

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

ARNAS DRAZDAUSKAS

EVOLIUCINIAI ANGLIES IR AZOTO GAUSŲ POKYČIAI MAŽOS MASĖS METALINGOSE  
ŽVAIGŽDĖSE

Daktaro disertacijos santrauka  
Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2016

Daktaro disertacija rengta 2012–2016 metais Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institute

Mokslinė vadovė:

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

Disertacija bus ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas: Habil. dr. **Kazimieras Zdanavičius** (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Nariai:

Prof. habil. dr. **Ilfan F. Bikmaev** (Kazanės universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Prof. habil. dr. **Gediminas Gaigalas** (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Dr. **Algirdas Kazlauskas** (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

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

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2016 m. gruodžio mėn. 2 d. 14:00 val. Nacionaliniame fizinių ir technologijos mokslų centre, D 401 auditorijoje.

Adresas: Saulėtekio al. 3, Vilnius, Lietuva.

Disertaciją galima peržiūrėti VU interneto svetainėje adresu:

<http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

VILNIUS UNIVERSITY  
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

ARNAS DRAZDAUSKAS

EVOLUTIONARY CARBON AND NITROGEN ABUNDANCE ALTERATIONS IN LOW  
MASS METAL-ABUNDANT STARS

Summary of Doctoral Dissertation  
Physical Sciences, Physics (02 P)

Vilnius, 2016

Doctoral Dissertation was completed during 2012–2016 at Vilnius University,  
Institute of Theoretical Physics and Astronomy

Scientific supervisor:

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

Doctoral Dissertation will be defended at the Vilnius University Doctoral Dissertation Committee in Physical Sciences

Chairman: Habil. dr. **Kazimieras Zdanavičius** (Vilnius University, Physical Sciences – 02 P)

Members:

Prof. habil. dr. **Ilfan Bikmaev** (Kazan Federal University, Physical Sciences – 02 P)

Prof. habil. dr. **Gediminas Gaigalas** (Vilnius University, Physical Sciences – 02 P)

Dr. **Algirdas Kazlauskas** (Vilnius University, Physical Sciences – 02 P)

Prof. dr. **Paulius Miškinis** (Vilnius Gediminas Technical University, Physical Sciences – 02 P).

Doctoral Dissertation will be defended at the public meeting of the Vilnius University Doctoral Dissertation Committee in Physical Sciences held at National Centre of Physical and Technological Sciences, auditorium D 401, on the 2nd of December 2016, 14:00.

Address: Saulėtekio av. 3, Vilnius, Lithuania.

The Dissertation is available at the VU website:

<http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

# Turinys

<b>Įvadas</b>	<b>7</b>
Tyrimo tikslai . . . . .	8
Uždaviniai . . . . .	8
Mokslinis naujumas . . . . .	9
Praktinė svarba . . . . .	9
Ginamieji rezultatai ir teiginiai . . . . .	10
Asmeninis indėlis . . . . .	10
Publikacijos disertacijos tema . . . . .	11
Pranešimai konferencijose disertacijos tema . . . . .	12
Disertacijos struktūra . . . . .	14
<b>1 Duomenys apie spiečius</b>	<b>15</b>
1.1 Padrikųjų spiečių apžvalga . . . . .	16
1.1.1 Collinder 261 . . . . .	16
1.1.2 Melotte 66 . . . . .	16
1.1.3 NGC 2324 . . . . .	16
1.1.4 NGC 2477 . . . . .	17
1.1.5 NGC 3960 . . . . .	17
1.1.6 NGC 4609 . . . . .	17
1.1.7 NGC 4815 . . . . .	18
1.1.8 NGC 5316 . . . . .	18
1.1.9 NGC 6705 . . . . .	18
1.1.10 Trumpler 20 . . . . .	19
1.2 Stebėjimai . . . . .	19
<b>2 Analizės metodai</b>	<b>20</b>
2.1 Diferencialinė analizė . . . . .	20
2.2 Ekvivalentinių plokščių metodas . . . . .	20
2.3 Spektrų sintezės metodas . . . . .	21
2.4 Žvaigždžių atmosferų modeliai. . . . .	21
2.5 Programinė įranga. . . . .	21
2.6 Pagrindinių atmosferos parametrų nustatymas . . . . .	22
2.7 Sintetinių spektrų modeliavimas . . . . .	22
2.8 Paklaidų įvertinimas . . . . .	24
<b>3 Rezultatai</b>	<b>25</b>
3.1 Pagrindiniai atmosferų parametrai . . . . .	25

3.2 Evoliuciniai cheminės sudėties efektai . . . . .	25
<b>4 Pagrindiniai rezultatai ir išvados</b>	<b>32</b>
<b>Literatūra</b>	<b>34</b>
<b>Summary</b>	<b>39</b>
<b>Trumpos žinios apie autorių</b>	<b>41</b>

# Įvadas

Padrikieji spiečiai dažnai naudojami astrofizikoje tyrinėjant žvaigždžių evoliuciją. Šiuos spiečius sudaro grupės žvaigždžių, kurios susiformavo iš vieno dulkių ir dujų debesies. Tai reiškia, kad spiečių sudarančios žvaigždės yra panašaus amžiaus, panašios pirminės cheminės sudėties bei nutolusios panašiu atstumu nuo Saulės (Lada ir Lada 2003; Pallavicini 2003). Padrikieji spiečiai yra gravitacijos susietų kūnų sistema. Žvaigždės, priklausančios padrikiesiems spiečiams, išsidėsčiusios pakankamai netoli viena nuo kitos, ir tokių grupių skersmuo yra daug mažesnis, lyginant su jų atstumu nuo Saulės. Tokius spiečius gali sudaryti nuo kelių dešimčių iki kelių tūkstančių žvaigždžių ir visi jie juda kaip vienas darinys Galaktikos disku. Šiuo metu yra identifikuota apie 2100 padrikųjų spiečių, tačiau stebėti yra tik pusė iš jų.

Turint keletą panašių objektų galima juos tyrinėti su didesniu tikslumu ir statistiškai įvertinti gautus rezultatus. Atstumas, amžius ir kiti parametrai gali būti įvertinti daug tiksliau, turint žvaigždžių grupę negu vieną izoliuotą objektą. Tačiau kiekviena žvaigždė vis tiek gali būti vertinama kaip atskiras objektas ir jeigu pirminė žvaigždžių sudėtis buvo daugmaž identiška, tuomet bet kokie šios sudėties skirtumai tarp objektų, stebimi šiuo metu, gali būti priskirti individualiose žvaigždėse vykstančių procesų įtakai. Ši savybė panaudota ne viename padrikųjų spiečių tyrime (Gilroy 1989; Gilroy ir Brown 1991; Luck 1994; Gonzalez ir Wallerstein 2000; Tautvaišienė ir kt. 2000, 2005; Origlia ir kt. 2006; Smiljanic ir kt. 2009; Mikolaitis ir kt. 2010, 2011a,b, 2012 ir kt.)

Šio darbo pagrindinis tikslas yra nustatyti žvaigždžių evoliucijos eigoje vykstančio cheminio maišymosi įtaką anglies ir azoto gausoms žvaigždžių atmosferose. Anglies ir azoto gausų, anglies ir azoto bei anglies izotopų  $^{12}\text{C}$  ir  $^{13}\text{C}$  santykių pokyčiai suteikia vertingos informacijos apie žvaigždžių viduje vykstančius fizikinius procesus. Šie pokyčiai priklauso nuo keleto faktorių: žvaigždės evoliucijos etapas, masė, metalingumas ir kt. Kita vertus, tikslios priklausomybės vis dar nėra iki galo iširtos (Chanamé ir kt. 2005; Charbonnel 2006; Cantiello ir Langer 2010; Charbonnel ir Lagarde 2010; Denissenkov 2010; Lagarde ir kt. 2011, 2012; Wachlin ir kt. 2011; Angelou ir kt. 2012; Lattanzio ir kt. 2015) ir iki šiol dar nėra identifikuoti visi procesai, galintys turėti įtakos šių elementų ir jų izotopų santykių priklausomybėms. Šiuo metu aktyviai vystomi ir teoriniai mo-

deliai, kurie aprašo cheminio maišymosi poveikį skirtingiems elementams priklausomai nuo spiečiaus posūkio iš pagrindinės sekos taško (angl. *Cluster turn-off point* - TO) masės, tačiau eksperimentinių rezultatų trūkumas stipriai stabdo šių modelių efektyvumo didinimą.

Šiame darbe mes tyrinėjame padrikuosius spiečius, kurių posūkio taško masės apima platų teorinių modelių intervalą nuo 1 iki  $6 M_{\odot}$ . Tarp tiriamųjų objektų yra du jauni padrikieji spiečiai, kurių TO masės yra  $> 5 M_{\odot}$ . Šiems spiečiams spektroskopiniai tyrimai atlikti pirmą kartą.

## Tyrimo tikslai

Pagrindinis šios disertacijos tikslas yra ištirti, kokią įtaką vidiniai maišymosi procesai turi elementų gausų pokyčiams evoliucionavusių žvaigždžių atmosferose. Klasikinis modelis aprašantis tik pirmosios drumsties maišymąsi, įvykstantį žvaigždėms pasiekus raudonųjų milžinių seką, negali paaiškinti visų stebimų  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  ir  $^{14}\text{N}$  elementų gausų pokyčių. Šiame modelyje atsižvelgiama tik į vieną vidinės medžiagos pernašos mechanizmą – konvekciją. Patys naujausi modeliai siūlo įtraukti termohalinį bei sukimosi sukeltą papildomą maišymąsi evoliucionavusiose žvaigždėse, kuris priklauso nuo žvaigždžių masės bei jų metalingumo. Šie maišymosi mechanizmai pradėti tyrinėti sąlygiškai neseniai. Pirmieji modelį kiekybiškai aprašė Charbonnel ir Lagarde (2010). Po keletos metų Lagarde ir kt. (2012) patobulino šiuos modelius, bei apskaičiavo juos skirtingiems metalingumams. Modeliai numato, kad šis papildomas maišymasis pasireikštų žvaigždėms pasiekus taip vadinamąjį raudonosios milžinių sekos (angl. *Red Giant Branch* - RGB) šviesio mazgą. Mūsų tikslas - nustatyti anglies, azoto ir deguonies gausas RGB žvaigždėse ir palyginti  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  ir C/N santykius su naujausiais teoriniais modeliais.

Papildomas šio darbo tikslas - pirmą kartą atlikti dviejų jaunų padrikųjų spiečių NGC 4609 ir NGC 5316 analizę iš aukštos skiriamosios gebos spektrų. Nustatyti jų cheminę sudėtį bei įvertinti teorinius natrio gausų modelius. Mes taip pat nustatysime pagrindinius žvaigždžių parametrus dar trims padrikiesiems spiečiams.

## Uždaviniai

- Nustatyti azoto, anglies bei deguonies gausas ir C/N bei  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  izotopų santykius padrikųjų spiečių Collinder 261, Melotte 66, NGC 2324, NGC 2477, NGC 3960,



NGC 4609, NGC 5316, NGC 4815, NGC 6705 ir Trumpler 20 žvaigždėse.

- Žvaigždžių atmosferų pagrindinių fizikinių parametrų nustatymas padrikųjų spiečių NGC 4609, NGC 4815, NGC 5316, NGC 6705 ir Trumpler 20 RGB žvaigždėse bei detali žvaigždžių, priklausančių spiečiams NGC 4609 ir NGC 5316 cheminės sudėties analizė.
- Nustatytų  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  ir  $\text{C}/\text{N}$  santykių bei natrio gausių interpretavimas bei palyginimas su teoriniais modeliais.

## Mokslinis naujumas

Nepaisant pastaruoju metu padaugėjusių tyrimų šia tema, cheminio maišymosi procesai evoliucionavusiose žvaigždėse vis dar nėra iki galo suprstas procesas. Eksperimentinių duomenų trūkumas, ypač ties didesnėmis TO masėmis, apsunkina tolimesnį teorinių modelių tobulinimą. Mūsų atlikta  $\text{C}/\text{N}$  bei  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  izotopų santykių analizė dešimties padrikųjų spiečių žvaigždėse suteikia vertingos informacijos, ypač intervale virš  $5 M_{\odot}$ , kuriame iki šiol nebuvo gauta patikimų rezultatų. Pasitelkiant stebėjimų duomenis mes įvertinome termohalinio bei sukimosi sukkelto maišymosi poveikį žvaigždėms turinčioms skirtingą TO masę.

