

VILNIAUS UNIVERSITETAS
TEORINĖS FIZIKOS IR ASTRONOMIJOS INSTITUTAS

Eduardas Puzeras

EVOLIUCINIAI CHEMINĖS SUDĖTIES POKYČIAI
HELĪ CENTRE DEGINANČIŲ ŽVAIGŽDŽIŲ
ATMOSFEROSE

Daktaro disertacijos santrauka
Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2011

Disertacija rengta 2002–2010 metais Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institute

Mokslinis vadovas:

Habil. dr. **Gražina Tautvaišienė** (Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas:

habil. dr. **Kazimieras Zdanavičius** (Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Nariai:

prof. habil. dr. **Gintautas Kamuntavičius** (Vytauto Didžiojo universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

doc. dr. **Romualda Lazauskaitė** (Vilniaus pedagoginis universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

prof. habil. dr. **Vytautas Straižys** (Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

habil. dr. **Evaldas Tornau** (Fizinių ir technologijos mokslų centro Puslaidininkių fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

Oponentai:

prof. habil. dr. **Antanas Bartkevičius** (Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

habil. dr. **Tamara Mishenina** (Odesos nacionalinis universitetas, Ukraina, fiziniai mokslai, fizika – 02 P).

Disertacija bus ginama viešame Vilniaus universiteto Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2011 m. rugsėjo 20 d. 14 val. Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos institute.

Adresas: A. Goštauto g. 12, LT-01108, Vilnius, Lietuva.

Disertaciją galima peržiūrėti Teorinės fizikos ir astronomijos instituto ir Vilniaus universiteto bibliotekose.

VILNIUS UNIVERSITY
INSTITUTE OF THEORETICAL PHYSICS AND ASTRONOMY

Eduardas Puzeras

EVOLUTIONARY EFFECTS
IN HELIUM CORE BURNING STAR
ATMOSPHERES

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

Vilnius, 2011

The thesis was prepared at Institute of Theoretical Physics and Astronomy, Vilnius University in 2002–2010.

Scientific supervisor:

Dr. habil. **Gražina Tautvaišienė** (Institute of Theoretical Physics and Astronomy, Vilnius University, 02P: Physical Sciences).

The doctoral dissertation is defended at the Vilnius University Doctoral Dissertation Committee in Physical Sciences:

Chairman:

Dr. habil. **Kazimieras Zdanavičius** (Institute of Theoretical Physics and Astronomy, Vilnius University, 02P: Physical Sciences).

Members:

Prof. Dr. habil. **Gintautas Kamuntavičius** (Vytautas Magnus University, 02P: Physical Sciences).

Doc. Dr. **Romualda Lazauskaitė** (Vilnius Pedagogical University, 02P: Physical Sciences).

Prof. Dr. habil. **Vytautas Straižys** (Institute of Theoretical Physics and Astronomy, Vilnius University, 02P: Physical Sciences).

Dr. habil. **Evaldas Tornau** (Institute of Physics, Center for Physical sciences and Technology, 02P: Physical Sciences).

Oponentai:

Prof. Dr. habil. **Antanas Bartkevičius** (Institute of Theoretical Physics and Astronomy, Vilnius University, 02P: Physical Sciences).

Dr. habil. **Tamara Mishenina** (Odesa National University, Ukraine, 02P: Physical Sciences).

The thesis will be defended in public at the Institute of Theoretical Physics and Astronomy, Vilnius University in 20th September 2011.

IVADAS

Žvaigždžių atmosferų cheminės sudėties tyrimas yra glaudžiai susijęs su dviem fundamentiniais moderniosios astrofizikos klausimais: maišymuisi jautrių cheminių elementų gausų tyrimas leidžia mums geriau suprasti žvaigždžių vidinę struktūrą, o galaktikose vykstančio medžiagos praturtinimo sunkesniais elementais proceso tyrimas – geriau suprasti tose galaktikose vykstančius evoliucinius procesus.

Maišymosi procesų metu išorinių žvaigždės sluoksnių medžiaga yra sumaišoma su termobranduolinėse reakcijose pakeista medžiaga. Žvaigždės branduolyje vykstančios termobranduolinės reakcijos lėtai keičia žvaigždės branduolio cheminę sudėtį, tačiau žvaigždės vidiniai sluoksniai susimaišo su išoriniais sluoksniais tik specifinių žvaigždės evoliucijos stadijų, vadinamų „drumstimis“ metu (angl. *dredge-up*). Drumsties metu žvaigždės konvekcinius sluoksnius pasiekia termobranduolinių reakcijų pakeistus vidinius žvaigždės sluoksnius, sumaišo žvaigždės medžiagą ir pakeičia kai kurių elementų gausą žvaigždės atmosferoje. Išsamios maišymosi procesų apžvalgos yra publikuotos Pinsonneault (1997), Chanamé ir kt. (2005), Charbonnel (2006) darbuose.

Vadinamasis „standartinis“ žvaigždės evoliucijos modelis priima konvekciją kaip vienintelį galimą maišymosi mechanizmą. Žvaigždei palikus pagrindinę seką ir kylant raudonųjų milžinių seka, konvekcinius sluoksnis išplinta į giluminius žvaigždės sluoksnius. Konvekcinius sluoksnis pasiekia termobranduolinių reakcijų pakeistos medžiagos sluoksnius ir išneša medžiagą į žvaigždės paviršių. Šis žvaigždės evoliucijos epizodas vadinamas pirmąja drumstimi (angl. *first dredge-up*). Žvaigždei toliau evoliucionuojant raudonųjų milžinių seka, konvekcinius sluoksnis atsitraukia ir „standartinis modelis“ nenumato kitų maišymosi epizodų iki antrosios drumsties, žvaigždei pasiekus asimptotinę milžinių seką (Pinsonneault 1997; Gratton ir kt. 2000).

Tačiau šiuolaikiniai cheminės sudėties tyrimų rezultatai pateikia svarių įrodymų, kad „standartinis modelis“ yra nepilnas (Gilroy 1989; Gilroy ir Brown 1991; Luck 1994; Charbonnel 1994; Charbonnel ir kt. 1998; Charbonnel ir Do Nascimento 1998; Gratton ir kt. 2000; Tautvaišienė ir kt. 2000; Smith ir kt. 2002; Shetrone 2003; Pilachowski ir kt. 2003; Geisler ir kt. 2005; Spite ir kt. 2006; Recio-Blanco ir de Laverny 2007; Smiljanic ir kt. 2009). Tikslūs cheminės sudėties matavimai naudojant didelės skiriamosios gebos spektrus įrodo, kad mažos masės raudonosios sekos žvaigždėse vyksta papildomo maišymosi procesai, kurių „standartinis modelis“ aprašyti negali. Šis papildomas maišymasis vyksta mažos masės raudonosioms milžinėms pasiekus vadinamąjį šviesio mazgą (angl. *luminosity bump*) raudonųjų milžinių sekoje. Šio papildomo maišymosi proceso intensyvumas priklauso nuo žvaigždės masės ir labiau pasireiškia mažos masės (iki 2 Saulės masių) žvaigždėse, tačiau naujaisi padrikųjų spiečių tyrimai rodo, kad žvaigždės nuo 2 iki 3 Saulės masių dydžio taip pat gali būti paveiktos papildomo maišymosi (Smiljanic ir kt. 2009; Mikolaitis ir kt. 2010). Dėl papildomo maišymosi sumažėja anglies izotopų ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) santykis, ličio ir anglies gausa padidėja, o azoto – šiek tiek sumažėja (Boothroyd ir Sackman 1999; Charbonnel ir Lagarde 2010).

Raudonoji sankaupa yra aiškiai išsiskiriantis Hercšprungo ir Raselo (HR) diagramos elementas. Žvaigždės diagramoje suformuoja „sankaupą“ – sąlyginai kompaktišką ir tankią struktūrą raudonosios milžinių sekos kairiojoje pusėje. Sankaupa sudaro raudonųjų milžinių sekos žvaigždės ir metalingos helį centre deginančios žvaigždės. Nemetalingos helį centre deginančios žvaigždės HR diagramoje formuoja

horizontaliąją seką. Sankaupa pirmiausia buvo išskirta ir atpažinta padrikųjų spiečių HR diagramose. Sankaupos žvaigždės yra patogūs objektai maišymosi procesams tirti, nes sankaupos žvaigždžių atmosferos cheminė sudėtis yra suminis visų maišymosi procesų, vykstančių raudonojoje milžinių sekoje, produktas.

Galaktikos raudonosios sankaupos egzistavimas pirmiausia buvo numatytas teoriškai (Cannon 1970). Netrukus buvo atrastos pirmosios Galaktikos sankaupos kandidatės (Sturch ir Helfer 1971) tarp „nesuklasifikuotų Upgreno žvaigždžių“ (Upgren 1962). Tačiau praktiškai išskirti sankaupos žvaigždes iš kitų Galaktikos lauko žvaigždžių buvo labai sunku. Pirmoji didelė Galaktikos sankaupos žvaigždžių grupė buvo išskirta tik 1994 metais OGLE eksperimento metu (Paczynski ir kt. 1994) stebint žvaigždes Baadės lange. Tik pakilus į kosmosą Hipparcos palydovui buvo sudaryta tiksli Saulės aplinkos žvaigždžių HR diagrama ir aiškiai identifikuotos Saulės aplinkoje esančios Galaktikos sankaupos žvaigždės.

Sistemingi Galaktikos raudonosios sankaupos žvaigždžių cheminės sudėties tyrimai prasidėjo tik 21-ojo amžiaus pradžioje. Zhao ir kt. (2001) ištyrė 39 Galaktikos sankaupos žvaigždžių cheminę sudėtį. Deja, autoriai nekritiškai panaudojo Alonso ir kt. (1999) klaidingai publikuotą temperatūros kalibraciją, dėl to klaidingai nustatė pagrindinius žvaigždžių atmosferos parametrus ir gausas. Mishenina ir kt. (2006) nustatė 9 elementų gausas 177-iose Galaktikos sankaupos žvaigždėse, Liu ir kt. (2007) – 11 elementų gausas 63-ose Pietų pusrutulio Galaktikos sankaupos žvaigždėse. Luck ir Heiter (2007) ištyrė 298 artimų Saulei milžinių, tarp kurių buvo ir sankaupos žvaigždžių, cheminę sudėtį. Minimi darbai aprėpė tik dalį sankaupos žvaigždžių, taip pat nebuvo nustatyta svarbaus žvaigždžių medžiagos maišymosi indikatoriaus ^{13}C gausa.

Darbo tikslas

Disertacijos tyrimų programa buvo sudaryta siekiant dvejojo mokslinio tikslo: papildomo maišymosi procesų tyrimas mažos masės žvaigždėse ir Galaktikos sankaupos žvaigždžių cheminės sudėties tyrimas.

Pagrindinis disertacijos tikslas yra evoliucinių efektų tyrimas mažos masės helį centre deginančių žvaigždžių atmosferose pagal stebėtus žvaigždžių spektrus ir teorinių modelių įvertinimas.

