

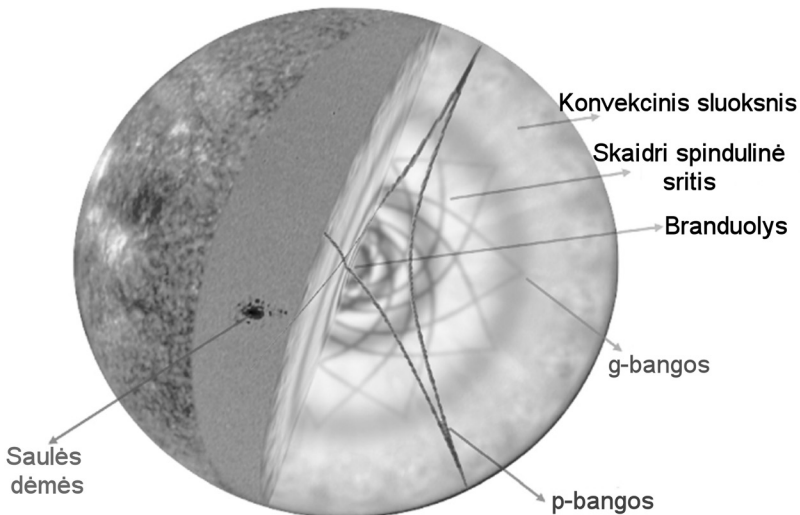


Apie ką „skamba“ Saulė ir jos giminaitės?

Erika Pakštienė

Pabandykite atsakyti į klausimus: Ar Saulė yra stabili žvaigždė? O gal kintamoji? Kodėl taip manote? Jei ji kintamoji, kaip tai pasireiškia?

Dalis žmonių pasakytų, kad Saulė nekinta, nes ji kiekvieną rytą pateka ir šviečia taip pat skaisčiai, kaip ir ankstesnę dieną. Kita dalis žmonių pasakytų, kad Saulė nėra tokia jau pastovi, nes jos aktyvumas kinta maždaug kas 11 m.: jos paviršiuje tai atsiranda Saulės dėmės, tai išnyksta, kai kada įvyksta Saulės žybsniai ir vainikinės masės išsiveržimai, kurie sukelia geomagnetines audras



1 pav. Schematinė Saulės sandara ir jos viduje sklindančios 2 rūšių bangos, sukeliančios Saulės pulsacijas (Rafaelis A. García ir Jérôme'as Ballotas, *Living Reviews in Solar Physics*, 2019)

Žemėje. Tad žmonės, teigiantys, kad Saulė nėra pastovi, bus teisūs.

Vis dėlto tik retas žino, kad Saulės gelmėse sklinda garso bangos, sukeliančios periodinius 5 min. trukmės šviesio svyravimus. Panašių bangų sukelti šviesio kitimai stebimi ir kai kuriose kitose žvaigždėse. Tokie kitimai vadinami Saulės tipo pulsacijomis.

Kintamosios žvaigždės

Astronominiai stebėjimai rodo, kad kai kurių žvaigždžių spindesys laikui bėgant tai sumažėja, tai padidėja. Tokias žvaigždes vadiname kintamosiomis, o jų spindesys gali kisti dėl įvairių priežasčių. Vienų objektų spindesys kinta dėl išorinių veiksnių, pavyzdžiui: jas užtemdo kita žvaigždė, įvyksta egzoplanetos tranzitas arba asteroido okultacija. Dėl išorinio poveikio žvaigždės spindesys gali ir padidėti, pavyzdžiui, kai susiklosto situacija, kad žvaigždės šviesa stebėtoją pasiekia praėjusi pro kito nematomo objekto sukurtą gravitacinį lęšį. Spindesys gali kisti ir dėl pulsacijų žvaigždės viduje, tokios žvaigždės vadinamos kintamosiomis žvaigždėmis. Saulė priskiriama prie silpnai kintančių žvaigždžių, jos šviesio pokyčius pastebėti be specialios įrangos neįmanoma.

Saulės tipo pulsacijos stebimos panašiose į Saulę žvaigždėse, kurių masė yra nuo maždaug 0.8 iki 2 Saulės masių (žr. 1 pav.). Šios žvaigždės savo branduolyje degina vandenilį ir turi aktyvų konvecinį išorinį sluoksnį. Vėlesnėse evoliucijos, būtent submilžinių ir milžinių, stadijose, kai vandenilis branduolyje išsenka ir pradeda degti sluoksnyje aplink helio branduolį arba kai helis pradeda degti pačiame branduolyje, Saulės tipo pulsacijos gali pasireikšti net ir masyvesnėse žvaigždėse, kurių masė siekia iki 3 Saulės masių. Tačiau masyviausiose žvaigždėse pulsacijų spektras būna sudėtingesnis dėl kitokio tipo bangų, kurios atsiranda arčiau žvaigždės centro.

