

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Dainius Prakupavičius

DEGUONIS ŽVAIGŽDŽIŲ ATMOSFEROSE:  
SPEKTRO LINIJŲ FORMAVIMASIS IR GAUSA

Daktaro disertacijos santrauka

Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2017

Disertacija rengta 2010–2014 metais Vilniaus universitete, Teorinės fizikos ir astronomijos institute studijuojant doktorantūroje ir ginama eksternu.

Mokslinis vadovas – dr. Arūnas Kučinskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P). Nuo 2010 10 01 iki 2014 09 30.

Mokslinis konsultantas – dr. Arūnas Kučinskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P). Nuo 2014 10 01 iki 2017 04 18.

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

Pirmininkas:

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

Nariai:

Dr. Donatas Narbutis (Vilniaus universitetas, 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 (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2017 m. balandžio mėn. 18 d. 15:00 val. Nacionaliniame fizinių ir technologijos mokslų centre, D401 auditorijoje. Adresas: Saulėtekio al. 3, LT-10257, Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta: 2017 m. kovo mėn. 17 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto interneto svetainėje adresu:

[www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius](http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius).

VILNIUS UNIVERSITY

CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Dainius Prakashavičius

OXYGEN IN STELLAR ATMOSPHERES:  
SPECTRAL LINE FORMATION AND ABUNDANCES

Doctoral dissertation summary

Physical sciences, Physics (02 P)

Vilnius, 2017

Doctoral dissertation was completed during doctorate studies at Vilnius University, Institute of Theoretical Physics and Astronomy in 2010–2014 and is defended in extern.

Scientific supervisor – dr. Arūnas Kučinskas (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P). From 2010 10 01 until 2014 09 30.

Scientific adviser – dr. Arūnas Kučinskas (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P). From 2014 10 01 until 2017 04 18.

**Council of the doctoral dissertation defense:**

Chairman:

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

Members:

Dr. Donatas Narbutis (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P)

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

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

Dr. Kastytis Zubovas (Vilnius University, 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, auditorium D401 at 3:00 p.m. on 18th of April, 2017. Address: Saulėtekio al. 3, LT–10257, Vilnius, Lithuania.

Summary of the doctoral dissertation was mailed on 17th of March, 2017.

The dissertation is available at the Vilnius university internet site:

[www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius](http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius).

## Tyrimo motyvacija

Žvaigždžių atmosferas sudaro medžiaga, kurios cheminė sudėtis gali būti įvairi. Cheminių elementų gausos žvaigždžių atmosferose tyrimai atliekami analizuojant spektro linijas, kurios stebimos šių žvaigždžių spektruose. Žinios apie žvaigždžių fotosferų cheminę sudėtį ir žvaigždžių populiacijų narių kinematiką yra svarbios siekiant geriau suprasti cheminę-dinaminę žvaigždžių populiacijų bei iš jų sudarytų žvaigždžių sistemų (spiečių, galaktikų) raidą.

Šiuo požiūriu deguonis yra svarbus elementas, jo gausos tyrimai žvaigždžių atmosferose gali suteikti svarbios informacijos tiek apie pavienių žvaigždžių, tiek ir apie jų sistemų raidą, charakteringus laikus ir pobūdį (Stasińska et al. 2012). Deguonies gausa žvaigždžių fotosferose gali būti nustatoma naudojant atomų (O I) bei molekulių (OH) spektro linijas. Pagrindiniai atominiai deguonies gausos indikatoriai yra draustinės linijos (žymimos [O I];  $\lambda = 630$  ir  $636$  nm) ir IR tripletas ( $\lambda = 777$  nm). OH molekulės spektro linijos stebimos UV (310–330 nm) ir IR (1500–1650 nm) spektro srityse.

Manoma, kad [O I] spektro linijos yra patikimiausi deguonies gausos indikatoriai, nes šios spektro linijos formuojasi lokali termodinaminės pusiausvyros (angl. *local thermodynamic equilibrium*, LTE) sąlygomis (Asplund et al. 2004). Kita vertus, šios spektro linijos yra silpnos arba nėra stebimos žvaigždžių, kurių metalingumas<sup>1</sup> yra mažesnis nei  $[\text{Fe}/\text{H}] = -3$ , spektruose. O I IR tripleto spektro linijos, dėl jų aukšto sužadavimo potencialo ( $\chi = 9,146$  eV), yra matomos tik pagrindinės sekos žvaigždžių (efektinė temperatūra  $T_{\text{eff}} > 5000 - 5500$  K) spektruose ir, skirtingai nuo draustinių spektro linijų, jos formuojasi nelokali termodinaminės pusiausvyros (angl. *non-local thermodynamic equilibrium*, NLTE) sąlygomis (Asplund et al. 2004).

Asplund et al. (2004) tyrimo rezultatai parodė, kad spektro analizėje panaudojant vienmatį (1D) hidrostatinį Saulės atmosferos modelį, skirtingi deguonies gausos indikatoriai prognozuoja skirtingą deguonies gausą<sup>2</sup>,  $A(\text{O})$ . Taip pat, šio tyrimo autoriai įvairių deguonies spektro linijų Saulės spektre analizei pritaikė trimatį (3D) hidrodinaminį Saulės atmosferos modelį, apskaičiuotą STAGGER paketu (Magic et al. 2013), ir nustatė, kad deguonies gausos įverčiai, gauti panaudojant skirtingus indikatorius, gerai dera tarpusavyje. Kita vertus, nauja deguonies gausos Saulės atmosferoje vertė,  $A(\text{O})_{\odot} = 8,66 \pm 0,05$ , yra gerokai mažesnė nei standartinė ( $A(\text{O})_{\odot} = 8,83 \pm 0,06$ ; Grevesse & Sauval 1998). Tai lemia, kad standartinio Saulės modelio, apskaičiuoto naudojant mažą deguonies gausos vertę, helioseismologinės prognozės nesutampa su helioseismologiniais stebėjimais.

---

<sup>1</sup> $[\text{Fe}/\text{H}] = \log[\text{N}(\text{Fe})/\text{N}(\text{H})]_{*} - \log[\text{N}(\text{Fe})/\text{N}(\text{H})]_{\odot}$

<sup>2</sup> $A(\text{O}) = \log[\text{N}(\text{O})/\text{N}(\text{H})] + 12$

Caffau et al. (2008) atliko analogišką deguonies gausos Saulės atmosferoje tyrimą, kuriame naudojo 3D hidrodinaminis CO<sup>5</sup>BOLD atmosferos modelius ir nustatė  $A(O)_{\odot} = 8,76 \pm 0,07$  dex. Villante et al. (2014) tyrimo rezultatai parodė, kad ši gausa geriau dera su deguonies gausa, nustatyta iš helioseismologinių ir neutrinių srauto stebėjimų ( $A(O)_{\odot} = 8,85 \pm 0,01$  dex). Nepaisant to, Caffau et al. (2008) darbe  $A(O)_{\odot}$  buvo nustatyta taikant 3D LTE ir 1D NLTE gausos analizės metodus, kai žinoma (pvz., Pereira et al. 2009b), kad O I IR tripleto linijos turėtų būti tiriamos tik taikant pilną 3D NLTE gausos analizės metodiką. Būtent dėl šios priežasties disertacijoje atliktas nepriklausomas deguonies gausos Saulės fotosferoje tyrimas, kurio metu buvo taikomas 3D hidrodinaminis CO<sup>5</sup>BOLD Saulės atmosferos modelis ir 3D NLTE gausos analizės metodika, ir šio uždavinio sprendimui tinkamas paketas NLTE3D (Cayrel et al. 2007), kurį taikant galima atlikti NLTE spektro sintezę naudojant 3D hidrodinaminis žvaigždžių atmosferų modelius. Kita vertus, NLTE3D paketą iki šiol buvo galima naudoti tik ličio spektro linijų sintezei, todėl prieš atliekant 3D NLTE deguonies gausos tyrimą reikėjo atitinkamai modifikuoti ir išplėsti šio programų paketo galimybes, pritaikant jį darbui su bet kokio atomo modeliu.

Nustatant deguonies gausą taip pat yra naudojamos OH molekulės spektro linijos, stebimos UV ir IR srityse. Skirtingai nei atominio deguonies spektro linijos, OH UV linijos yra labai stiprios, todėl jos stebimos net ir labai mažo metalingumo ( $[Fe/H] \lesssim -3$ ) žvaigždžių spektruose, kuriuose atominės O I spektro linijos nėra registruojamos (pvz., Bessell et al. 2015). OH molekulės spektro linijos yra stebimos visų vėlyvųjų spektro klasių žvaigždžių (raudonųjų milžinių, submilžinių, nykštukių) spektruose. Kita vertus, kai šie spektrai yra analizuojami naudojant klasikinius 1D hidrostatinis atmosferų modelius, stebima priklausomybė tarp nustatytos deguonies gausos ir spektro linijos parametrų (sužadinimo potencialo, ekvivalentinio pločio, pvz., Aoki 2015), nors, klasikiniu požiūriu, gausos, nustatytos panaudojant skirtingas spektro linijas, turėtų sutapti. Taip pat, yra žinoma, kad šių spektro linijų formavimuisi didelę įtaką daro konvekcijos efektai (Collet et al. 2007), tačiau 3D hidrodinaminiai žvaigždžių atmosferų modeliai kol kas buvo taikomi tik pavieniuose tyrimuose, kuriuose buvo nagrinėjami molekulių spektro linijų formavimosi žvaigždžių atmosferose procesai. Dėl šių priežasčių disertacijoje buvo siekiama ištirti konvekcijos efektų itaką molekulių spektro linijų formavimuisi žvaigždžių atmosferose.

# Mokslinis naujumas

Disertacijoje pateiktų rezultatų naujumą sudaro:

1. NLTE3D programų paketas buvo išplėstas ir pritaikytas deguonies spektro linijų sintezei naudojant 3D hidrodinaminis CO<sup>5</sup>BOLD atmosferų modelius. NLTE3D programų pakete buvo įdiegta pagreitinų  $\Lambda$ -iteracijų (angl. *accelerated  $\Lambda$ -iteration*, ALI) schema, galimybė įskaityti įvairius susidūrimų su atomais procesus, atlikti skaičiavimus naudojant įvairių atomų (ir jonų) modelius, apskaičiuoti kontinuumo neskaidrumus ir įskaityti nuokrypį nuo jonizacijos balanso.
2. Atlikto 3D NLTE deguonies gausos Saulės fotosferoje tyrimo rezultatai parodė, kad teoriniai individualių O I IR tripleto spektro linijų profiliai, apskaičiuoti naudojant 3D hidrodinaminis žvaigždžių atmosferų modelius, su stebėjimais dera žymiai geriau (redukuoto  $\chi^2$  vertė apytiksliai lygi 1) nei analogiški profiliai, apskaičiuoti naudojant klasikinius 1D žvaigždžių atmosferų modelius (redukuoto  $\chi^2$  vertė svyruoja nuo 5 iki 15).
3. Išsamaus molekulių (CO, OH, C<sub>2</sub>, CH, NH, CN) spektro linijų formavimosi raudonųjų milžinių atmosferose tyrimo rezultatai parodė, kad horizontalios termodinaminių ir hidrodinaminių fliuktuacijos keičia molekulių lygmenų užpildas, todėl spektro linijos, apskaičiuotos naudojant 3D hidrodinaminį modelį, yra stipresnės spektro linijų, apskaičiuotų taikant 1D hidrostatinį modelį, atžvilgiu. Atitinkamai, cheminių elementų gausos įverčiai, nustatyti panaudojant 3D atmosferos modelius, yra iki 1,8 dex mažesni nei gausos įverčiai, gauti taikant 1D atmosferos modelius.
4. 3D hidrodinaminis mažo metalingumo raudonosios milžinės HD 122563 atmosferos modelis buvo pritaikytas analizuojant OH UV (310–330 nm) spektro linijas. Sprendžiant šį uždavinį buvo taikoma nauja mikroturbulencijos greičio nustatymo metodika, šiam tikslui panaudojant 3D hidrodinaminį atmosferos modelį. Mūsų tyrimo rezultatai parodė, kad taikant šiuo metodu nustatytą mikroturbulencijos greitį sumažinama sistematinių paklaidų, atsirandančių dėl 3D hidrodinaminių atmosferos modelių trūkumų, pvz., modelio skyros, įtaka gausos įverčiams. Taip pat, buvo atrasta, kad deguonies gausos nustatytos taikant 3D hidrodinaminį atmosferos modelį nepriklauso nuo sužadavimo potencialo ir spektro linijos stiprumo.