Pagrindinės užduotys

1. 62-ų Galaktikos sankaupos žvaigždžių pagrindinių atmosferos parametrų ir geležies grupės elementų gausų nustatymas ir gautų rezultatų interpretacija.
2. Anglies, azoto ir deguonies gausų ir anglies izotopų santykio ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) nustatymas 34-ių Galaktikos sankaupos žvaigždžių atmosferose ir gautų rezultatų interpretacija.
3. Padrikojo žvaigždžių spiečiaus NGC 7789 9-ių žvaigždžių pagrindinių atmosferos parametrų ir detalios cheminės sudėties nustatymas, ir gautų rezultatų interpretacija.

Mokslinis naujumas

1. Ištirtų Galaktikos sankaupos žvaigždžių imtis buvo padidinta, anglies izotopų ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) santykis Galaktikos sankaupos žvaigždėse buvo ištirtas pirmą kartą.

2. Panaudojant autorius ir publikuotus kitų šiuolaikinių tyrimų rezultatus, buvo įvertintas Galaktikos sankaupos žvaigždžių metalingumo pasiskirstymas. Tyrimas patvirtino hipotezę, kad sankaupos žvaigždės yra sąlyginai jauni objektai, atstovaujantys artimiems Saulei metalingumams, ir susiformavusios per pastaruosius kelis milijardus metų.

3. Buvo pasiūlytas anglies izotopų santykio kriterijus Galaktikos sankaupos žvaigždžių evoliucinei stadijai nustatyti.

4. Padrikojo žvaigždžių spiečiaus NGC 7789 žvaigždžių cheminė sudėtis buvo nustatyta tiksliau ir apimant didesnę cheminių elementų skaičių nei ankstesniuose darbuose. Anglies izotopų ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) santykis spiečiaus sankaupos žvaigždžių atmosferose buvo nustatytas pirmą kartą.

Praktinė disertacijos svarba

Ši disertacija yra stebėjimo darbas, kuris apima dvi greitai besivystančias astrofizikinių tyrimų kryptis. Tai – a) maišymosi procesų tyrimas evoliucionavusiose žvaigždėse ir b) Galaktikos sankaupos žvaigždžių Saulės aplinkoje cheminės sudėties tyrimas:

1. Žvaigždėse vykstančių papildomo maišymosi procesų supratimas yra būtinas norint pilnai suprasti žvaigždžių vidaus sandarą ir evoliuciją. Papildomo maišymosi procesų teorijos ir modeliai gali būti patvirtinti tik lyginant su stebėjimų rezultatais, kurių rinkinį papildoma ginami rezultatai.

2. Disertacijoje publikuojami rezultatai nustato papildomus apribojimus Galaktikos sankaupos teoriniams modeliams, kurie bus naudingi ateityje modeliuojant Galaktikos žvaigždžių populiaciją Saulės aplinkoje.

3. Tikslus Galaktikos sankaupos modelis yra būtinas, naudojant sankaupos žvaigždės kaip atstumo nustatymo įrankį.

4. Tiksliai nustatytas seno ir turtingo padrikojo spiečiaus NGC 7789 metalingumas leidžia naudoti spiečių kaip atskaitos tašką analogiškai kaip naudojamas padrikasis spiečius M67.

Ginamieji teiginiai

1. Ištirtos Galaktikos sankaupos žvaigždės sudaro homogenišką imtį, kurios metalingumas yra artimas Saulės metalingumui. Šiame darbe nustatytas Galaktikos sankaupos žvaigždžių metalingumas ir maža metalingumo dispersija ($\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]} = 0.15$) patvirtina Girardi ir Salaris (2001) *Hipparcos* sankaupos teorinį modelį, kuris teigia, kad Galaktikos sankaupos žvaigždės Saulės aplinkoje yra (vidutiniškai) santykinai jauni objektai, atspindintys artimus Saulei metalingumus, ir susiformavę per pastaruosius keletą milijardų metų.

2. Apibendrinus šioje disertacijoje nustatytus ir literatūroje publikuotus (Mishenina ir kt. 2006; Liu ir kt. 2007; Luck ir Heiter 2007) Galaktikos sankaupos

žvaigždžių cheminės sudėties tyrimo rezultatus nustatyta, kad Galaktikos sankaupos žvaigždėse anglies gausa yra sumažėjusi per 0.2, azoto gausa padidėjusi per 0.2, o deguonies gausa nepakitusi, palyginti su Galaktikos lauko žvaigždžių nykštukių atmosferų chemine sudėtimi.

3. Sankaupos žvaigždės gali būti suskirstytos į skirtingas evoliucines grupes panaudojant $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ kriterijų. Iširtos Galaktikos sankaupos žvaigždės pasiskirsto į šias grupes maždaug po lygiai.

4. Stebimi $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ izotopų santykiai Galaktikos sankaupos žvaigždėse gerai sutampa su šaltojo žemutinių sluoksnių papildomo maišymosi modelio (CBP, angl. *Cool Bottom Processing*) numatomais santykiais (Boothroyd ir Sackman 1999). Termohalinio papildomo maišymosi modelis (Lagarde ir Charbonnel 2009) turi būti papildytas sukimosi sukkelto maišymosi komponente, kad būtų užtikrintas modelio ir stebėjimų sutapimas žvaigždėms, kurių masė didesnė už 1.5 Saulės masės.

5. Padrikovo spiečiaus NGC 7789 metalingumas yra artimas Saulės metalingumui. Yra nustatytas C/N santykio skirtumas spiečiaus raudonosiose milžinėse (1.9 ± 0.5) ir sankaupos žvaigždėse (1.3 ± 0.2). $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ izotopų santykis yra panašus visose iširtose spiečiaus žvaigždėse (9 ± 1) ir nurodo galbūt didesnę papildomą maišymą nei numato dabartiniai teoriniai modeliai.

Autoriaus įnašas

Autorius dalyvavo sudarant stebėjimų programas, stebėjimuose Šiaurės optiniu teleskopu (NOT) La Palmoje ir atliko dalį spektrų apdorojimo darbų, nustatė tiriamų žvaigždžių atmosferos parametrus ir cheminę sudėtį, atliko gautų rezultatų analizę ir suformulavo išvadas.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, penki skyriai, išvados ir literatūros sąrašas. Pirmajame skyriuje pateikiama stebėjimų medžiaga, antrajame – darbo metodai, trečiajame – apžvelgiamas Galaktikos sankaupos žvaigždžių pagrindinių parametru ir geležies grupės elementų gausų tyrimas, ketvirtajame – pristatomas maišymosi indikatorių tyrimas Galaktikos sankaupos žvaigždėse, penktajame – aptiriamas padrikovo spiečiaus NGC 7789 žvaigždžių cheminės sudėties tyrimas.

PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

1. Tautvaišienė G., Edvardsson B., **Puzeras E.**, Barisevičius G., Ilyin I. 2010, *C, N and O abundances in red clump stars of the Milky Way* // Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 409, 1213–1219.

2. **Puzeras E.**, Tautvaišienė G., Cohen J. G., Gray D. F., Adelman S. J., Ilyin I., Chorniy Y. 2010, *High-resolution spectroscopic study of red clump stars in the Galaxy: iron-group elements* // Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 408, 1225–1232.

3. Tautvaišienė G., **Puzeras E.**, Chorniy Y., Barisevičius G., Ilyin I. 2009, *CNO abundance pattern in the red clump stars of the Milky Way* // IAU Symposium 262, „Stellar populations: Planning for the next decade“ (eds. Gustavo Bruzual & Stephane Charlot), IAUS, 262, 434–435.

4. Tautvaišienė G., **Puzeras E.** 2008, *Red clump stars in the Galactic field* // IAU Symposium 254, „The Galaxy Disk in Cosmological Context“ (eds. J. Andersen, J. Bland-Hawthorn & Birgitta Nordström), IAUS, 254, 1–6.

5. Tautvaišienė G., Mikolaitis Š., **Puzeras E.** 2009, *E–infrastructure in Baltic States and its Application in Astrophysics* // Memorie della Società Astronomica Italiana, 80, 534–539.

6. Tautvaišienė G., Edvardsson B., **Puzeras E.**, Ilyin I. 2006, *Abundances of C, N and O as Probes of Mixing in Low-Mass Helium-Core Burning Stars* // IAU Symposium 239, „Convection in Astrophysics“ (eds. F. Kupka, I. W. Roxburgh & K. Lam Chan), IAUS, 239, 301–303.

7. Tautvaišienė G., Edvardsson B., **Puzeras E.**, Stasiukaitis E., Ilyin I. 2006, *Chemical abundances and mixing in red clump stars of the Galaxy* // ESO–Arcetri Workshop „Chemical abundances and mixing in stars in the Milky Way and its satellites“ (eds. S. Randich, L. Pasquini), ESO ASTROPHYSICS SYMPOSIA, Springer-Verlag, 11–12.

8. Tautvaišienė G., Edvardsson B., **Puzeras E.**, Ilyin I. 2005, *Chemical composition of evolved stars in the open cluster NGC 7789* // Astronomy & Astrophysics, 431, 933–942.

9. Tautvaišienė G., Stasiukaitis E., **Puzeras E.**, Gray D. F., Ilyin I., 2005, *High resolution spectroscopic study of red clump stars in the Galaxy. Main atmospheric parameters* // 13th Cambridge Workshop „Cool stars, stellar systems and the Sun“ (eds. F. Favata, G. A. J. Hussain, B. Battrick), ESA SP-560, European Space Agency, 989–992.

10. Tautvaišienė G., **Puzeras E.**, Edvardsson B., Ilyin I., 2004, *Stellar abundance anomalies: Open cluster NGC7789* // IAU Symposium 219, „Stars as Suns: Activity, Evolution and Planets“ (eds. A. K. Dupree & A. O. Benz), IAUS, 219, 985.

11. Tautvaišienė G., **Puzeras E.**, Gray D. F., Ilyin I., 2003, *Chemical homogeneity of atmospheres in clump stars of the Galaxy* // IAU Symposium 210, „Modelling of Stellar Atmospheres“ (eds. N. Piskunov, W. W. Weiss & D. F. Gray), IAUS, 210, D6.