Žvaigždžių pulsacijų procesas yra sudėtingas. Jį dažniausiai lemia žvaigždžių viduje veikiančios slėgio ir gravitacinės jėgos. Pagal tai, kokių jėgų veikiamos atsirado pulsacijos, jos gali būti skirstomos į p bangų (slėgio arba garso bangų) ir g bangų (gravitacinių bangų) pulsacijas. p ir g bangos atsiranda skirtinguose žvaigždės sluoksniuose ir dėl skirtingų priežasčių. p bangos susidaro dėl slėgio skirtumų aktyvios konvekcijos sluoksniuose ir sklinda daugiausia žvaigždės išoriniuose sluoksniuose. Jos aptinkamos Saulės ir δ Scuti tipo kintamosiose žvaigždėse, submilžinėse ir kai kuriose raudonosiose milžinėse. g bangos atsiranda dėl gravitacijos bei tankio gradientų ir dominuoja žvaigždžių vidiniuose sluoksniuose, kur vyrauja stabili šilumos pernaša spindulinėje zonoje. g bangos dominuoja γ Doradus tipo žvaigždėse, kai kuriose ankstyvose A ir F spektrinės klasės žvaigždėse, raudonosiose milžinėse, kurių branduolyje vis dar vyksta spindulinė šilumos pernaša. Raudonosios milžinės gali turėti tiek p , tiek g bangas, nes jos turi tiek išorinius konvekcinius sluoksnius, tiek tankų branduolį su spinduline šilumos pernaša. Tačiau

g bangos, sklisdamos gelmėse, dažniausiai neturi jokio poveikio žvaigždės šviesio kitimams, nes joms sunku iš gelmių prasiskverbti į žvaigždės paviršių. *p* bangos paprastai pasižymi aukštesniais dažniais nei *g* bangos. Bet kartais dėl tam tikrų žvaigždės struktūrinių pokyčių jų dažniai pasidaro labai panašūs. Tuomet stebimos mišrios, labiau sudėtingos *p* ir *g* bangų sukeltos pulsacijos.

Žvaigždžių „muzika“

Gali atrodyti, kad, jei jau Saulėje sklinda garso bangos, tai mes turėtume jas girdėti. Iš tikrųjų nei Saulės, nei kitų kintamųjų žvaigždžių mes išgirsti negalime. Visų pirma, šios garso bangos negali išeiti už žvaigždės ribų, nes žvaigždės supa labai retos vandenilio dujos, susimaišiusios su mažomis dulkių dalelėmis. Saulės aplinkoje, viename kubiniame centimetre erdvės, rastume vos vieną kitą atomą, todėl tarpžvaigždinę erdvę sąlyginai galime laikyti vakuumu. Bet, net jei ir galėtume įsiskverbti į Saulės vidų, šių garso bangų mes neišgirstume, nes jų dažnis yra už žmogaus klausos jautrumo ribų. Lygiai taip pat mes negalime girdėti ultragarso, kurį skleidžia šikšnosparniai ir delfinai, bei mėlynojo banginio skleidžiamo infragarso (žr. 1 lentelę). Žvaigždžių garso bangų dažnis yra per žemas, kad žmogaus ausis sugebėtų jį išgirsti. Bet padėtis nėra tokia beviltiška. Atlikus tam tikras transformacijas žvaigždžių „muziką“ išgirsti įmanoma.

Garso šaltinis	Garso dažnių intervalas, Hz	
Šikšnosparnis	1000–120 000	Ultragarsas
Delfinas	150–150 000	Ultragarsas
Žmogus	20–20 000	Akustinės bangos
Mėlynasis banginis	10–40	Infragarsas
Žvaigždės su Saulės tipo pulsacijomis	0.00001–0.007	Ypač žemo dažnio garso bangos

1 lentelė. Skirtingų garso šaltinių skleidžiamų garso bangų dažnių intervalai

Tai, ką mes laikome muzika, dažniausiai yra garsų dažnių, amplitudžių ir fazių santykiai, o ne absoliuti jų vertė. Iš tikrųjų tik nedaugeliui žmonių, dažniausiai profesionaliems muzikantams, yra svarbu, kokioje tonacijoje skamba muzika. Ir taip dažniausiai yra vien dėl to, kad būtų lengviau tą muziką groti arba dainuoti. Tačiau daugumai žmonių tonacijos pakeitimas nekeičia muzikos kūrinio suvokimo. Melodija vis tiek atpažįstama ir kitoje tonacijoje, nes dažnių tarpusavio santykiai nepasikeičia. Įrašę šikšnosparnio skleidžiamą ultragarsą jautria garso įrašymo įranga ir perstūmę šių garsų dažnius į žmogaus klausos

sritį, galime išgirsti šikšnosparnio traškesį. Panašiai su tinkama įranga galime įrašyti ir banginių sklaidžiamą infragarsą, o padidinę dažnį klausytis jų „dainų“.