## Disertacijos tikslai

Ištirti konvekcijos ir nelokalaus spinduliuotės lauko įtaką atominio deguonies spektro linijų formavimuisi Saulės atmosferoje; atlikti konvekcijos įtakos molekulių (CO, OH, C<sub>2</sub>, CH, NH, CN) spektro linijų formavimosi raudonųjų milžinių atmosferose analizę.

## Disertacijos uždaviniai

1. Sukurti ir įdiegti programų pakete NLTE3D modulius, skirtus atominio deguonies 3D NLTE spektro linijų analizei.
2. Ištirti konvekcijos ir nelokalaus spinduliuotės efektų įtaką deguonies IR tripleto formavimuisi Saulės spektre, nustatyti deguonies gausą Saulės atmosferoje panaudojant atnaujintą NLTE3D programų paketą, 3D hidrodinaminį CO<sup>5</sup>BOLD atmosferos modelį ir didelės skyros bei signalo triukšmo santykio Saulės spektrą, stebėtą skirtingose Saulės disko vietose.
3. Ištirti konvekcijos įtaką molekulių (CO, OH, C<sub>2</sub>, CH, NH, CN) spektro linijų formavimuisi raudonųjų milžinių atmosferose.
4. Nustatyti deguonies gausą mažo metalingumo milžinės HD 122563 atmosferoje, panaudojant 3D hidrodinaminį atmosferos modelį ir OH molekulės spektro linijas, stebimas UV spektro srityje (310–330 nm).

## Ginami teiginiai

1. Sukurti ir programų pakete NLTE3D įdiegti nauji moduliai, skirti atominio deguonies 3D NLTE spektro linijų sintezei: deguonies atomo modelis, pagreintų  $\Lambda$ -iteracijų schema (angl. *accelerated  $\Lambda$ -iterations*, ALI), smūginių procesų įtakos statistiniam balansui bei kontinuumo neskaidrumų skaičiavimo moduliai;
2. Naudojant didelės skyros Saulės spektrus, užregistruotus skirtingose Saulės disko vietose, bei 3D hidrodinaminį CO<sup>5</sup>BOLD atmosferos modelį ir NLTE gausos tyrimo metodiką, nustatyta deguonies gausa Saulės atmosferoje  $A(O) = 8,76 \pm 0,02$ ;
3. Molekulių (CO, OH, C<sub>2</sub>, CH, NH, CN) spektro linijų stebimų raudonųjų milžinių spektruose 3D–1D gausos pataisų dydis priklauso nuo žvaigždės metalingumo ir spektro linijos sužadavimo potencialo: didžiausios pataisos yra mažiausio sužadavimo potencialo ( $\chi < 0,5$  eV) spektro linijoms, stebimoms mažo metalingumo ( $[M/H] = -3,0$ ) žvaigždžių spektruose;
4. Deguonies gausa mažo metalingumo raudonosios milžinės HD 122563 atmosferoje, nustatyta naudojant OH UV spektro linijas ir 3D–1D gausos pataisas, yra  $A(O) = 6,23 \pm 0,13$  dex.



## Asmeninis įnašas

Disertacijos autorius atliko dalį NLTE3D paketo pakeitimų, leidžiančių atlikti skaičiavimus su deguonies atomo modeliu, įskaityti smūginio sužadavimo ir jonizacijos procesus, atlikti kontinuumo neskaidrumų ir LTE lygmenų užpildų apskaičiavimą naudojant IONDIS/IONOPA paketus, įvertinti jonizacijos balanso nuokrypį. Autorius atliko dalį atnaujinto NLTE3D paketo testavimo darbų, surinko duomenis deguonies atomo modeliui, atliko 3D NLTE ir 1D NLTE O I IR tripleto spektro linijų ( $\lambda = 777 \text{ nm}$ ) sintezės skaičiavimus ir nustatė deguonies gausą Saulės atmosferoje naudodamas ekvivalentinių plokčių analizės metodą. Šie rezultatai apibendrinami moksliniame straipsnyje Steffen et al. (2015; bendraautorai suformulavo tyrimo tikslus ir uždavinius, atliko spektroskopinius stebėjimus ir jų redukcijos darbus, sukūrė deguonies gausos analizės metodiką, apskaičiavo 3D hidrodinaminį ir 1D hidrostatinį atmosferų modelius, nustatė deguonies gausą taikant spektro linijų priderinimo metodą, atliko gautų rezultatų analizę). Autorius atliko molekulių (CO, OH, C<sub>2</sub>, CH, NH, CN) spektro linijų 3D LTE ir 1D LTE sintezės skaičiavimus, apskaičiavo molekulių linijų 3D–1D gausos pataisas ir dalyvavo atliekant konvekcijos įtakos šių molekulių spektro linijų formavimosi raudonųjų milžinių atmosferose tyrimą. Šie rezultatai apibendrinami straipsnyje Dobrovolskas et al. (2013; bendraautorai suformulavo tyrimo tikslus ir uždavinius, programinės įrangos kūrimo darbus, atmosferos modelių skaičiavimus, įvairius testus, atomų ir jonų spektro linijų sintezės skaičiavimus, nustatė šių linijų 3D–1D gausos pataisas, ištyrė konvekcijos ir sklaidos itaką atomų, jonų ir molekulių spektro linijų formavimuisi, 3D–1D gausos pataisų skirtingose RGB žvaizždėse tyrimą, atliko gautų rezultatų analizę). Autorius, panaudodamas 1D hidrostatinį ATLAS9, LHD ir 3D hidrodinaminį C0<sup>5</sup>BOLD mažo metalingumo raudonosios milžinės HD 122563 atmosferos modelius, atliko OH UV spektro linijų sintezės skaičiavimus, atliko dalį 1D LTE ir 3D LTE deguonies gausos bei konvekcijos įtakos OH UV spektro linijų formavimuisi tyrimo darbų. Šie darbai apibendrinami moksliniame straipsnyje Prakapavičius et al. (2017; bendraautorai prisidėjo prie tyrimo tikslų ir uždavinių suformulavimo, atliko atmosferos modelių skaičiavimus, dalį 1D LTE ir 3D LTE deguonies gausos tyrimo darbų, dalį konvekcijos įtakos OH UV spektro linijų formavimuisi tyrimo ir gautų rezultatų analizės darbų).

## Publikacijos disertacijos tema ISI WoS žurnaluose

1. **Prakapavičius, D.**, Kučinskas, A., Dobrovolskas, V., Klevas, J., Steffen, M., Bonifacio, P., Ludwig, H.-G., and Spite, M., 2017 *Three-dimensional hydrodynamical CO<sup>5</sup>BOLD 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. Steffen, M., **Prakapavičius, D.**, Caffau, E., Ludwig, H.-G., Bonifacio, P., Cayrel, R., Kučinskas, A., Livingston, W.C., 2015, *The photospheric solar oxygen project. IV. 3D-NLTE investigation of the 777nm triplet lines* // *Astronomy and Astrophysics*, 583, A57.
3. Dobrovolskas, V., Kučinskas, A., Steffen, M., Ludwig, H.-G., **Prakapavičius, D.**, Klevas, J., Caffau, E., Bonifacio, P., 2013, *Three-dimensional hydrodynamical CO<sup>5</sup>BOLD model atmospheres of red giant stars. III. Line formation in the atmospheres of giants located close to the base of the red giant branch* // *Astronomy and Astrophysics*, 559, A102.

## Kitos publikacijos ISI WoS žurnaluose

1. Dobrovolskas, V., Kučinskas, A., Bonifacio, P., Korotin, S. A., Steffen, M., Sbordone, L., Caffau, E., Ludwig, H.-G., Royer, F. **Prakapavičius, D.**, 2014, *Abundances of lithium, oxygen, and sodium in the turn-off stars of Galactic globular cluster 47 Tucanae* // *Astronomy and Astrophysics*, 565, A121.
2. Kučinskas, A., Steffen, M., Ludwig, H.-G., Dobrovolskas, V., Ivanauskas, A., Klevas, J., **Prakapavičius, D.**, Caffau, E., Bonifacio, P., 2013, *Three-dimensional hydrodynamical CO<sup>5</sup>BOLD 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.

## Pranešimai konferencijose

1. **Prakapavičius D.**, Kučinskas A., Dobrovolskas V., Klevas J., Steffen M., Bonifacio P., Ludwig H.-G., ir Spite M., 2016, *The influence of convection on OH UV line formation in the atmosphere of metal-poor red giant HD 122563* // "CO<sup>5</sup>BOLD Workshop 2016". Neapolis (Italija), 2016 m., balandžio mėn. 11–13 d., *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, spaudoje (žodinis **D. Prakapavičiaus** pranešimas);
2. Dobrovolskas, V., **Prakapavičius, D.**, Kučinskas, A., Bonifacio, P., Caffau, E., Ludwig, H.-G., Steffen, M., Spite, M., 2015, *Oxygen in the early Galaxy: abundance studies with 3D hydrodynamical model atmospheres* // ESO workshop "Rainbows on the Southern Sky". Garcingas (Vokietija), 2015 m. spalio mėn 5–9 d. (stendinis V. Dobrovolsko pranešimas);
3. Dobrovolskas, V., Kučinskas, A., Bonifacio, P., Korotin, S. A., Sbordone, L., Caffau, E., **Prakapavičius, D.**, 2013, *Abundances of lithium, oxygen and sodium in the turn-off stars of Galactic globular cluster 47 Tuc* // "40th Lithuanian National Physics

- Conference", Vilnius, 2013 m. birželio mėn. 10–12 d., Programa ir pranešimų tezės, Vilniaus universitetas, 244 p. (stendinis V. Dobrovolsko pranešimas);
4. **Prakapavičius, D.**, Steffen, M., Kučinskas, A., Ludwig, H.-G., Freytag, B., Caffau, E., Cayrel, R., 2012, *Oxygen spectral line synthesis: 3D non-LTE with CO<sup>5</sup>BOLD hydrodynamical model atmospheres* // "CO<sup>5</sup>BOLD Workshop 2012", Heidelbergas (Vokietija), 2012 m. spalio mėn 1–3 d., Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi, 24, 111 (žodinis **D. Prakapavičiaus** pranešimas);
  5. Kučinskas, A., Ludwig, H.-G., Steffen, M., Dobrovolskas, V., Klevas, J., **Prakapavičius, D.**, Caffau, E., Bonifacio, P., 2012, *The influence of convection on the atmospheric structures and observable properties of red giant stars* // "CO<sup>5</sup>BOLD Workshop 2012", Heidelbergas (Vokietija), 2012 m. spalio mėn 1–3 d., Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi, 24, 68 (žodinis A. Kučinsko pranešimas);
  6. Klevas, J., Kučinskas, A., Ludwig, H.-G., Bonifacio, P., Steffen, M., **Prakapavičius, D.**, 2012, *Spectral line asymmetries in the metal-poor red giant HD 122563: CO<sup>5</sup>BOLD predictions versus observations* // "CO<sup>5</sup>BOLD Workshop 2012", Heidelbergas (Vokietija), 2012 m. spalio mėn. 1–3 d., Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi, 24, 78 (žodinis J. Klevo pranešimas).
  7. Dobrovolskas, V., Kučinskas, A., Ludwig, H.-G., Caffau, E., Klevas, J., **Prakapavičius, 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", Heidelbergas (Vokietija), 2010 m. liepos mėn. 19–23 d., Proc. of the 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos, id.288 (stendinis V. Dobrovolsko pranešimas).

## Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro **įvadas**, keturi **skyriai**, **išvados**, **naudotos literatūros šaltinių sąrašas** ir **du priedai**.

**1 skyriuje** aprašyti disertacijoje naudoti atmosferų modeliavimo bei LTE/NLTE spektro sintezės programų paketai.

**2 skyriuje** aprašytas NLTE3D programų paketas ir testai atlikti vykdant paketo tobulinimo darbus.

**3 skyriuje** aprašyti deguonies gausos Saulės atmosferoje tyrimo rezultatai, gauti naudojant 3D hidrodinaminį atmosferos modelį ir 3D NLTE spektro sintezės priemonės. Šio tyrimo rezultatai buvo paskelbti Steffen et al. (2015; antras įrašas straipsnių, paskelbtų disertacijos tema, sąrašė).

