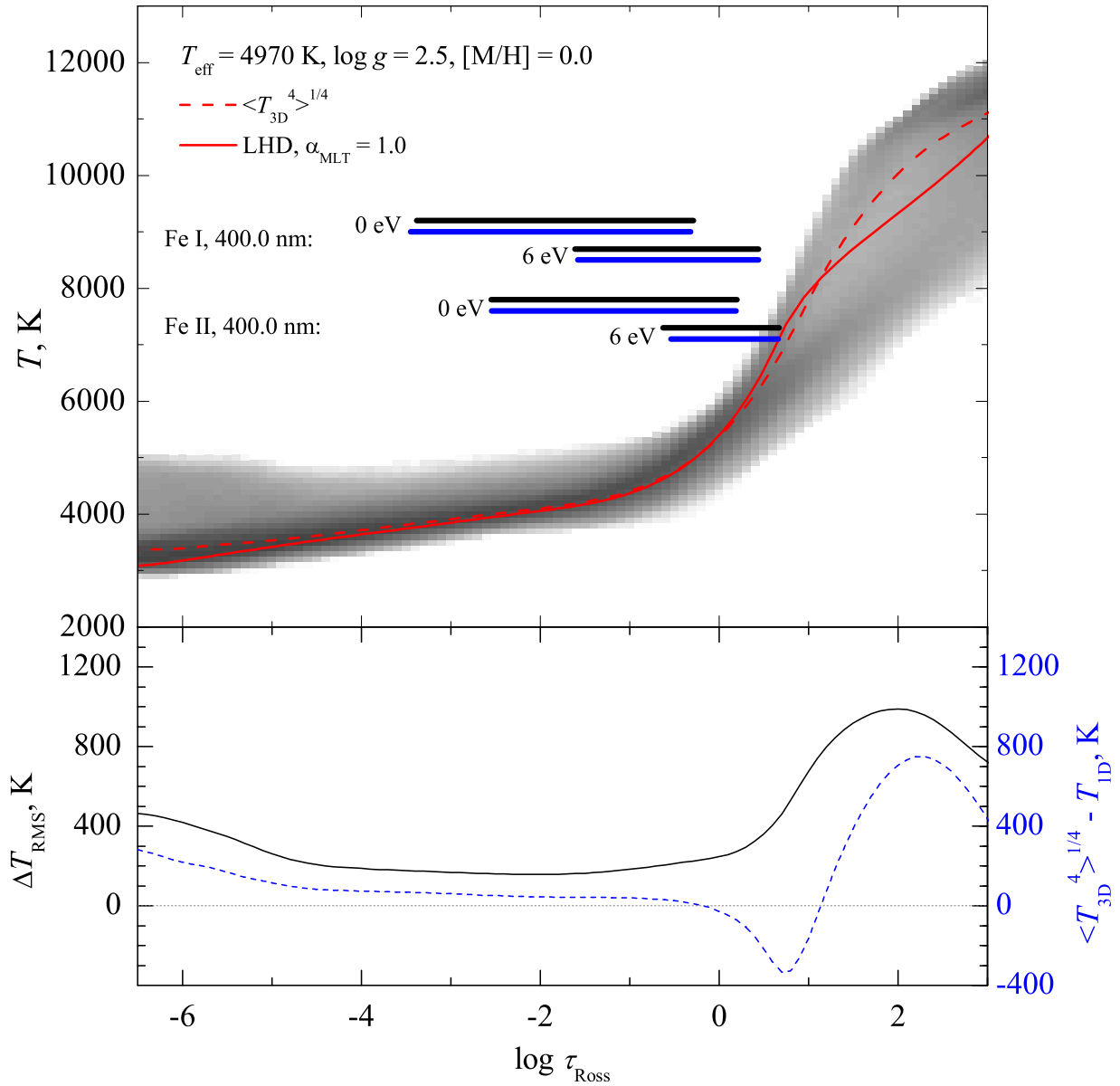
Siekiant bent iš dalies užpildyti šią spragą, mūsų darbe buvo atlikta konvekcijos įtakos spektro linijų formavimuisi analizė pagrindinės sekos posūkio taško (PSPT) ir raudonųjų milžinių sekos (RMS) žvaigždžių atmosferose. Tyrimas atliktas nagrinėjant gausos pataisų, t.y., gausos įverčių, gautų panaudojant tą pačią spektro liniją ir taikant 3D hidrodinaminis bei klasikinius 1D hidrostatinius žvaigždžių atmosferų modelius, skirtumus. Tyrimui buvo pasirinktos astrofizikiniu požiūriu svarbių cheminių elementų (Li I, C I, O I, Na I, Mg I, Mg II, Al I, Al II, Si I, Si II, K I, Ca I, Ca II,



**2 pav.** Neutralių atomų spektro linijų 3D–1D gausos pataisų priklausomybė nuo metalingumo RMS žvaigždžių atmosferose ( $\lambda = 400$  nm):  $\Delta_{3D-(3D)}$  (kairiajame stulpelyje),  $\Delta_{(3D)-1D}$  (centriniame stulpelyje) ir  $\Delta_{3D-1D}$  (dešiniajame stulpelyje). Pataisos kiekvienoje eilutėje suskaičiuotos skirtingoms sužadinimo potencialo vertėms, kurios nurodytos dešinėje kiekvienos eilutės pusėje.