PRANEŠIMAI TARPTAUTINĖSE KONFERENCIJOSE

1. **Puzeras E.**, Tautvaišienė G., *Chemical properties of the Hipparcos red clump* // Joint European and National Astronomy Meeting 2010 (JENAM–2010), Lisbon (Portugal), 6–10 September, 2010 (stendinis pranešimas).
2. Tautvaišienė G., **Puzeras E.**, Chorniy Y., Barisevicius G., Ilyin I. 2009, *CNO abundance pattern in the red clump stars of the Milky Way* // IAU Symposium 262 „Stellar populations: Planning for the next decade“, Rio de Janeiro (Brazil), 3–7 August, 2009.
3. Tautvaišienė G., **Puzeras E.**, *Red clump stars in the Galactic field* // IAU Symposium 254 „The Galaxy Disk in Cosmological Context“, Copenhagen (Denmark), 9–13 June, 2008.
4. Tautvaišienė G., Edvardsson B., **Puzeras E.**, Ilyin I., *Abundances of C, N and O as Probes of Mixing in Low–Mass Helium–Core Burning Stars* // IAU Symposium 239 „Convection in Astrophysics“, Prague (Czech Republic), 21–25 August, 2006.
5. Tautvaišienė G., Edvardsson B., **Puzeras E.**, Stasiukaitis E., Ilyin I., *Chemical abundances and mixing in red clump stars of the Galaxy* // ESO–Arcetri Workshop „Chemical abundances and mixing in stars in the Milky Way and its satellites“, Castiglione della Pescaia (Italy), 13–17 September, 2004.
6. Tautvaišienė G., Stasiukaitis E., **Puzeras E.**, Gray D. F., Ilyin I., *High resolution spectroscopic study of red clump stars in the Galaxy. Main atmospheric parameters* // 13th Cambridge Workshop „Cool stars, stellar systems and the Sun“, Hamburg (Germany), 5–9 July, 2004.
7. **Puzeras E.**, Tautvaišienė G., Edvardsson B., Ilyin I., *Chemical composition of evolved stars in open cluster NGC 7789* // Taiwan–Baltic Workshop „Dynamical and Chemical Evolution of Star Clusters“, Jong–Li (Taiwan), 24–28 November, 2003 (žodinis pranešimas).
8. Tautvaišienė G., **Puzeras E.**, Edvardsson B., Ilyin I., *Stellar abundance anomalies: Open cluster NGC7789* // IAU Symposium 219 „Stars as Suns: Activity, Evolution and Planets“, Sydney (Australia), 21–25 July, 2003.
9. Tautvaišienė G., **Puzeras E.**, Gray D. F., Ilyin I., *Chemical homogeneity of atmospheres in clump stars of the Galaxy* // IAU Symposium 210 „Modelling of Stellar Atmospheres“, Uppsala (Sweden), 17–21 June, 2002.

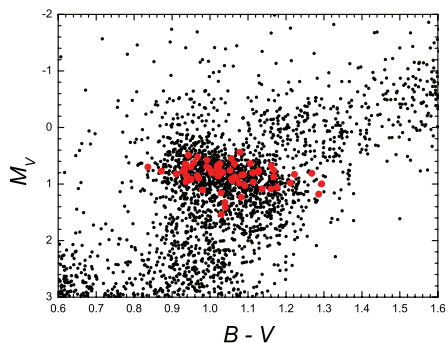
1 STEBĖJIMŲ MEDŽIAGA

Darbe naudotą stebėjimo medžiagą sudaro dvi mažos masės raudonųjų milžinių imtys: 62 Galaktikos raudonosios sankaupos žvaigždės ir 9 padrikojo spiečiaus NGC 7789 žvaigždės.

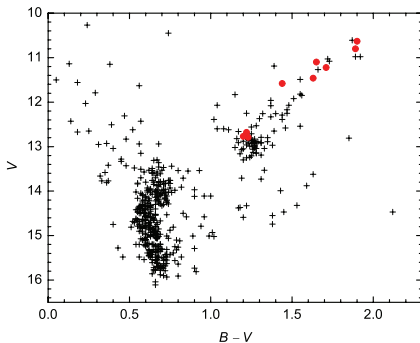
1.1 Objektų pasirinkimas

Hipparcos kataloge (Perryman ir kt. 1997) yra apie 600 sankaupos žvaigždžių, kurių paralakso paklaida yra mažesnė negu 10 %, taigi absoliutinio ryškio paklaida mažesnė negu 0.12 ryškio. Ši tikslumo riba maždaug atitinka atstumo ribą ties 125 parsekais, iki kurios sankaupos žvaigždžių imtis yra pilna. *Hipparcos* katalogo žvaigždės atitinkančios tikslumo kriterijus $\sigma_{\pi}/\pi < 0.1$ ir $\sigma_{B-V} < 0.025$ ryškio, yra pavaizduotos 1-ame pav. Jame yra aiškiai matoma sankaupa, kurios centras apytiksliai yra ties $B-V \approx 1.0$ ir $M(Hp) \approx 1.0$. Atitinkančios minėtą tikslumo kriterijų ir vizualiai priklausančios sankaupos struktūrai žvaigždės buvo atrinktos stebėti. Remiantis literatūros šaltiniais buvo patikrintas visų kandidačių dvinariškumas ir kintamumas. Tolesnį konkrečių žvaigždžių pasirinkimą stebėti diktavo stebėjimo laikas ir sąlygos.

Padrikasis spiečius NGC 7789 buvo pasirinktas tirti todėl, kad yra senas ir gausus žvaigždžių, spiečiaus spalvos ir ryškio diagramoje aiškiai matoma sankaupa. Šis spiečius yra pakankamai arti, kad galėtų būti tiriamas pagal didelės skiriamosios gebos spektrus autoriui prieinamais prietaisais. Tyrimui išrinkome 6 spiečiaus raudonosios milžinių sekos žvaigždes ir 3 helį centre deginančias sankaupos žvaigždes.



1 pav. *Hipparcos* katalogo spalvos ir ryškio diagrama. Tiriamos žvaigždės pažymėtos raudona spalva.



2 pav. Padrikojo spiečiaus NGC 7789 spalvos ir ryškio diagrama pagal Burbidge ir Sandage (1958) UBV fotometrinius matavimus. Tiriamos žvaigždės pažymėtos raudona spalva.

1.2 Stebėjimai

Autorius asmeniškai stebėjo kai kurias imties žvaigždes Šiaurės optiniu teleskopu (NOT), esančiu La Palmoje, Kanarų salose (Ispanija). Gauta stebėjimų medžiaga buvo papildyta spektrais, gautais iš užsienio kolegų. Dalis tiriamųjų žvaigždžių buvo stebėtos keliais teleskopais.

17-os Galaktikos sankaupos žvaigždžių spektrai ir visų 9 padrikojo spiečiaus NGC 7789 žvaigždžių spektrai buvo gauti NOT teleskopo SOFIN spektrografu (Tuominen ir kt. 1999). Galaktikos sankaupos žvaigždžių spektrams gauti buvo naudojama 2-oji spektrografo optinė kamera, užtikrinanti $R \approx 80\,000$ skiriamąją gebą. Vienu metu buvo gauta 13 spektrinių eilių, kurių kiekvienos plotis 40–60 Å, spektro intervale 5650–8130 Å. Geresniam spektro padengimui buvo gauti du kiekvienos žvaigždės spektrai naudojant skirtingas CCD detektoriaus pozicijas. Spiečiaus žvaigždžių stebėjimams buvo naudojama 3-ioji spektrografo optinė kamera, užtikrinanti skiriamąją gebą $R \approx 30\,000$. Šiuo atveju CCD detektorius padengė 25 spektrines eiles, kurių kiekvienos plotis 80–150 Å, spektro intervale nuo 4500 iki 8750 Å.

Lauko žvaigždžių stebėjimų ekspozicijos trukmė buvo nuo 5 iki 30 minučių. Ji priklausė nuo žvaigždės ryškio ir stebėjimo sąlygų. Signalo triukšmo santykis S/N siekė 100–200. Spiečiaus raudonųjų milžinių sekos žvaigždžių tipiška ekspozicijos trukmė buvo 40 minučių, spiečiaus sankaupos žvaigždžių – 160 minučių. NGC 7789 milžinėms S/N siekė 100, o sankaupos žvaigždėms buvo pasiektas S/N ≈ 50 . SOFIN spektrografo CCD vaizdai buvo apdoroti naudojant SOFIN 4A programinį paketą pagal standartinę procedūrą (Ilyin 2000).

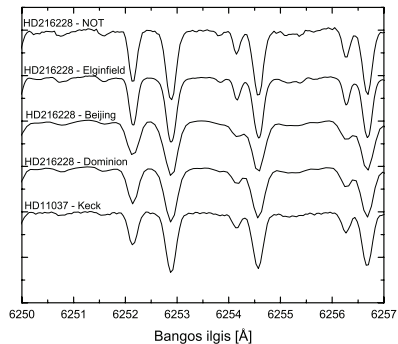
NOT teleskopu gauta Galaktikos sankaupos žvaigždžių stebėjimo medžiaga buvo papildyta iš užsienio kolegų gautais spektrais. 14-os žvaigždžių spektrai buvo gauti 10 m Keck teleskopo HIRES spektrografu (skiriamoji geba $R \approx 34\,000$), 17-os žvaigždžių spektrai buvo gauti 1.22 m Dominiono observatorijos teleskopu ($R \approx 40\,000$), 18-os žvaigždžių spektrai spektro intervale nuo 6220 Å iki 6270 Å buvo gauti 1.2 m Elginfieldo observatorijos teleskopu ($R \approx 100\,000$). Stebėjimo medžiaga buvo papildyta viešai publikuotais spektrais, gautais 2.16 m Pekino observatorijos teleskopu ($R \approx 37\,000$) (Zhao ir kt. 2001). 3 ir 4 pav. pateikiami skirtingais teleskopais stebėtų žvaigždžių spektrų pavyzdžiai.

2 DARBO METODAI

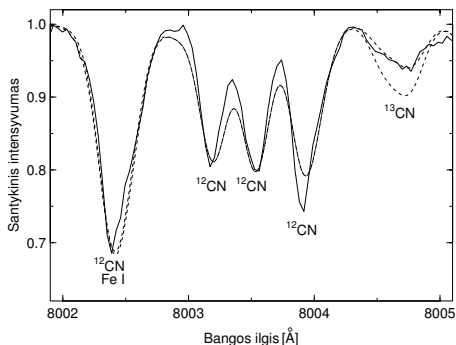
Cheminių elementų gausai nustatyti buvo naudojamas klasikinis diferencialinis atmosferų modelių metodas. Diferencialinio metodo esmę sudaro cheminio elemento santykinės gausos nustatymas tiriamoje žvaigždėje palyginamosios žvaigždės (mūsų atveju Saulės) atžvilgiu, minimalizuojant gausos nustatymo paklaidas. Tokiu būdu galima, pavyzdžiui, neutralizuoti sistematines paklaidas, atsirandančias dėl skaičiavimui naudojamų fizikinių duomenų paklaidų arba dėl nukrypimų nuo lokalinės termodinaminės pusiausvyros (LTE) modelio (Cayrel ir Cayrel de Strobel, 1966).

Norint nustatyti cheminių elementų gausas, reikia nustatyti pagrindinius žvaigždės atmosferos parametrus (efektingą temperatūrą, laisvojo kritimo pagreitį žvaigždės paviršiuje ir mikroturbulencijos greitį), reikalingas atitinkamas žvaigždės

atmosferos modelis ir atominiai (arba molekuliniai) fizikiniai duomenys, aprašantys tiriamą spektrinę liniją atitinkanti šuolį.



3 pav. Galaktikos sankaupos žvaigždžių spektrų pavyzdžiai spektriniame regione nuo 6250 iki 6257 Å. Žvaigždė HD 216228 buvo stebėta keturiais skirtingais teleskopais.



4 pav. Sintetinio spektro pavyzdys. Ištinė linija žymi stebėtą spektrą, o brūkšninės linijos – sintetinį spektrą (viršutinė linija $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 10$; apatinė $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 20$).