**4 skyriuje** apibendrintas konvekcijos įtakos molekulių (CO, OH, C<sub>2</sub>, CH, NH, CN) spektro linijų formavimuisi raudonųjų milžinių atmosferose tyrimas. Rezultatai pateikti šiame poskyryje buvo paskelbti Dobrovolskas et al. (2013; trečias įrašas straipsnių, paskelbtų disertacijos tema, sąrašė).

**5 skyriuje** aprašyti deguonies gausos mažo metalingumo raudonosios milžinės HD 122563 atmosferoje tyrimo rezultatai, gauti panaudojant OH UV spektro linijas

bei 3D hidrodinaminį atmosferos modelį, ir konvekcijos įtakos OH UV spektro linijų formavimuisi analizės rezultatai. Šiame poskyryje gauti rezultatai buvo paskelbti Prakapavičius et al. (2017; pirmas įrašas straipsnių, paskelbtų disertacijos tema, sąrašė).

**Išvadose** glaustai apibendrinami disertacijoje pristatyti rezultatai, trumpai aptariami galimi tolimesni šio darbo taikymai ateities tyrimuose.

**Prieduose** pateikiama: (a) 3D–1D gausos pataisos molekulių (CO, OH, C<sub>2</sub>, CH, NH, CN) spektro linijoms, stebimoms raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių spektruose (A Priedas); (b) OH UV spektro linijų, naudotų tiriant deguonies gausą mažo metalingumo raudonosios milžinės HD 122563 atmosferoje, parametrų sąrašas; bei deguonies gausų, nustatytų naudojant skirtingas OH UV linijas, sąrašas (B Priedas).

## Žvaigždžių atmosferų modeliai ir spektro linijų sintezės skaičiavimai

Tiriant žvaigždžių atmosferų cheminę sudėtį naudojami teoriniai žvaigždžių atmosferų modeliai. Šie modeliai aprašo viršutinius žvaigždės sluoksnius, tame tarpe ir tuos, kuriuose formuojasi stebetoją pasiekianti spinduliuotė (kontinuumas, spektro linijos). Šiuo metu plačiausiai taikomi dviejų tipų – 1D hidrostatiniai ir 3D hidrodinaminiai – žvaigždžių atmosferų modeliai. Taikant šiuos modelius nustatomos skirtingos cheminių elementų gausos.

Disertacijoje pristatomas darbas buvo atliktas naudojant 3D hidrodinaminis atmosferos modelius, kurie apskaičiuojami sprendžiant hidrodinamikos lygtis kartu su spinduliuotės pernašos lygtimi. Modelių skaičiavimai buvo atliekami CO<sup>5</sup>BOLD programų paketu (Freytag et al. 2012). Spinduliuotės pernašos uždavinys buvo sprendžiamas taikant supaprastintą neskaidrumų grupavimo schemą (angl. *opacity binning*, Vögler et al. 2004). Ši schema grįsta tuo, jog panašaus dydžio neskaidrumai yra grupuojami į nedidelį skaičių (5–14) grupių, o tai leidžia gerokai pagreitinti spinduliuotės pernašos uždavinio sprendimą. Kadangi CO<sup>5</sup>BOLD atmosferų modeliai yra hidrodinaminiai, šių skaičiavimų rezultatas yra modelio vidinių struktūrų, apskaičiuotų skirtingais laiko momentais, seka. Tolimesnių skaičiavimo darbų paspartinimui, iš šios sekos buvo atrinkta 20 skirtingais laiko momentais apskaičiuotų hidrodinaminio atmosferos modelio konfigūracijų (angl. *snapshot*), kurių parametrų (termodinaminį, hidrodinaminį, atmosferos) vidurkiai atitinka visos sekos parametrų vidurkius.

Kartu CO<sup>5</sup>BOLD atmosferų modeliais, disertacijoje buvo taikomi ir 1D hidrostatiniai atmosferų modeliai, apskaičiuoti naudojant LHD (Caffau & Ludwig 2007) ir

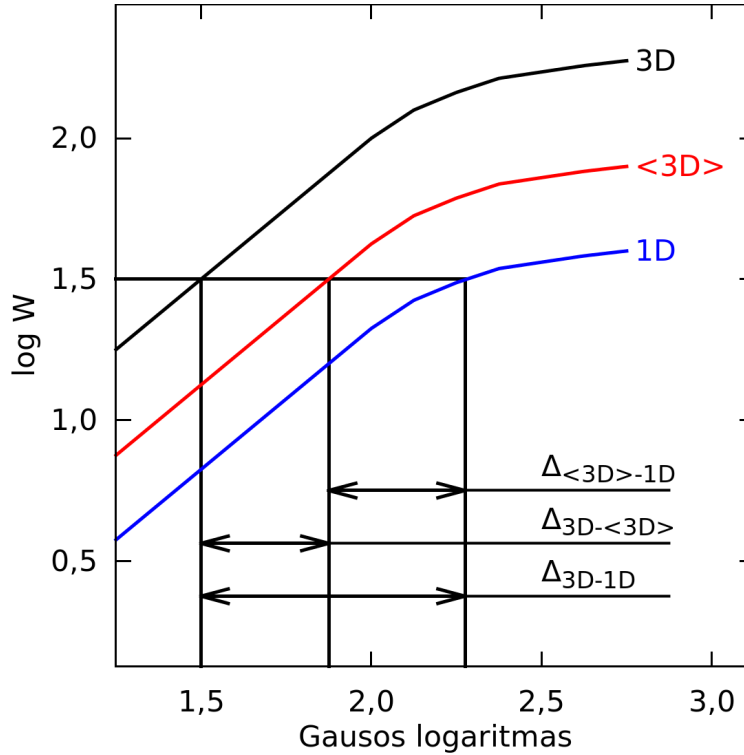
ATLAS9 (Kurucz 1970) programų paketus. Fizikiniu požiūriu, šie modeliai yra panašūs, tačiau LHD atmosferų modeliuose yra taikoma tokia pati būsenos lygtis ir neskaidrumų grupavimo artinys, kurie naudojami CO<sup>5</sup>BOLD atmosferų modeliuose. ATLAS9 programiniame pakete spinduliuotės pernaša modeliuojama naudojant neskaidrumų skirstinio funkciją (angl. *opacity distribution function*) ir gerokai didesnę bangos ilgių skaičių (ATLAS9 BIG neskaidrumų lentelės, 337 bangos ilgio taškai). Dėl šios priežasties galima teigti, kad ATLAS9 atmosferos modeliai yra (realistiškesni lyginant su LHD) ir gali būti naudojami 1D LTE gausos analizėje (4 skyrius), o LHD atmosferos modelis yra tinkamas diferencialiniam 3D–1D gausos įverčių palyginimui.

Panaudojant žvaigždės atmosferos modelį ir parametrus, charakterizuojančius pasirinktą spektro liniją (sužadinimo potencialas, bangos ilgis, Einšteino koeficientai), galima apskaičiuoti teorinį (sintetinį) žvaigždės spektrą, ir, lyginant jį su stebėtu žvaigždės spektru, nustatyti žvaigždės atmosferos cheminę sudėtį. Norint išspręsti šį uždavinį, kiekviename atmosferos modelio taške reikia įvertinti spektro linijos neskaidrumą ir šaltinio funkciją<sup>3</sup>. Šie dydžiai priklauso nuo tiriamo cheminio elemento atomo lygmenų užpildų. Taikant LTE artinį, tiriamo atomo lygmenų užpildas galima apskaičiuoti naudojant Saha-Bolcmano lygtį, o šaltinio funkcija yra lygi Planko funkcijai. Kita vertus, žvaigždės atmosfera yra optiškai retas sluoksnis, o zona, kurioje formuojasi spektro linijos, yra veikama spinduliuotės, kuri formuojasi karštesniuose žvaigždės sluoksniuose. Ši spinduliuotė gali papildomai jonizuoti medžiagą, sukurti nuokrypius nuo LTE ir daryti įtaką atomų lygmenų užpildoms. Siekiant atsižvelgti į nelokalios spinduliuotės įtaką atomų energijos lygmenų užpildoms, yra būtina taikyti NLTE artinį.

Vykdamas disertacijoje aprašytus tyrimus, NLTE spektro sintezės skaičiavimai buvo atliekami naudojant NLTE3D programų paketą, kuris naudojamas sprendžiant statistinio balanso ir spinduliuotės pernašos lygtis. Tam reikalingas atomo modelis, kuriame yra apibrėžtos atomo lygmenų energijos ir šuolių tarp skirtingų atomo lygmenų tikimybės (susieti-susieti, susieti-laisvi šuoliai, vykstantys dėl sąveikos su spinduliuotės lauku ir susidūrimų su kitomis dalelėmis, pvz., vandenilio atomais, elektronais). Naudojant statistinio balanso lygtį yra įskaitoma nelokalios spinduliuotės lauko įtaka ir apskaičiuojamos pasirinkto atomo modelio lygmenų užpildos. Panaudojant statistinio balanso lygties sprendinį ir sprendžiant spinduliuotės pernašos lygtį galima apskaičiuoti vidutinį spinduliuotės lauko intensyvumą ties skirtingais bangos ilgiais bei tiriamų spektro linijų profilius. Kadangi abi šios lygtys yra netiesinės, jos sprendžiamos iteracijų būdu. NLTE3D sprendinys yra nuokrypio koeficientai,  $b_i$  (angl.

---

<sup>3</sup>Šaltinio funkcija yra apibrėžiama kaip terpės emisijos ir absorpcijos koeficientų santykis.



**1 pav.** Gausos pataisos:  $\Delta_{3D-1D}$ ,  $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle}$  ir  $\Delta_{\langle 3D \rangle - 1D}$ . Linijos yra augimo kreivės apskaičiuotos naudojant 3D hidrodinaminį (juoda), suvidurkintą  $\langle 3D \rangle$  (raudona) ir 1D hidrostatinį (mėlyna) atmosferų modelius. Atitinkama gausos pataisa yra apibrėžiama kaip gausos skirtumas tarp augimo kreivių apskaičiuotų naudojant skirtingus atmosferos modelius fiksuotam spektro linijos ekvivalentiniam pločiui.

*departure coefficient*)<sup>4</sup>, kurie naudojami skaičiuojant linijos neskaidrumą ir šaltinio funkciją NLTE sąlygomis. Šie skaičiavimai buvo atliekami naudojant Linfor3D<sup>5</sup> paketą.

Linfor3D paketas taip pat yra pritaikytas LTE spektro linijų sintezei ir jis buvo naudotas tiriant konvekcijos įtaką spektro linijų formavimuisi. Šiam tyrimui buvo panaudotos augimo kreivės (angl. *curves-of-growth*), apskaičiuotos taikant 3D hidrodinaminis CO<sup>5</sup>BOLD ir 1D hidrostatinis LHD atmosferų modelius, kurie buvo naudojami skaičiuojant 3D–1D gausos pataisų vertes tiriamoms spektro linijoms. Cheminio elemento 3D–1D gausos pataisa,  $\Delta_{3D-1D}$ , yra cheminio elemento gausos skirtumas tarp 3D hidrodinaminio ir 1D hidrostatinio modeliais apskaičiuotų augimo kreivių ties fiksuotu spektro linijos ekvivalentiniu pločiu. Be to, naudojant Linfor3D paketą, galima apskaičiuoti ir suvidurkintą 3D atmosferos modelį,  $\langle 3D \rangle$ . Šis atmosferos modelis yra gaunamas suvidurkinant skirtingais laiko momentais apskaičiuotas 3D hidrodinaminio modelio konfigūracijas. Naudojant šį atmosferos modelį galima apskaičiuoti ir su juo susijusias gausos pataisas – 3D– $\langle 3D \rangle$  ( $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle}$ ) ir  $\langle 3D \rangle$ –1D ( $\Delta_{\langle 3D \rangle - 1D}$ ).

<sup>4</sup>Atomo lygmens nuokrypio koeficientas,  $b_i$ , yra NLTE/LTE lygmens užpildų santykis (atitinkamai,  $n_i$  ir  $n_i^*$ ) atomo lygmeniui  $i$ ;  $b_i = n_i/n_i^*$ .