Tarp mūsų tirtų padrikųjų spiečių yra ir du (NGC 4609 ir NGC 5316) kurie iki šiol neturėjo jokių tyrimų iš aukštos skiriamosios gebos spektrų. Žvaigždžių esančių šiuose spiečiuose metalingumas ir detali cheminė sudėtis buvo nustatyta pirmą kartą pasinaudojant spektrinės analizės metodu.

## Praktinė svarba

Maišymosi procesų, vykstančių žvaigždžių viduje, teoriniai modeliai gali būti patikrinti tik lyginant juos su stebėjimų rezultatais. Padrikųjų spiečių stebėjimų duomenys yra itin vertingi dėl juose esančių žvaigždžių panašių cheminių ir erdvinų savybių. Atlikta dešimties padrikųjų spiečių su įvairiomis TO masėmis, chemine sudėtimi bei atstumais analizė suteikia vertingos informacijos žvaigždžių evoliucijos tyrimų srityje.

## Ginamieji rezultatai ir teiginiai

- Penkių padrikųjų spiečių (NGC 4609, NGC 4815, NGC 5316, NGC 6705, Trumpler 20) 79 evoliucionavusioms žvaigždėms nustatyti pagrindiniai atmosferų parametrai, bei dviem spiečiams (NGC 4609 ir NGC 5316) nustatytos 11 cheminių elementų gausos.
- Anglies ir azoto gausos nustatytos 109 žvaigždėms, esančioms dešimtyje padrikųjų spiečių, deguonies gausa - 68 žvaigždėms devyniuose spiečiuose, C/N santykiai - 109 žvaigždėms (10 padrikųjų spiečių) bei  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  santykiai - 27 žvaigždėms septyniuose padrikuosiuose spiečiuose.
- Vidutinės  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  santykių vertės helį centre deginančiose žvaigždėse, kurių TO masės yra iki  $1.5 M_{\odot}$ , gerai sutampa su termohalinio maišymosi arba termohalinio bei sukimosi sukulto papildomo maišymosi modeliais. Žvaigždėms, kurių TO masės yra virš  $2 M_{\odot}$ , vidutinės anglies izotopų santykių vertės sutampa su klasikiniu pirmos drumsties arba termohalinio maišymosi modeliais.
- Vidutinės C/N santykių vertės spiečiams kurių TO masės mažesnės negu  $\sim 3 M_{\odot}$  gerai sutampa su termohalinio papildomo maišymosi arba pirmosios drumsties modeliais. Žvaigždėms, esančioms padrikuosiuose spiečiuose su didesnėmis TO masėmis, gauti rezultatai sutampa su modeliais, kurie įtraukia termohalinį bei sukimosi sukeltą maišymąsi, tačiau paklaidų ribose rezultatai sutampa ir su pirmosios drumsties modeliu.
- Padrikajam spiečiui NGC 3960 (posūkio taško masė apie  $2 M_{\odot}$ ) nustatytos  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  vertės yra nehomogeniškos. Šiame spiečiuje tikriausiai yra žvaigždžių, kurios yra paveiktos tiek termohalinio maišymosi, tiek sukimosi ar kitokių veiksnių, sukeliančių papildomą maišymąsi.

## Asmeninis indėlis

Autorius nustatė penkių padrikųjų spiečių žvaigždžių pagrindinius fizikinius atmosferų parametrus bei 10-ies padrikųjų spiečių žvaigždžių cheminę sudėtį. Kartu su bendraautoriais pristatė gautus rezultatus bei suformulavo išvadas.

## Publikacijos disertacijos tema

1. Cantat-Gaudin T., Vallenari A., Zaggia S., Bragaglia A., Sordo R., Drew J. E., Eisloffel J., Farnhill H. J., Gonzalez-Solares E., Greimel R., Irwin M. J., Kupcu-Yoldas A., Jordi C., Blomme R., Sampedro L., Costado M. T., Alfaro E., Smiljanic R., Magrini L., Donati P., Friel E. D., Jacobson H., Abbas U., Hatzidimitriou D., Spagna A., Vecchiato A., Balaguer-Nunez L., Lardo C., Tosi M., Pancino E., Klutsch A., Tautvaišienė G., **Drazdauskas A.**, Puzeras E., Jiménez-Esteban F., Maiorca E., Geisler D., San Roman I., Villanova S., Gilmore G., Randich S., Bensby T., Flaccomio E., Lanzafame A., Recio-Blanco A., Damiani F., Hourihane A., Jofré P., de Laverny P., Masseron T., Morbidelli L., Prisinzano L., Sacco G. G., Sbordone L., Worley C. C., *The Gaia-ESO Survey: Stellar content and elemental abundances in the massive cluster NGC 6705*, Astronomy & Astrophysics, Vol. 569, A17, 18 pp, 2014.
2. Tautvaišienė G., **Drazdauskas A.**, Mikolaitis Š., Barisevičius G., Puzeras E., Stonkutė E., Chorniy Y., Magrini L., Romano D., Smiljanic R., Bragaglia A., Carraro G., Friel E., Morel T., Pancino E., Donati P., Jiménez-Esteban F., Gilmore G., Randich S., Jeffries R. D., Vallenari A., Bensby T., Flaccomio E., Recio-Blanco A., Costado M. T., Hill V., Jofré P., Lardo C., de Laverny P., Masseron T., Moribelli L., Sousa S. G., Zaggia S., *The Gaia-ESO Survey: CNO abundances in the open clusters Trumpler 20, NGC 4815, and NGC 6705*, Astronomy & Astrophysics, Vol. 573, A55, 2015.
3. **Drazdauskas A.**, Tautvaišienė G., Randich S., Bragaglia A., Mikolaitis Š., and Janulis R., *The extent of mixing in stellar interiors: the open clusters Collinder 261 and Melotte 66*, Astronomy & Astrophysics, Vol. 589, A50, 2016.
4. Tautvaišienė G., Smiljanic R., Bagdonas V., **Drazdauskas A.**, Mikolaitis Š., *The role of asymptotic giant branch stars in the chemical evolution of the Galaxy*, Memorie della Societa Astronomica Italiana, Vol. 87, p.315, 2016.
5. **Drazdauskas A.**, Tautvaišienė G., Smiljanic R., Bagdonas V., Chorniy Y., *Chemical composition of evolved stars in the young open clusters NGC 4609 and NGC 5316*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 462, Issue 1, p.794-803, 2016.

6. Tautvaišienė G., **Drazdauskas A.**, Bragaglia A., Randich S., Ženovienė R., 2016, *C, N, O abundances and carbon isotope ratios in evolved stars of the open clusters NGC 2324, NGC 2477, and NGC 3960*, Astronomy & Astrophysics, Vol. 595, A16, 2016.
7. **Drazdauskas A.**, Tautvaišienė G., Mikolaitis Š., Barisevičius G., Puzeras E., Stonkutė E., Chorniy Y., and GES collaborators, *The Gaia-ESO Survey: CNO abundances in open clusters of our Galaxy*, 2016, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, in press.

## Pranešimai konferencijose disertacijos tema

1. Tautvaišienė G., **Drazdauskas A.**, Mikolaitis Š., Barisevičius G., Chorniy Y., Puzeras E., Smiljanic R., Sestito P., Geisler D., Villanova S., San Roman I., *CNO abundances in open clusters*, "Gaia-ESO Survey First Science meeting", 2013, Nica (Prancūzija), 8-11 Balandis, 2013 (Stendinis).
2. Tautvaišienė G., **Drazdauskas A.**, Stonkutė E., Mikolaitis Š., Barisevičius G., Puzeras E., Chorniy Y. and the Gaia-ESO survey consortium, *The Gaia-ESO Survey: CNO abundances in Galactic Open clusters and Field Stars*, European Astronomical Society symposium "Gaia Research for European Astronomy Training: GREAT network science, European Week of Astronomy and Space Science, Ženeva (Šveicarija), 30 Birželis - 4 Liepa, 2014 (Stendinis).
3. **Drazdauskas A.**, Tautvaišienė G., Mikolaitis Š., Barisevičius G., Puzeras E., Stonkutė E., Chorniy Y., and GES collaborators, *The Gaia-ESO Survey: CNO abundances in open clusters of our Galaxy*, International conference "Multi-Object Spectroscopy in the Next Decade: Big Questions, Large Surveys and Wide Fields", Santa Kruz De La Palma (Ispanija), 2-6 Kovas, 2015 (Stendinis).
4. **Drazdauskas A.**, Tautvaišienė G., Randich S., Mikolaitis Š., *Cheminio maišymo procesų tyrimas mažos masės padrikųjų spiečių žvaigždėse*, "41-oji Lietuvos Nacionalinė Fizikos Konferencija", Vilnius (Lietuva), 17-19 Birželis, 2015 (Stendinis).
5. Bagdonas V., Tautvaišienė G., Smiljanic R., **Drazdauskas A.**, Mikolaitis Š., *Sunkiųjų cheminių elementų gausa padrikųjų spiečių raudonosiose milžinėse*, "41-oji

- Lietuvos Nacionalinė Fizikos Konferencija", Vilnius (Lietuva), 17-19 Birželis, 2015 (Stendinis).
6. Tautvaišienė G., Smiljanic R., Bagdonas V., **Drazdauskas A.**, Mikolaitis Š., *The role of asymptotic giant branch stars in the chemical evolution of the Galaxy*, European Astronomical Society special session "AGB stars: a key ingredient in the understanding and interpretation of stellar populations", European Week of Astronomy and Space Science, La Laguna, Tenerife, (Ispanija), 22-26 Birželis, 2015 (Stendinis).
  7. Tautvaišienė G., Mikolaitis Š., Kordopatis G., Stonkutė E., **Drazdauskas A.**, Smiljanic R., Valentini M., Puzeras E., and Gaia-ESO Consortium, *The Gaia-ESO Survey: CNO and alpha-element distributions in the Galactic discs*, European Astronomical Society special session "Chemical abundances and gradients in spatially resolved late-type Galaxies in the Local Universe", European Week of Astronomy and Space Science, La Laguna, Tenerife, (Ispanija), 22-26 Birželis, 2015 (Stendinis).
  8. Tautvaišienė G., **Drazdauskas A.**, Randich S., Smiljanic R., Mikolaitis Š., *Diagnostics of mixing processes in atmospheres of low-mass stars*, IAU Symposium "Stellar Physics in Galaxies Throughout the Universe", XXIX (29th) International Astronomical Union General Assembly, Honolulu, Havajai (JAV), 3-14 Rugpjūtis, 2015 (Stendinis).
  9. Tautvaišienė G., **Drazdauskas A.**, Lardo C., Martell S. L., Pancino E., Stonkutė E., & Gaia-ESO Consortium, *The Gaia-ESO Spectroscopic Survey: CNO abundances in giants of the multiple-population globular cluster NGC 1851*, IAU Symposium "The General Assembly of Galaxy Halos: Structure, Origin and Evolution", XXIX (29th) International Astronomical Union General Assembly, Honolulu, Havajai (JAV), 3-14 Rugpjūtis, 2015 (Stendinis).
  10. **Drazdauskas A.**, Smiljanic R., Tautvaišienė G. and Bagdonas V., *CNO abundances in low mass stars of open clusters*, "Gaia-ESO Survey Third Science Meeting", Vilnius (Lietuva), 1-4 Gruodis, 2015 (Stendinis).
  11. Ženovienė R., Tautvaišienė G., **Drazdauskas A.**, Mikolaitis Š., *Carbon to nitrogen ratio in stars of open clusters*, COST Action international conference "Origins and

evolution of Life in the Universe, From Star and Planet Formation to Early Life", Vilnius (Lietuva), 25-28 Balandis, 2016 (Stendinis).

12. **Drazdauskas A.**, Bagdonas V., Randich S., Bragaglia A., Smiljanic R., Tautvaišienė G., *Carbon, Nitrogen and Oxygen abundances in evolved low mass stars of open clusters*, COST Action international conference "Origins and evolution of Life in the Universe, From Star and Planet Formation to Early Life", Vilnius (Lietuva), 25-28 Balandis, 2016 (Stendinis).