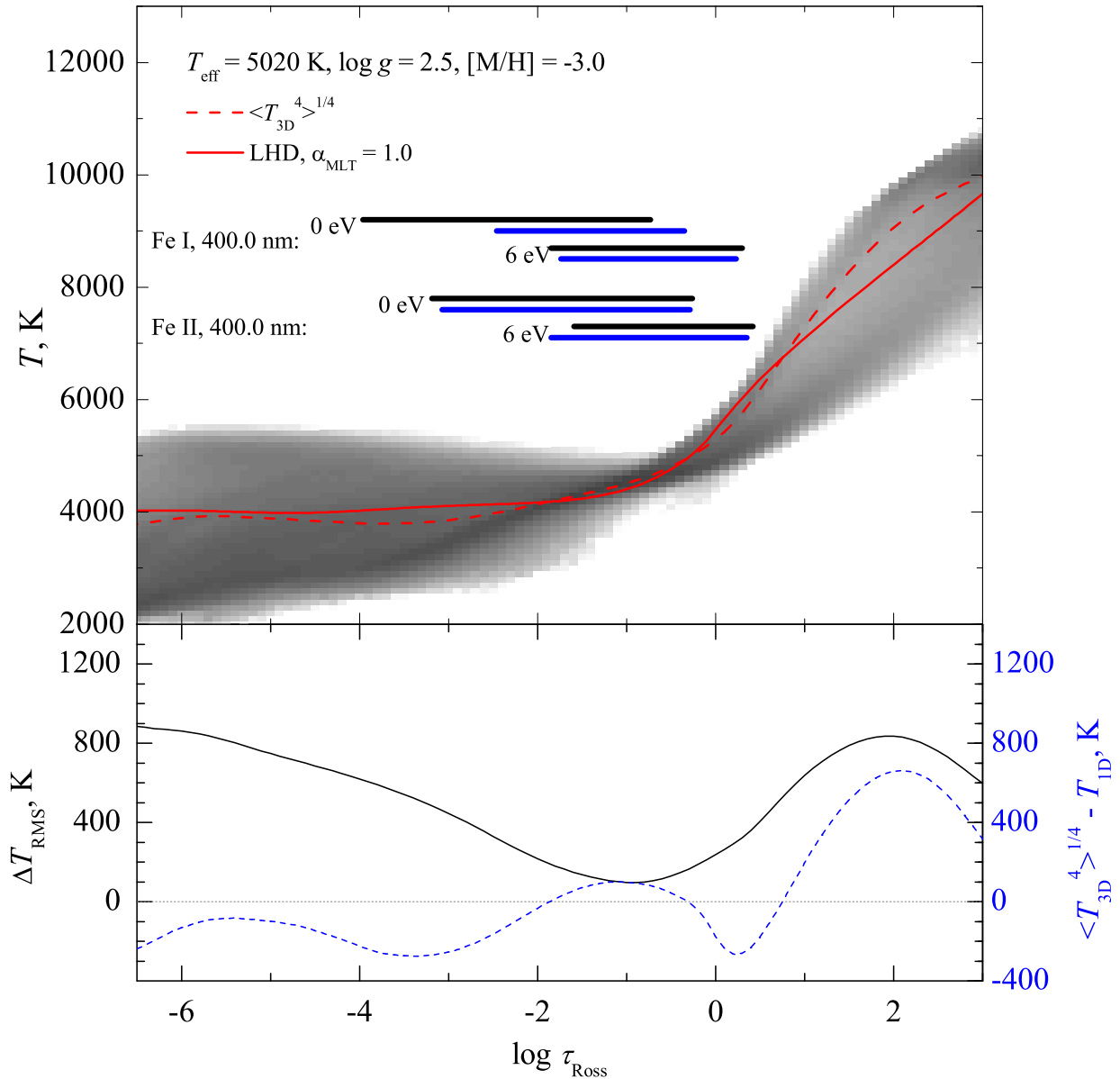
Ti I, Ti II, Fe I, Fe II, Ni I, Ni II, Ba II ir Eu II) spektro linijos, o visi gauti rezultatai apžvelgiami Kučinskas ir kt. (2013) ir Dobrovolskas ir kt. (2013) publikacijose. Šiame skyriuje pateikiame tik trumpą gautų pagrindinių rezultatų santrauką.

2 pav. parodyta neutralių atomų spektro linijų ( $\lambda = 400$  nm), charakterizuojamų skirtingais sužadinimo potencialais, 3D–1D gausos pataisų priklausomybė nuo metalingumo RMS žvaigždžių atmosferose. Matoma aiški pataisų dydžio sąsaja su metalingumu, charakterizuojančiu tiriamos žvaigždės atmosferą: ties  $[M/H] = 0.0$  ir  $[M/H] = -1$  pataisos yra nežymios, tačiau, mažėjant metalingumui, greitai didėja ir, pvz., Fe I linijų atveju, pasiekia  $-0.6$  dex esant  $[M/H] = -3.0$ . Didžiausios pataisos gaunamos mažiausio sužadinimo potencialo,  $\chi = 0 - 2$  eV, linijoms ir tampa vis mažesnės didėjant sužadinimo potencialui. Be to, didžiausiems nagrinėtiems suža-



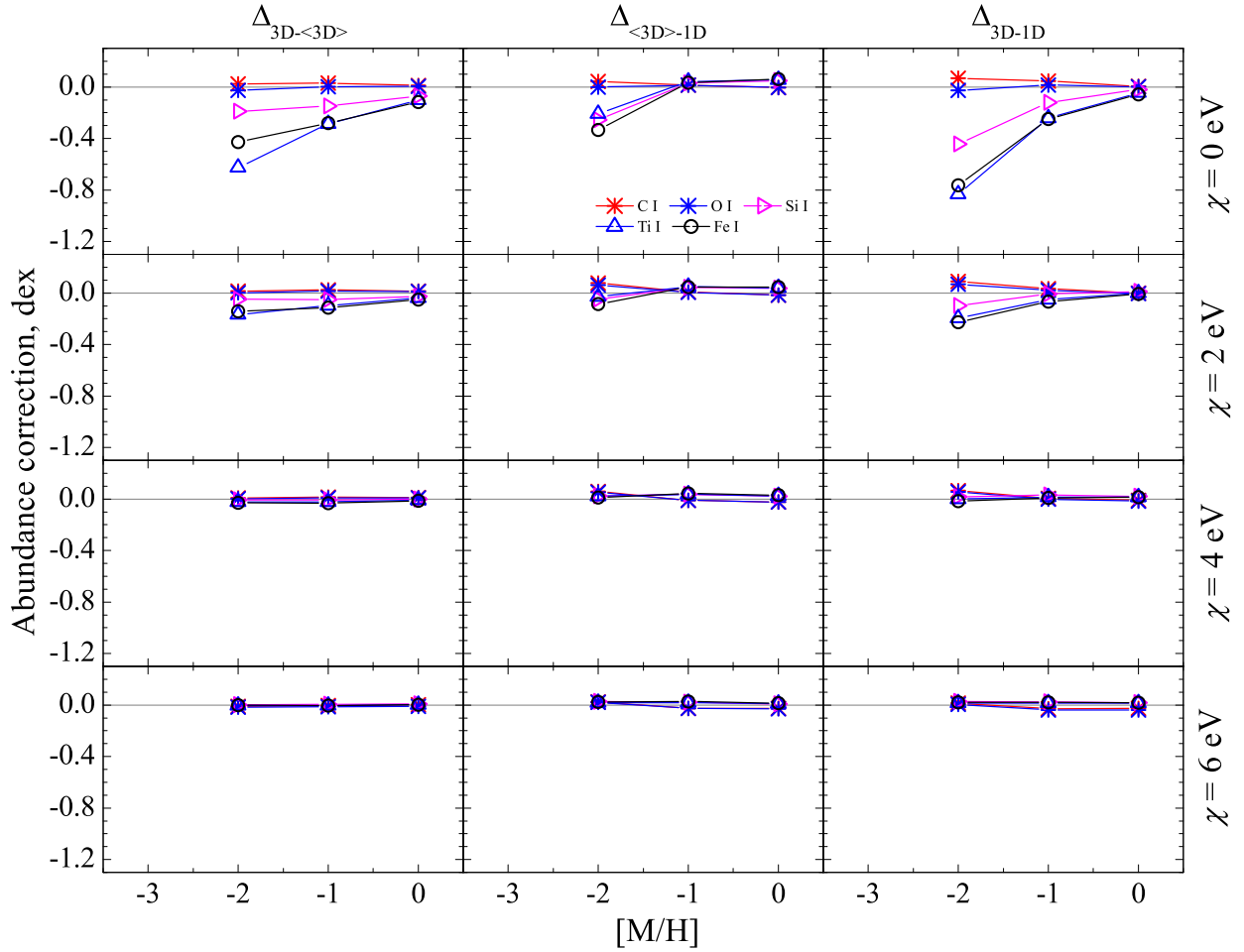
**3 pav. Viršuje:** temperatūros priklausomybė nuo Rosseland'o optinio gylio,  $\tau_{\text{Ross}}$ , raudonosios milžinės modelyje, kurio parametrai  $T_{\text{eff}}/\log g/[M/H] = 4970/2.5/0.0$ . Pilkos spalvos tankio grafikas rodo temperatūros pasiskirstymą 3D modelyje, raudona punktyrinė linija – vidutinė 3D modelio temperatūra, ištisinė raudona linija – 1D modelio temperatūra. Horizontalios atkarpos žymi Fe I ir Fe II spektro linijų ( $\lambda = 400 \text{ nm}$ ,  $\chi = 0$  ir  $6 \text{ eV}$ ) formavimosi sritis 3D (juoda spalva) ir 1D (mėlyna spalva) atmosferos modeliuose (atkarpos nurodo sritis, kuriose spektro linijos ekvivalentinis plotis padidėja nuo 5% iki 95% galutinės vertės). **Apačioje:** 3D modelio temperatūros horizontalių fluktuacijų,  $\Delta T_{\text{RMS}}$ , kitimo eiga (ištisinė linija) ir temperatūros skirtumo tarp suvidurkinto  $\langle 3D \rangle$  ir 1D modelių (punktyrinė linija) priklausomybė nuo Rosseland'o optinio gylio.