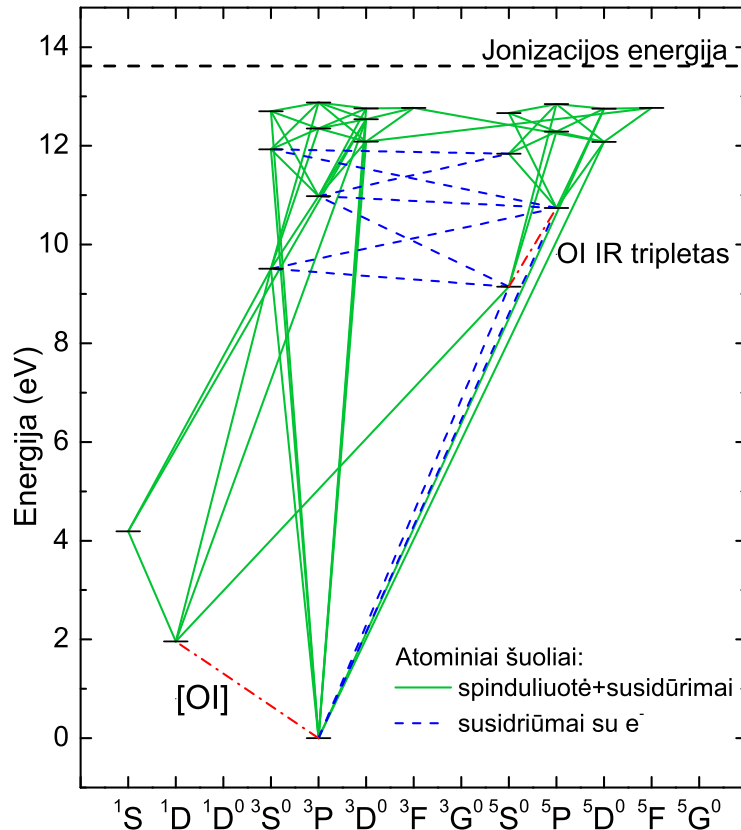
<sup>5</sup><http://www.aip.de/Members/msteffen/linfor3d>

Kadangi  $\langle 3D \rangle$  modelis yra vienmatis ir horizontaliai homogeniškas,  $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle}$  pataisa rodo, kokią įtaką spektro linijai daro horizontalūs 3D modelio nehomogeniškumai, atsirandantys dėl konvekcijos, smūginių bangų ir kt. Analogiškai,  $\Delta_{\langle 3D \rangle-1D}$  pataisa apibrėžia skirtumus tarp gausos, nustatytos panaudojant  $\langle 3D \rangle$  ir 1D hidrostatinis atmosferų modelius. Pastaroji gausos pataisa yra parametrizuoto konvekcijos įskaitymo 1D hidrostatiniam modelyje įtakos gausai įvertis. Visų trijų gausos pataisų skaičiavimo schema pateikta 1 pav.

## Atomio deguonies spektro linijos žvaigždžių atmosferose: O I IR tripletas ir deguonies gausa Saulės atmosferoje

Žinios apie deguonies gausą žvaigždžių atmosferose reikalingos tiriant įvairių žvaigždžių populiacijų raidą. Deguonies gausa Saulės fotosferoje,  $A(O)_{\odot}$ , yra įprastas tokių tyrimų atskaitos taškas. Deguonies gausos,  $A(O)_{\odot}$  įverčiai, kurie buvo gauti taikant 3D hidrodinaminį STAGGER Saulės atmosferos modelį, yra gana maži  $A(O)_{\odot} = 8,66 - 8,68$  dex (Pereira et al. 2009b). Standartinio Saulės vidinės struktūros modelio, apskaičiuoto su tokia deguonies gausa, prognozės prastai dera su helioseismologinių tyrimų rezultatais. Basu & Antia (2008) tyrimo rezultatai parodė, kad standartinis Saulės modelis, apskaičiuotas su Saulės chemine sudėtimi publikuota Grevesse & Sauval (1998), kur  $A(O)_{\odot} = 8,83 \pm 0,06$ , žymiai geriau atkuria helioseisminių stebėjimų rezultatus.

Caffau et al. (2008), kurie naudojo 3D hidrodinaminį CO<sup>5</sup>BOLD atmosferos modelį, nustatė kiek didesnę  $A(O)_{\odot} = 8,76 \pm 0,07$  dex, o Villante et al. (2014) parodė, kad standartinio Saulės modelio apskaičiuoto su tokia  $A(O)_{\odot}$  prognozės daug geriau dera su helioseisminių ir neutrinių stebėjimų rezultatais. Nepaisant to, reikia pabrėžti, kad deguonies IR tripleto tyrimui Caffau et al. (2008) taikė 3D LTE ir 1D NLTE deguonies gausos analizės priemones ir iki šiol nebuvo aišku kiek pasikeistų šie rezultatai, jei analizė būtų atliekama taikant 3D NLTE gausos analizės metodiką. Toks tyrimas buvo atliktas šioje disertacijoje ir žemiau glaustai aptariamais svarbiausi O I IR tripleto ( $\lambda = 777$  nm) spektro linijų formavimosi Saulės atmosferoje tyrimo rezultatai, gauti taikant 3D NLTE deguonies gausos analizės metodiką.



**2 pav.** Tyrime naudoto deguonies atomo modelio Grotriano diagrama. Šuoliai, kurie vyksta atomui sugeriant arba išspinduliuojant fotoną, pažymėti žaliomis linijomis. Šuoliai, kurie vyksta dėl deguonies atomo susidūrimų su elektronais, pažymėti mėlynomis linijomis. Draustinę [O I] ir O I IR tripleto linijas atitinkantys šuoliai pažymėti raudonomis punktyrinėmis-taškinėmis linijomis. Kiekvieną atomo lygmenį su pagrindiniu jonizuoto deguonies (O II) lygmeniu sieja susieti-laisvi šuoliai.

Tyrime buvo naudoti Saulės intensyvumo spektrai, užregistruoti skirtingose Saulės disko vietose. Intensyvumo spektrų stebėjimo Saulės diske pozicija apibūdinama krypties kosinusu  $\mu^6$ . Tyrimui buvo naudoti trys aukštos kokybės intensyvumo spektrų rinkiniai: Saulės disko centro ( $\mu = 1,00$ ) intensyvumo ir srauto spektrai užregistruoti Kitt Peak observatorijoje (Neckel & Labs 1984; Neckel 1999;  $625\,000 < \lambda/\Delta\lambda < 825\,000$ ; toliau – Neckel spektras), intensyvumo spektrų rinkinys, registruotas Kitt Peak observatorijoje McMath-Pierce Saulės teleskopu (Livingston et al. 2007;  $\lambda/\Delta\lambda \approx 90\,000$ ;  $S/N \approx 1\,500 - 700$ ;  $\mu = 1,00, 0,87, 0,66, 0,48, 0,35$  ir  $0,25$ ; toliau – WCLC spektras) ir aukštos kokybės intensyvumo spektrų rinkinys naudotas Pereira et al. (2009b;  $\lambda/\Delta\lambda \approx 200\,000$ ;  $S/N \approx 1\,200 - 1\,500$ ;  $\mu = 1,00, 0,816, 0,608, 0,424$  ir  $0,197$ ; toliau – Pereira spektras)<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> $\mu = \cos\theta$ , čia  $\theta$  - kampas tarp stebėtojo ir krypties statmenos Saulės paviršiui. Intensyvumo spektras registruojamas stebėjimus atliekant tam tikra kryptimi, kurią charakterizuoja kampas  $\theta$ .

<sup>7</sup><http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/508/1403>

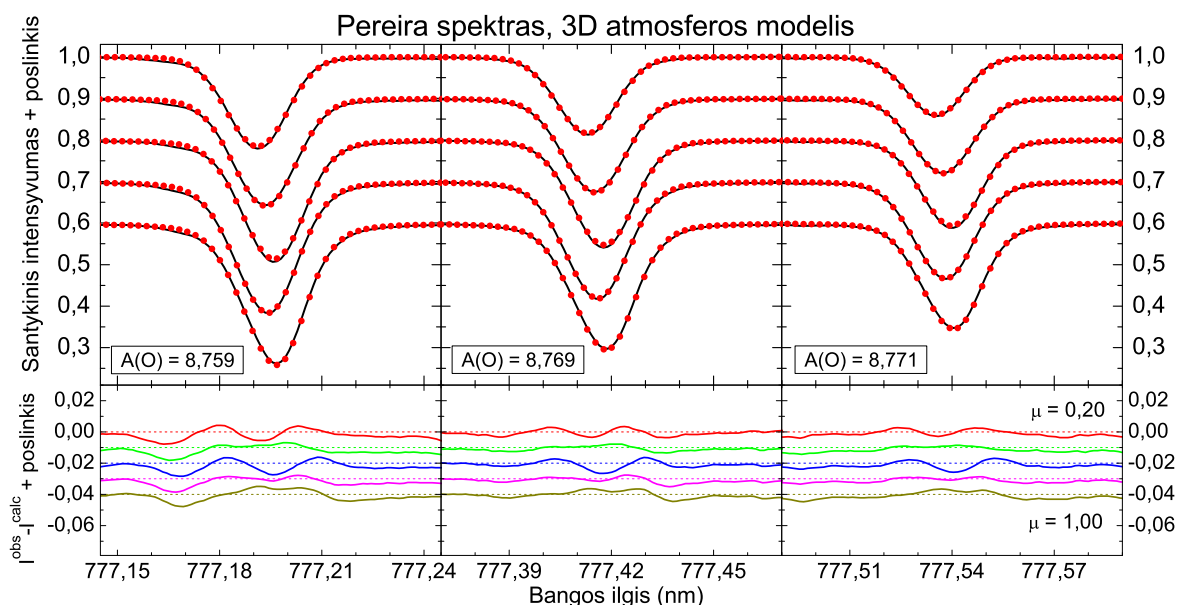
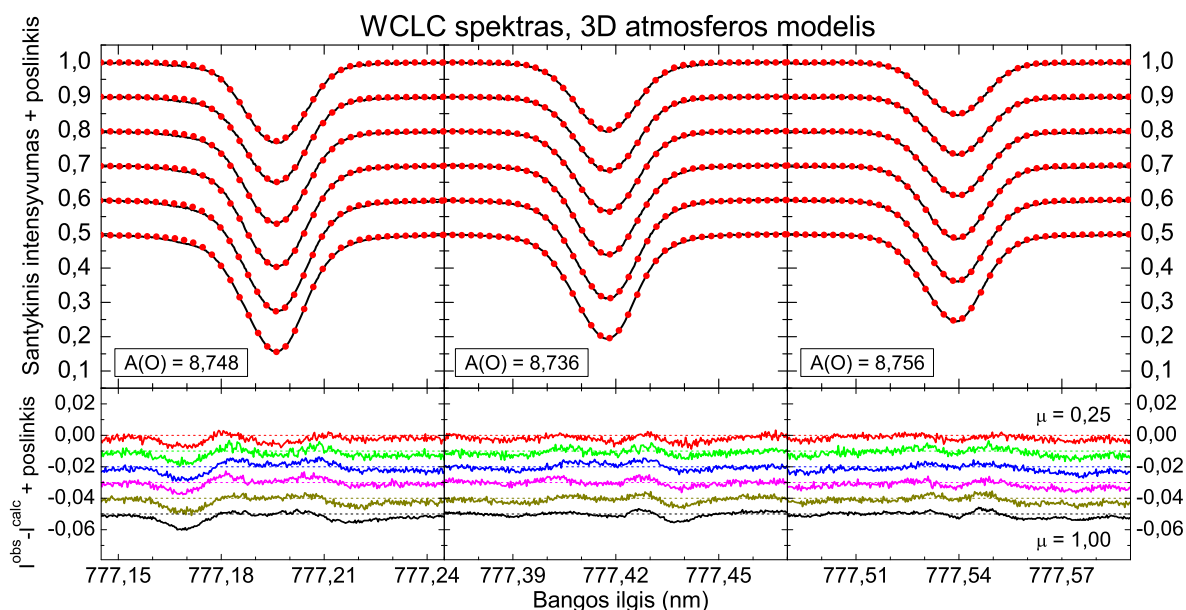


Šiame tyrime buvo naudoti keturi Saulės atmosferos modeliai: 3D hidrodinaminis ir 1D hidrostatinis, apskaičiuoti naudojant atitinkamai CO<sup>5</sup>BOLD ir LHD programų paketus, suvidurkintas ⟨3D⟩ ir pusiau empirinis Holweger & Mueller (1974) atmosferos modelis.