2.1 Pagrindinių atmosferos parametrų nustatymas

Šioje disertacijoje buvo taikomas spektrinis žvaigždžių atmosferos parametrų nustatymo metodas. Metodas yra pagrįstas reikalavimu, kad konkretaus cheminio elemento gausa, apskaičiuota pagal skirtingas elemento spektrines linijas, būtų identiška. Teisingų žvaigždės atmosferos parametrų rinkiniui nustatyti yra naudojami paprasti ir efektyvūs kontrolės būdai. Efektinė temperatūra nustatoma reikalaujant, kad elemento gausa nepriklaustų nuo spektrinės linijos sužadavimo potencialo. Laisvojo kritimo pagreitis nustatomas reikalaujant, kad sutaptų elemento gausos, nustatytos pagal neutralaus ir jonizuoto elemento linijas. Mikroturbulencijos greitis nustatomas reikalaujant, kad gausa, nustatyta pagal stiprias ir silpnas elemento linijas, sutaptų.

Preliminari efektinė temperatūra buvo nustatyta pagal $(B-V)_0$ ir $(b-y)_0$ fotometrinius indeksus, naudojant Alonso ir kt. (1999) kalibracijas, taip pat publikuotas IRFM metodu nustatytas efektines temperatūras. Efektinės temperatūros buvo koreguojamos pirmiau minėtu spektriniu metodu. Visų tiriamų žvaigždžių pagrindiniai atmosferos parametrai buvo nustatyti pagal geležies elemento spektrines linijas. Atsižvelgiant į spektro padengimą, pagrindiniams parametrams nustatyti buvo naudojama iki 65 Fe I ir 12 Fe II linijų.

Žvaigždžių masės buvo nustatytos pagal autoriaus nustatytas efektines temperatūras ir apskaičiuotas žvaigždžių šviesius bei Girardi ir kt. (2000) žvaigždžių evoliucijos trekus. Žvaigždžių šviesiai buvo apskaičiuoti pagal *Hipparcos* paralaksus (van Leeuwen 2007), Alonso ir kt. (1999) darbe publikuotas bolometrines pataisas ir Hakkila ir kt. (1994) programa apskaičiuotas tarpžvaigždinio paraudonavimo korekcijas.

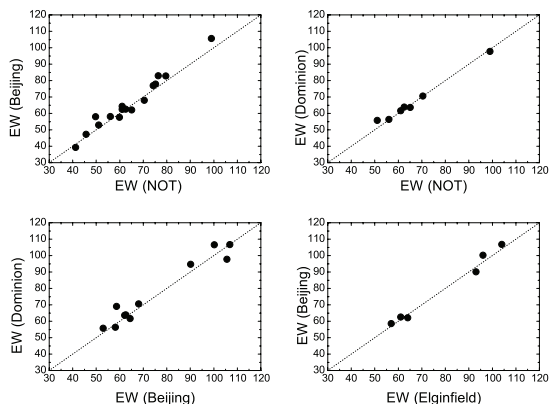
2.2 Programinė įranga, atmosferų modeliai ir fizikiniai duomenys

Gausų vertėms skaičiuoti buvo naudojami du programinės įrangos paketai (*eqwidth* ir *bsyn*), sukurti Upsalos astronomijos observatorijoje. *Eqwidth* paketas buvo naudojamas skaičiuoti cheminių elementų gausas naudojant išmatuotus ekvivalentinius linijų pločius. Ekvivalentūs linijų pločiai buvo matuojami interaktyviai aproksimuojant spektrines linijas Gauso funkcijomis, naudojant 4A programinį paketą (Ilyin 2000). Anglies, azoto, deguonies, itrio ir europio gausos buvo nustatytos sintetinių spektrų paketu *bsyn*. Šiuo atveju buvo suskaičiuoti keli sintetiniai konkrečios žvaigždės spektrai, varijuojant tiriamo elemento gausą, ir vizualiai lyginami su stebėtu žvaigždės spektru.

Šiame darbe buvo naudojami lokalinės termodinaminės pusiausvyros (LTE), plokščiai lygiagretūs, pastovaus srauto žvaigždžių atmosferų modeliai, suskaičiuoti naudojant atnaujintą MARCS kodą (Gustafsson ir kt. 2008).

Skaičiavimui reikalingi fizikiniai spektrinių linijų parametrai buvo surinkti iš keleto šaltinių. Pagrindinis atominių duomenų šaltinis buvo Vienos atominių linijų duomenų bazė (VALD, Piskunov ir kt. 1995). Svarbiausioms linijoms osciliatorių stiprumai ir Saulės linijų ekvivalentūs pločiai buvo paimti iš Kijeve atliktos Saulės spektro analizės (Gurtovenko & Kostik 1989).

2.3 Spektrinių linijų pasirinkimas ir matavimas



5 pav. Žvaigždės HD 216228 spektro linijų ekvivalentinių pločių, išmatuotų pagal skirtingų teleskopų spektrus, palyginimas.

tarp 20 mÅ ir 150 mÅ. Pagal konkrečią spektrinę liniją skaičiuojamos gausos rezultatai visose tiriamose žvaigždėse buvo lyginami su vidutiniu gausos rezultatu, gautu pagal visas elemento linijas. Sistematiškai anomalią gausą daugumoje tiriamų žvaigždžių duodančios spektrinės linijos buvo pašalintos iš linijų sąrašo. Pagal skirtingų teleskopų spektrus išmatuotų spektro linijų ekvivalentinių pločių sutapimas buvo įvertintas pagal žvaigždės HD 216228 spektrus (5 pav.).

Žvaigždžių cheminės sudėties nustatymo tikslumas labai priklauso nuo analizuojamų spektro linijų sąrašo pasirinkimo ir tikslaus spektrinių linijų ekvivalentaus pločio matavimo. Moore ir kt. (1966) Saulės linijų atlasas ir VALD duomenų bazė buvo naudojami blenduotoms linijoms identifikuoti ir atvesti. Visų skaičiavimams naudotų linijų profiliai buvo vizualiai patikrinti ir buvo atmestos linijos, kurių pločio nebuvo įmanoma patikimai išmatuoti. Skaičiavimui buvo naudotos tik tos linijos, kurių ekvivalentus plotis yra intervale

2.4 Sintetinių spektrų metodas

Silpnų arba galbūt susiliejusių linijų ir molekulinėjų juostų tyrimas yra efektyvesnis taikant sintetinių spektrų metodą. Šiame darbe sintetinių spektrų metodu buvo nustatytos anglies, azoto, deguonies, itrio, europio gausos ir anglies izotopų santykis.

Anglies gausai nustatyti buvo modeliuojamas 5632–5636 Å spektro intervalas ties C₂ Swan (0, 1) juosta. Molekuliniai C₂ juostos duomenys buvo paimti iš Gonzalez ir kt. (1998) straipsnio. Izotopų santykis ¹²C/¹³C buvo nustatytas modeliuojant ¹²C/¹⁴N ir ¹³C/¹⁴N struktūras spektro intervale 7980–8130 Å (4 pav.). Deguonies gausa buvo nustatyta modeliuojant draustinę [O I] liniją ties 6300 Å. Modeliuojant Galaktikos sankaupos žvaigždžių spektrus buvo įskaitytas linijų išplitimas dėl žvaigždės sukimosi. Žvaigždžių *v*-sini vertės buvo paimtos iš literatūros. Itrio ir europio gausos padrikojo spiečiaus NGC 7789 žvaigždėse buvo nustatytos: itrio gausa – pagal 5402 Å Y II liniją, europio gausa – pagal 6645 Å Eu II liniją.

2.5 Paklaidų įvertinimas

Cheminių elementų gausos nustatymo paklaidų šaltinius galime suskirstyti į dvi pagrindines grupes: pirmąją grupę sudaro paklaidos, kurios veikia kiekvieną spektro liniją atskirai, antrąją grupę sudaro paklaidos, kurios veikia visas spektro linijas kartu.

Pirmąją grupę sudaro linijos parametrų paklaidos (atsitiktinės linijos ekvivalentaus pločio, osciliatoriaus stiprumo ir t. t. paklaidos). Iš dalies į šią grupę patenka kitos paklaidos, visų pirma spektro ištinio spektro padėties nustatymo paklaidos. Šios grupės paklaidos yra pateikiamos atitinkamose rezultatų lentelėse disertacijos tekste kaip kiekvieno elemento apskaičiuotų gausų pagal visas elemento linijas vidutinis kvadratinis nuokrypis. Vidutinę šios paklaidos vertę galime laikyti tipine atsitiktinių paklaidų verte. Sankaupos žvaigždžių gausos nustatymo vidutinė paklaida yra 0.07. Padrikojo spiečiaus NGC 7789 žvaigždžių gausos nustatymo vidutinė paklaida yra 0.10. Ši skirtumą nulemia mažesnė NGC 7789 žvaigždžių spektrų skiriamoji geba ir mažesnis spektrų signalo ir triukšmo santykis.

Antroji paklaidų grupė apima paklaidas, kurios veikia visas linijas kartu. Pagrindinis šių paklaidų šaltinis yra atmosferų modelių paklaidos, t. y. efektinės temperatūros, laisvojo kritimo pagreičio ir mikroturbulencijos greičio nustatymo paklaidos. Disertacijoje šios paklaidos pateikiamos gausų nustatymo jautrumo atmosferos parametrų paklaidoms pavidalu, priimant tam tikrus atmosferų parametrų nustatymo paklaidų įverčius: $\Delta T_{\text{eff}} = 100$ K; $\Delta \log g = 0.2$; $\Delta v_t = 0.3$ km/s.

3 GALAKTIKOS SANKAUPOS POPULIACIJA SAULĖS APLINKOJE

Sankaupos žvaigždės yra gerai žinomas spiečių HR diagramų elementas, tačiau Saulės aplinkoje sankaupos žvaigždės buvo aiškiai išskirtos tik pagal *Hipparcos* kosminės misijos rezultatus, nors egzistuojant tokias žvaigždes buvo įtariama jau seniai (Cannon 1970). Galaktikos sankaupos žvaigždžių tyrimas yra svarbus, nes nustato naudingus Galaktikos cheminės evoliucijos modelių apribojimus. Be to, sankaupos žvaigždės gali būti efektyvus atstumo indikatorius (Girardi ir Salaris 2001).

Ištirtos sankaupos žvaigždės sudaro homogenišką imtį pagrindinių atmosferos parametrų erdvėje. Zhao ir kt. (2001) darbe pasiūlytų skirtingo metalingumo žvaigždžių grupių nepastebėta. Žvaigždžių efektinės temperatūros apima intervalą nuo 4300 iki 5100 K, vidutinė imties vertė yra $T_{\text{eff}} = 4750 \pm 160$ K; $\log g$ intervalas yra nuo 1.8 iki 3.3, jo vidutinė vertė yra ties $\log g = 2.41 \pm 0.26$; mikroturbulencijos greičio vidutinė vertė yra $v_t = 1.34 \pm 0.19$ km·s⁻¹. Žvaigždės yra išsidėsčiusios metalingumo intervale nuo -0.6 iki +0.3, tačiau dauguma žvaigždžių koncentruojasi apie vidutinę vertę $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.04$, kai vidutinis kvadratinis nuokrypis yra 0.15.

3.1 Rezultatų palyginimas

35-ios šiame darbe tirtos žvaigždės buvo tiriamos ir McWilliam (1990) darbe. McWilliam ir Rich (1994) pažymėjo, kad dėl McWilliam (1990) darbe analizei naudoto siauro bangų intervalo (6550–6800 Å) ir metalingų žvaigždžių atmosferų modelių trūkumo žvaigždžių metalingumas buvo nepakankamai tiksliai nustatytas. Šio darbo rezultatai tai patvirtina: $[\text{Fe}/\text{H}]_{(\text{McW})} - [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{Mūsų}} = -0.13 \pm 0.07$.