**4 pav.** Tas pat kaip ir 3 pav., bet raudonajai milžinei, kurios  $T_{\text{eff}}/\log g/[M/H] = 5020/2.5/-3.0$ .

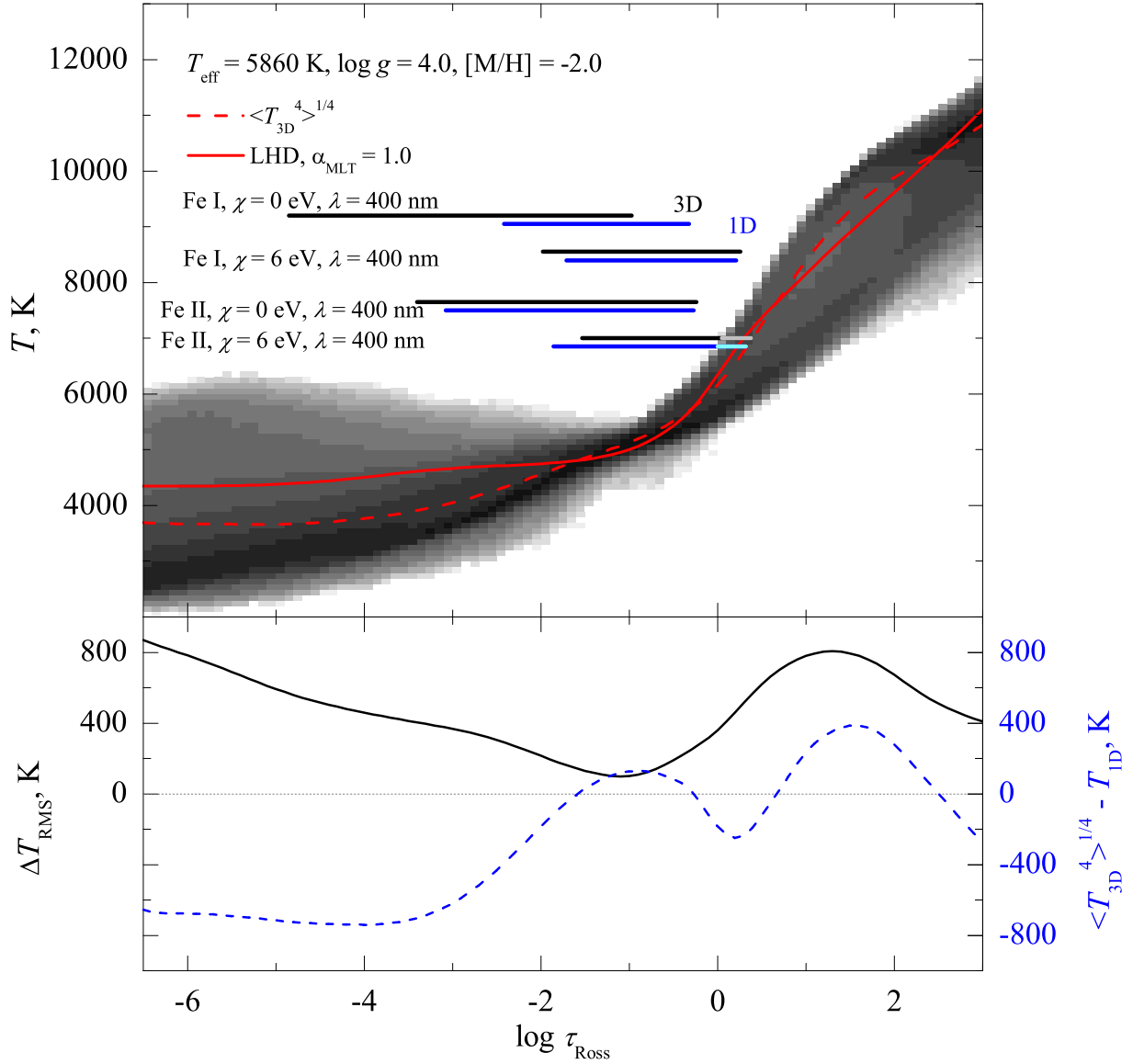
dinimo potencialams,  $\chi = 4 - 6$  eV, 3D–1D pataisų vertė beveik nepriklauso nuo metalingumo (2 pav.). Šiuos rezultatus lemia fizinių sąlygų skirtumai spektro linijų formavimosi regionuose. Esant bet kokiam metalingumui, mažiausio sužadavimo potencialo spektro linijos formuojasi labiausiai į išorę nutolusiose žvaigždės atmosferos dalyse, o didėjant sužadavimo potencialui, linijos formuojasi vis giliau atmosferoje (3–4 pav.). Esant Saulės metalingumui, temperatūros skirtumai tarp  $\langle 3D \rangle$  ir 1D modelių yra maži ir nedaug keičiasi priklausomai nuo gylio atmosferoje. Temperatūros fluktuacijos, apibrėžiamos kaip  $\Delta T_{\text{RMS}} = \sqrt{\langle (T - T_0)^2 \rangle_{x,y,t}}$  (laužtiniai skliausteliai žymi vidurkinimą laike ir horizontalia kryptimi ties to paties optinio gylio paviršiais, o



**5 pav.** Neutralių atomų spektro linijų 3D–1D gausos pataisų priklausomybė nuo metalingumo PSPT žvaigždžių atmosferose ( $\lambda = 400$  nm):  $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle}$  (kairiajame stulpelyje),  $\Delta_{\langle 3D \rangle-1D}$  (centriniame stulpelyje) ir  $\Delta_{3D-1D}$  (dešiniajame stulpelyje). Pataisos kiekvienoje eilutėje suskaičiuotos skirtingoms sužadavimo potencialo vertėms, kurios nurodytos dešinėje kiekvienos eilutės pusėje.