## Disertacijos struktūra

Disertacija sudaryta iš penkių pagrindinių dalių: įvado, keturių skyrių ir literatūros sąrašo.

- Pirmajame skyriuje aprašomi darbe tirti padrikieji spiečiai.
- Antrajame skyriuje pateikta informacija apie naudotus analizės metodus: aprašomas diferencialinės analizės metodas, žvaigždžių modeliai bei rezultatų neapibrėžties įvertinimas.
- Trečiajame skyriuje aprašyti gauti rezultatai, jų palyginimas su teoriniais modeliais bei ankstesniais tyrimais, kitų autorių gautais rezultatais.
- Ketvirtajame skyriuje pateikiami pagrindiniai rezultatai ir išvados.

# Duomenys apie spiečius

Šiame darbe tirti padrikieji spiečiai pasirinkti iš kelių šiuo metu vykdomų tarptautinių mokslinių projektų. Trys padrikieji spiečiai pasirinkti iš šiuo metu aktyviai vykdomo Gaia - ESO (*ang. European Southern Observatory* - Europos pietinė observatorija) spektrinės dangaus apžvalgos projekto. Šis projektas skirtas ištirti per  $10^5$  žvaigždžių mūsų Paukščių Tako Galaktikoje. Pagrindinis projekto tikslas yra pateikti homogeniškus žvaigždžių kinematikos ir cheminės sudėties rezultatus mūsų Galaktikoje. Gaia-ESO projektas apima ne tik padrikuosius ir kamuolinius spiečius, bet ir lauko žvaigždes skirtinguose Galaktikos regionuose - tarp jų Galaktikos centriniame telkinyje, plonajame ir storajame diskuose bei Galaktikos sferoide. Šis projektas svariai prisidės prie Galaktikos bei žvaigždžių cheminės evoliucijos tyrimų.

Penki padrikieji spiečiai pasirinkti iš Bolonijos padrikųjų spiečių cheminės evoliucijos projekto (*angl. Bologna Open Clusters Chemical Evolution project* – BOCCE) sąrašo. Vienas pagrindinių šio projekto tikslų yra pagilinti žinias apie žvaigždžių cheminės sudėties galaktocentrinius gradientus. Šio projekto vykdytojai pasirinko apie 30 padrikųjų spiečių, tolygiai pasiskirsčiusių amžiaus, metalingumo bei galaktocentrinio atstumo skalėse. BOCCE projekto eigoje homogeniškai nustatyti objektų amžiai, atstumai bei cheminių elementų gausos padės geriau įvertinti galimas šių parametrų priklausomybes nuo galaktocentrinio atstumo.

Duomenys dviems padrikiesiems spiečiams NGC 4609 ir NGC 5316 gauti vykdant LMT projektą "Spektroskopinis anglies, azoto ir deguonies tyrimas padrikųjų Galaktikos spiečių žvaigždėse" ir bendradarbiaujant su bendraautoriumi R. Smiljanic. Jis atstebėjo virš dešimties padrikųjų spiečių, daliai kurių iki šiol nėra publikuota jokių spektroskopinių tyrimų. Cheminio maišymosi procesai daugumoje šių spiečių bus tirti pirmą kartą.

Mes pasirinkome tirti tik tas fotometriškai atrinktas spiečių žvaigždes, kurios yra identifikuotos RGB narės. Mūsų pagrindinis tikslas - ištirti žvaigždžių cheminio maišymosi procesus, kurių padariniai tampa akivaizdūs tik tuomet, kai žvaigždė palieka pagrindinę

ir patenka į RGB seką.

## 1.1 Padrikųjų spiečių apžvalga

### 1.1.1 Collinder 261

Pirmasis padrikasis žvaigždžių spiečius Collinder 261 ( $Cr\ 261$ ;  $l = 301^{\circ}.68$ ,  $b = -5^{\circ}.53$ ) pirmą kartą stebėtas jau prieš daugiau negu 50 metų (van den Bergh ir Hagen 1975). Jis yra ne vieną kartą tirtas fotometriškai ir identifikuotas kaip vienas seniausių padrikųjų spiečių (Phelps ir kt. 1994). Bragaglia ir Tosi (2006) atliko vieną naujausių šio spiečiaus tyrimų ir nustatė amžių artimą 6 mlrd. m. Spiečius buvo tirtas pasinaudojant tiek žemos tiek aukštos skiriamosios gebos spektrais (Friel 1995; Sestito ir kt. 2008 ir kt.). Gauti metalingumo rezultatai yra nuo -0.22 iki 0.13. Mikolaitis ir kt. (2012) atliko ir anglies bei azoto elementų gausų tyrimą šešioms šio spiečiaus žvaigždėms.

### 1.1.2 Melotte 66

Ankstyviausias Melotte 66 ( $Mel\ 66$ ;  $l = 259^{\circ}.56$ ,  $b = -14^{\circ}.24$ ) paminėjimas mokslo leidiniuose buvo 1962 metais (Eggen ir Stoy 1962). King (1964) savo tyrimu nustatė, kad šis spiečius taip pat yra gana senas. Skirtingi tyrimai pateikia panašius amžiaus vertinimus tarp 4 ir 7 mlrd. m. (Hawarden 1976; Anthony-Twarog ir kt. 1979; Gratton 1982; Friel ir Janes 1993; Kassis ir kt. 1997). Fotometrinių šio spiečiaus metalingumo nustatymai pateikia gan žemas vertes: apie -0.5 (Hawarden 1976; Dawson 1978; Geisler ir Smith 1984; Twarog ir kt. 1995). Spektriniais tyrimais nustatytos metalingumo vertės svyruoja nuo -0.33 iki -0.51. Šiam spiečiui nėra ankstesnių maišymuisi jautrių elementų bei jų izotopų gausų nustatymų. Darbe tiriamos penkios žvaigždės yra patvirtintos spiečiaus narės.

### 1.1.3 NGC 2324

Padrikojo spiečiaus NGC 2324 ( $l = 213^{\circ}.45$ ,  $b = +03^{\circ}.30$ ) tyrimai prasidėjo kartu su Cufey (1941), kuris iš sudarytos spalvinės diagramos nustatė apytikslį spiečiaus atstumą: 3.3 kpc. NGC 2324 yra sąlyginai jaunas spiečius. Kyeong ir kt. (2001) pasinaudodamas fotometrinių duomenimis nustatė apie 630 mln. m. amžių, galaktocentrinį atstumą  $R_{gc} = 11.7$  kpc, ir metalingumą  $[Fe/H] \sim -0.32$ . Vienas naujesnių fotometrinių tyrimų



atliktų Piatti ir kt. (2004) pateikia amžiaus vertę apie 440 mln. m, atstumą apie 3.8 kpc ir metalingumą apie  $-0.30$  dex. Šiek tiek aukštesnės metalingumo vertės nustatytos iš žemos ir aukštos skiriamosios gebos spektrų. Friel ir kt. (2002) ir Bragaglia ir kt. (2008) pateikia atitinkamai  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.15 \pm 0.16$  ir  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.17 \pm 0.05$ .

#### 1.1.4 NGC 2477

Pirmieji fotometriniai NGC 2477 ( $l = 253^\circ.56$ ,  $b = -05^\circ.84$ ) stebėjimai publikuoti Eggen ir Stoy (1961). Hartwick ir kt. (1972) nustatė apytikslį spiečiaus amžių: 1.5 mlrd.m. Kharchenko ir kt. (2013) savo studijoje šiam spiečiui nustatė 1.5 kpc atstumą nuo Saulės ir 820 mln. m. amžių. Metalingumo vertės nustatytos pasinaudojant aukštos bei žemos skiriamosios gebos spektrais yra nuo  $-0.13$  iki  $0.07$  (Friel ir kt. 2002; Bragaglia ir kt. 2008).

#### 1.1.5 NGC 3960

NGC 3960 ( $l = 294^\circ.37$ ,  $b = +06^\circ.18$ ) buvo identifikuotas van den Bergh ir Hagen (1975). Pirmoji spalvinė diagrama iš fotometrinių stebėjimų sudaryta Janes (1981). Prisinzano ir kt. (2004) tyrinėjo šį spiečių pasitelkdamas *BVI* filtrus ir nustatė, kad šis spiečius yra tarp 0.9 ir 1.4 mlrd. m. amžiaus. Patikslintas amžius, nustatytas Bragaglia ir kt. (2006), yra tarp 0.6 ir 0.9 mlrd. m. NGC 3960 metalingumas tyrinėtus keletą kartų. Fotometrinės vertės svyruoja nuo  $-0.68$  iki  $-0.06$ . Tuo tarpu spektroskopiškai nustatytas metalingumas yra tarp  $-0.34$  ir  $+0.02$ .

#### 1.1.6 NGC 4609

Padrikasis spiečius NGC 4609 ( $l = 301^\circ.89$ ,  $b = -00^\circ.14$ ) buvo tirtas tik fotometriškai. Feinstein ir Marraco (1971) buvo pirmasis, atlikęs fotometrinius šio spiečiaus tyrimus. Jis apskaičiavo labai mažą šio spiečiaus amžių - apie 60 mln. m. ir nustatė, kad šis padrikasis spiečius yra labai negausus - identifikuotos tik 33 žvaigždės-narės. Sekančios amžiaus nustatymo vertės svyruoja nuo 36 mln. m. iki 125 mln. m. Vienintelis NGC 4609 metalingumo nustatymas atliktas Claria ir kt. (1989). Pasinaudojant fotometriniiais evoliucionavusių žvaigždžių stebėjimais nustatytas metalingumas apie 0.05.

### 1.1.7 NGC 4815

NGC 4815 yra vidutinio amžiaus padrikasis spiečius ( $l = 303^{\circ}.63$ ,  $b = -02^{\circ}.10$ ). Pirmieji šį spiečių tyrinėjo Moffat ir Vogt (1973). Pasinaudodami fotometriniiais duomenimis jie padarė išvadą, kad šis žvaigždžių telkinys nėra spiečius. Tačiau sekantis tyrimas atliktas van den Bergh ir Hagen (1975) patvirtino, kad visgi tai yra daug žvaigždžių turintis padrikasis spiečius. Spiečiaus amžiaus nustatymai varijuoja tarp 200 ir 630 mln. m. Spiečiaus metalingumas, nustatytas iš fotometrinių duomenų, yra artimas Saulės metalingumui. Spektriniai tyrimai patvirtino šiuos nustatymus. Pasinaudojant aukštos skiriamosios gebos spektrais nustatytas  $[Fe/H]=0.03$  (Friel ir kt. 2014).

### 1.1.8 NGC 5316

Pirmasis NGC 5316 ( $l = 310^{\circ}.23$ ,  $b = 00^{\circ}.12$ ) amžiaus nustatymas atliktas Lindoff (1968). Jis nustatė, kad šio spiečiaus amžius yra vos 51 mln. m. Vėlesniais metais nustatytos amžiaus vertės yra nuo jau minėtų 51 iki 195 mln. m. Vienas paskutinių amžiaus nustatymų pateikia 100 mln. m. vertę. Šis padrikasis spiečius turi net keletą metalingumo nustatymų iš fotometrinių duomenų, o rezultatai svyruoja nuo -0.02 iki 0.19.

### 1.1.9 NGC 6705

NGC 6705 ( $l = 27^{\circ}.31$ ,  $b = -2^{\circ}.80$ ) turbūt yra labiausiai tirtas padrikasis spiečius. Tai yra labai masyvus ir daug žvaigždžių turintis spiečius (Messina ir kt. 2010; Santos ir kt. 2005). Šio spiečiaus masė yra daugiau negu keletas tūkstančių Saulės masių (McNamara ir kt. 1977; Santos ir kt. 2005), o tai jau yra riba tarp masyviausių padrikųjų spiečių, ir mažiausią masę turinčių kamuolinių spiečių (Bragaglia ir kt. 2012). Pirmą kartą šis spiečius paminėtas Messier kataloge jau prieš 150 metų. Tačiau pirmi fotometriniai stebėjimai atlikti tik po 100 metų Johnson ir kt. (1956). Naujausi fotometriniai tyrimai pateikia gan panašias amžiaus vertes tarp 220 ir 250 mln. m. (Sung ir kt. 1999; Santos ir kt. 2005; Koo ir kt. 2007). Šis spiečius ne kartą tyrinėtas ir spektroskopiškai, o metalingumo vertės svyruoja nuo 0.10 (Gonzalez ir Wallerstein 2000; Cantat-Gaudin ir kt. 2014) iki 0.12 (Heiter ir kt. 2014).