Zhao ir kt. (2001) ištyrė 39-į Galaktikos sankaupos žvaigždžių cheminę sudėtį. Deja, autoriai panaudojo Alonso ir kt. (1999) temperatūros kalibracijos formulę su spaudos klaida, kuri buvo ištaisyta Alonso ir kt. (2001) darbe. Neteisingai nustatyta temperatūra nulėmė, kad buvo klaidingai nustatyti pagrindinius žvaigždžių parametrai ir klaidingai nustatytos gausos. Metalingų žvaigždžių temperatūra buvo pervertinta iki 200 K ir gausa iki +0.2, nemetalingų žvaigždžių rezultatai buvo paveikti analogiško dydžio priešingo ženklų paklaidų.

177-į Galaktikos sankaupos žvaigždžių cheminę sudėtį tyrė Mishenina ir kt. (2006), naudodami Haute Provence observatorijos (Prancūzija) 1.93 m teleskopu gautus spektrus ($R = 42\,000$). 63-ą Pietų pusrutulio Galaktikos sankaupos žvaigždžių cheminę sudėtį tyrė Liu ir kt. (2007), naudodami 1.52 m ESO La Silla teleskopo spektrus ($R = 48\,000$). Luck ir Heiter (2007) tyrė 298 raudonųjų milžinių cheminę sudėtį, naudodami didelės skiriamosios gebos spektrus ($R = 60\,000$). Palyginimui mes iš 298 milžinių atrinkome 138 raudonosios sankaupos žvaigždes pagal darbe publikuotą HR diagramą.

Minėtuose darbuose tiriamos žvaigždžių imtys iš dalies persiklojo, todėl buvo atlikta metalingumo lyginamoji analizė:

$$\begin{aligned} [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{D}} - [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{LH}} &= +0.01 \pm 0.06 \text{ (16 žvaigždžių),} \\ [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{D}} - [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{L}} &= +0.04 \pm 0.10 \text{ (8 žvaigždės),} \\ [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{D}} - [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{M}} &= +0.01 \pm 0.12 \text{ (24 žvaigždės),} \\ [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{L}} - [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{LH}} &= -0.04 \pm 0.04 \text{ (9 žvaigždės),} \end{aligned}$$

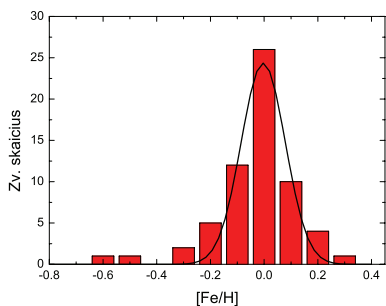
čia D – disertacijos rezultatas, LH – Luck ir Heiter (2007), M – Mishenina ir kt. (2006), L – Liu ir kt. (2007). Kaip matome, skirtinguose darbuose nustatyto metalingumo skirtumai yra nežymūs ir atsitiktinio pobūdžio. Išimtį sudaro nedidelis sisteminis skirtumas tarp LH ir M darbų: $[Fe/H]_{LH} - [Fe/H]_M = +0.07 \pm 0.07$ (41 žvaigždžių).

Disertacijoje nustatyti pagrindiniai žvaigždžių atmosferų parametrai puikiai dera su Mishenina ir kt. (2006) darbe publikuotais parametrais, nepaisant skirtingų efektinės temperatūros nustatymo metodų. Luck ir Heiter (2007) darbe atmosferų parametrai buvo nustatyti keliais skirtingais metodais. „Spektrinės“ temperatūros yra sistematiškai aukštesnės per ~100 K, log g skiriasi per +0.4, tačiau „fizikiniai“ parametrai puikiai dera su disertacijoje ir Mishenina ir kt. (2006) darbe publikuotais parametrais. Efektinės temperatūros, publikuotos Liu ir kt. (2007) darbe, yra ~60 K žemesnės, o log g yra ~0.3 didesnis nei disertacijos rezultatai.

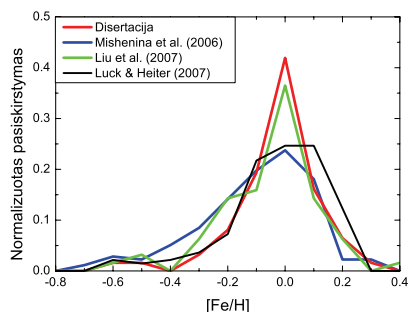
3.2 Galaktikos sankaupos žvaigždžių metalingumo pasiskirstymas

Galaktikos sankaupos žvaigždžių pasiskirstymas pagal metalingumą yra svarbi Galaktikos sankaupos charakteristika. Pasibaigus *Hipparcos* palydovo misijai, *Hipparcos* sankaupos metalingumą buvo bandoma nustatyti netiesioginiais metodais. Jimenez ir kt. (1998) pagal *Hipparcos* sankaupos padėtį izochronų atžvilgiu Galaktikos sankaupos žvaigždžių metalingumo intervalą įvertino: $-0.7 < [Fe/H] < 0.0$.

Girardi ir Salaris (2001) įvertino *Hipparcos* sankaupos žvaigždžių metalingumo pasiskirstymą pagal rinkiniame spektroskopiniame *Cayrel de Strobel* ir kt. (1997) kataloge pateikiamus metalingumus. Buvo nustatyta, kad $[Fe/H]$ histogramą puikiai aprašo Gauso pasiskirstymo kreivė, kurios centras yra $[Fe/H] = -0.12$, o $\sigma_{[Fe/H]} = 0.18$. Tame pačiame Girardi ir Salaris (2001) darbe yra publikuojamas teorinis *Hipparcos* sankaupos modelis, kuris puikiai atkuria stebimą žvaigždžių metalingumo pasiskirstymą. Modeliuotas metalingumo pasiskirstymas gali būti gerai aprašytas siaura Gauso funkcija, kurios parametrai yra $\langle [Fe/H] \rangle = +0.03$ ir $\sigma_{[Fe/H]} = 0.17$, nors autoriai modeliavo platų metalingumo intervalą.



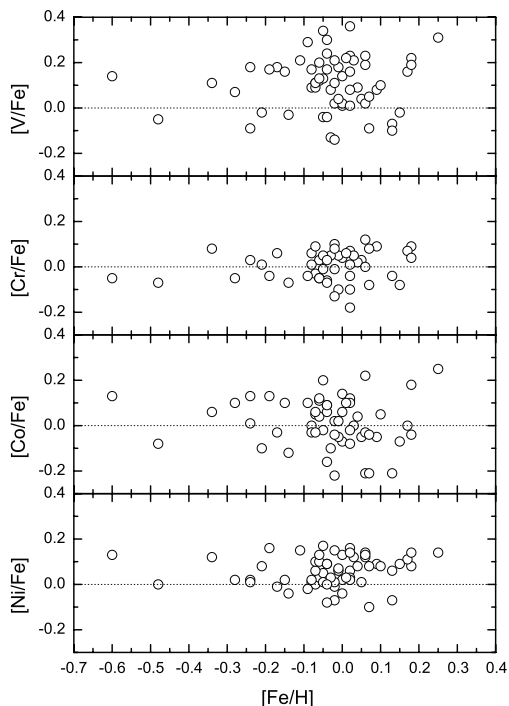
6 pav. Disertacijoje ištirtų Galaktikos sankaupos žvaigždžių pasiskirstymas pagal $[Fe/H]$. Juoda ištisinė linija pažymėta Gauso aproksimacijos funkcija.



7 pav. Galaktikos sankaupos žvaigždžių metalingumo pasiskirstymo palyginimas pagal skirtingus autorius.

Disertacijoje tiriamų žvaigždžių imties pasiskirstymas pagal metalingumą yra pateikiamas 6 pav. Tiriamos žvaigždės apima metalingumų intervalą nuo +0.3 iki -0.6, tačiau dauguma tiriamųjų žvaigždžių koncentruojasi ties vidutine $[\text{Fe}/\text{H}]$ verte, artima nuliui. Disertacijoje nustatyta $[\text{Fe}/\text{H}]$ pasiskirstymo funkcijos forma yra labai panaši į Girardi ir Salaris (2001) Galaktikos sankaupos modelio pasiskirstymo funkcijos formą. Kaip ir modelinio pasiskirstymo atveju, disertacijoje nustatyta $[\text{Fe}/\text{H}]$ pasiskirstymo funkcija gali būti aproksimuota Gauso funkcija, kurios dispersija yra labai nedidelė ($\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle = -0.01$ ir $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]} = 0.08$). Taigi disertacijoje pateikiami rezultatai patvirtina Girardi ir Salaris (2001) pasiūlytą teorinį *Hipparcos* sankaupos modelį, kuris teigia kad Galaktikos sankaupos žvaigždės Saulės aplinkoje yra (vidutiniškai) santykinai jauni objektai, atspindintys artimus Saulei metalingumus, ir susiformavę per pastaruosius keletą milijardų metų.

3.3 Geležies grupės elementų gausa



8 pav. Sankaupos žvaigždžių geležies grupės elementų gausa.

Disertacijoje buvo nustatytos geležies grupės elementų (vanadžio, chromo, kobalto, nikelio) gausos (8 pav.). Kobalto gausa buvo nustatyta įskaitant pataisus dėl linijų hipersmulkiosios sandaros (HFS). Vanadžio gausa buvo nustatyta šiame darbe ir dvejuose kituose darbuose: autorius gavo vidutinę vertę $[\text{V}/\text{Fe}] = +0.11 \pm 0.12$; Liu ir kt. (2007) gavo $+0.02 \pm 0.10$; Luck ir Heiter (2007) gavo -0.05 ± 0.09 , t.y. vanadžio gausa $[\text{V}/\text{Fe}]$ yra labai artima Saulės gausai. Chromo ir kobalto gausos buvo tiriamos disertacijoje ir Luck ir Heiter darbe. Vidutinės $[\text{Cr}/\text{Fe}]$ gausos yra lygios Saulės gausai, $[\text{Co}/\text{Fe}]$ vertė Luck ir Heiter darbe yra lygi $+0.07 \pm 0.06$, disertacijoje (įskaitant HFS pataisus) $[\text{Co}/\text{Fe}] = +0.02 \pm 0.11$.

Vidutinės nikelio gausos tiriamose žvaigždėse taip pat yra artimos šio elemento gausai Saulėje visuose darbuose: $[\text{Ni}/\text{Fe}] = +0.06 \pm 0.07$ (disertacijos rezultatas), $[\text{Ni}/\text{Fe}] = +0.11 \pm 0.03$ (Mishenina ir kt. 2006), $[\text{Ni}/\text{Fe}] = +0.02 \pm 0.05$ (Liu ir kt. 2007), $[\text{Ni}/\text{Fe}] = +0.01 \pm 0.03$ (Luck ir Heiter 2007).