$T_0 = \langle T \rangle_{x,y,t}$ , yra nuo gylio atmosferoje priklausanti vidutinė temperatūra), Saulės metalingumo modelyje yra nedidelės, palyginus su  $[M/H] = -3$  modelio vertėmis, ir taip pat nedaug keičiasi priklausomai nuo gylio žvaigždės atmosferoje. Todėl, esant Saulės metalingumui, 3D–1D gausos pataisos yra nedidelės ir mažai priklauso nuo sužadavimo potencialo. Kita vertus, esant mažesniai metalingumui, temperatūros skirtumai tarp  $\langle 3D \rangle$  ir 1D modelių išorinėje atmosferos dalyje yra didesni (4 pav.). Temperatūros fliuktuacijos taip pat didesnės atmosferos išorėje ir didėja mažėjant metalingumui. Tai nulemia, kad esant  $[M/H] < -1$ , daugumos cheminių elementų gausos pataisos yra didžiausios mažiausio sužadavimo potencialo spektro linijoms, besiformuojančioms išorinėje žvaigždės atmosferos dalyje.

5 pav. parodyta neutralių atomų spektro linijų ( $\lambda = 400$  nm), charakterizuojamų



**6 pav.** Tas pat kaip ir 3 pav., bet PSPT žvaigždėi, kurios  $T_{\text{eff}}/\log g/ [M/H] = 5860/4.0/-2.0$ .

skirtingais sužadavimo potencialais, 3D–1D gausos pataisų priklausomybė nuo metalingumo PSPT žvaigždžių atmosferose. Kaip ir RMS žvaigždžių atveju, matoma aiški pataisų dydžio sąsaja su metalingumu, charakterizuojančiu tiriamos žvaigždės atmosferą: ties  $[M/H] = 0.0$  ir  $[M/H] = -1$  pataisos yra nedidelės, tačiau mažėjant metalingumui jos greitai didėja. Palyginus su rezultatais, gautais RMS žvaigždžių atveju, mažo metalingumo PSPT žvaigždėms 3D–1D pataisos yra gerokai didesnės, pvz., Fe I linijų atveju, pasiekia  $-1.1$  dex esant  $[M/H] = -2.0$  (5 pav.). Didžiausios pataisos gaunamos mažiausio sužadavimo potencialo,  $\chi = 0 - 2$  eV, linijoms ir mažėja didėjant sužadavimo potencialui. Be to, didžiausiems nagrinėtiems sužadavimo potencialams,  $\chi = 4 - 6$  eV, 3D–1D pataisų vertė beveik nepriklauso nuo metalingumo

(5 pav.).

Skirtumas tarp  $\langle 3D \rangle$  ir 1D atmosferos modelių temperatūros profilių išorinėje PSPT žvaigždžių atmosferų dalyje, t.y., srityse, kur formuojasi mažo sužadavimo potencialo spektro linijos (3 pav.), yra gerokai didesnis, negu temperatūros profilių skirtumai to paties metalingumo RMS žvaigždžių atmosferose. Tai lemia, kad mažo sužadavimo potencialo neutralių atomų spektro linijoms yra gaunamos gerokai didesnės 3D–1D gausos pataisos, lyginant su RMS žvaigždėmis.

## Lengvųjų elementų gausos įverčiai kamuolinių spiečių žvaigždžių atmosferose

Galaktikos kamuoliniai žvaigždžių spiečiai, kartu su halo lauko žvaigždėmis, yra seniausios Galaktikos žvaigždžių populiacijos, todėl jų cheminės sudėties tyrimai itin svarbūs analizuojant įvairius Paukščių Tako cheminės raidos aspektus. Per pastaruosius kelis dešimtmečius atlikti kamuolinių spiečių žvaigždžių cheminės sudėties tyrimai (žr., pvz., Gratton ir kt. 2004; Carretta ir kt. 2010) atskleidė įvairių cheminių elementų gausos koreliacijas/antikoreliacijas spiečių žvaigždėse: Na–O (Kraft 1994; Gratton ir kt. 2001; Carretta ir kt. 2009a), Mg–Al (see, e.g., Carretta ir kt. 2009b) ir Li–Na (Pasquini ir kt. 2005; Bonifacio ir kt. 2007) gausų antikoreliacijas, bei Li–O gausos koreliaciją (Pasquini ir kt. 2005; Shen ir kt. 2010). Svarbu pažymėti, kad skirtingų elementų gausos koreliacijos/antikoreliacijos būdingos tik kamuolinių spiečių žvaigždėms ir nėra stebimos tokio paties metalingumo Galaktikos lauko ar padrikųjų spiečių žvaigždėse. Kaip kol kas vienintelė išimtis paminėtinas masyvus padrikasis žvaigždžių spiečius NGC 6791, kuriame Geisler ir kt. (2012) aptiko galimą natrio-deguonies gausos antikoreliaciją, būdingą kamuoliniams žvaigždžių spiečiams.

Didžioji dalis kamuolinių spiečių žvaigždžių cheminės sudėties tyrimų iki šiol buvo atliekama taikant 1D hidrostatinis žvaigždžių atmosferų modelius. Nepaisant to, ankstesniajame skyriuje apibendrinti rezultatai rodo, kad konvekcija gali daryti nemažą įtaką spektro linijų formavimuisi, ypač mažo metalingumo žvaigždžių atmosferose. Tai gali sąlygoti ženklus gausos įverčių, gautų, taikant 3D hidrodinaminis ir 1D hidrostatinis žvaigždžių atmosferų modelius, skirtumus. Šie skirtumai turėtų būti didžiausi jei gausos įverčiai buvo nustatomi panaudojant mažo sužadavimo potencialo (pvz., rezonansines) spektro linijas. Taigi, svarbu žinoti, kokią naują informaciją gali suteikti 3D hidrodinaminis atmosferų modelių taikymai Galaktikos

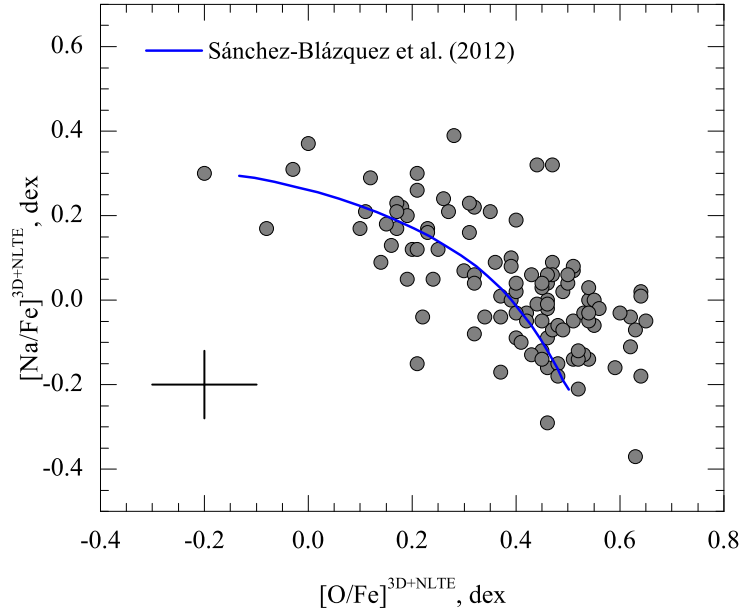
kamuolinių spiečių cheminės sudėties tyrimams. Lygiai taip pat yra svarbu suprasti, kokią įtaką spektro linijų formavimuisi gali turėti efektai, susiję su nepusiausvirošios spinduliuotės pernašos reiškiniais. Tiek 3D hidrodinaminiai, tiek NLTP efektai yra didžiausi esant mažiausiam metalingumui, todėl žinios apie jų svarbą gali suteikti naujų įžvalgų Galaktikos kamuolinių spiečių cheminės sudėties tyrimams.