### 1.1.10 Trumpler 20

Trumpler 20 ( $l = 301^{\circ}.50$ ,  $b = +2^{\circ}.20$ ) yra dar vienas žvaigždėmis turtingas padrikasis spiečius, identifikuotas van den Bergh ir Hagen (1975). Tai yra sąlyginai senas spiečius, tik pastaruoju metu sulaukęs didesnio dėmesio iš mokslininkų. Amžiaus nustatymai yra tarp 1.3 ir 2.1 mlrd. m. (Platais ir kt. 2008; Kharchenko ir kt. 2013). Visos fotometriais tyrimais nustatytos metalingumo vertės yra artimos Saulės metalingumui. Aukštos skiriamosios gebos spektrų analizė, atlikta Donati ir kt. (2014), pateikia  $[Fe/H]=0.17$ , nustatytą iš 13 žvaigždžių. Beveik tuo pačiu metu Carraro ir kt. (2014) atlikta spektrinė analizė pateikia kiek mažesnę ir artimesnę Saulei vertę -  $[Fe/H]=0.09$ .

## 1.2 Stebėjimai

Šiame darbe tirtų žvaigždžių spektrai buvo stebėti dviem Europos pietinei observatorijai priklausančiais teleskopais ir prie jų sumontuotais spektrografais.

**UVES spektrografas.** 105 spektrai panaudoti analizei buvo gauti Čilėje pastatytu labai dideliu teleskopu (angl. *Very Large Telescope* – VLT) ir ten esančiu UVES (angl. *UV-Visual Echelle Spectrograph* – UVES) spektrografu. Šiuo spektrografu buvo stebėti spektrai tiek Gaia-ESO, tiek BOCCE projektams, tačiau abu projektai naudojo skirtingus nustatymus. Gaia-ESO projekte gautų spektrų bangų ilgių diapazonas yra 4700-6840 Å, tuo tarpu BOCCE projekte gauti spektrai padengia visą bangų ilgių intervalą nuo 4750 iki 10600 Å. Prietaiso skiriamoji geba  $R=48\,000$ . Pradinis spektrų apdorojimas buvo atliktas naudojant standartinį redukavimo metodą pačioje observatorijoje

**FEROS spektrografas.** Penkioms žvaigždėms padrikuosiuose spiečiuose NGC 4609 ir NGC 5316 spektrai buvo gauti FEROS spektrografu (angl. *Fiber-fed Extended Range Optical Spectrograph*) ir 2.2 m skersmens Makso Planko draugijos teleskopu. Šio spektrografo, kaip ir UVES, skiriamoji geba  $R=48\,000$ , o spektrinis bangų ilgių intervalas nuo 3500 iki 9200 Å. Pirminis spektrų apdorojimas atliktas observatorijoje redukavimo paketu MIDAS.

# Analizės metodai

## 2.1 Diferencialinė analizė

Šiame darbe naudojamas klasikinis diferencialinės analizės metodas. Norint, kad šis metodas būtų efektyvus, reikia pasirinkti atskaitos tašką - mūsų atveju tai buvo Saulė. Visi paskaičiavimai buvo vykdomi atskaitos tašku pasirinkus Saulės cheminių elementų gausas. Žvaigždžių cheminių elementų gausos buvo apskaičiuojamos dviem metodais: ekvivalentinių pločių ir spektrų sintezės. Ekvivalentinių pločių metodas pranašesnis, kai turime daug stiprių neužterštų linijų, tuo tarpu spektrinės sintezės metodas nepralengiamas analizuojant silpnas spektrines linijas. Ir vienu, ir kitu atveju, pirmiausia reikia nustatyti žvaigždės pagrindinius atmosferos parametrus.

## 2.2 Ekvivalentinių pločių metodas

Žvaigždžių pagrindiniai atmosferos parametrai atsispindi žvaigždės spektro linijose. Analizuodami pasirinktas linijas, mes surenkame informaciją apie žvaigždės paviršiuje esančią temperatūrą, laisvojo kritimo pagreitį, žvaigždės sukimosi greitį ir kt. Ekvivalentinis plotis yra pagrindinis spektrinės linijos parametras, ir jis apibrėžia plotį stačiakampio, kurio aukštis lygus tolydinio spektro lygiui linijos centre, o plotas lygus linijos kontūro ir tolydinio spektro apribotam plotui.

Šis metodas panaudotas tiriant geležies linijas, norint nustatyti žvaigždžių pagrindinius atmosferos parametrus - efektingą temperatūrą, laisvojo kritimo pagreitį žvaigždės paviršiuje, mikroturbulencijos greitį bei metalingumą. Taip pat ekvivalentiniai pločiai buvo panaudoti apskaičiuojant cheminių elementų Na, Mg, Al, Si, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, ir Ni gausas. Gausų įvertinimui buvo panaudota nuo dviejų iki 18 linijų. Jos buvo atrinktos atsižvelgiant į galimus linijų iškraipymus dėl pašalinių veiksnių (kosminiai spinduliai, netoli esanti kita linija, triukšmo lygis ir kt.)

## 2.3 Spektrų sintezės metodas

Kartu su ekvivalentinių pločių metodu buvo naudota ir spektrų sintezė. Šiam metodui reikalingi žvaigždžių atmosferų parametrai bei spektrinių linijų atominiai duomenys. Pastaruosius mes surinkome iš VALD (*anlg. Vienna Atomic Line Database - Vienos atominių linijų duomenų bazė*) duomenų bazės. Naudodami spektrų sintezės metodą ir panaudodami nustatytus pagrindinius žvaigždės atmosferos parametrus, mes galime sumodeliuoti dirbtinį žvaigždės spektrą ir palyginti jį su stebėtu. Tuomet, keisdami cheminių elementų gausas ir ieškodami geriausio linijų sutapimo tarp dviejų spektrų, mes galime nustatyti tikslias skirtingų cheminių elementų gausas.

## 2.4 Žvaigždžių atmosferų modeliai.

Sugerties linijų formavimasis žvaigždėse yra sudėtingas procesas, kuriam įtaką daro daugelis veiksnių. Šias linijas mes galime interpretuoti pasinaudodami atmosferų modeliais. Savo darbe mes naudojome MARCS modelius (Gustafsson ir kt. 2008). Šie modeliai teoriškai aprašo, kaip žvaigždės atmosferos parametrai veikia linijų formavimasis skirtinguose atmosferos sluoksniuose. Į šiuos aprašymus įtraukiamos hidrostatinės pusiausvyros, energijos pernašos, termodaminės statistikos bei kvantinės mechanikos lygtys.

## 2.5 Programinė įranga.

Darbe buvo naudota keletas programinių paketų. Pagrindiniai iš jų: SPLAT-VO, DAOSPEC, EQWIDTH ir BSYN.

SPLAT-VO (Škoda ir kt. 2014) bei DAOSPEC (Stetson ir Pancino 2008) skirti ištisinio spektro nustatymui ekvivalentinių linijų pločių matavimams. DAOSPEC programa linijų pločius galima matuoti automatiškai. EQWIDTH programa (sukurta Upsalos universitete) skirta apskaičiuoti cheminių elementų gausas, pasitelkiant prieš tai išmatuotus linijų ekvivalentinius pločius, linijų atominius duomenis bei žvaigždžių atmosferų modelius.

Sintetiniai spektrai buvo skaičiuojami programa BSYN (sukurta Upsalos universitete). Ši programa, pasitelkdama atmosferų modelius, spektrinių linijų atominius duomenis bei numanomas tiriamųjų elementų gausas, sumodeliuoja dirbtinį žvaigždės spektrą, kurį galime palyginti su stebėtu.

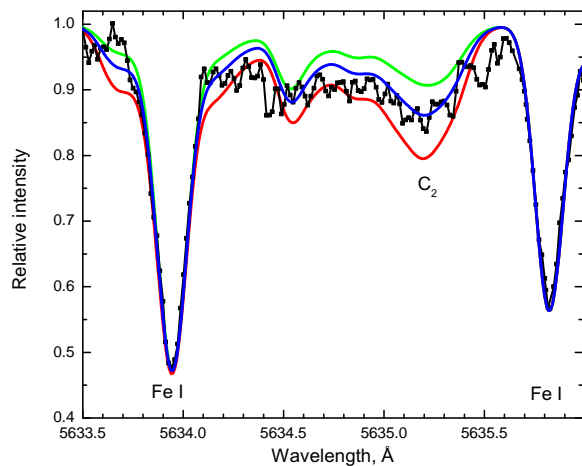
## 2.6 Pagrindinių atmosferos parametrų nustatymas

Pagrindiniai fizikiniai žvaigždžių atmosferų parametrai buvo nustatyti naudojant klasikinį spektroskopinį metodą pasitelkiant F, G, K spektrinės klasės žvaigždžių spektruose gausiai esančias nejonizuotų (Fe I) ir vieną kartą jonizuotų (Fe II) geležies atomų linijas. Šis metodas turi tris pagrindinius principus. Pirma - elemento gausa, apskaičiuojama skirtingoms linijoms, turi būti vienoda. Norint patenkinti šią sąlygą, reikia surasti tokią efektingą žvaigždės temperatūrą, kuriai esant visų elemento linijų (mūsų atveju geležies - Fe I) rodoma gausa nepriklauso nuo linijų apatinio lygmens sužadavimo potencialo. Antra - Fe I ir Fe II linijos turi rodyti vienodą gausą. Laisvojo kritimo pagreitis žvaigždės paviršiuje daug stipriau įtakoja mažas Fe II linijas, negu neutralias Fe I. Keičiant šio pagreičio vertę, sutapatrinamos gausos, apskaičiuojamos naudojant Fe I ir Fe II linijas. Trečia - skirtingoms linijoms apskaičiuojama elemento gausa turi nepriklausyti nuo to, ar ta linija stipri ar silpna. Mikroturbulencijos greitis yra teisingas tuomet, kai tiek silpnų, tiek stiprių linijų gausa sutampa ir bendras rezultatas turi mažiausią išsibarstymą. Iteruodami tarp šių trijų parametrų, ir atmesdami užterštas bei kitaip blenduotas linijas, gauname galutinį linijų sąrašą. Jį dažnai sudaro nuo keliolikos iki keliasdešimt geležies linijų. Pasinaudojant šiuo sąrašu ir nustatyta efektine temperatūra, laisvojo kritimo pagreičiu bei mikroturbulencijos greičiu gauname žvaigždės metalingumo įvertinimą.

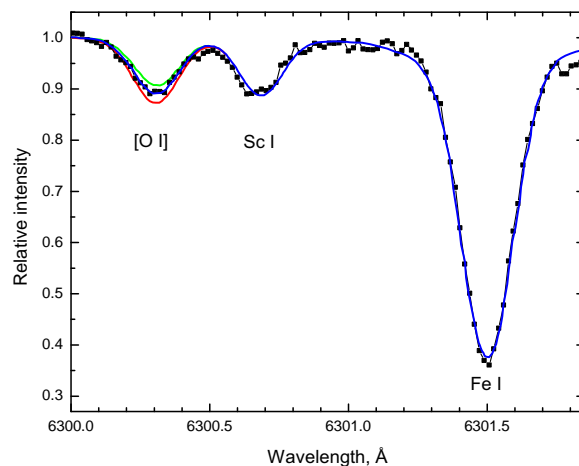
## 2.7 Sintetinių spektrų modeliavimas

Sintetinių spektrų metodu buvo nustatytos anglies, azoto ir deguonies gausos bei  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  santykiai. Anglies nustatymui naudoti du regionai:  $\text{C}_2$  molekulinės juostos ties 5135 Å ir 5635 Å. Molekuliniai duomenys šioms linijoms naudoti tokie patys, kaip ir Gonzalez ir kt. (1998). Deguonies nustatymui pasitelkta draustinė linija ties 6300.3 Å. Ši silpna linija yra susiliejusi su  $^{58}\text{Ni}$  ir  $^{60}\text{Ni}$  izotopų linijomis. Šioms nikelio linijoms atominiai parametrai paimti iš Johansson ir kt. (2003). Azoto gausų nustatymui naudoti du regionai, priklausomai nuo turimo spektro bangų ilgio intervalo. NGC 4815, NGC 6705 ir Trumpler 20 padrikiesiems spiečiams pasitelktas intervalas nuo 6470 iki 6490 Å turintis stiprias  $^{12}\text{C}^{14}\text{N}$  molekulinės juostas. Tuo tarpu likusiems spiečiams naudotas tolimesnis regionas ties 7980 – 8010 Å.