Deguonies atomo lygmenų užpildų nuokrypio koeficientai buvo apskaičiuoti naudojant NLTE3D paketą. Šiam tikslui buvo sudarytas deguonies atomo modelis (22 O I ir pagrindinis O II energijos lygmenys, 64 susieti-susieti šuoliai). Kiekvieną O I atomo lygmenį su pagrindiniu O II lygmeniu sieja susieti-laisvi šuoliai. Darbe naudoto atomo modelio Grotriano diagrama pateikta 2 pav. Šiame deguonies atomo modelyje buvo panaudoti naujausi atominiai duomenys (atomo lygmenų energijos, Einšteino koeficientai, fotojonizacijos skerspjūviai, elektronų susidūrimo su deguonies atomais skerspjūviai). Susidūrimų tarp O I ir H I įtaka deguonies atomo lygmenų užpildoms buvo įskaityta taikant klasikinę Drawin formulę (Drawin 1969; Steenbock & Holweger 1984; Lambert 1993). Drawin formulė yra apytikslė ir susidūrimų skerspjūvius prognozuoja eilės tikslumu, todėl šių skerspjūvių dydis buvo koreguojamas padauginant juos iš korekcinio daugiklio  $S_H$  (įprastai,  $0,01 < S_H < 10$ ). Svarbu pabrėžti, kad deguonies ir vandenilio atomų susidūrimai yra labai svarbūs O I O I atomo lygmenų užpildoms, todėl  $S_H$  yra nežinomas dydis ir turi būti nustatytas kartu su  $A(O)_\odot$  (žr. žemiau).

Naudojant O I atomo modelį ir NLTE3D paketą bei keičiant  $A(O)_\odot$  ir  $S_H$  parametrus intervaluose  $8,65 < A(O)_\odot < 8,83$  dex (žingsnis 0,03 dex) ir  $0 < S_H < 8/3$  (žingsnis 1/3), buvo apskaičiuotas deguonies atomo lygmenų nuokrypių nuo LTE tinklas. Naudojant šį  $b_i$  tinklą ir Linfor3D paketą, buvo apskaičiuoti O I tripleto linijų profiliai  $\mu$  vertėms, kurioms buvo registruoti WCLC ir Pereira intensyvumo spektrai.

Naudojant  $\chi^2$  minimizavimo metodiką, teoriniai O I IR tripleto linijų profiliai buvo priderinti prie stebėtų Saulės spektre. Atliekant šią procedūrą buvo nustatytos  $A(O)_\odot$  ir  $S_H$  kombinacijos, su kuriomis apskaičiuoti teoriniai linijų profiliai geriausiai atitinka linijų profilius, stebėtus ties visomis  $\mu$  vertėmis. 3 pav. parodyti sintetiniai 3D NLTE linijų profiliai, geriausiai derantys su stebėtais WCLC ir Pereira spektruose. Sutapimas tarp stebėtų ir teorinių spektrų profilių yra labai geras spektro linijos centre ir sparnuose, o skirtumai neviršija 1%. Kita vertus, teoriniai spektro linijų profiliai, apskaičiuoti naudojant 1D LHD ir suvidurkintą ⟨3D⟩ modelius nedera su stebėtais profiliais (redukuota  $\chi^2$  vertė siekia 5–15), be to, gaunamas nefizikinis sprendinys  $S_H < 0$ . 1 lentelėje pateiktos deguonies gausos, kurios buvo nustatytos taikant 3D NLTE analizės metodiką.



**3 pav.** Geriausiai su WCLC (viršuje) ir Pereira (apačioje) spektrais derantys teoriniai NLTE spektro linijų profiliai, apskaičiuoti naudojant 3D hidrodinaminį Saulės atmosferos modelį. Viršutinėse paveikslų dalyse parodyti stebėti (juodos linijos) ir teoriniai (raudoni taškai) spektro linijų profiliai, stebėti arba apskaičiuoti esant skirtingoms  $\mu$  vertėms ( $\mu$  vertė didėja iš viršaus į apačią). Apatinėse paveikslų dalyse parodyti skirtumai tarp normuotų stebėtų ir teorinių linijų profilių. Grafikuose skirtingas spektro linijas atitinkantys duomenys paslinkti vertikaliai 0,1 (spekto linijų grafikai) ir 0,01 (skirtumų grafikai) žingsniu.

Šiame darbe taip pat buvo išmatuoti O I tripleto linijų ekvivalentiniai pločiai. Lyginant matavimų vertes su teorinių linijų ekvivalentiniais pločiais, nustatytos  $A(O)_{\odot}$  bei  $S_H$  vertės, lygios atitinkamai  $8,763 \pm 0,012$  ir  $1,6 \pm 0,2$  (1 lentelė).

Šiame darbe, panaudojant du aukštos kokybės Saulės intensyvumo spektrų rinkinius, 3D hidrodinaminį atmosferos modelį ir 3D NLTE spektro analizę, buvo nusta-

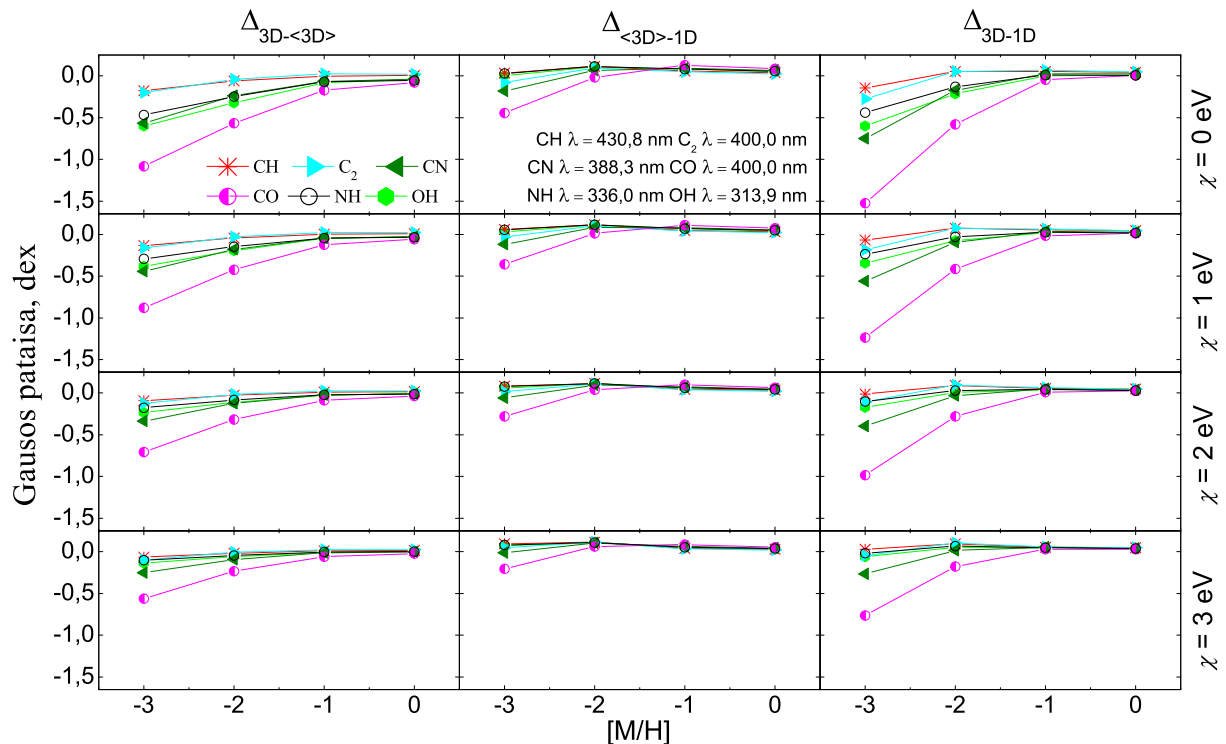
**1 lentelė.** Deguonies gausa Saulės atmosferoje ir  $S_{\text{H}}$  parametro vertės, nustatytos taikant du skirtingus metodus: (a) 3D NLTE spektro linijų profilių priderinimo, ir (b) ekvivalentinių pločių priderinimo metodus. Rezultatai gauti naudojant WCLC ir Pereira spektrus. Kiekvienos O I tripleto linijos atveju pateikiamos gausos paklaidos, gaunamos taikant konkretų priderinimo metodą, vidutinės deguonies gausos vertės paklaida yra gausos standartinis nuokrypis.

Spektras:	$A(\text{O})_{\odot}$		$S_{\text{H}}$	
	WCLC	Pereira	WCLC	Pereira
Spektro linijų profilių priderinimo metodas				
777,2	$8,748 \pm 0,002$	$8,759 \pm 0,004$	$1,44 \pm 0,03$	$1,64 \pm 0,07$
777,4	$8,735 \pm 0,002$	$8,769 \pm 0,004$	$1,22 \pm 0,03$	$1,67 \pm 0,07$
777,5	$8,756 \pm 0,002$	$8,771 \pm 0,003$	$1,58 \pm 0,04$	$1,85 \pm 0,07$
Vidurkis	$8,747 \pm 0,010$	$8,766 \pm 0,006$	$1,41 \pm 0,19$	$1,72 \pm 0,12$
Spektro linijų ekvivalentinių pločių priderinimo metodas				
777,2	$8,763 \pm 0,018$	$8,765 \pm 0,014$	$1,63 \pm 0,35$	$1,67 \pm 0,25$
777,4	$8,743 \pm 0,021$	$8,772 \pm 0,013$	$1,28 \pm 0,33$	$1,69 \pm 0,25$
777,5	$8,757 \pm 0,017$	$8,776 \pm 0,010$	$1,56 \pm 0,36$	$1,96 \pm 0,26$
Vidurkis	$8,754 \pm 0,010$	$8,771 \pm 0,006$	$1,49 \pm 0,19$	$1,77 \pm 0,17$

tyta deguonies gausa Saulės fotosferoje,  $A(\text{O})_{\odot} = 8,76 \pm 0,02$  ir daugiklis, kontroliuojantis susidūrimų tarp O I ir H I efektyvumą,  $S_{\text{H}} = 1,6 \pm 0,2$ . Skirtumo tarp mūsų gautos  $A(\text{O})_{\odot}$  ir Pereira et al. (2009b) vertės, siekiančio 0.1 dex, kilmė nėra aiški. Gali būti, kad juos lemia skirtumai tarp tyrėjų grupių naudotų atmosferos modelių, deguonies atomo modelių arba spektro sintezės paketų.

## Konvekcija raudonųjų milžinių atmosferose: molekulių spektro linijų formavimasis

Anglis, azotas ir deguonis (CNO elementai) yra svarbūs cheminiai elementai, kurių gausos įverčiai žvaigždžių atmosferose yra naudojami tiriant ankstyvosios Galaktikos raidą. Šių elementų atominių spektro linijų, registruojamų optinėje spektro srityje, skaičius yra mažas, jos yra silpnos ir nėra stebimos mažo metalingumo žvaigždžių ( $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ ) spektruose. Tokiu atveju, šių elementų gausą galima įvertinti tik analizuojant molekulių (pvz., CH, CO, C<sub>2</sub>, NH, CN ir OH) spektro linijas. Tyrimų, kuriuose buvo naudojami 3D hidrodinaminiai STAGGER atmosferų modeliai (Collet et al. 2007), rezultatai parodė, kad CH, NH ir OH molekulių spektro linijos yra labai jautrios konvekcijos efektams, kurie sustiprina šių molekulių spektro linijas. Siekiant atlikti išsamesnę šios problemos analizę, disertacijoje buvo tiriama konvekcijos įtaka skirtingų molekulių, kurias sudaro bent vienas CNO elemento atomas, spektro linijų formavimuisi. Tyrime buvo naudojami 3D hidrodinaminiai CO<sup>5</sup>BOLD, suvidurkinti ⟨3D⟩ ir 1D hidrostatiniai LHD raudonųjų milžinių atmosferų modeliai (2 lentelė).