Šiame darbe 3D hidrodinaminiai atmosferų modeliai buvo panaudoti nustatant cheminių elementų gausas dviejų kamuolinių spiečių – 47 Tuc ir NGC 6752 – žvaigždžių atmosferose. Taip pat, panaudojant 1D atmosferų modelius, buvo įvertinta NLTP efektų įtaką spektro linijų formavimuisi ir į šiuos efektus buvo atsižvelgta nustatinėjant cheminių elementų gausą. Tai atlikdami, mes siekėme geriau suprasti santykinę 3D ir NLTP efektų svarbą cheminių elementų spektro linijų formavimosi procesams ir, panaudojant šias žinias, įvertinti cheminių elementų 3D+NLTP gausas šių kamuolinių spiečių žvaigždžių atmosferose (3D+NLTE cheminių elementų gausos buvo nustatytos prie 1D NLTE gausos pridėdant 3D–1D LTE gausos pataisą). Išsamiau gauti rezultatai aptariami Dobrovolskas ir kt. (2012) ir Dobrovolskas ir kt. (2013), žemiau pateikiama trumpa jų santrauka.

Darbe buvo naudojami archyviniai 47 Tuc kamuolinio žvaigždžių spiečiaus spektroskopiniai stebėjimai, gauti 2008 metų rugpjūčio-rugsėjo mėnesiais (PI: Z.-X. Shen). Atskirų spiečiaus žvaigždžių spektrai užregistruoti GIRAFFE/VLT spektrografu (Europos pietinė observatorija) trijuose bangos ilgių intervaluose: 647.0 – 679.0 nm, 746.8 – 788.9 nm, ir 807.3 – 863.2 nm, spektrų skyra siekė  $R = \lambda/\Delta\lambda = 16\,000 - 18\,000$ . Analizei naudojamą imtį sudarė 110 PSPT žvaigždžių spektrų, kurių signalo-triukšmo santykis  $S/N \approx 80$  ties 777 nm. NGC 6752 raudonųjų milžinių cheminės sudėties tyrimams buvo naudojami didelės skyros ( $R = 60\,000$ ) ir aukštos kokybės ( $S/N \approx 130$  ties 600 nm) archyviniai spektrai, gauti UVES/VLT spektrografu (Europos pietinė observatorija).

3D+NLTE ličio, deguonies ir natrio gausos kamuolinio spiečiaus 47 Tuc PSPT žvaigždžių atmosferose įverčiai pateikiami 7 pav. Gauti gausų įverčiai gerai dera su D’Orazi ir kt. (2010) rezultatais bei patvirtina pastarajame darbe nustatytą Na-O gausų antikoreliaciją. Taip pat verta pažymėti, kad gauti rezultatai gerai dera su Sánchez-Blázquez ir kt. (2012) 47 Tuc spiečiaus cheminės evoliucijos modelio prognozėmis (7 pav.).

Tyrimo metu buvo nustatyta, kad konvekcija daro labai nedidelę įtaką deguonies ir natrio spektro linijų formavimuisi 47 Tuc PSPT žvaigždžių atmosferose. 3D–1D gausos pataisos yra nedidelės ir siekia  $-0.04 \dots + 0.04$  dex natriui bei

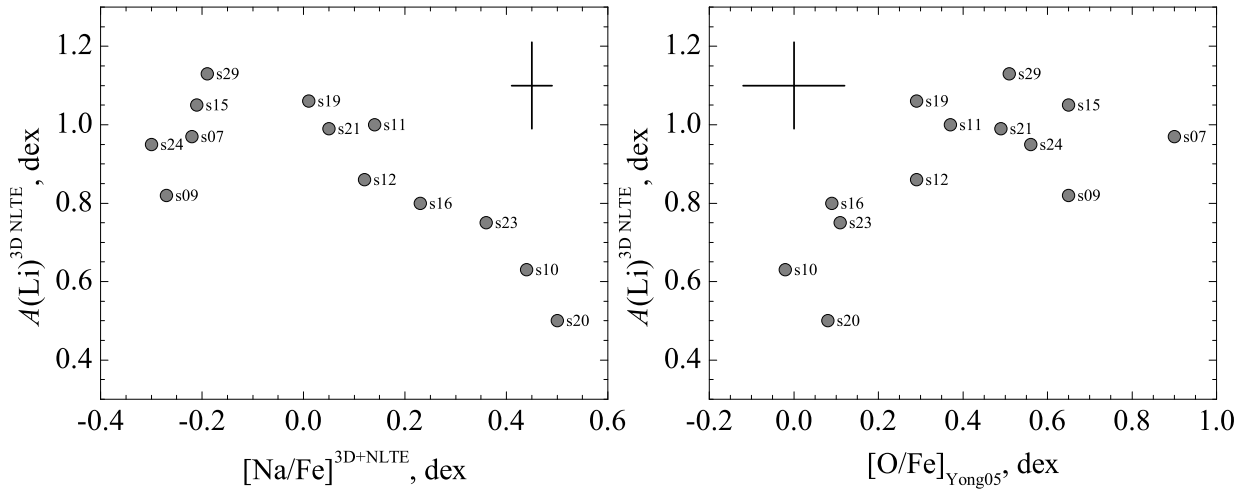


**7 pav.** Natrio-geležies ir deguonies-geležies gausų santykiai 47 Tuc kamuolinio spiečiaus PSPT žvaigždžių atmosferose (3D+NLTE deguonies ir natrio gausų įverčiai gauti prie 1D NLTE gausų pridendant 3D–1D LTE gausos pataisais). Tipinės gausų matavimo paklaidos parodytos kairėje apatinėje paveikslo dalyje. Mėlyna ištisinė linija – 47 Tuc spiečiaus cheminės evoliucijos modelis iš Sánchez-Blázquez ir kt. (2012).

+0.01 ... + 0.09 dex deguoniui. Kita vertus, NLTP efektai yra labai žymūs: natriui vidutinė NLTP gausos pataisa siekia  $-0.35$  dex, tuo tarpu deguoniui jos vertė yra  $-0.20$  dex.