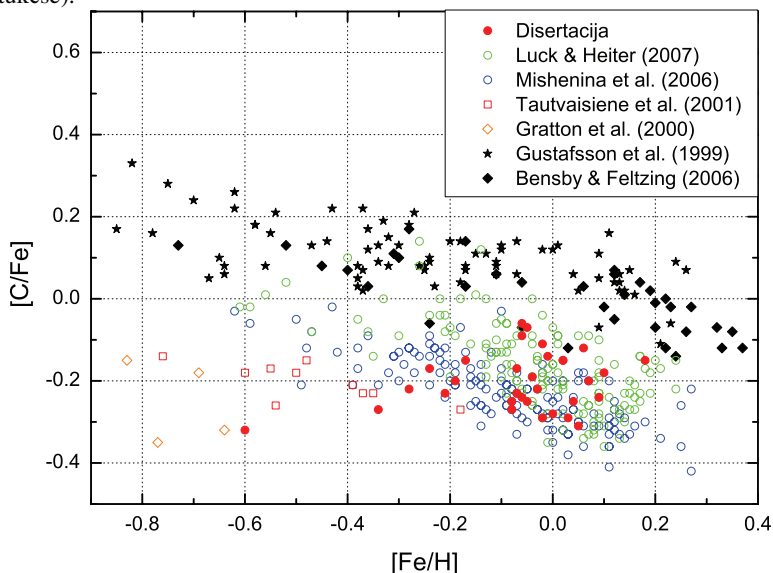
4 EVOLIUCINIAI EFEKTAI GALAKTIKOS SANKAUPOS ŽVAIGŽDŽIŲ ATMOSFEROSE

Sankaupos žvaigždės yra geras maišymosi procesų tyrimo įrankis, nes sankaupos žvaigždžių atmosferų cheminė sudėtis yra visų maišymosi procesų, vykusių raudonojoje milžinių sekoje, rezultatas. Deja, maišymosi indikatorių tyrimas Galaktikos sankaupos žvaigždėse iki šiol buvo ribotas. Anglies ir azoto gausas tyrė Mishenina ir kt. (2006), taip pat Luck ir Heiter (2007) kartu su kitomis milžinėmis Saulės aplinkoje, tačiau anglies izotopų santykio tyrimas Galaktikos sankaupos žvaigždėse iki šiol nebuvo atliktas. $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ izotopų santykis yra labai geras maišymosi procesų indikatorius, nes jis yra labai jautrus maišymosi procesams ir mažai jautrus žvaigždžių pagrindinių parametru nustatymo paklaidoms.

Disertacijoje autorius pristato $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ izotopų santykių ir anglies, azoto, deguonies gausų nustatymo rezultatus 34-iose Galaktikos sankaupos žvaigždėse. Rezultatai yra aptariami kitų Galaktikos sankaupos tyrimo publikacijų kontekste.

4.1 Anglies, azoto, deguonies gausos

1-osios drumsties metu vykstančius žvaigždžių atmosferų pokyčius galime analizuoti lygindami anglies, azoto, deguonies gausas Galaktikos sankaupos žvaigždėse ir 1-osios drumsties stadijos nepasiekusiose Galaktikos lauko žvaigždėse (disko nykštukėse).

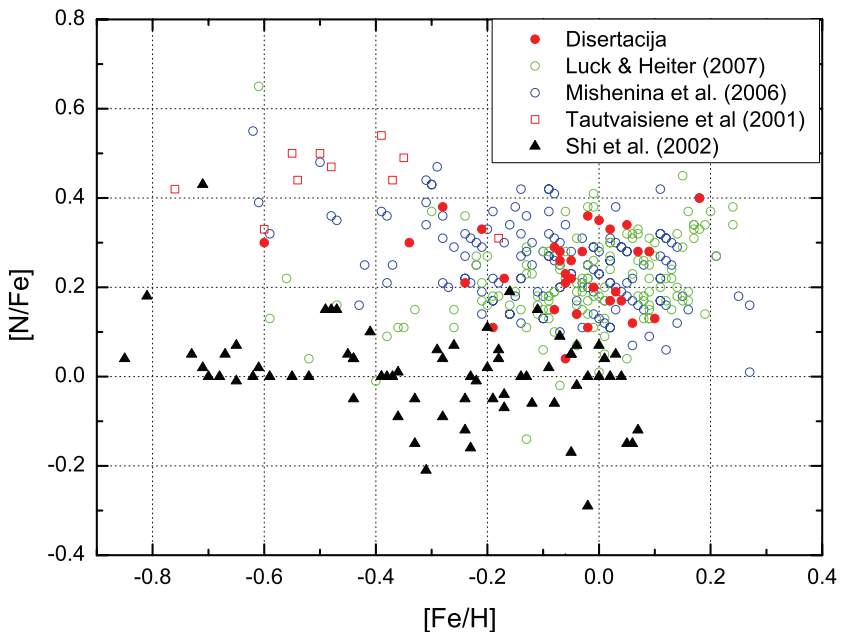


9 pav. Anglies gausa Galaktikos sankaupos žvaigždėse. Raudonais skrituliukais pažymėtos disertacijoje ištirtos Galaktikos sankaupos žvaigždės. Žaliais ir mėlyniais skrituliukais pažymėti kitų autorių Galaktikos sankaupos žvaigždžių tyrimo rezultatai. Juoda spalva žymi palyginamųjų Galaktikos disko žvaigždžių rezultatus.

Anglies gausoms palyginti autorius pasirinko dvi Galaktikos disko žvaigždžių cheminės analizės publikacijas: Gustafsson ir kt. (1999) bei Bensby ir Feltzing (2006). Autoriaus gauti rezultatai ir kitų autorių rezultatai yra pavaizduoti 9 pav. Iš diagramos akivaizdžiai matome, kad $[C/Fe]$ santykis Galaktikos sankaupos žvaigždėse, palyginti su Galaktikos disko nykštukėmis, yra mažesnis maždaug per 0.2 dešimtąsias.

Darbų, kuriuose būtų pateikiama nustatyta Galaktikos disko žvaigždžių azoto gausa, nėra daug. Pagal Samland (1989) kompiliaciją metalingų disko žvaigždžių $[N/Fe]$ vertės plačiai barstosi apie vidutinę vertę, kuri yra apytiksliai lygi Saulės vertei. Palyginimui buvo pasirinkta Shi ir kt. (2002) publikacija (10 pav.). Matome, kad $[N/Fe]$ santykis Galaktikos sankaupos žvaigždėse ir disko nykštukėse skiriasi maždaug 0.2.

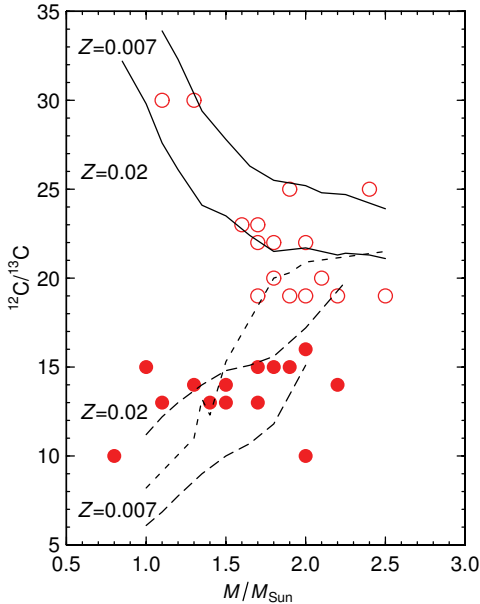
Disertacijoje nustatyta Galaktikos sankaupos žvaigždžių deguonies gausa yra artima Edvardsson ir kt. (1993) darbe nustatytai disko nykštukių deguonies gausai, kaip ir Mishenina ir kt. (2006), Liu ir kt. (2007), Luck ir Heiter (2007) darbuose nustatytos deguonies gausos.



10 pav. Azoto gausa Galaktikos sankaupos žvaigždėse. Raudonais skrituliukais pažymėtos disertacijoje ištirtos Galaktikos sankaupos žvaigždės. Žaliais ir mėlynais skrituliukais pažymėti kitų autorių Galaktikos sankaupos žvaigždžių tyrimo rezultatai. Juoda spalva žymi palyginamųjų Galaktikos disko žvaigždžių rezultatus.

4.2 Palyginimas su maišymosi procesų teoriniais modeliais

Papildomo maišymosi indikatorius $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ anglies izotopų santykio tyrimas stebimose žvaigždėse ir palyginimas su papildomo maišymosi modeliuose prognozuojamomis vertėmis yra vienas iš pagrindinių disertacijos tikslų. Darbo metu gauti rezultatai buvo lyginami su Boothroyd ir Sackman (1999) publikuotu šaltojo žemutinių sluoksnių papildomo maišymosi modeliu (angl. *Cool Bottom Processing*, toliau CBP). CBP modelis įskaito giluminį cirkuliacinį maišymąsi po žvaigždės „standartinio“ konvekciniame sluoksniu. Kaip matome iš 11 pav., CBP modelis iš tikrųjų puikiai aprašo disertacijoje gautas Galaktikos sankaupos žvaigždžių anglies izotopų santykio vertes.



11 pav. Anglies izotopų santykis Galaktikos sankaupos žvaigždėse. Ištisinėmis linijomis pažymėti 1-osios drumsties teoriniai modeliai, brūkšninėmis linijomis – Boothroyd ir Sackman (1999) papildomo maišymosi modeliai, trumpų brūkšnelių linija – termohalinio papildomo maišymosi modelis (Lagarde ir Charbonnel 2009). Tuščiaiduriais ir pilnais rutuliukais pažymėtos tiriamos žvaigždės, priskirtos atitinkamai raudonosioms milžinėms ir helį centre deginančioms žvaigždėms.

Eggleton ir kt. (2006) pademonstravo molekulinio svorio inversinio sluoksnio egzistavimo galimybę Saulės masės žvaigždžių evoliucijos modeliuose, kuri buvo teoriškai numatyta dar Ulrich (1972). Molekulinio svorio inversijos sluoksnis yra nestabilus ir sukelia medžiagos cirkuliaciją tarp viršutinio ir apatinio sluoksnių.

Remdamiesi Eggleton ir kt. (2006) darbu, Charbonnel ir Zahn (2007) suskaičiavo žvaigždžių vidaus sandaros modelius, įskaitant papildomą maišymąsi dėl giluminių žvaigždės sluoksnių molekulinio svorio inversijos. Šie modeliai literatūroje yra vadinami termohalinio papildomo maišymosi modeliais. Kaip matome 11 pav., termohalinio maišymosi modelis gerai aprašo mažos masės (iki 1.5 Saulės masės) žvaigždžių stebėjimų rezultatus, tačiau didesnės masės žvaigždėse gaunamas didesnis papildomas maišymasis, nei numato termohalinio maišymosi modelis. Šių žvaigždžių rezultatams aprašyti reikia pasitelkti papildomą maišymąsi, sąlygotą žvaigždžių sukimūsi, joms esant pagrindinėje sekoje (Lagarde ir Charbonnel 2009).