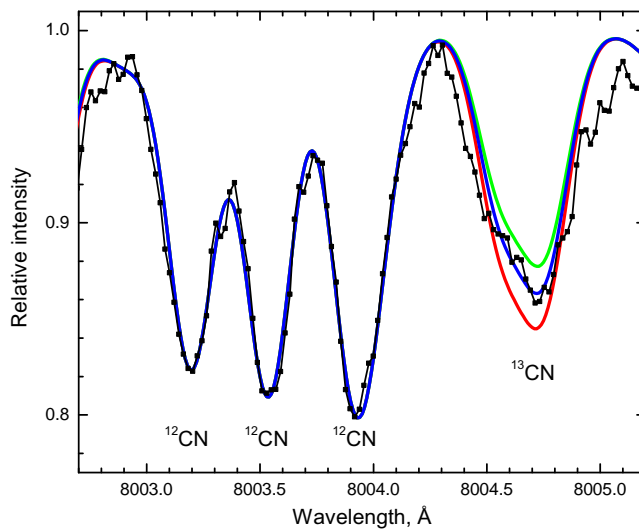
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  santykio nustatymui naudota stipriausia  $^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  linija ties 8004.7 Å. Šios ir kitų linijų sintetinių spektrų analizės pavyzdžiai pateikti paveikslėliuose 2.1 - 2.3.



**2.1 pav.:** Anglies molekulinės juostos ties 5635 Å sintetinio spektro pavyzdžiai žvaigždei Collinder 261 RGB05, esant gausoms  $[C/Fe] = -0.1 \pm 0.1$ .



**2.2 pav.:** Deguonies draustinės juostos ties 6300.3 Å sintetinio spektro pavyzdžiai žvaigždei NGC 2477 4221, esant gausoms  $[O/Fe] = -0.08 \pm 0.1$ .



**2.3 pav.:**  $^{12}C/^{14}N$  bei  $^{13}C/^{14}N$  molekulių juostų sintetinių spektrų pavyzdžiai žvaigždėje Melotte 66 1865, esant  $^{12}C/^{14}N$  gausai  $[N/Fe] = 0.42$  ir  $^{12}C/^{13}C = 6 \pm 1$

## 2.8 Paklaidų įvertinimas

Paklaidos mūsų darbe gali būti suskirstytos į dvi grupes. Pirmiausia yra paklaidos, kurių poveikis įvertinamas kiekvienai linijai atskirai, tai būtų atominių parametrų netikslumai, ištisinio spektro įvertinimo bei gausinio profilio pritaikymo linijai paklaidos. Šios paklaidos įvertinamos, apskaičiuojant skirtingoms linijoms gaunamų rezultatų išsibarstymus ir yra pateiktos šalia kiekvieno elemento gausos atskiroms žvaigždėms.

Antroji paklaidų kategorija - tai paklaidos, kurios veikia visas linijas tuo pačiu metu, pvz. žvaigždžių atmosferos parametrai. Disertacijoje pateikiamos lentelės, kuriose paskaičiuota, kiek atmosferos parametrų verčių nuokrypiai ( $\Delta T_{\text{eff}} = 100 \text{ K}$ ;  $\Delta \log g = 0.3$ ;  $\Delta v_t = 0.3 \text{ km s}^{-1}$ ) veikia tiriamų elementų gausų įvertinimus.

Šiame darbe tiriamieji anglies ir azoto elementai (taip pat ir deguonis) yra susieti molekulinės pusiausvyros, t.y. pokyčiai vieno elemento gausoje, atsispindi kito elemento gausos vertėje. Disertacijoje taip pat pateiktos lentelės, kaip vieno elemento nustatymo paklaidos paveikia kito elemento gausos įvertinimą.



# Rezultatai

## 3.1 Pagrindiniai atmosferų parametrai

Pagrindiniai žvaigždžių atmosferų fizikiniai parametrai buvo nustatyti penkiems spiečiams. NGC 4815, NGC 6705 ir Trumpler 20 spiečių parametrai buvo nustatyti Gaia-ESO projektui kartu su kitais šio projekto vykdytojais. Detaliau parametų nustatymo principai aprašyti disertacijos 2.5 skyriuje. Padrikųjų spiečių NGC 4609 ir NGC 5316 žvaigždėms parametrai buvo nustatyti mūsų darbe. Likusiems penkiems spiečiams parametų vertės paimtos iš ankstesnių bendraautorių straipsnių kuriuose parametrai buvo nustatyti pagal tą pačią stebėjimų medžiagą, naudotą ir mūsų darbe. Collinder 261 ir Melotte 66 žvaigždžių parametų vertės buvo paimtos iš Sestito ir kt. (2008), NGC 2324 ir NGC 2477 parametrai nustatyti Bragaglia ir kt. (2008), Sestito ir kt. (2006) publikavo pagrindinius atmosferos parametrus žvaigždėms spiečiuje NGC 3960. Nepaisant to, kad parametrai nustatyti skirtingų autorių, visuose darbuose naudotas tas pats klasikinis spektroskopinis metodas, todėl galima teigti, kad parametrai yra homogeniški. Visų žvaigždžių pagrindiniai parametrai yra pateikti lentelėje disertacijos tekste.

## 3.2 Evoliuciniai cheminės sudėties efektai

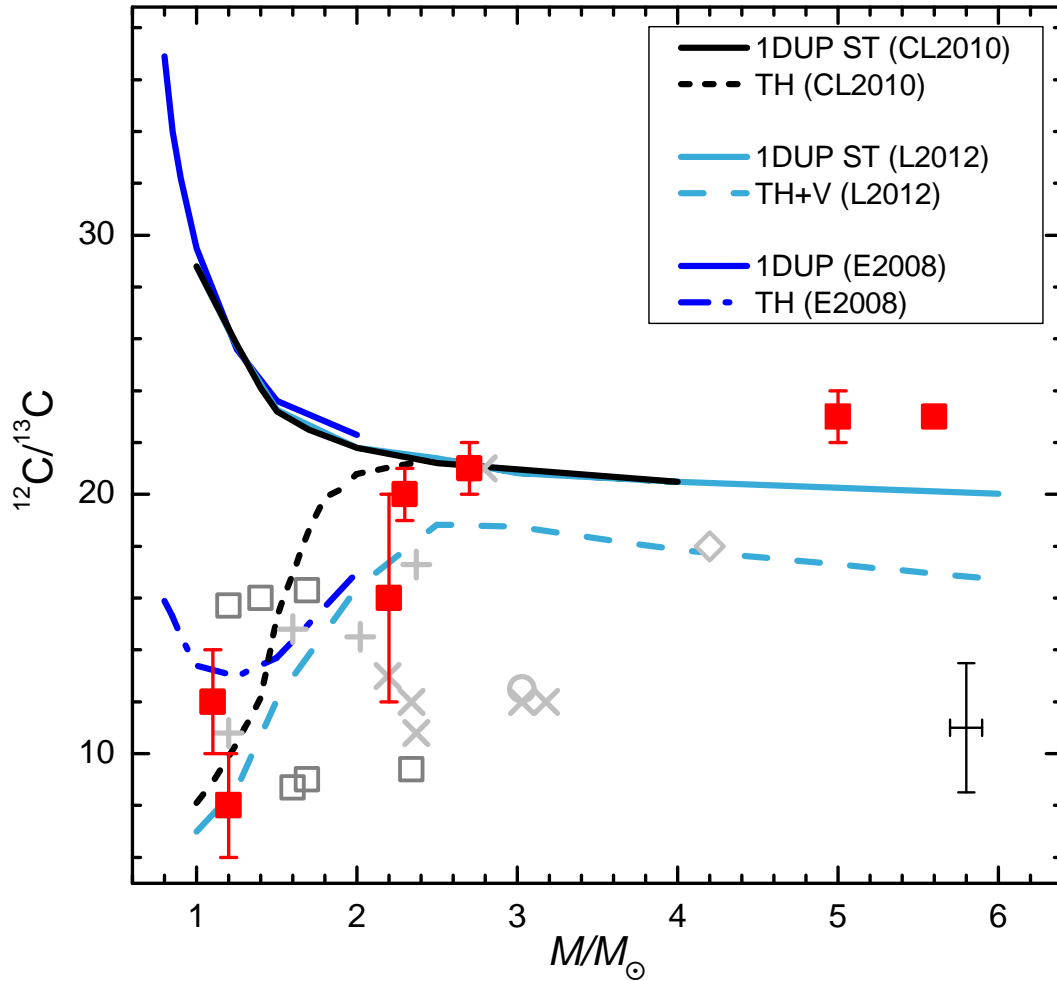
Analizuodami praevoliucionavusių žvaigždžių spektrus ir juose esančias cheminių elementų sugerties linijas, mes jua nematome tos pačios cheminės sudėties, kokia ji buvo žvaigždei gimus (Iben 1967). Žvaigždėse vykstančių termobranduolinių reakcijų metu yra gaminami ir sunaikinami įvairūs skirtingų elementų izotopai. Tam tikrose evoliucijos stadijose vidinė žvaigždžių struktūra gali pakisti. Tokių pakitimų metu, materija iš vidinių žvaigždės sluoksnių patenka į išorinius, ir mes galime stebėti atmosferos cheminės sudėties pokyčius. Standartinis žvaigždžių evoliucijos modelis numato vieną tokio maišymosi atvejį žvaigždėms evoliucionuojant raudonųjų milžinių sekoje - pirmoji drumstis (Iben 1967), kuri įvyksta pačioje sekos pradžioje. Tokios drumsties metu žvaigždės

konvekcinis sluoksnis išsiplečia, ir apjungia šerdyje susintetintus elementus su atmosferoje esančia medžiaga. Šio proceso metu labiausiai pasikeičia anglies ( $^{12}\text{C}$  ir  $^{13}\text{C}$ ) bei azoto ( $^{14}\text{N}$ ) gausos. Šių elementų gausos bei jų santykiai yra tarsi maišymosi procesų indikatoriai mažos ir vidutinės masės žvaigždėse.

**Anglies ir azoto gausos bei C/N,  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  santykiai.** Mūsų nustatytos anglies, azoto ir jų izotopų  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  bei  $^{12}\text{C}/^{14}\text{N}$  santykiai gali būti palyginti su Saulės vertėmis. Yra žinoma, kad žvaigždžių nykštukių anglies ir azoto gausų vertės [C/Fe] ir [N/Fe] yra artimos nuliui, t.y. artimos Saulės vertėms (Shi ir kt. 2002). Tuo tarpu Saulės  $^{12}\text{C}/^{14}\text{N}$  vertė yra 3.98 (Grevesse ir Sauval 2002), o  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  vertė yra 86 (Scott ir kt. 2006). Beveik visose mūsų tirtose žvaigždėse, matomi nukrypimai nuo nykštukėse stebimų verčių. [C/Fe] vertės nustatytos milžinėse yra sumažėjusios iki  $-0.47$ , o [N/Fe] yra padidėjusios kai kuriais atvejais net iki  $+0.82$ . Tuo tarpu  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  bei  $^{12}\text{C}/^{14}\text{N}$  vertės visais atvejais yra gerokai mažesnės už nykštukėse gautus rezultatus. Detalios gausos ir izotopų santykių vertės pateiktos disertacijoje.