Nustatytas vidutinis 3D NLTP ličio gausos įvertis  $\langle \log \epsilon(\text{Li}) \rangle = 1.84 \pm 0.25$  gerai dera su Bonifacio ir kt. (2007) rezultatais ir yra truputį mažesnis už D’Orazi ir kt. (2010) tai pačiai žvaigždžių imčiai gautą vidutinę vertę,  $\langle \log \epsilon(\text{Li}) \rangle = 2.02 \pm 0.21$ , kuri buvo nustatyta panaudojant 1D hidrostatinis žvaigždžių atmosferų modelius ir neatsižvelgiant į NLTP efektus (vertės, esančios už  $\pm$  ženklo, yra gausos vertės visoje tirtoje žvaigždžių imtyje standartinis nuokrypis).

Gauti ličio 1D LTE ir natrio 3D+NLTE gausos įverčiai kamuolinio spiečiaus NGC 6752 žvaigždžių atmosferose pateikiami 8 pav. Šiame tyrime naudotuose raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių spektruose esanti vienintelė deguonies linija ties 630 nm buvo stipriai paveikta telūrinių linijų ir nebuvo tinkama patikimam deguonies gausos įvertinimui, todėl 8 pav. pateikti deguonies gausos įverčiai yra paimti iš Yong ir kt. (2005) darbo. Įdomu, jog gauti rezultatai rodo ličio-natrio gausos antikoreliacijos bei ličio-deguonies gausos koreliacijos požymius, tačiau dėl nedidelės žvaigždžių imties, šių sąsajų statistinis patikimumas nėra didelis.



**8 pav.** Ličio ir natrio-geležies gausos santykis (**kairėje**) bei ličio ir deguonies-geležies gausos santykis (**dešinėje**) NGC 6752 kamuolinio spiečiaus raudonųjų milžinių atmosferose. Ličio ir natrio gausos įverčiai buvo nustatyti šiame darbe, deguonies gausos paimtos iš Yong ir kt. (2005) darbo. Tipinės gausų matavimo paklaidos parodytos viršutinėje dešinėje/kairėje paveikslėlyje.

## Pagrindiniai disertacijoje gauti rezultatai

- Nustatyta, kad konvekcija didžiausią įtaką daro neutralių atomų mažo sužadimo potencialo ( $< 2$  eV) spektro linijų formavimuisi mažiausio tyrinėto metalingumo ( $[M/H] = -3$ ) pagrindinės sekos posūkio taško ir raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių atmosferose; 3D–1D gausos pataisa neutralių atomų linijoms siekia  $-0.6$  dex RMS žvaigždžių atveju ir  $-1.1$  dex PSPT žvaigždžių atveju.
- Raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių atmosferose dideles gausos pataisų vertes lemia erdviniai temperatūros nehomogeniškumai, atsirandantys dėl konvekcinio medžiagos judėjimo žvaigždės atmosferoje. Skirtumai tarp vidutinio 3D hidrodinaminio bei 1D hidrostatinio atmosferos modelių temperatūros profilių taip pat svarbūs, tačiau jų įnašas į 3D–1D gausos pataisų dydį yra mažesnis. PSPT žvaigždžių atveju yra priešingai – temperatūros profilių skirtumai tarp 3D hidrodinaminio ir 1D hidrostatinio atmosferos modelių turi didžiausią įtaką 3D–1D gausos pataisų dydžiui, ypač esant mažam metalingumui ( $[M/H] \leq -2$ ).
- Konvekcijos įtaka deguonies ir natrio spektro linijų formavimuisi 47 Tuc kamuolinio spiečiaus posūkio taško žvaigždžių atmosferose yra žymiai mažesnė už nelokalios termodinaminės pusiausvyros efektų įtaką. 1D NLTP–LTP gausos pataisa siekia  $-0.35$  dex natriui ir  $-0.20$  dex deguoniui, tuo tarpu 3D–1D gausos pataisos yra, atitinkamai,  $+0.02$  dex natriui ir  $+0.05$  dex deguoniui.

- Disertacijoje nustatyti ličio, deguonies ir natrio gausos įverčiai 110 PSPT žvaigždžių, priklausančių kamuoliniam spiečiui 47 Tuc, atmosferose, atsižvelgiant į konvekcijos ir NLTP efektų įtaką spektro linijų formavimuisi. Gautų verčių intervalai yra:  $\langle \log \epsilon(\text{Li}) \rangle = 1.78 \pm 0.18$ ,  $\langle [\text{O}/\text{Fe}] \rangle = +0.28 \pm 0.16$  ir  $\langle [\text{Na}/\text{Fe}] \rangle = +0.11 \pm 0.15$  (vertės, esančios už  $\pm$  ženklo, yra gausos vertės visoje tirtoje žvaigždžių imtyje standartinis nuokrypis).
- Disertacijoje nustatyti ličio, natrio ir bario gausos įverčiai 8 RMS žvaigždžių, priklausančių kamuoliniam spiečiui NGC 6752, atmosferose, atsižvelgiant į konvekcijos ir NLTP efektų įtaką spektro linijų formavimuisi. Gautų verčių intervalai yra:  $\langle \log \epsilon(\text{Li}) \rangle = 0.74 \pm 0.23$ ,  $\langle [\text{Na}/\text{Fe}] \rangle = +0.03 \pm 0.28$  ir  $\langle [\text{Ba}/\text{Fe}] \rangle = +0.10 \pm 0.06$  (vertės, esančios už  $\pm$  ženklo, yra gausos vertės visoje tirtoje žvaigždžių imtyje standartinis nuokrypis).

## Publikacijos disertacijos tema ISI WoS žurnaluose

1. **Dobrovolskas, V.**, Kučinskas, A., Bonifacio, P., Korotin, S. A., Sbordone, L., Caffau, E., Prakashavičius, D., Steffen, M., Ludwig, H.-G., Royer, F. 2013, *Abundances of lithium, oxygen, and sodium in the turn-off stars of Galactic globular cluster 47 Tuc* // Astronomy and Astrophysics, submitted, arXiv:1311.1072.
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, spaudoje, DOI:10.1051/0004-6361/201321036.
3. Kučinskas, A., Steffen, M., Ludwig, H.-G., **Dobrovolskas, V.**, Ivanauskas, A., Klevas, J., Prakashavičius, 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.
4. **Dobrovolskas, V.**, Kučinskas, A., Andrievsky, S. M., Korotin, S. A., Mishenina, T. V., Bonifacio, P., Ludwig, H.-G., Caffau, E. 2012, *Barium abundance in red giants of NGC 6752. Non-local thermodynamic equilibrium and three-dimensional effects* // Astronomy and Astrophysics, 540, A128.
5. Mishenina, T. V., Kučinskas, A., Andrievsky, S. M., Korotin, S. A., **Dobrovols-**



skas, V., Ivanauskas, A., Caffau, E., Ludwig, H.-G., Steffen, M., Sperauskas, J., Klochkova, V. G., Panchuk, V. E. 2009, *NLTE abundances of sodium, magnesium and barium in the globular clusters M10 and M71* // *Baltic Astronomy*, 18, 193–203.