Lygindami tiriamas Galaktikos sankaupos žvaigždes su teoriniais modeliais (11 pav.) matome, kad žvaigždės pagal anglies izotopų santykį $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ pasiskirsto į dvi grupes: pirmosios žvaigždžių grupės anglies izotopų santykis apytiksliai atitinka 1-osios drumsties modelio prognozuojamą izotopų santykį (šios žvaigždės milžnių seka kyla pirmą kartą), antrosios žvaigždžių grupės anglies izotopų santykis atitinka papildomo maišymosi modelio prognozuojamą izotopų santykį (tai helį centre deginančios žvaigždės). Tiriamos žvaigždės pasiskirsto į minėtas evoliucines grupes apytiksliai po lygiai. Mishenina ir kt. (2006) pagal azoto gausą identifikavo 21 helį centre deginančią žvaigždę ir 54 kandidates iš 177 tirtų žvaigždžių. Disertacinio darbo rezultatai parodė, kad anglies izotopų santykis yra geras mažos masės žvaigždžių evoliucijos stadijos nustatymo įrankis.

5 PADRIKASIS ŽVAIGŽDŽIŲ SPIEČIUS NGC 7789

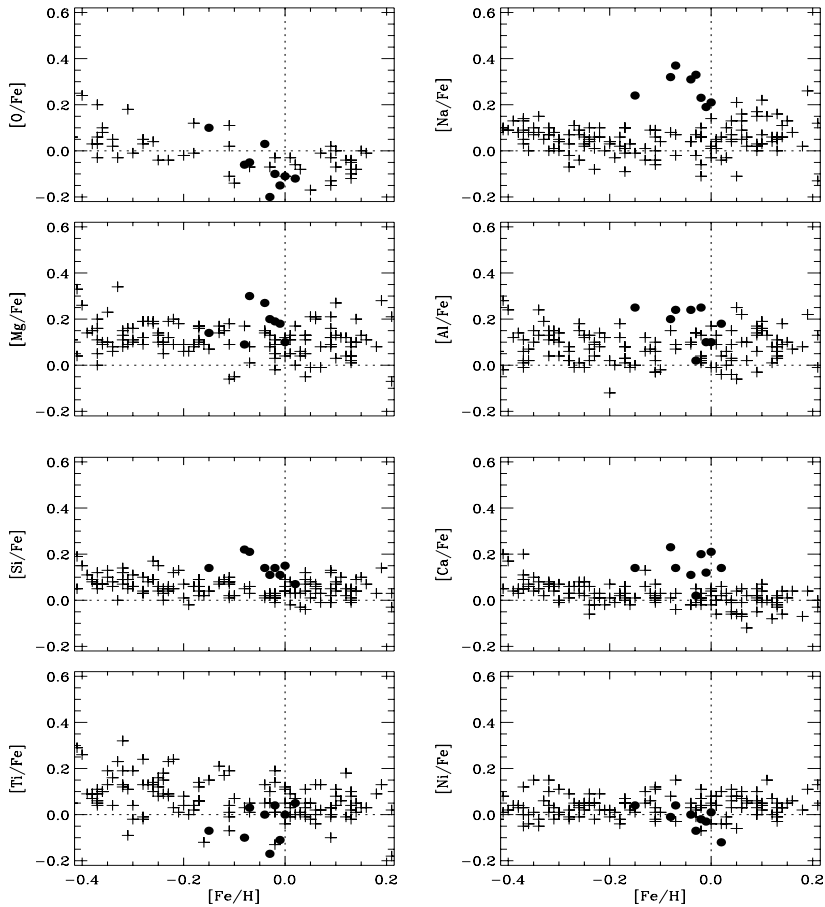
Padrikieji spiečiai yra svarbūs žvaigždžių evoliucijos procesų tyrimo įrankiai. Visos spiečiaus žvaigždės formuojasi maždaug vienu metu iš to paties dujų telkinio, todėl yra vienodo amžiaus ir turi vienodą pradinę cheminę sudėtį. Dėl to padrikieji spiečiai plačiai naudojami evoliucijos procesams žvaigždėse tirti, tame tarpe ir žvaigždžių evoliucijos nulemtiems cheminės sudėties pokyčiams žvaigždžių atmosferose tirti. Disertacijoje tirti buvo pasirinktas padrikasis spiečius NGC 7789. Šis spiečius yra turtingas žvaigždžių ir kartu pakankamai senas, dėl to spiečiaus HR diagrama turi aiškiai išreikštą sankaują. Naudojant didelės skiriamosios gebos spektras buvo atlikta tik keletas ribotos apimties spiečiaus cheminės sudėties tyrimo darbų: Pilachowski ir kt. (1984) tyrė ličio gausą spiečiaus žvaigždėse; Pilachowski (1985) nustatė kai kurių metalų gausą šešiose spiečiaus žvaigždėse; Sneden ir Pilachowski (1986) nustatė anglies izotopų santykį septyniuose spiečiaus žvaigždėse.

Autorius pasirinko tirti devynias spiečiaus žvaigždes: tris sankaupos žvaigždes ir šešias milžinių sekos žvaigždes. Padrikėjo žvaigždžių spiečiaus NGC 7789 žvaigždžių cheminė sudėtis buvo nustatyta tiksliau ir apimant didesnę cheminių elementų skaičių nei ankstesniuose darbuose. Buvo nustatyta dvidešimties cheminių elementų gausa ir pirmą kartą ištirtas anglies izotopų ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) santykis spiečiaus sankaupos žvaigždžių atmosferose.

Devynių tirtų spiečiaus žvaigždžių metalingumas buvo panaudotas nustatyti bendrą spiečiaus metalingumą: $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle = -0.04 \pm 0.05$. Natrio gausa spiečiaus žvaigždžių atmosferose yra padidėjusi, palyginti su natrio gausa Galaktikos lauko nykštukėse, o silicio ir kalcio gausos – galimai padidėjusios (12 pav.).

5.1 Maišymosi procesų indikatoriai

Kaip ir Galaktikos sankaupos žvaigždėse, spiečiaus žvaigždėse buvo nustatytos maišymosi indikatorių gausos (anglies ir azoto gausos, anglies izotopų santykis). Autoriaus nustatyta vidutinė anglies gausa spiečiaus žvaigždėse yra $\langle [\text{C}/\text{Fe}] \rangle = -0.21 \pm 0.03$. Palyginti su anglies gausa Saulėje ir kitose Galaktikos disko nykštukėse (Gustafsson ir kt. 1999), anglies gausa ištirtose spiečiaus milžinėse ir sankaupos žvaigždėse yra sumažėjusi tokiu pačiu dydžiu (per 0.2 dešimtašias), kaip ir ištirtose Galaktikos raudonosios sankaupos žvaigždėse (9 pav.).



12 pav. Cheminių elementų gausa padrikojo spiečiaus NGC 7789 žvaigždžių atmosferose.

Palyginus su azoto gausa Saulėje ir kitose Galaktikos disko nykštukėse, spiečiaus NGC 7789 helį centre deginančiose žvaigždėse azoto gausa yra padidėjusi per $[N/Fe] = 0.26 \pm 0.08$, o milžinėse – per $[N/Fe] = 0.15 \pm 0.13$. Dėl to C/N santykiai tiriamose spiečiaus žvaigždėse yra skirtingi: 1.9 ± 0.5 milžinėse ir 1.3 ± 0.2 sankaupos žvaigždėse.

Visose ištirtose spiečiaus žvaigždėse nustatytas beveik identiškas izotopų santykis $\langle^{12}C/^{13}C\rangle = 9 \pm 1$. Spiečiaus žvaigždžių atmosferose nustatytas anglies izotopų santykis yra mažesnis nei analogiškos masės Galaktikos sankaupos žvaigždėse ir byloja apie, ko gero, didesnę papildomą maišymąsi nei numato dabartiniai teoriniai modeliai. NGC 7789 žvaigždžių posūkio iš pagrindinės sekos masė yra 1.6 Saulės masės (Faulkner ir Cannon 1973). Tokios masės žvaigždėms teoriniai modeliai numato anglies izotopų santykio sumažėjimą iki 14–18 (Boothroyd ir Sackman 1999; Lagarde ir Charbonnel 2009).

PAGRINDINIAI REZULTATAI IR IŠVADOS

1. Galaktikos sankaupa. Disertacijoje buvo nustatyti 62 *Hipparcos* Galaktikos raudonosios sankaupos žvaigždžių pagrindiniai atmosferos parametrai (efektinė temperatūra, laisvojo kritimo pagreitis, mikroturbulencijos greitis) ir geležies grupės elementų (vanadžio, kobalto, geležies ir nikelio) gausa.

Išvados

1.1. Sankaupos žvaigždės sudaro homogenišką imtį, kurios efektinė temperatūra yra $T_{\text{eff}} = 4750 \pm 160$ K, laisvojo kritimo pagreitis $\log g = 2.41 \pm 0.26$ ir vidutinis metalingumas $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.04 \pm 0.15$.

1.2. Galaktikos sankaupos žvaigždžių pasiskirstymas pagal geležies gausą yra labai siauras. Žvaigždžių $[\text{Fe}/\text{H}]$ pasiskirstymo funkcijos aproksimacijos Gauso funkcija parametrai yra: $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle = -0.01$ ir $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]} = 0.08$. Tiriamų žvaigždžių geležies grupės elementų gausos ir geležies gausos santykiai yra artimi atitinkamiems santykiams Saulėje.

1.3. Galaktikos sankaupos žvaigždžių pasiskirstymo pagal geležies gausą pobūdis patvirtina Girardi ir Salaris (2001) pasiūlytą teorinį *Hipparcos* sankaupos modelį, kuris teigia kad artimos Saulei sankaupos žvaigždės yra (vidutiniškai) santykinai jauni objektai, atspindintys artimus Saulei metalingumus, ir susiformavę per pastaruosius keletą milijardų metų.

2. Maišymosi procesai Galaktikos sankaupos žvaigždėse. Disertacijoje buvo nustatyti anglies, azoto ir deguonies gausos ir $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ anglies izotopų santykis 34 Galaktikos raudonosios sankaupos žvaigždžių atmosferose.

Išvados

2.1. Šiame darbe nustatytos anglies, azoto ir deguonies gausos, kartu su kitais literatūroje publikuotais Galaktikos raudonosios sankaupos tyrimų rezultatais (Mishenina ir kt. 2006; Liu ir kt. 2007; Luck ir Heiter 2007) ir raudonosios horizontalinės sekos tyrimų rezultatais (Tautvaišienė ir kt. 2001; Gratton ir kt. 2000) buvo palygintos su analogiškais literatūroje publikuotomis gausomis Galaktikos disko nykštukėse. Nustatyta, kad sankaupos žvaigždėse anglies gausa yra vidutiniškai sumažėjusi per 0.2; azoto gausa yra padidėjusi per 0.2; o deguonies gausa yra nepakitusi.

2.2. Pagal padėtį $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ santykio ir žvaigždės masės diagramoje sankaupos žvaigždės gali būti suskirstytos į skirtingas evoliucines grupes: helį centre deginančias žvaigždes ir raudonąsias milžines. Iširtos Galaktikos sankaupos žvaigždės pasiskirsto į šias grupes apytiksliai po lygiai.

2.3. Nustatytus $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ santykius helį centre deginančių žvaigždžių atmosferose gerai aprašo šaltojo žemutinių sluoksnių papildomo maišymosi modelis (Boothroyd ir Sackman 1999). Termohalinio papildomo maišymosi modelis (Lagarde ir Charbonnel 2009) turėtų būti papildytas suskimosi sukkelto maišymosi komponente, kad sutaptų su žvaigždžių, kurių masė didesnė nei 1.5 Saulės masės, stebėjimų rezultatais.