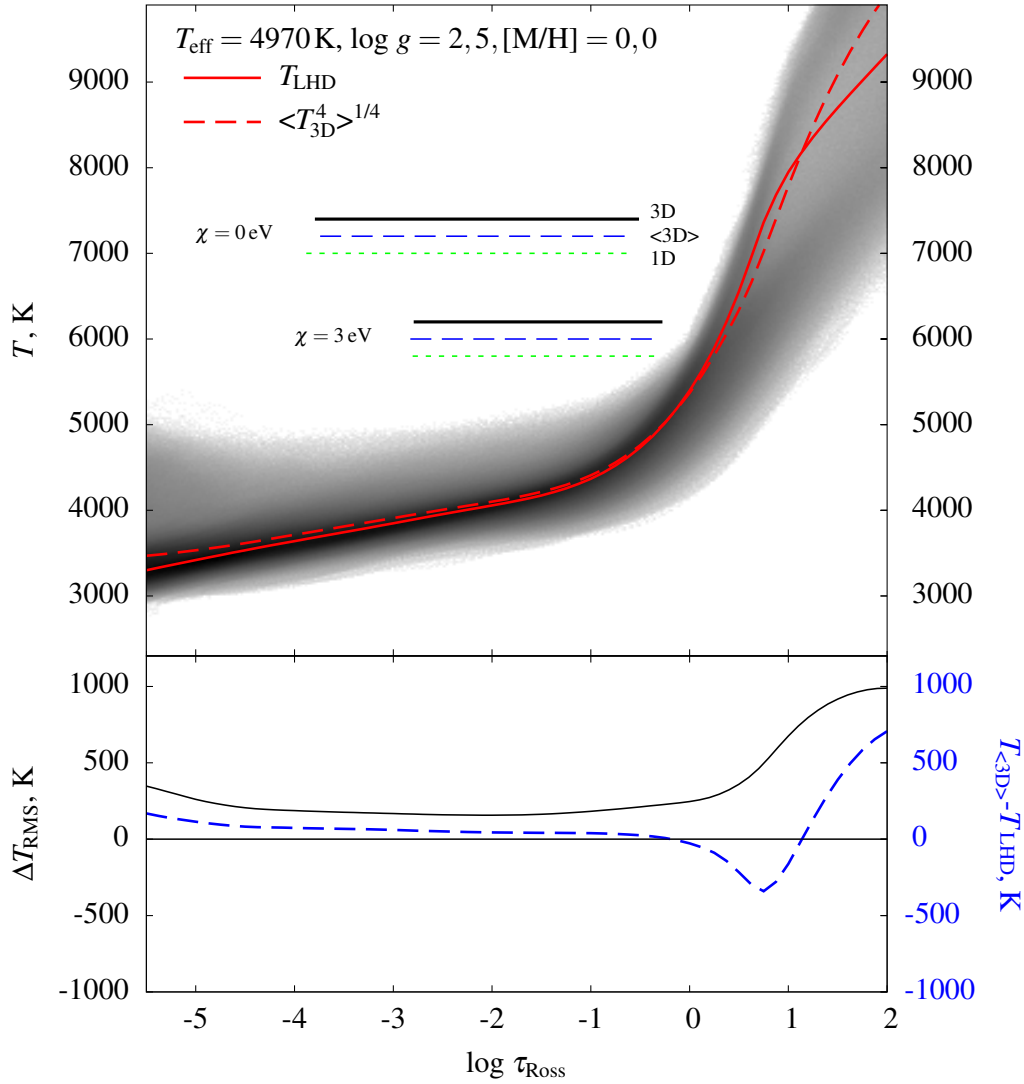


**4 pav.** Molekulių spektro linijų gausos pataisų priklausomybė nuo metalingumo:  $\Delta_{3D-(3D)}$  (kairėje),  $\Delta_{(3D)-1D}$  (viduryje) ir  $\Delta_{3D-1D}$  (dešinėje). Pataisos buvo apskaičiuotos keturiems sužadavimo potencialams (žr. dešinėje). Paveiksle rodomos gausos pataisos spektro linijoms, apskaičiuotoms ties mėlyniausiais tyrime nagrinėtais bangos ilgiais (nurodyti viršutiniame vidurinio stulpelio paveiksle).

Naudojant minėtus atmosferų modelius ir Linfor3D programų paketą, buvo apskaičiuotos molekulių spektro linijų augimo kreivės ir nustatytos  $\Delta_{3D-1D}$ ,  $\Delta_{3D-(3D)}$  ir  $\Delta_{(3D)-1D}$  gausos pataisos CH, CO, C<sub>2</sub>, NH, CN ir OH molekulių spektro linijoms. Šiame darbe buvo tyrinėtos silpnos spektro linijos, kurių formavimuisi greičių laukas žvaigždės atmosferoje nedaro didelės įtakos. Darbe buvo naudoti fiktyvūs (t.y., ne realūs) spektro linijų parametrai (bangos ilgis, sužadavimo potencialas, osciliatoriaus stipris). Tai mums leido ištirti konvekcijos įtaką spektro linijų formavimuisi plačioje spektro linijų parametru erdvėje, nustatyti, kaip keičiasi šių efektų dydis

**2 lentelė.** Tyrime naudotų CO<sup>5</sup>BOLD ir LHD atmosferų modelių charakteristikos: modelio pavadinimas, efektinė temperatūra, gravitacijos pagreičio logaritmas, metalingumas, 3D hidrodinaminio atmosferos modelio matmenys, 3D hidrodinaminio atmosferos modelio skaitmeninės gardelės matmenys  $n_x \times n_y \times n_z$ , kur  $n_x$ ,  $n_y$  ir  $n_z$  yra modelio taškų skaičius atitinkamai x, y ir z kryptimis.

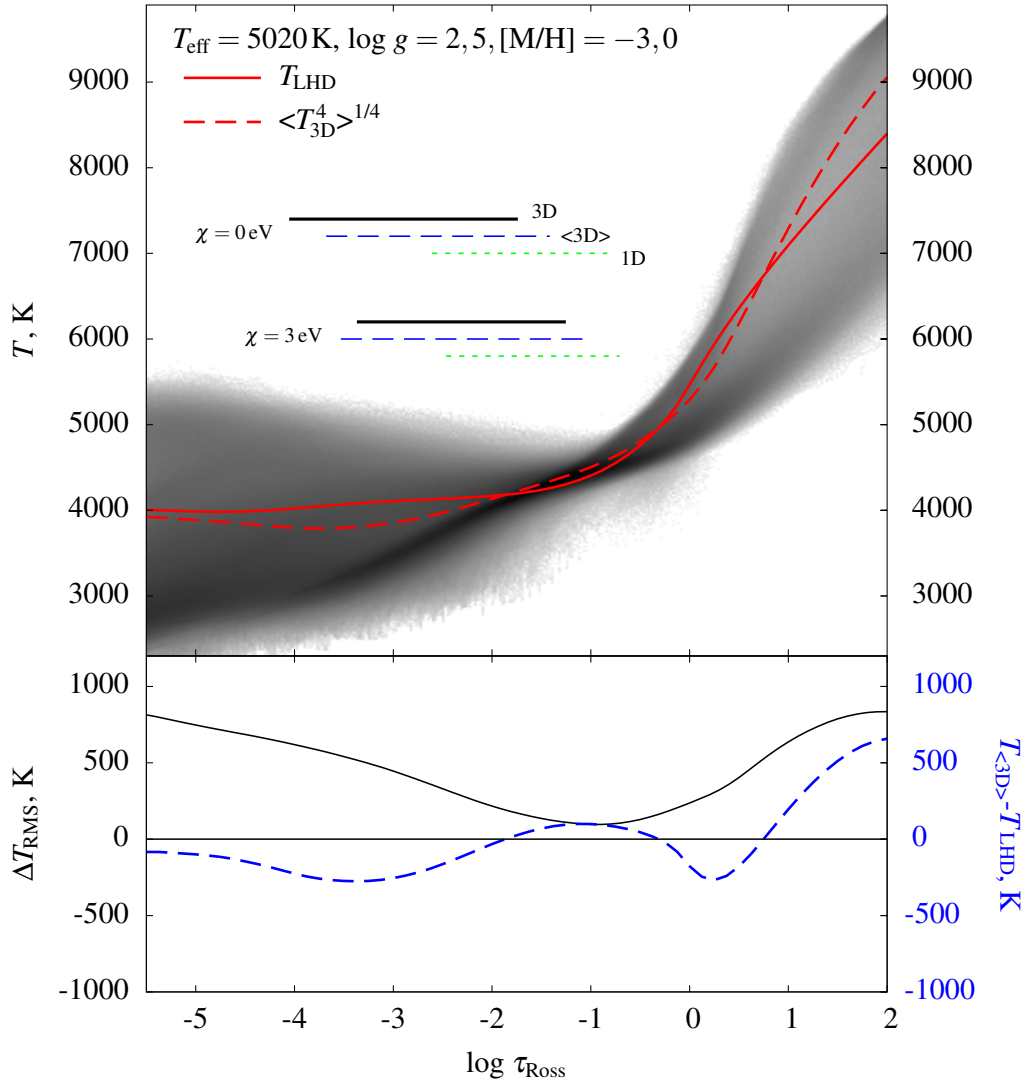
Pavadinimas	$\langle T_{\text{eff}} \rangle$ K	$\log g$ [cgs]	[Fe/H]	Tinklelio matmenys Mm	Skyra $n_x \times n_y \times n_z$
d3t50g25mm00	4970	2,5	0	573×573×243	160×160×200
d3t50g25mm10	4990	2,5	-1	573×573×245	160×160×200
d3t50g25mm20	5020	2,5	-2	584×584×245	160×160×200
d3t50g25mm30	5020	2,5	-3	573×573×245	160×160×200



**5 pav.** Viršuje: temperatūros priklausomybė nuo Rosseland'o optinio gylio,  $\log \tau_{\text{Ross}}$ , raudonosios milžinės atmosferos modeliuose, kurių atmosferos parametrai yra  $T_{\text{eff}}/\log g/[M/H] = 4970/2,5/0,0$ : 3D hidrodinaminiam (tankio grafikas), suvidurkintame  $\langle 3D \rangle$  (punktyrinė linija), ir 1D hidrostatiniam (ištisinė linija). Apačioje: horizontalių temperatūros fliktuacijų,  $\Delta T_{\text{RMS}}$ , 3D hidrodinaminiam atmosferos modelyje (ištisinė linija), bei skirtumo tarp suvidurkinto  $\langle 3D \rangle$  ir 1D hidrostatinio atmosferų modelių (punktyrinė linija) priklausomybė nuo  $\tau_{\text{Ross}}$ .

priklausomai nuo konkrečios molekulės linijos parametrų.

Trumpiausio tirta bangos ilgio molekulių linijų 3D–1D gausos pataisos parodytos 4 pav. 3D hidrodinaminiai atmosferos modeliai prognozuoja stipresnes spektro linijas, todėl  $\Delta_{3D-1D}$  gausos pataisos yra neigiamos. Gausos pataisos mažėja didėjant spektro linijos sužadavimo potencialui: aukštesnio sužadavimo potencialo spektro linijos formuojasi giliau atmosferoje, kur horizontalios temperatūros fliktuacijos yra mažesnės (5, 6 pav.). Gausos pataisos taip pat stipriai priklauso nuo žvaigždės atmosferos modelio metalingumo ir yra didžiausios (labiausiai neigiamos) kai metalingumas mažiausias: pvz., CO molekulės atveju gausos pataisa yra  $\Delta_{3D-1D} = -1,8$  dex. Verta