### Kitos publikacijos ISI WoS žurnaluose

1. Kučinskas, A., **Dobrovolskas, V.**, Lazauskaitė, R., Tanabé, T. 2009, *Properties of red giant branches of star clusters in the Magellanic Clouds and their relation with cluster metallicity. II. Mean photometric colors of cluster RGBs* // *Baltic Astronomy*, 18, 225–232.
2. Kučinskas, A., **Dobrovolskas, V.**, Černiauskas, A., Tanabé, T. 2008, *Properties of red giant branches of star clusters in the Magellanic Clouds and their relation with cluster metallicity* // *Baltic Astronomy*, 17, 363–372.
3. Kučinskas, A., **Dobrovolskas, V.**, Lazauskaitė, R., Lindegren, L., Tanabé, T. 2008, *Magnitude and color transformations between Sirius and 2MASS photometric systems* // *Baltic Astronomy*, 17, 283–292.

### Pranešimai konferencijose disertacijos tema

1. **Dobrovolskas, V.**, Kučinskas, A., Bonifacio, P., Korotin, S. A., Sbordone, L., Caffau, E., Prakupavičius, D. 2013. *Abundances of lithium, oxygen and sodium in the turn-off stars of Galactic globular cluster 47 Tuc* // "40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija", Programa ir pranešimų tezės, Vilniaus universitetas, 244 p. Vilnius, 2013 birželio 10–12 d. (stendinis pranešimas).
2. Černiauskas, A., Kučinskas, A., Bonifacio, P., Andrievsky, S., Korotin, S., **Dobrovolskas, V.** 2013. *Chemical evolution of light elements in the Galactic globular cluster 47 Tuc* // "40-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija", Programa ir pranešimų tezės, Vilniaus universitetas, 226 p. Vilnius, 2013 birželio 10–12 d. (stendinis pranešimas).
3. **Dobrovolskas, V.**, Kučinskas, A., Ludwig, H. G., Caffau, E., Klevas, J., Prakupavičius, D. 2010. *Chemical abundances in metal-poor giants: limitations imposed by the use of classical 1D stellar atmosphere models* // "11th Symposium on Nuclei in the Cosmos", Proc. of the 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos, published online at <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=100>, id.288. Heidelbergas (Vokietija), 2010 liepos 19–23 d.

(stendinis pranešimas).

4. Kučinskas, A., **Dobrovolskas, V.**, Černiauskas, A., Lazauskaitė, R., Tanabé, T. 2009. *Metallicities of intermediate-age and old star clusters in the Large Magellanic Cloud* // "Star clusters: basic galactic building blocks throughout time and space", Proc. of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 266, 446–446, (eds. R. de Grijs and J. Lepine). Rio de Žaneiras (Brazilija), 2009 rugpjūčio 10–14 d. (stendinis pranešimas).
5. Kučinskas, A., **Dobrovolskas, V.**, Ivanauskas, A., Ludwig, H.-G., Caffau, E., Blaževičius, K., Klevas, J., Prakapavičius, D. 2009. *Can we trust elemental abundances derived in late-type giants with the classical 1D stellar atmosphere models?* // "Chemical Abundances in the Universe: Connecting First Stars to Planets", Proc. of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 265, 209–210, (red. K. Cunha, M. Spite ir B. Barbuy). Rio de Žaneiras (Brazilija), 2009 rugpjūčio 10–14 d. (stendinis pranešimas).

## Summary

Stellar chemical composition can be deduced from the observed stellar spectra, with the help of theoretical stellar model atmospheres. Model atmospheres describe physical conditions in the stellar atmosphere, thus our knowledge about stellar abundances relies firmly on the accuracy and realism of the physical ingredients that are put into such models. Unfortunately, current commonly used model atmospheres make many simplifications to the real physical picture. For example, it is normally assumed that stellar atmospheres are one-dimensional (either plane-parallel or spherical) and hydrostatic. On the other hand, phenomena related with non-local thermodynamic equilibrium (NLTE) spectral line formation are equally important in real stellar atmospheres and therefore should be properly taken into account when studying abundances of chemical elements. Unfortunately, this is not always the case and thus simplifications are made in this context as well.

In this thesis we investigate the role of convection and non-local thermodynamic equilibrium in the formation of spectral lines taking place in stellar atmospheres. The influence of convection is assessed by analyzing differences in the elemental abundances obtained by using 3D hydrodynamical and classical 1D hydrostatic stellar model atmospheres, for a number of astrophysically important chemical elements and different types of stars. This is done by focusing both on the theoretical aspects of spectral line formation with the 3D hydrodynamical model atmospheres, and by evaluating the size of these effects in the atmospheres of real stars that belong to Galactic globular clusters 47 Tucanae (47 Tuc) and NGC 6752. In a similar fashion, the role of non-local thermodynamic equilibrium effects is investigated by focusing on differences in the elemental abundances derived assuming LTE and NLTE spectral line formation, by using classical 1D model atmospheres. The importance of NLTE effects is assessed by studying chemical composition of Galactic globular cluster stars, located both on the main sequence and red giant branch. Finally, we derive abundances of several important elements in the atmospheres of stars of Galactic globular clusters NGC 6752 and 47 Tucanae (47 Tuc), by taking into account spectral line formation in 3D and NLTE.

The main results obtained in this work are: (1) the magnitude of the 3D–1D abundance correction (i.e., difference between the abundances inferred from the same spectral line of a given element using 3D hydrodynamical and classical 1D model atmospheres) depends on the excitation potential, and wavelength of a given spectral

line, as well as on the metallicity of the model atmosphere. For the red giant stars at solar metallicity ( $[M/H]=0.0$ ), the 3D–1D abundance corrections in case of weak lines are in the range of  $+0.05$  to  $-0.10$  dex for neutral atoms and  $0.0$  to  $-0.15$  dex for singly ionized atoms, whereas at  $[M/H] = -3$  the 3D–1D abundance corrections reach  $-0.6$  dex for neutral atoms and  $-0.15$  dex for ions. For the metal-poor ( $[M/H] = -2$ ) main sequence stars, the 3D–1D abundance corrections reach  $-1.1$  dex for the spectral lines of neutral atoms. Obviously, such large differences at lower metallicities can not be neglected in the context of stellar abundance work. (2) In the atmospheres of red giant stars, large 3D–1D abundance corrections are caused mainly by the horizontal temperature inhomogeneities arising from the convective motions in stellar atmospheres. Differences in the temperature stratifications between the average 3D and 1D model atmospheres play an important, albeit typically smaller, role. The situation is different in main sequence stars, however: in this case it is the difference between the temperature profiles that provides the largest contribution towards the total 3D–1D abundance correction, especially at lowest metallicities. (3) NLTE effects are very important in the formation of spectral lines of sodium and oxygen in the atmospheres of main sequence turn-off (TO) stars in the Galactic globular cluster 47 Tuc. In this case, the differences between the abundances derived with NLTE and LTE approaches may reach  $\Delta_{1DNLTE-1DLTE} \approx -0.35$  dex for sodium infrared doublet lines located at 818.3 and 819.5 nm, and  $\Delta_{1DNLTE-1DLTE} \approx -0.20$  dex for the oxygen infrared triplet at 777 nm. The role of convection in the spectral line formation is significantly less important in the atmospheres of these stars: the differences in the abundances of sodium and oxygen inferred from the same spectral lines with the 3D hydrodynamical and 1D classical model atmospheres are  $\Delta_{3D-1D} \approx +0.02$  dex and  $\Delta_{3D-1D} \approx +0.05$  dex, respectively. (4) We determined abundances of lithium, oxygen, and sodium in the atmospheres of 110 turn-off stars in the globular cluster 47 Tuc, taking into account both NLTE and 3D effects. The determined abundances span the following ranges (as indicated by the numbers after the plus-minus sign, which give the standard deviation of the respective abundance variation in the entire sample of studied stars):  $\langle \log \epsilon(\text{Li}) \rangle = 1.78 \pm 0.18$ ,  $\langle [\text{O}/\text{Fe}] \rangle = +0.28 \pm 0.16$ , and  $\langle [\text{Na}/\text{Fe}] \rangle = +0.11 \pm 0.15$ . We also determined abundances of lithium, sodium, and barium in the atmospheres of 8 red giant stars in the globular cluster NGC 6752, again taking into account both NLTE and 3D effects:  $\langle \log \epsilon(\text{Li}) \rangle = 0.74 \pm 0.23$ ,  $\langle [\text{Na}/\text{Fe}] \rangle = +0.03 \pm 0.28$ , and  $\langle [\text{Ba}/\text{Fe}] \rangle = +0.10 \pm 0.06$ .