**$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  ir C/N verčių palyginimas su teoriniais maišymosi modeliais.** Literatūroje vis dar nėra pakankamai duomenų apie  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  ir C/N santykius evoliucionavusiose žvaigždėse. Norint apskaičiuoti tikslesnius teorinius modelius, eksperimentiniai rezultatai yra nepakeičiamas informacijos šaltinis. Pastaruoju metu ypač tobulinami teoriniai modeliai, į skaičiavimus įtraukiantys termohalinio maišymosi bei sukimosi sukkelto papildomo maišymosi įtaką. Savo rezultatus mes lyginame su teoriniais modeliais apskaičiuotais Eggleton ir kt. (2008), Charbonnel ir Lagarde (2010) bei Lagarde ir kt. (2012). Šių autorių tyrimuose, pagrindinis papildomą maišymąsi įtakojanti veiksnys - termohalinis maišymasis (TH). Lagarde ir kt. (2012) apjungė termohalinio maišymosi įtaką su žvaigždės sukimosi indukuotu papildomu maišymusi (TH+V). Visi šie autoriai taip pat pateikia ir klasikinį pirmosios drumsties (1DUP) modelį.

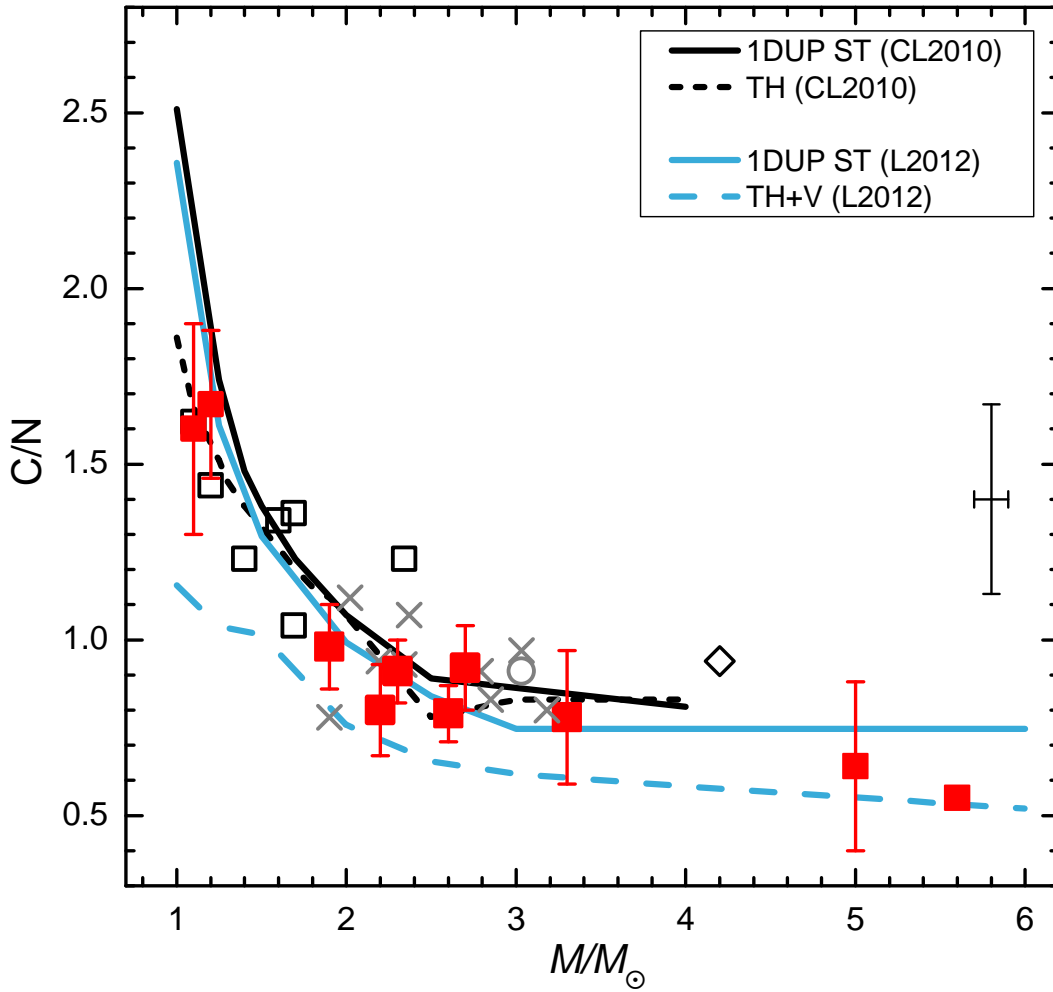
Pagrindiniai rezultatai pateikti 3.1 ir 3.2 paveikslėliuose. Iš pateiktų grafikų galime daryti išvadas, kad  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  santykiai mažos masės žvaigždėse patvirtina teorinių modelių prielaidas, kad jose vyksta papildomo maišymosi procesai, įtakoti termohalinio maišymosi arba termohalinio maišymosi ir sukimosi efektų. Masių intervale nuo 1 iki  $1.5 M_{\odot}$  abu modeliai yra gan panašūs ir pateikia žemesnes vertes negu pirmosios drumsties standartinis modelis. Tuo tarpu posūkio masių intervale virš  $2 M_{\odot}$  matome, kad anglies izotopų vertės nėra tokios žemos, kaip pateikta modeliuose, kuriuose įtakos



**3.1 pav.:** RGB žvaigždžių padrikuosiuose spiečiuose anglies izotopų  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  vidutinių reikšmių priklausomybė nuo TO masių. Grafike pavaizduoti teoriniai modeliai paimti iš Charbonnel ir Lagarde (2010), Lagarde ir kt. (2012) bei Eggleton ir kt. (2008). Šio darbo stebėjimų rezultatai yra pažymėti pilnaviduriais kvadratais iš Tautvaišienė ir kt. (2015, 2016); Drazdauskas ir kt. (2016a,b); tuščiaviduriais kvadratais pažymėti kiti Vilniaus grupės rezultatai - Mikolaitis ir kt. (2010, 2011a,b, 2012) ir Tautvaišienė ir kt. (2000, 2005); kryžiuokais pažymėti rezultatai iš Smiljanic ir kt. (2009); pliusiukais iš Gilroy (1989); rombais - iš Santrich ir kt. (2013); rutuliukais - iš Luck (1994). Tipinių paklaidų ribos yra pažymėtos. Mūsų rezultatų individualios paklaidos atspindi rezultatų sklaidą tarp spiečiaus žvaigždžių.

žvaigždžių vidiniam maišymuisi turi ir termohalinio maišymosi ir sukimosi procesų sukelti efektai. Mūsų nustatytos  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  vertės yra artimesnės pirmosios drumsties arba vien termohalinio maišymosi modeliams.

C/N santykis mažesnės posūkiu masės žvaigždėse nėra sumažėjęs tiek, kiek nurodo termohalinio maišymosi ir sukimosi sukulto papildomo maišymosi modeliai. Ties didesnėmis masėmis, C/N vertės yra žemesnės ir sutampa su papildomo maišymosi, paveikto



**3.2 pav.:** RGB žvaigždžių padrikuosiuose spiečiuose anglies ir azoto gausų  $^{12}\text{C}/^{14}\text{N}$  vidutinių reikšmių priklausomybė nuo TO masių. Simboliai yra tokie patys kaip ir pav. 3.1.

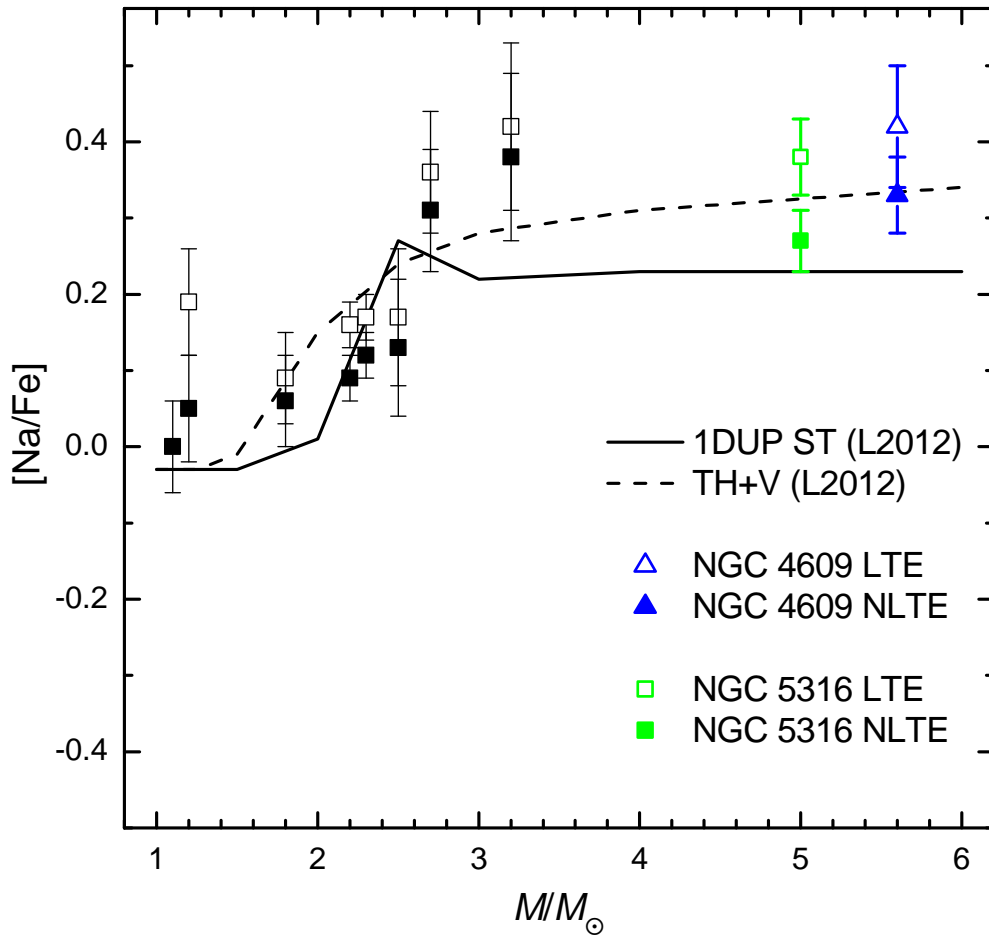
termohalinio maišymosi ir sukimosi efektų kombinuotam poveikiui, bet paklaidų ribose sutampa ir su pirmosios drumsties modeliu.

NGC 3960 yra gana neįprastas spiečius. Visos šio spiečiaus nagrinėtos žvaigždės yra panašios savo parametrais ir yra panašioje evoliucijos stadijoje, tačiau  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  vertės svyruoja nuo 10 iki 20, ir tai yra natūralus išsibarstymas tarp objektų. Šiame spiečiuje tikriausiai yra žvaigždžių, paveiktų skirtingų papildomo maišymosi mechanizmų.

**Helio žybsnio įtaka maišymuisi.** Tarp mūsų tirtų spiečių viename buvo žvaigždžių, esančių raudonosios sankaupos pozicijoje ir žvaigždžių, kurios dar tik kyla raudonąja milžinių seka ir yra stadijoje prieš Helio žybsnį - Collinder 261. Mes patikrinome, ar yra skirtumas nustatytuose  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  santykiuose šiose žvaigždėse. Vienoje šio spiečiaus žvaigždėje, kuri dar tik pradeda kilti raudonąja milžinių seka, nustatytas anglies izo-

topų santykis yra 18. Tai yra didesnė vertė negu nustatyta labiau evoliucionavusiose žvaigždėse. Jose nustatytas izotopų santykis yra 12. Raudonosios sankaupos žvaigždėse atsispindi cheminės sudėties pokyčiai, įvykę per visą žvaigždės buvimo raudonąja milžine laiką bei helio žybsnį. Tokie skirtumai buvo pastebėti ir kai kuriuose ankstesniuose tyrimuose (M 67, Tautvaišienė ir kt. 2000; NGC 7789, Tautvaišienė ir kt. 2005; NGC 3532, Smiljanic ir kt. 2009; NGC 2506, Mikolaitis ir kt. 2011a).