**6 pav.** Tas pat kaip ir 5 pav., bet atmosferos modeliui, kurio  $T_{\text{eff}}/\log g/[M/H] = 5020/2,5/-3,0$ .

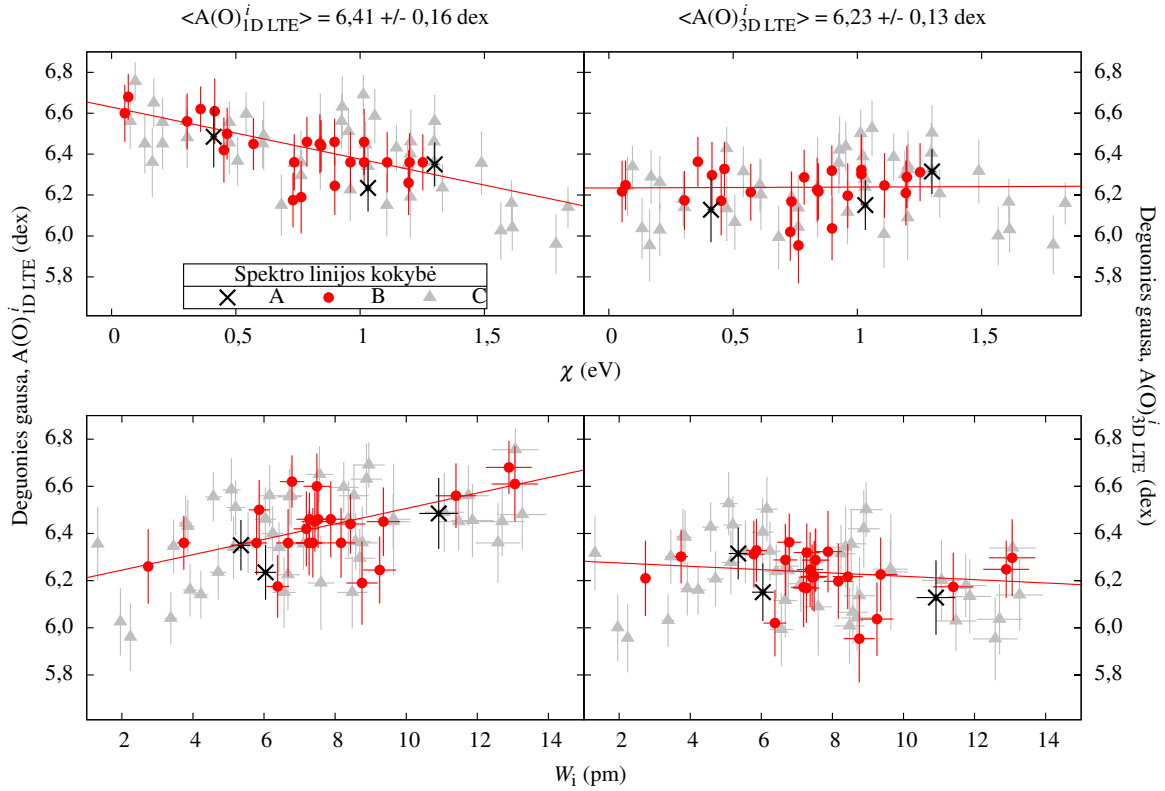
pastebėti, kad  $\Delta_{3D-1D}$  gausos pataisos vertę lemia didelės  $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle}$  gausos pataisos. Tai reiškia, kad horizontalios temperatūros fluktuacijos daro didelę įtaką molekulių linijų formavimuisi. Taip yra todėl, kad molekulės formuojasi išoriniuose žvaigždės atmosferos sluoksniuose, kur temperatūra yra žemiausia, o šioje atmosferos dalyje horizontalios temperatūros fluktuacijos yra didžiausios ir todėl jos daro didžiausią įtaką molekulių spektro linijų stipriui (6 pav.,  $\log \tau_{\text{Ross}} < -3$ ).

# Deguonies gausa mažo metalingumo raudonosios milžinės HD 122563 atmosferoje, nustatyta panaudojant OH UV spektro linijas

Deguonies gausos matavimai mažo metalingumo žvaigždėse yra sudėtingi dėl kelių priežasčių: stiprių spektro linijų, kurios būtų tinkamos deguonies gausos tyrimams, skaičius optinėje bangos ilgių srityje yra mažas ir dažnai, naudojant 1D LTE spektro analizės metodiką ir skirtingas deguonies spektro linijas, yra nustatomos skirtingos deguonies gausos vertės (žr. pvz., Meléndez & Barbuy 2002; Barbuy et al. 2003; Aoki 2015). Dėl to mūsų žinios apie deguonies gausos tendencijas (pvz., sąryšis tarp  $[O/Fe]$  ir  $[Fe/H]$ ) mažo metalingumo žvaigždėse yra fragmentiškos. Kadangi konvekcija daro pastebimą įtaką spektro linijų formavimuisi žvaigždžių atmosferose, taikant 3D hidrodinaminius atmosferų modelius galima gauti tikslesnius, patikimesnius ir, tikėtina, geriau tarpusavyje derančius deguonies gausos įverčius. Siekiant suprasti konvekcijos efektų svarbą OH UV spektro linijų formavimuisi, buvo atliktas deguonies gausos raudonosios milžinės HD 122563 atmosferoje tyrimas, šiam tikslui naudojant OH UV spektro linijas.

Deguonies 1D LTE ir 3D LTE gausa buvo nustatyta taikant 1D hidrostatinius ATLAS9, LHD ir 3D hidrodinaminius CO<sup>5</sup>BOLD žvaigždžių atmosferų modelius. Tyrimui buvo panaudotas aukštos skyros bei aukšto signalo/triukšmo santykio raudonosios milžinės HD 122563 spektras ( $R = 60\,000$ ,  $S/N = 50 - 200$ ). Deguonies 1D LTE gausa buvo nustatyta taikant  $\chi^2$  minimizavimo metodiką, nustatyta vidutinė 1D LTE deguonies gausos vertė  $A(O) = 6,41 \pm 0,16$ . Analizuojant gautus rezultatus pastebima gan aiški 1D LTE deguonies gausos priklausomybė nuo spektro linijos sužadavimo potencialo ir linijos ekvivalentinio pločio (7 pav.). Kadangi deguonies gausa, nustatoma naudojant skirtingas OH UV spektro linijas, turėtų būti vienoda, gautas rezultatas gali rodyti, jog deguonies gausos tyrimams naudoti 1D hidrostatiniai atmosferų modeliai nėra pakankamai realistiški.

Naudojant 3D hidrodinaminius CO<sup>5</sup>BOLD ir LHD atmosferų modelius, visoms tyrimė naudotoms OH UV spektro linijoms buvo apskaičiuotos 3D–1D gausos pataisos,  $\Delta_{3D-1D}$ , bei, taikant gautas pataisas, nustatyta deguonies 3D LTE gausa. Vidutinė deguonies 3D LTE gausa, nustatyta naudojant 71 OH UV liniją, yra  $\langle A(O) \rangle = 6,23 \pm 0,13$ , o 3D–1D gausos pataisos kinta intervale nuo  $\approx -0,45$  dex



**7 pav.** Deguonies gausos, nustatytos taikant 1D hidrostatinis ATLAS9 atmosferų modelius (kairėje), ir gausos, gautos pritaikius 3D–1D gausos pataisą (dešinėje). Grafike pavaizduota deguonies gausos priklausomybė nuo spektro linijos parametru – sužadintimo potencialo ( $\chi$ , viršutinėse paveikslo dalyse) ir linijos ekvivalentinio pločio ( $W_i$ , apatinėse paveikslo dalyse). Skirtingi simboliai žymi skirtingos kokybės spektro linijas, kur A-klasės spektro linijos yra aukščiausios kokybės (stiprios arba arti jų nėra persiklojančių spektro linijų).

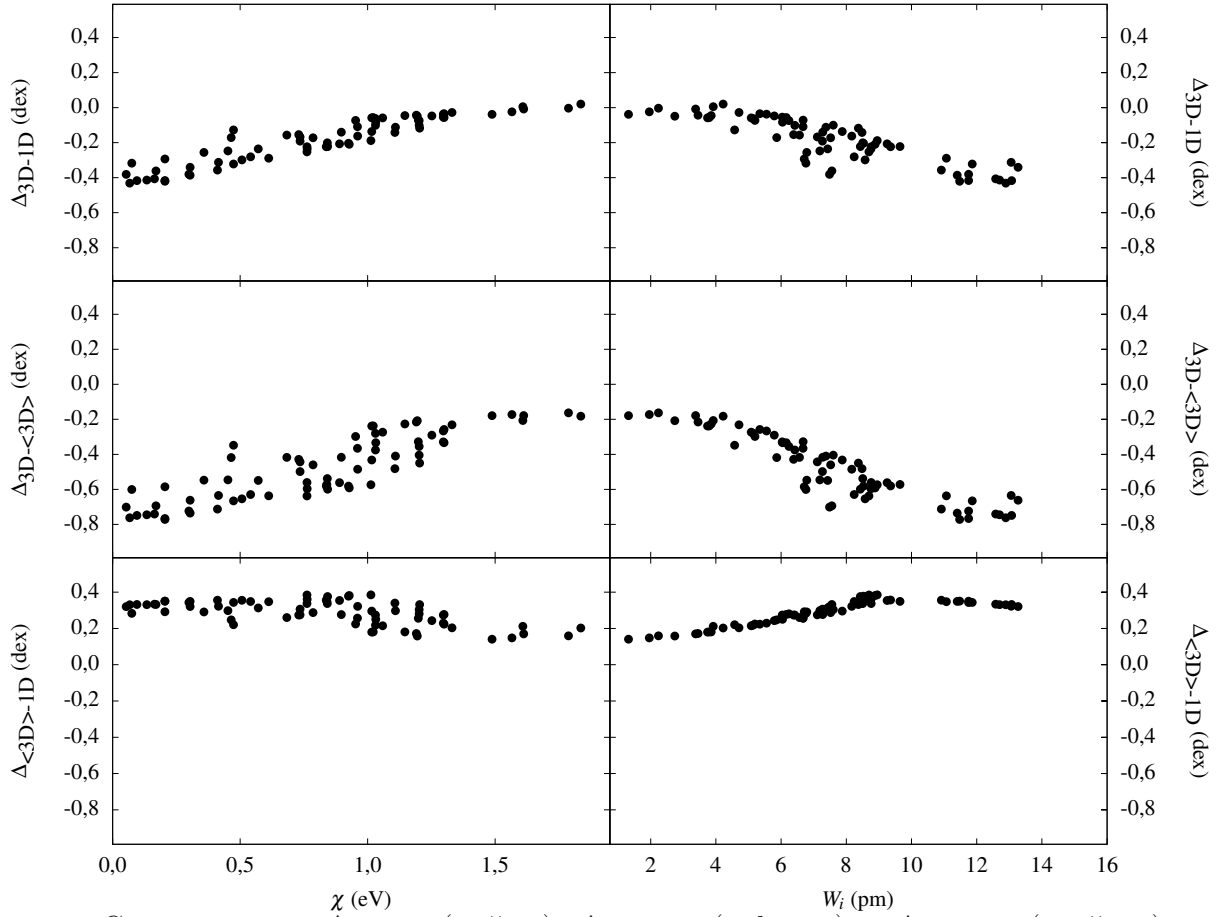
( $\chi \approx 0$  eV) iki  $\approx 0,0$  dex ( $\chi \approx 1,5$  eV). Gauti 3D LTE deguonies gausos įverčiai nepriklauso nuo spektro linijų parametru.

3 lentelėje pateikiami deguonies gausos įverčiai, gauti naudojant OH UV, OH IR ir draustinę [O I] spektro linijas. Deguonies 3D LTE gausos, nustatytos naudojant OH UV ir OH IR linijas, sutampa kiek geriau, nei šias linijas naudojant gauti 1D LTE gausos įverčiai. Kita vertus, pastebimas didesnis 3D LTE gausos, nustatytos naudojant OH UV linijas, skirtumas nuo gausos, įvertintos naudojant draustinę atominio deguonies liniją: 1D LTE atveju šis skirtumas yra 0,13 dex, tuo tarpu 3D LTE atveju

**3 lentelė.** Deguonies 1D LTE ir 3D LTE gausa raudonosios milžinės HD 122563 atmosferoje, nustatyta naudojant OH UV, OH IR ir [O I] spektro linijas. Deguonies gausos vertės, gautos naudojant OH IR spektro linijas, paimtos iš Dobrovolskas et al. (2015), o gausos vertė nustatyta, naudojant draustinę [O I] spektro liniją - iš Spite et al. (2005).

	A(O)	
	1D LTE	3D LTE
OH UV	$6,41 \pm 0,16$	$6,23 \pm 0,13$
OH IR	$6,63 \pm 0,10$	$6,39 \pm 0,11$
[O I]	$6,54 \pm 0,15$	$6,53 \pm 0,15$





**8 pav.** Gausos pataisų  $\Delta_{3D-1D}$  (viršuje),  $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle}$  (viduryje) ir  $\Delta_{\langle 3D \rangle-1D}$  (apačioje), apskaičiuotų skirtingoms OH UV linijoms, priklausomybė nuo linijos sužadavimo potencialo,  $\chi$  (kairėje), ir linijos ekvivalentinio pločio,  $W_i$  (dešinėje).

jis padidėja iki 0,30 dex. Tikslī šių skirtumų priežastis nėra žinoma, tačiau tikėtina, kad juos gali lemti NLTE efektai, į kuriuos šiame tyrime nebuvo atsižvelgiama.