## Literatūra

Asplund, M. 2005, *ARA&A*, 43, 481

Asplund, M., Grevesse, N., Jacques Sauval, A., & Scott, P. 2009, *ARA&A*, 47, 481

Behara, N. T., Bonifacio, P., Ludwig, H.-G., Sbordone, L., González Hernández J.I. ir kt. 2010, *A&A*, 513, 72

Bonifacio, P., Pasquini, L., Molaro, P., Carretta, E., François, P. ir kt. 2007, *A&A*, 470, 153

Böhm-Vitense, E. 1958, *ZAp*, 46, 108

Caffau, E., & Ludwig, H.-G. 2007, *A&A*, 467, L11

Carlsson, M. 1986, *UppOR*, 33

Carretta, E., Bragaglia, A., Gratton, R. G., ir kt. 2009a, *A&A*, 505, 117

Carretta, E., Bragaglia, A., Gratton, R. G., & Lucatello, S. 2009b, *A&A*, 505, 139

Carretta, E., Bragaglia, A., Gratton, R. G., Recio-Blanco, A., Lucatello, S. ir kt. 2010, *A&A*, 516, 55

Collet, R., Asplund, M., & Trampedach, R. 2007, *A&A*, 469, 687

Collet, R., Asplund, M., & Nissen, P. E. 2009, *PASA*, 26, 330

Dobrovolskas, V., Kučinskas, A., Steffen, M., Ludwig, H.-G., Prakupavičius, D., ir kt. 2013, *A&A*, in press, DOI: 10.1051/0004-6361/201321036

D'Orazi, V., Lucatello, S., Gratton, R., Bragaglia, A., Carretta, E., ir kt. 2010, *ApJ*, 713L, 1

Freytag, B., Steffen, M., Ludwig, H.-G., Wedemeyer-Böhm, S., Schaffenberger, W., ir kt. 2012, *Journ. Comp. Phys.*, 231, 919

Geisler, D., Villanova, S., Carraro, G., Pilachowski, C., Cummings, J., ir kt. 2012, *ApJ*, 756, 40

González Hernández, J.I., Bonifacio, P., Caffau, E., Steffen, M., Ludwig, H.-G., ir kt. 2009, *A&A*, 505, 13

- Gratton, R., Bonifacio, P., Bragaglia, A., Carretta, E., Castellani, V., *ir kt.* 2001, *A&A*, 369, 87
- Gratton, R., Sneden, C., & Carretta, E. 2004, *ARA&A*, 42, 385
- Gray, D. F. 2012, *AJ*, 143, 112
- Gray, D. F. 2005, *PASP*, 117, 711
- Gray, D. F., Carney, B. W., & Yong, D. 2008, *AJ*, 135, 2033
- Hayek, W., Sing, D., Pont, F., & Asplund, M. 2012, *A&A*, 539, 102
- Klevas, J., Kučinskis, A., Ludwig, H.-G., Bonifacio, P., Steffen, M., *ir kt.* 2013, *Proc. of the 2nd COBOLD Workshop, Mem. Soc. Astron. Italiana Suppl.*, 24, 79
- Ludwig, H.-G., Jordan, S., & Steffen, M. 1994, *A&A*, 284, 105
- Ludwig, H.-G. 1992, *Non-gray Radiation Transport in Numerical Simulations of Stellar Convection*, Ph.D. Thesis, University of Kiel
- Korotin, S. A., Andrievsky, S. M., & Luck, R. E. 1999, *A&A*, 351, 168
- Kraft, R. P. 1994, *PASP*, 106, 553
- Kučinskis, A., Steffen, M., Ludwig, H.-G., Dobrovolskas, V., Ivanauskas, A., *ir kt.* 2013, *A&A*, 549, A14
- Mashonkina, L., Gehren, T., Shi, J.-R., Korn, A. J., & Grupp, F. 2011, *A&A*, 528, 87
- Mihalas, D. *Stellar Atmospheres*, Freeman and Company
- Nordlund, Å. 1982, *A&A*, 107, 1
- Pasquini, L., Bonifacio, P., Molaro, P., François, P., Spite, F., *ir kt.* 2005, *A&A*, 441, 549
- Ramírez, I., Allende Prieto, C., Koesterke, L., Lambert, D. L., & Asplund, M. 2009, *A&A*, 501, 1087
- Ramírez, I., Collet, R., Lambert, D. L., Allende Prieto, C., & Asplund, M. 2010, *ApJL*, 725, 223

- Sánchez-Blázquez, P., Marcolini, A., Gibson, B. K., Karakas, A. I., Pilkington, K.,  
ir kt. 2012, MNRAS, 419, 1376
- Shen, Z.-X., Bonifacio, P., Pasquini, L., & Zaggia, S. 2010, A&A, 524L, 2
- Thévenin, F., & Idiart, T. P. 1999, ApJ, 521, 753
- Yong, D., Grundahl, F., Nissen, P. E., Jensen, H. R., & Lambert, D. L. 2005, A&A,  
438, 875

# Vidas Dobrovolskas

## *Curriculum Vitae*

**Date and place of birth:** 5 October 1979, Lithuania  
**E-mail:** Vidas.Dobrovolskas@ff.vu.lt

### **Education:**

<i>B.S.</i>	in Physics at Vilnius University	2001
<i>M.S.</i>	in Physics, Theoretical Physics and Astronomy at Vilnius University	2005
<i>Ph.D. studies</i>	in Physical Sciences, Physics (02 P) at Vilnius University	2008–2013

### **Professional improvement:**

- *NordForsk summer school: Stellar pulsations*, Lithuania, 2005
- *summer school: Virtual Observatories*, Lithuania, 2007
- *NordForsk summer school: Observational Stellar Astrophysics*, Lithuania, 2008
- *EstSpace School: Future Cosmic Surveys and Huge Databases*, Estonia, 2009