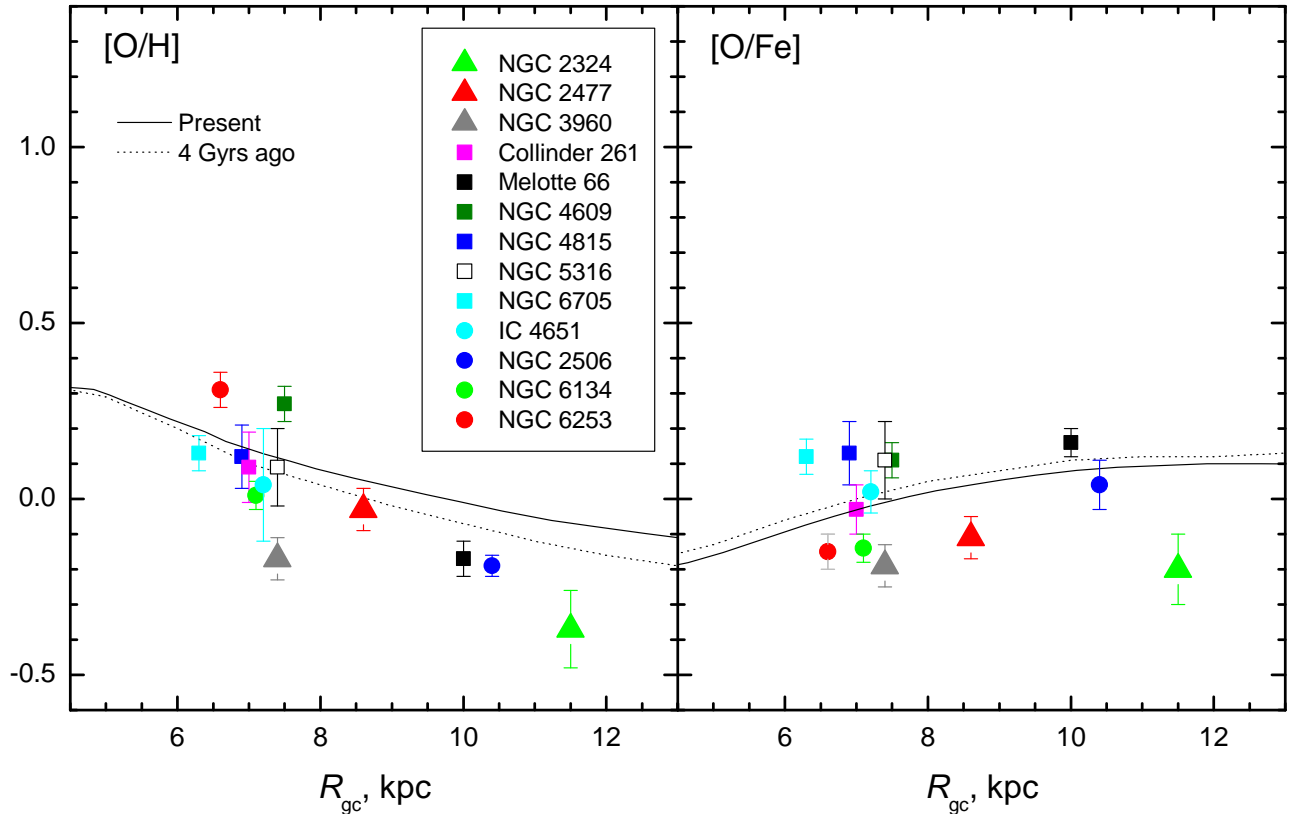
**Natris.** Natris pagrindė gaminamas anglies deginimo metu masyviose žvaigždėse taip pat NeNa ciklo metu. Pirmosios drumsties metu natris gali būti pernešamas į žvaigždės paviršių, tačiau nėra įvertinta, kaip efektyviai tai galėtų vykti mažos ir vidutinės masės žvaigždėse. Teoriniai žvaigždžių modeliai rodo, kad šis procesas efektyviausias žvaigždėse, kurių masė yra virš  $1.5\text{--}2 M_{\odot}$ .



**3.3 pav.:** Vidutinės  $[\text{Na}/\text{Fe}]$  vertės dviejuose tirtuose spiečiuose palygintos su teoriniais modeliais Lagarde ir kt. (2012) bei kitų autorių nustatytais natrio gausomis kituose mūsų tirtuose spiečiuose (Smiljanic ir kt. 2016; Bragaglia ir kt. 2008; Sestito ir kt. 2008).

Natrio gausa buvo nustatyta iš trijų spektrinių linijų. Joms taip pat buvo įvertintas ir nukrypimas nuo lokalsios termodinaminės pusiausvyros, kaip aprašyta Lind ir kt. (2011) straipsnyje. Gautas vertes palyginome su Lagarde ir kt. (2012) pateiktais pirmosios drumsties ir papildomo maišymosi (kuriame kartu veikia termohalinis maišymasis ir sukimosi sukelta drumstis) modeliais (3.3 pav.). Mūsų gauti rezultatai jauniems spiečiams (NGC 4609 ir NGC 5316) rodo, kad žvaigždėse, kurių TO masės  $> 3M_{\odot}$ , natrio gausos augimas stabilizuojasi. Palyginus  $[Na/Fe]$  vertes su teoriniais skaičiavimais matome, kad tiek  $[Na/Fe]$  tiek C/N atveju, rezultatai palaiko modelį, kuriame kartu veikia termohalinis maišymasis ir sukimosi sukelta papildoma drumstis (TH+V).

**Deguonis.** Deguonies gausa, skirtingai nuo anglies ir azoto, mažai kinta žvaigždžių evoliucijos eigoje. Ji išlieka panaši nuo to laiko kai žvaigždė susiformavo, ir ja galima pasinaudoti tyrinėjant Galaktikos cheminę evoliuciją.



**3.4 pav.:** Vidutinės deguonies gausos spiečiuose, esančiuose skirtingais atstumais nuo Galaktikos centro, palygintos su teoriniais modeliais Magrini ir kt. (2009).

3.4 paveikslėlyje pavaizduota deguonies gausos priklausomybė nuo galaktocentrinio atstumo ir palyginta su teoretiniais modeliais (Magrini ir kt. 2009). Į palyginimą įtraukti

ir rezultatai iš Mikolaitis ir kt. (2010, 2011a,b, 2012).

Paveikslėlyje akivaizdžiai matoma koreliacija tarp  $[O/H]$  vertės ir galaktocentrinio atstumo. Tai buvo pastebėta ir ankstesniuose tyrimuose (Magrini ir kt. 2009; Jacobson ir kt. 2009; Luck ir Lambert 2011; Yong ir kt. 2012; Korotin ir kt. 2014; Martin ir kt. 2015; Magrini ir kt. 2015 ir kt.). Mūsų rezultatai, kaip ir kitų autorių, rodo, kad deguonies gausa, tolstant nuo Galaktikos centro, mažėja.

Nustatyta santykinė deguonies gausa geležies atžvilgiu aiškios priklausomybės nuo galaktocentrinio atstumo tirtuose spiečiuose nerodo. Tokį rezultatą patvirtina ir Jacobson ir kt. (2009) darbas.

# Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Penkių padrikųjų spiečių (NGC 4609, NGC 4815, NGC 5316, NGC 6705, Trumpler 20) 79 evoliucionavusioms žvaigždėms nustatyti pagrindiniai atmosferų parametrai, bei dviem spiečiams (NGC 4609 ir NGC 5316) nustatytos 11 cheminių elementų gausos.
2. Vidutinės  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  ir/arba  $^{12}\text{C}/^{14}\text{N}$  santykių vertės nustatytos 10 padrikųjų spiečių esančioms evoliucionavusioms žvaigždėms:
  - Collinder 261  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=11\pm 2$  ir  $\text{C}/\text{N}=1.60\pm 0.30$  nustatyta keturiose raudonosios sankaupos žvaigždėse ir  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=18$ ,  $\text{C}/\text{N}=1.74$  vienoje RGB žvaigždėje.
  - Melotte 66  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=8\pm 2$  aštuoniose spiečiaus žvaigždėse ir  $\text{C}/\text{N}=1.67\pm 0.21$  penkiose raudonosios sankaupos žvaigždėse;
  - NGC 2324  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=21\pm 1$  keturiose ir  $\text{C}/\text{N}=0.92\pm 0.12$  šešiose raudonosios sankaupos žvaigždėse;
  - NGC 2477  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=20\pm 1$  keturiose ir  $\text{C}/\text{N}=0.91\pm 0.09$  šešiose spiečiaus žvaigždėse;
  - NGC 3960  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=16\pm 4$  penkiose ir  $\text{C}/\text{N}=0.80\pm 0.13$  šešiose spiečiui priklausančiose žvaigždėse;
  - NGC 4609  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=23$ ,  $\text{C}/\text{N}=0.55$  nustatyta vienintelei spiečiaus RGB žvaigždei;
  - NGC 4815  $\text{C}/\text{N}=0.79\pm 0.08$  nustatyta penkioms spiečiaus žvaigždėms;
  - NGC 5316  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=8\pm 2$  ir  $\text{C}/\text{N}=0.64\pm 0.24$  nustatyta keturioms evoliucionavusioms žvaigždėms;
  - NGC 6705  $\text{C}/\text{N}=0.83\pm 0.19$  nustatyta 27 žvaigždėms;
  - Trumpler 20  $\text{C}/\text{N}=0.98\pm 0.12$  apskaičiuota 42 RGB žvaigždėms.



3. Vidutinės  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  santykių vertės helį centre deginančiose žvaigždėse, kurių TO masės yra iki  $1.5 M_{\odot}$ , gerai sutampa su termohalinio maišymosi arba termohalinio maišymosi bei sukimosi sukkelto papildomo maišymosi modeliais. Žvaigždėms, kurių TO masės yra virš  $2 M_{\odot}$ , vidutinės anglies izotopų santykių vertės sutampa su klasikiniu pirmos drumsties arba termohalinio maišymosi modeliais.
4. Vidutinės C/N santykių vertės spiečiams kurių TO masės mažesnės negu  $\sim 3 M_{\odot}$  gerai sutampa su termohalinio papildomo maišymosi arba pirmosios drumsties modeliais. Žvaigždėms, esančioms padrikuosiuose spiečiuose su didesnėmis TO masėmis, gauti rezultatai sutampa su modeliais, kurie įtraukia termohalinį bei sukimosi sukeltą maišymąsi, tačiau paklaidų ribose rezultatai sutampa ir su pirmosios drumsties modeliu.
5. Padrikajam spiečiui NGC 3960 (posūkio taško masė apie  $2 M_{\odot}$ ) nustatytos  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  vertės yra nehomogeniškos. Šiame spiečiuje tikriausiai yra žvaigždžių, kurios yra paveiktos tiek termohalinio maišymosi, tiek sukimosi ar kitokių veiksnių, sukeliančių papildomą maišymąsi.
6. Vidutinės [Na/Fe] vertės padrikuosiuose spiečiuose NGC 4609 ir NGC 5316 nerodo tolimesnio natrio gausos didėjimo žvaigždėse, kurių TO masės  $> 3M_{\odot}$ .
7. Vidutinės [O/H] vertės tirtuose padrikuosiuose spiečiuose patvirtina ankstesnius rezultatus, rodančius deguonies gausos mažėjimą tolstant nuo Galaktikos centro. [O/Fe] gausos mūsų tirtuose spiečiuose nerodo priklausomybės nuo galaktocentrinio atstumo.