Siekiant geriau ištirti OH UV linijų formavimosi šios raudonosios milžinės atmosferoje ypatumus, buvo analizuojamos gausos pataisos  $\Delta_{3D-1D}$  bei jos komponentų,  $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle}$  ir  $\Delta_{\langle 3D \rangle-1D}$ , dydį ir sąsajas su spektro linijos parametrais lemiančios fizinės priežastys (8 pav.). Tyrimo metu nustatyta, kad šias tendencijas lemia keli efektai:

1. Mažiausio sužadavimo potencialo spektro linijos yra stipriausios, jos formuojasi išoriniuose žvaigždės atmosferos sluoksniuose, kur horizontalios termodinamių ir hidrodinamių dydžių fluktuacijos yra didžiausios. Spektro linijos, apskaičiuotos panaudojant 3D hidrodinaminį atmosferos modelį, yra stipresnės nei prognozuojamos taikant 1D hidrostatinį modelį, todėl  $\Delta_{3D-\langle 3D \rangle}$  pataisa yra neigiama. Didėjant spektro linijų sužadavimo potencialui (ir mažėjant linijos ekvivalentiniam pločiui), jos formuojasi vis giliau, todėl šių linijų gausos pataisos  $\Delta_{3D-1D}$  vertė pamažu artėja link nulio.

2. Gausos pataisos  $\Delta_{\langle 3D \rangle - 1D}$  priklausomybė nuo  $W_i$  atsiranda dėl to, kad suvidurkintas  $\langle 3D \rangle$  ir 1D hidrostatinis atmosferų modeliai prognozuoja skirtingas kontinuumo srauto vertes UV spektro srityje. Šie skirtumai daro įtaką augimo kreivių tiesinių dalių posvyriams, o dėl skirtingų  $\langle 3D \rangle$  ir 1D augimo kreivių posvyrių atsiranda priklausomybė tarp  $\Delta_{\langle 3D \rangle - 1D}$  ir  $W_i$ . Skirtingai nuo  $\Delta_{3D - \langle 3D \rangle}$  pataisų, kurių dydį nulemia horizontalios fliktuacijos,  $\Delta_{\langle 3D \rangle - 1D}$  pataisoms didžiausią įtaką daro temperatūrų skirtumai atmosferos vietose, kur formuojasi žvaigždės ištinis spektras.

Apibendrinant gautus rezultatus galima teigti, kad OH UV spektro linijų formavimasis yra kompleksiškas ir įvairialypis procesas, kurį adekvačiai galima modeliuoti tik taikant 3D hidrodinaminis žvaigždžių atmosferų modelius.

## Pagrindiniai disertacijoje gauti rezultatai

1. Taikant 3D NLTE deguonies gausos analizės metodiką bei panaudojant O I tripleto ( $\lambda = 777$  nm) spektro linijas, stebimas Saulės spektre, nustatyta deguonies gausos vertė Saulės atmosferoje  $A(O) = 8,76 \pm 0,02$ . Teorinės O I tripleto linijos, apskaičiuotos naudojant 3D hidrodinaminį atmosferos modelį, žymiai geriau sutampa su Saulės spektre stebimomis linijomis (redukuota  $\chi^2$  vertė  $\approx 1$ ), nei linijos, kurių profiliai apskaičiuojami naudojant 1D hidrostatinį atmosferos modelį (redukuota  $\chi^2$  vertė siekia 5–15).
2. Konvekcijos sukeltos erdvinės (horizontalios) temperatūros fliktuacijos daro didelę įtaką molekulių spektro linijų formavimuisi milžinių atmosferose. Didžiausios 3D–1D gausos pataisos yra būdingos mažo sužadavimo potencialo linijoms, kurios formuojasi mažiausio metalingumo ( $[M/H] = -3$ ) žvaigždžių atmosferose. Be to, gausos pataisos vertės skirtingų molekulių linijoms yra nevienodos: pvz., CH spektro linijoms 3D–1D gausos pataisa yra lygi  $-0,2$  dex, CO lygi  $-1,8$  dex (abiem atvejais  $[M/H] = -3,0$ ,  $\chi = 0$  eV).
3. Deguonies 3D LTE gausa nustatyta naudojant 3D hidrodinaminį atmosferos modelį ir OH UV linijas mažo metalingumo raudonosios milžinės HD 122563 atmosferoje yra  $A(O) = 6,23 \pm 0,13$ . Nors 1D LTE atveju deguonies gausos, nustatytos panaudojant skirtingais parametrais (sužadavimo potencialas, ekvivalentinis plotis) charakterizuojamas OH UV linijas, žymiai skiriasi, deguonies 3D LTE gausa nepriklauso nuo spektro linijų, kurios buvo naudojamos nustatant gausą, parametrų.

# Summary

The realism of spectroscopic abundance determination depends directly on the realism of physical assumptions used in the model atmospheres and spectral synthesis tools. The vast majority of stellar abundances in late-type stars are determined using classical 1D (plane-parallel or spherically symmetric) hydrostatic model atmospheres. It is well known however that low-mass stars exhibit granulation patterns that arise due to convective motions in their atmospheres. Although these dynamical fluid flows directly influence conditions under which stellar radiation forms, they are not properly accounted for in the 1D hydrostatic model atmospheres. This can be done in a much more realistic way by using more advanced 3D hydrodynamical model atmospheres. In a similar way, while the assumption of non-local thermodynamic equilibrium (NLTE) is becoming more and more widely used in 1D abundance analysis, it is rarely applied with the 3D hydrodynamical model atmospheres.

In this Thesis we developed a methodology that could be used to model non-local radiative transfer and, subsequently, for computing NLTE oxygen spectral line profiles using 3D hydrodynamical model atmospheres. This was done by generalizing and expanding spectral synthesis code NLTE3D and constructing a realistic model atom of oxygen. This methodology was applied for the analysis of solar intensity spectrum of O I IR triplet located near 777 nm. We also investigated the role of convection in the formation of molecular lines both theoretically (using weak fictitious lines) and by analysing high-quality spectra of the metal-poor halo giant HD 122563. The impact of convection was quantified with the aid of 3D–1D abundance corrections, i.e., the difference in the abundance of particular chemical element determined using the same spectral line of a given equivalent width,  $W$ , with the 3D hydrodynamical and 1D hydrostatic model atmospheres.

The main results of this Thesis are: (1) the NLTE3D package has undergone significant upgrade and generalization allowing to use oxygen model atom for the spectral synthesis with the CO<sup>5</sup>BOLD model atmospheres. Implementation of accelerated  $\Lambda$ -iteration (ALI) scheme allows for faster solution of the non-local radiative transfer problem; (2) a new model atom of oxygen has been constructed and implemented in NLTE3D package. The new model atom was used to determine 3D NLTE solar oxygen abundance; (3) solar oxygen abundance was determined using the updated NLTE3D package, realistic solar CO<sup>5</sup>BOLD model atmosphere and two sets of solar intensity spectra taken at different limb angles. The obtained value is  $A(\text{O}) = 8.76 \pm 0.02$ .

The solar oxygen abundance determined using 3D hydrodynamical CO<sup>5</sup>BOLD model atmosphere is higher than that determined using STAGGER model atmospheres ( $A(\text{O}) < 8.70$ ); (4) 3D–1D abundance corrections of weak molecular (CH, CO, C<sub>2</sub>, NH, CN, and OH) lines were determined using model atmospheres of stars located in the lower part of the red giant branch (RGB) at four different metallicities,  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0, -1, -2, -3$ . It was found that the 3D–1D abundance corrections become larger and increasingly more negative at lowest metallicities and line excitation potentials. The largest (and most negative) 3D–1D abundance correction was determined for the resonance lines of CO at  $[\text{Fe}/\text{H}] = -3$  and reach  $-1.8$  dex. (5) it was found that the cool layers of the 3D hydrodynamical model atmosphere play an important role in the formation of molecular lines. Since the low temperatures that are encountered in the 3D hydrodynamical model atmospheres are not present in the classical 1D models, we found that realistic modelling of molecular line formation could not be achieved using classical model atmospheres; (6) mean oxygen abundance in the atmosphere of the metal-poor halo star HD 122563 determined using OH lines located in the UV part of the spectrum (310–330 nm) and the 1D hydrostatic ATLAS9 model atmospheres is  $A(\text{O}) = 6.41 \pm 0.16$ . The mean 3D LTE oxygen abundance determined using classical LHD and 3D hydrodynamical CO<sup>5</sup>BOLD model atmospheres is  $A(\text{O}) = 6.23 \pm 0.13$ . 1D LTE oxygen abundances showed significant trends with line excitation potential and strength. However, oxygen abundances corrected for the 3D-effects using 3D–1D LTE abundance corrections did not exhibit such trends; (7) the 3D–1D oxygen abundance corrections in the atmosphere of HD 122563 were different for different OH UV lines and their size was found to be correlated with the line excitation potential and/or line strength and covered a range between 0.45 dex at 0 eV to 0.0 dex at 1.5 eV; (8) oxygen-to-iron ratio in the atmosphere of HD 122563 is  $[\text{O}/\text{Fe}] = 0.07 \pm 0.13$  dex and falls at the lower boundary of oxygen abundance spread observed at this metallicity and does not support the high over-abundance ( $[\text{O}/\text{Fe}] \approx 1.0$ ) of oxygen in the metal-poor stars.

## Literatūros šaltinių sąrašas

- Aoki, W. 2015, ApJ, 811, 64
- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., et al. 2004, A&A, 417, 751
- Barbuy, B., Meléndez, J., Spite, M., et al. 2003, ApJ, 588, 1072
- Basu, S., & Antia, H. M. 2008, Phys. Rep., 457, 217
- Bessell, M. S., Collet, R., Keller, S. C., et al. 2015, ApJ, 806, 16
- Caffau, E., & Ludwig, H.-G. 2007, A&A, 467, L11
- Caffau, E., Ludwig, H.-G., Steffen, M., et al. 2008, A&A, 488, 1031
- Cayrel, R., Steffen, M., Chand, H., et al. 2007, A&A, 473, L37
- Collet, R., Asplund, M., & Trampedach, R. 2007, A&A, 469, 687
- Dobrovolskas, V., Kučinskas, A., Steffen, M., et al. 2013, A&A, 559, A102
- Dobrovolskas, V., Kučinskas, A., Bonifacio, P., et al. 2015, A&A, 576, A128
- Drawin, H. W. 1969, ZPhy, 225, 483
- Freytag, B., Steffen, M., Ludwig, H.-G., et al. 2012, Journ. Comp. Phys., 231, 919
- Grevesse, N., & Sauval, A. J. 1998, Space Sci. Rev., 85, 161
- Holweger, H., & Mueller, E. A. 1974, Sol. Phys., 39, 19
- Kurucz, R. L. 1970, SAOSR, 309
- Lambert, D. L. 1993, Physica Scripta Volume T, 47, 186
- Livingston, W., Wallace, L., White, O. R., & Giampapa, M. S. 2007, ApJ, 657, 1137
- Magic, Z., Collet, R., Asplund, M., et al. 2013, A&A, 557, A26
- Meléndez, J., & Barbuy, B. 2002, ApJ, 575, 474
- Neckel, H., & Labs, D. 1984, Sol. Phys., 90, 205
- Neckel, H. 1999, Sol. Phys., 184, 421
- Pereira, T. M. D., Asplund, M., & Kiselman, D. 2009, A&A, 508, 1403

- Prakapavičius, D., Kučinskas, A., Dobrovolskas, V., et al. 2017, *A&A*, 599, A128
- Spite, M., Cayrel, R., Plez, B., et al. 2005, *A&A*, 430, 655
- Stasińska, G., Prantzos, N., Meynet, G., et al. 2012, *EAS Publications Series*, 54, 255
- Steenbock, W., & Holweger, H. 1984, *A&A*, 130, 319
- Steffen, M., Prakapavičius, D., Caffau, E., et al. 2015, *A&A*, 583, A57
- Villante, F. L., Serenelli, A. M., Delahaye, F., & Pinsonneault, M. H. 2014, *ApJ*, 787, 13
- Vögler, A., Bruls, J. H. M. J., & Schüssler, M. 2004, *A&A*, 421, 741

# Dainius Prakapavičius

## *Curriculum Vitae*

Date and place of birth: 30 March 1988, Lithuania

E-mail: dainius.prakapavicius@tfai.vu.lt

### **Education:**

M.S. in Physics and Astronomy at University of Liverpool 2006-2010

Ph.D. *studies* in Physical Sciences, Physics (02 P) at Vilnius University

2010-2014

### **Professional improvement:**

- Participation in CO<sup>5</sup>BOLD workshop, 2016
- Participation in CO<sup>5</sup>BOLD workshop, 2012
- NordForsk summer school, Lithuania, 2012
- NEON'11 summer school, Lithuania, 2011