3. Padrikojo žvaigždžių spiečiaus NGC 7789 cheminė sudėtis. Disertacijoje buvo nustatytos cheminių elementų gausos, C/N ir $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ izotopų santykiai NGC 7789 žvaigždėse. Buvo ištirtos 3 sankaupos žvaigždės ir 6 raudonosios milžinės, esančios virš raudonųjų milžinių sekos mazgo (angl. *luminosity bump*).

Išvados

3.1. Nustatytas bendras spiečiaus metalingumas yra artimas Saulės metalingumui ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.04 \pm 0.05$).

3.2. Nustatytas $^{12}\text{C}/^{14}\text{N}$ santykio skirtumas milžinėse (1.9 ± 0.5) ir sankaupos žvaigždėse (1.3 ± 0.2).

3.3. Izotopų santykis $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ yra panašus visose ištirtose spiečiaus žvaigždėse (9 ± 1) ir nurodo galbūt didesnę papildomą maišymąsi nei numato dabartiniai teoriniai modeliai.

SUMMARY

The main goals of this dissertation were the observational study of the Galactic red clump as well as investigations of evolutionary effects in atmospheres of low-mass helium-core burning stars and evaluation of theoretical models of ‘extra’ mixing processes in interiors of stars. Modern observations provide evidences that the standard stellar evolution model is incomplete. Abundances of carbon, nitrogen and some other mixing-sensitive chemical elements provide insights into mixing process in atmospheres of low-mass evolved stars. 62 *Hipparcos* clump stars and 9 evolved stars in the old open cluster NGC 7789 were selected for observations. The high-resolution spectra were obtained using the Nordic Optical Telescope, Keck telescope and telescopes of Dominion, Elginfield and Beijing observatories. The spectra were analysed using a differential model atmosphere technique and the *MARCS* stellar atmosphere models.

The main atmospheric parameters and abundances of iron peak elements were determined for 62 Galactic red clump stars. $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ isotope ratios and nitrogen, carbon and oxygen abundances were determined for a sub-sample of 34 Galactic red clump stars. The main atmospheric parameters, abundances of 20 elements and isotope ratios $^{12}\text{C}/^{14}\text{N}$ and $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ were determined in NGC 7789 stars.

It was found that: the clump stars form a homogeneous sample in the stellar atmosphere parameter space; the Galactic clump star distribution by the iron abundance is quite narrow and close to solar; the iron group element to iron abundance ratios in the investigated clump giants are close to solar; the near-solar metallicity and small dispersion of $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ of clump stars of the Galaxy show that nearby clump stars are (in the mean) relatively young objects, reflecting mainly the near-solar metallicities developed in the local disk during the last few Gyrs of its history; the obtained stellar abundances together with results of other studies indicate that the mean carbon abundances in the investigated clump stars are decreased by about 0.2 dex compared to dwarfs, nitrogen is enhanced by 0.2 dex and oxygen is unaltered; clump stars can be separated into two evolutionary groups using $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ criteria; the investigated stars fall into different evolutionary groups in approximately equal numbers; observed $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratios of helium-core-burning clump stars are consistent with the Cool Bottom Processing extra-mixing model (Boothroyd & Sackmann 1999); the thermohaline extra-mixing model by Lagarde & Charbonnel (2009) needs to be complemented by rotationally induced mixing in order to agree with the available observational data; the overall metallicity of the open cluster NGC 7789 is close to solar; the $^{12}\text{C}/^{14}\text{N}$ ratio is different in the cluster giants (1.9 ± 0.5 dex) and cluster clump stars (1.3 ± 0.2 dex); the $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ isotope ratios are similar in all investigated cluster stars (9 ± 1 dex) and indicate a larger extra-mixing than it is foreseen by currently available theoretical models.

LITERATŪRA

- Alonso, A., Arribas, S., Martínez–Roger, C. 1999, A&AS, 140, 261
- Bensby, F., Feltzing, S. 2006, MNRAS, 367, 1181
- Boothroyd, A. I., Sackmann, I. J., 1999, ApJ, 510, 232
- Cannon, R. D. 1970, MNRAS, 150, 111
- Cayrel, R., Cayrel de Strobel, G. 1966, ARA&A, 4, 1
- Cayrel de Strobel, G., Soubiran, C., Friel, E. D., et al. 1997, A&AS, 124, 299
- Chanamé, J., Pinsonneault, M., Terndrup, D., 2005, ApJ, 631, 540
- Charbonnel, C. 1994, A&A, 282, 811
- Charbonnel, C., Brown, J. A., & Wallerstein, G. 1998, A&A 332, 204
- Charbonnel, C., Do Nascimento, Jr., J. D. 1998, A&A, 336, 915
- Charbonnel, C., 2006, in Montmerle T., Kahane C., eds., EAS Publ. Ser., Vol. 19, Stars and Nuclei: Tribute to Manuel Forestini. EDP Sciences, Paris, p. 125
- Charbonnel, C., Zahn, J. P., 2007, A&A, 467, L15
- Charbonnel, C., Lagarde, N. 2010, A&A, 522, 10
- Edvardsson, B., Andersen, J., Gustafsson, B., et al. 1993, A&A 275, 101
- Eggleton, P. P., Dearborn, D. S. P., Lattanzio, J. C., 2006, Science, 314, 1580
- Faulkner, D. J., Cannon, R. D. 1973, ApJ, 180, 435
- Geisler, D., Smith, V. V., Wallerstein, G., et al. 2005, AJ, 129, 1428
- Gilroy, K. K. 1989, ApJ 347, 835
- Gilroy, K. K. & Brown, J. A. 1991, ApJ, 371, 578
- Girardi, L., Bressan, A., Bertelli, G., Chiosi, C., 2000, A&AS, 141, 371
- Girardi, L., Salaris, M. 2001, MNRAS, 323, 109
- Gonzalez, G., Lambert, D. L., Wallerstein, G., et al. 1998, ApJS, 114, 133
- Gratton, R. G., Sneden, C., Carreta, E., Bragaglia, A., 2000, A&A, 354, 169
- Gurtovenko, E. A., Kostik, R. I., 1989, Fraunhofer's spectrum and a system of solar oscillator strengths, Kiev, Naukova Dumka, 200 p.
- Gustafsson, B., Karlsson, T., Olsson, E., et al. 1999, A&A, 342, 426
- Gustafsson, B., Edvardsson, B., Eriksson, K., et al. 2008, A&A, 486, 951
- Hakkila, J., Myers, J. M., Stidham, B. J., Hartmann, D. H., 1997, AJ, 114, 2043
- Jimenez, R., Flynn C., Kotoneva E., 1998, MNRAS, 299, 515
- Lagarde, N., Charbonnel, C., 2009, in Heydari–Kalayeri M., Reylé C. & Samadi R., eds., Proc. Annual Meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics, SF2A–2009, p. 279
- van Leeuwen, F. 2007, A&A, 474, 653
- Liu, Y. J., Zhao, G., Shi, J. R., Pietrzynski, G., Gieren, W., 2007, MNRAS, 382, 553
- Luck, R. E. 1994, ApJS, 91, 309
- Luck, R. E., Heiter, U. 2007, AJ, 133, 2464
- McWilliam, A., 1990, ApJS, 74, 1075
- McWilliam, A., Rich, R. M., 1994, ApJS, 91, 749
- Mikolaitis, S., Tautvaišienė, G., Gratton, R., et al. 2010, MNRAS, 407, 1866
- Mishenina, T. V., Bienaymé, O., Gorbaneva, T. I., et al. 2006, A&A, 456, 1109
- Moore, C. E., Minnaert, M. G. J., Houtgast, J. 1966, The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å, NBS Monogr., No. 61

Paczyński, B., Stanek, K. Z., Udalski, A., et al. 1994, AJ, 107, 2060
Perryman, M. A. C. et al., 1997, A&A, 323, L49
Pilachowski, C. A. 1985, PASP, 97, 801
Pilachowski, C. A., Mould, M. R., Siegel, M. J. 1984, ApJ, 282, L17
Pilachowski, C., Sneden, C., Freeland, E., Casperson, J. 2003, AJ, 125, 794
Pinsonneault, M. H., 1997, ARA&A, 35, 557
Piskunov, N. E., Kupka, F., Ryabchikova, T. A., et al. 1995, A&AS 112, 525
Recio-Blanco, A., de Laverny, P. 2007, A&A, 461, L13
Samland, M., 1998, ApJ, 496, 155
Shetrone, M. D. 2003, ApJ, 585, L45
Shi, J. R., Zhao, G., Chen, Y. Q., 2002, A&A, 381, 982
Smiljanic, R., Gauderon, R., North, P., et al. 2009, A&A, 502, 267
Smith, V. V., Hinkle, K. H., Cunha, K., et al. 2002, AJ, 124, 3241
Spite, M., Cayrel, R., Hill, V., et al. 2006, A&A, 455, 291
Sturch, C., Helfer, H. L. 1971, AJ, 76, 334
Tautvaišienė, G., Edvardsson, B., Tuominen, I., Ilyin, I., 2000, A&A, 360, 499
Tautvaišienė, G., Edvardsson B., Tuominen, I., Ilyin, I., 2001, A&A, 380, 578
Tuominen, I., Ilyin, I., Petrov, P., 1999, in Karttunen H., Piirola V., eds., *Astrophysics with the NOT*, Turku University, Piikio, Finland, p. 47
Ulrich, R. K. 1972, ApJ, 172, 165
Ungren, A. R., 1962, AJ, 67, 37
Zhao, G., Qiu, H. M., Mao, S., 2001, ApJ, 551, L85

TRUMPOS ŽINIOS APIE AUTORIŲ

Eduardas Puzeras gimė 1975 m. liepos 11 d. 1999 m. įgijo astrofizikos bakalauro, 2001 m. – astronomijos magistro kvalifikacinį laipsnį Vilniaus universitete. Nuo 1997 m. dirba Teorinės fizikos ir astronomijos institute (1997–2003 m. inžinieriumi, nuo 2003 m. – jaunesnioju mokslo darbuotoju). 2006–2010 m. studijavo bendroje TFAI ir VPU doktorantūroje. 2006–2008 m. dalyvavo tarptautinio FP6 projekto „BalticGrid“ darbo grupės NA3 veikloje. 2008–2010 m. dalyvavo tarptautinio tęstinio FP7 projekto „BalticGrid II“ darbo grupės NA3 veikloje. 2007–2009 m. dalyvavo Lietuvos lygiagrečių ir paskirstytų skaičiavimų projektų „LitGrid“ ir „GridTechno“ veikloje. 2001 m. ir 2006 m. autorius stebėjo Šiaurės šalių optiniu teleskopu (NOT).

Autorius aktyviai tobulino savo kvalifikaciją tarptautinėse vasaros mokyklose: 2001 m. „Introduction to Radioastronomy“, Ventspilis, Latvija; 2002 m. „Astrophysics of Interacting Stars“, Molėtai, Lietuva; 2007 m. „BalticGrid“ projekto vasaros mokykla, Ryga, Latvija; 2008 m. „Observational Stellar Astrophysics“, Molėtai, Lietuva.