## Literatūra

- Angelou, G. C., Stancliffe, R. J., Church, R. P., Lattanzio, J. C., ir Smith, G. H. 2012, ApJ, 749, 128
- Anthony-Twarog, B. J., Twarog, B. A., ir McClure, R. D. 1979, ApJ, 233, 188
- Bragaglia, A., Gratton, R. G., Carretta, E., ir kt. 2012, A&A, 548, A122
- Bragaglia, A., Sestito, P., Villanova, S., ir kt. 2008, A&A, 480, 79
- Bragaglia, A. ir Tosi, M. 2006, AJ, 131, 1544
- Bragaglia, A., Tosi, M., Carretta, E., ir kt. 2006, MNRAS, 366, 1493
- Cantat-Gaudin, T., Vallenari, A., Zaggia, S., ir kt. 2014, A&A, 569, A17
- Cantiello, M. ir Langer, N. 2010, A&A, 521, A9
- Carraro, G., Villanova, S., Monaco, L., ir kt. 2014, A&A, 562, A39
- Chanamé, J., Pinsonneault, M., ir Terndrup, D. M. 2005, ApJ, 631, 540
- Charbonnel, C. 2006, in EAS Publications Series, Vol. 19, EAS Publications Series, ed. T. Montmerle ir C. Kahane, 125–146
- Charbonnel, C. ir Lagarde, N. 2010, A&A, 522, A10
- Claria, J. J., Lapasset, E., ir Minniti, D. 1989, A&AS, 78, 363
- Cuffey, J. 1941, ApJ, 94, 55
- Dawson, D. W. 1978, AJ, 83, 1424
- Denissenkov, P. A. 2010, ApJ, 723, 563
- Donati, P., Cantat Gaudin, T., Bragaglia, A., ir kt. 2014, A&A, 561, A94
- Drazdauskas, A., Tautvaišienė, G., Randich, S., ir kt. 2016a, A&A, 589, A50

Drazdauskas, A., Tautvaišienė, G., Smiljanic, R., Bagdonas, V., ir Chorniy, Y. 2016b, MNRAS, 462, 794

Eggen, O. J. ir Stoy, R. H. 1961, Royal Greenwich Observatory Bulletins, 24

Eggen, O. J. ir Stoy, R. H. 1962, Royal Greenwich Observatory Bulletins, 53, 7

Eggleton, P. P., Dearborn, D. S. P., ir Lattanzio, J. C. 2008, ApJ, 677, 581

Feinstein, A. ir Marraco, H. G. 1971, PASP, 83, 218

Friel, E. D. 1995, ARA&A, 33, 381

Friel, E. D., Donati, P., Bragaglia, A., ir kt. 2014, A&A, 563, A117

Friel, E. D. ir Janes, K. A. 1993, A&A, 267, 75

Friel, E. D., Janes, K. A., Tavaréz, M., ir kt. 2002, AJ, 124, 2693

Geisler, D. P. ir Smith, V. V. 1984, PASP, 96, 871

Gilroy, K. K. 1989, ApJ, 347, 835

Gilroy, K. K. ir Brown, J. A. 1991, ApJ, 371, 578

Gonzalez, G., Lambert, D. L., Wallerstein, G., ir kt. 1998, ApJS, 114, 133

Gonzalez, G. ir Wallerstein, G. 2000, AJ, 119, 1839

Gratton, R. G. 1982, ApJ, 257, 640

Grevesse, N. ir Sauval, A. J. 2002, Advances in Space Research, 30, 3

Gustafsson, B., Edvardsson, B., Eriksson, K., ir kt. 2008, A&A, 486, 951

Hartwick, F. D. A., Hesser, J. E., ir McClure, R. D. 1972, ApJ, 174, 557

Hawarden, T. G. 1976, MNRAS, 174, 471

Heiter, U., Soubiran, C., Netopil, M., ir Paunzen, E. 2014, A&A, 561, A93

Iben, Jr., I. 1967, ApJ, 147, 624

Jacobson, H. R., Friel, E. D., ir Pilachowski, C. A. 2009, AJ, 137, 4753

Janes, K. A. 1981, AJ, 86, 1210

Johansson, S., Litzén, U., Lundberg, H., ir Zhang, Z. 2003, ApJ, 584, L107

Johnson, H. L., Sandage, A. R., ir Wahlquist, H. D. 1956, ApJ, 124, 81

Kassis, M., Janes, K. A., Friel, E. D., ir Phelps, R. L. 1997, AJ, 113, 1723

Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., Schilbach, E., Röser, S., ir Scholz, R.-D. 2013, A&A, 558, A53

King, I. R. 1964, Royal Greenwich Observatory Bulletins, 82, 106

Koo, J.-R., Kim, S.-L., Rey, S.-C., ir kt. 2007, PASP, 119, 1233

Korotin, S. A., Andrievsky, S. M., Luck, R. E., ir kt. 2014, MNRAS, 444, 3301

Kyeong, J.-M., Byun, Y.-I., ir Sung, E.-C. 2001, Journal of Korean Astronomical Society, 34, 143

Lada, C. J. ir Lada, E. A. 2003, ARA&A, 41, 57

Lagarde, N., Charbonnel, C., Decressin, T., ir Hagelberg, J. 2011, A&A, 536, A28

Lagarde, N., Decressin, T., Charbonnel, C., ir kt. 2012, A&A, 543, A108

Lattanzio, J. C., Siess, L., Church, R. P., ir kt. 2015, MNRAS, 446, 2673

Lind, K., Asplund, M., Barklem, P. S., ir Belyaev, A. K. 2011, A&A, 528, A103

Lindoff, U. 1968, Arkiv for Astronomi, 5, 1

Luck, R. E. 1994, ApJS, 91, 309

Luck, R. E. ir Lambert, D. L. 2011, AJ, 142, 136

Magrini, L., Randich, S., Donati, P., ir kt. 2015, A&A, 580, A85

Magrini, L., Sestito, P., Randich, S., ir Galli, D. 2009, A&A, 494, 95

Martin, R. P., Andrievsky, S. M., Kovtyukh, V. V., ir kt. 2015, MNRAS, 449, 4071

McNamara, B. J., Pratt, N. M., ir Sanders, W. L. 1977, A&AS, 27, 117

Messina, S., Parihar, P., Koo, J.-R., ir kt. 2010, *A&A*, 513, A29

Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Gratton, R., Bragaglia, A., ir Carretta, E. 2010, *MNRAS*, 407, 1866

Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Gratton, R., Bragaglia, A., ir Carretta, E. 2011a, *MNRAS*, 413, 2199

Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Gratton, R., Bragaglia, A., ir Carretta, E. 2011b, *MNRAS*, 416, 1092

Mikolaitis, Š., Tautvaišienė, G., Gratton, R., Bragaglia, A., ir Carretta, E. 2012, *A&A*, 541, A137

Moffat, A. F. J. ir Vogt, N. 1973, *A&AS*, 10, 135

Origlia, L., Valenti, E., Rich, R. M., ir Ferraro, F. R. 2006, *ApJ*, 646, 499

Pallavicini, R. 2003, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 3, 74

Phelps, R. L., Janes, K. A., ir Montgomery, K. A. 1994, *AJ*, 107, 1079

Piatti, A. E., Clariá, J. J., ir Ahumada, A. V. 2004, *A&A*, 418, 979

Platais, I., Melo, C., Fulbright, J. P., ir kt. 2008, *MNRAS*, 391, 1482

Prisinzano, L., Micela, G., Sciortino, S., ir Favata, F. 2004, *A&A*, 417, 945

Santos, Jr., J. F. C., Bonatto, C., ir Bica, E. 2005, *A&A*, 442, 201

Santrich, O. J. K., Pereira, C. B., ir Drake, N. A. 2013, *A&A*, 554, A2

Scott, P. C., Asplund, M., Grevesse, N., ir Sauval, A. J. 2006, *A&A*, 456, 675

Sestito, P., Bragaglia, A., Randich, S., ir kt. 2006, *A&A*, 458, 121

Sestito, P., Bragaglia, A., Randich, S., ir kt. 2008, *A&A*, 488, 943

Shi, J. R., Zhao, G., ir Chen, Y. Q. 2002, *A&A*, 381, 982

Smiljanic, R., Gauderon, R., North, P., ir kt. 2009, *A&A*, 502, 267

Smiljanic, R., Romano, D., Bragaglia, A., ir kt. 2016, *ArXiv e-prints*

- Stetson, P. B. ir Pancino, E. 2008, PASP, 120, 1332
- Sung, H., Bessell, M. S., Lee, H.-W., Kang, Y. H., ir Lee, S.-W. 1999, MNRAS, 310, 982
- Tautvaišienė, G., Edvardsson, B., Puzeras, E., ir Ilyin, I. 2005, A&A, 431, 933
- Tautvaišienė, G., Edvardsson, B., Tuominen, I., ir Ilyin, I. 2000, A&A, 360, 499
- Twarog, B. A., Twarog, B. J. A., ir Hawarden, T. G. 1995, PASP, 107, 1215
- Škoda, P., Draper, P. W., Neves, M. C., Andrešič, D., ir Jenness, T. 2014, Astronomy and Computing, 7, 108
- van den Bergh, S. ir Hagen, G. L. 1975, AJ, 80, 11
- Wachlin, F. C., Miller Bertolami, M. M., ir Althaus, L. G. 2011, A&A, 533, A139
- Yong, D., Carney, B. W., ir Friel, E. D. 2012, AJ, 144, 95

## Summary

Open star clusters are important in giving us an opportunity to investigate stellar evolution. In open clusters we can analyse a number of stars of essentially the same age, distance, and origin, as stars in such clusters are most likely formed in the same protocloud of gas and dust. Open clusters are physically related multi-object systems of stars bounded together by the gravitational force. Stars inside the open cluster populate a limited region of space, much smaller than their distance from the Sun, so that they are all roughly at the same heliocentric distance. They are believed to originate from large clouds of cosmic gas and dust in the Milky Way. The number of objects in clusters can vary between tenths to thousands of stars.

When having a number of similar targets one can analyse them with higher precision and better statistics, thus their age, distance and other parameters can be determined more precisely than for single field stars. However each star can be treated separately and if chemical abundances in cluster members initially were identical, their changes in stellar atmospheres of evolved stars are mainly related to internal processes of stellar evolution. This circumstance was exploited in a number of studies of open clusters.

The main aim of the study is to investigate an influence of the chemical mixing processes in atmospheres of evolved stars. The classical first dredge-up theory cannot account for all observed changes in chemical composition of RGB stars. There have to be some other mechanisms of extra mixing involved, which alter the surface abundances of  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  and  $^{14}\text{N}$  beyond the 1<sup>st</sup> dredge-up model. Most recent models propose thermohaline- and rotation-induced mixing in evolved stars, which depends on stellar mass and metallicity. We aim to determine carbon, nitrogen, and oxygen abundances in helium-core burning stars of open clusters and compare  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  and C/N ratios with most advanced theoretical models. The additional goal is the first high-resolution spectroscopic analysis of stars in two open clusters not analyzed previously and the use of sodium abundance, which is also sensitive to mixing processes, for the evaluation of the theoretical models. We also aim to redetermine the main atmospheric parameters for stars in three other open clusters.

In this work we have determined the main atmospheric parameters for 79 evolved stars

in five open clusters and abundances of 11 chemical elements for stars in two young open clusters. We also present the results of carbon and nitrogen abundances for 109 stars in ten open clusters and oxygen for 68 stars in nine open clusters, results of  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  ratios in 27 evolved stars of seven open clusters and C/N ratios for 109 stars in 10 open clusters. Our results show, that  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  ratios for low turn-off masses (lower than  $1.5 M_{\odot}$ ) are better explained with models that include thermohaline- or thermohaline- and rotation-induced mixing. For larger turn-off masses the first dredge-up or the pure thermohaline-induced mixing is preferred. When looking at the C/N ratio, for masses up to about  $3 M_{\odot}$  the first dredge-up or the thermohaline-induced mixing models reproduce better results, however for larger turn-off masses (over  $5 M_{\odot}$ ) our results agree better with the both thermohaline- and rotation-induced mixing, but within errors agrees with first dredge-up model as well. Like any new paradigm, thermohaline and other types of mixing need further observational data so they can be further developed. So far there is no single model of extra-mixing which could fit both the observational  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  and C/N results.



## Trumpos žinios apie autorių

Vardas, pavardė: Arnas Drazdauskas  
Gimimo data: 1986 03 03  
Gimimo vieta: Vilnius  
Elektroninis paštas: Arnas.Drazdauskas@tfai.vu.lt

### Išsilavinimas:

2004 – 2008 Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas,  
fizikos bakalauro kvalifikacinis laipsnis

2010 – 2012 Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas,  
fizikos magistro kvalifikacinis laipsnis

2012 – 2016 Vilniaus universitetas, Teorinės fizikos ir astronomijos  
institutas, doktorantūros studijos

### Profesinė patirtis:

2013 08 – 2013 11 Erasmus+ stažuotė Nicos Observatorijoje  
(Observatoire de la Côte d'Azur), Nica, Prancūzija

2015 – Vilniaus universitetas, Teorinės fizikos ir astronomijos  
institutas, jaunesnysis mokslo darbuotojas