O kaip įrašyti ir tokią transformaciją atlikti su žvaigždžių garso bangomis, jei jos yra taip toli? Mes jau žinome, kad garso bangos žvaigždėse sukelia žvaigždžių pulsacijas ir jų šviesio kitimus. Be to, šviesio kitimo dažniai glaudžiai susiję su žvaigždės garso bangų dažniais. Todėl stebėdami, kokiu dažniu, amplitude ir faze kinta žvaigždės šviesis, mes sužinome ir garso bangų, sklindančių žvaigždės viduje, dažnius. O atlikę transformacijas išgirstame žvaigždžių „melodijas“ ar „riaumojimą“ aukštesnėje tonacijoje.

Kintančio šviesio žvaigždės mokslininkams suteikia unikalią galimybę „pažvelgti“ į žvaigždžių vidų ir ištirti žvaigždžių vidinę sandarą. Astrofizikos šaka, tyrinėjanti kintamųjų žvaigždžių pulsacijas, jų dažnius, amplitudes, fazes ir modeliuojanti tų žvaigždžių vidinę sandarą pagal žvaigždžių pulsacijas, yra vadinama asteroseismologija.

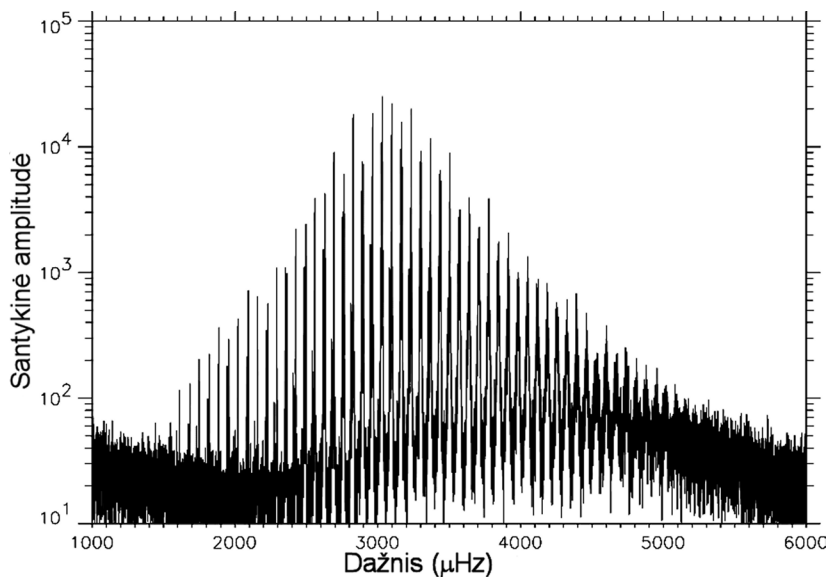
Asteroseismologijos užuomazgos

Pirmosios idėjos apie tai, kad žvaigždžių pulsacijos gali būti panaudotos žvaigždžių vidinės sandaros tyrimams, kilo XX a. pradžioje, kai astronomai pradėjo suprasti, kad kintamųjų žvaigždžių šviesio pokyčiai yra susiję su jų fiziniais pokyčiais. Artūras Edingtonas (angl. *Arthur Stanley Eddington*, 1882–1944) buvo vienas pirmųjų, kuris apie tai rašė 1926 m. savo knygoje „Žvaigždžių vidaus sandara“ (angl. *The Internal Constitution of the Stars*).

Visų pirma, Edingtonas bandė išsiaiškinti, kodėl kai kurios žvaigždės pulsuoja, o kitos lieka stabilios. Jis siekė suprasti, kokios jėgos veikia žvaigždės viduje ir kaip šios jėgos turi sąveikauti, kad sukeltų pulsacijas. Mokslininkas sukūrė matematinį modelį, aprašantį žvaigždžių pulsacijas, kuris buvo pavadintas Edingtono pulsacijų lygtimi. Šis matematinis modelis grindžiamas žvaigždės vidinių jėgų pusiausvyra, įskaitant slėgio skirtumus, gravitaciją, tankio pokyčius ir energijos pernašos mechanizmus. Edingtonas suprato, kad žvaigždė gali tapti kintamąja tuomet, kai jėgų pusiausvyra jos viduje sutrikdoma – tai gali sukelti nestabilumą ir ilgalaikes pulsacijas. Be žvaigždžių pulsacijų Edingtonas taip pat prisidėjo prie žvaigždžių evoliucijos teorijos kūrimo. Jo darbai padėjo suprasti, kaip žvaigždžių pulsacijos gali būti susijusios su žvaigždės evoliucijos stadijomis. Edingtono darbai ne tik padėjo pagrindą asteroseismologijai – mokslui, tiriančiam žvaigždžių vidinę sandarą pagal jų pulsacijas, bet ir atvėrė kelią detalesniems žvaigždžių tyrimams, kurie vėliau leido atrasti įvairius pulsacijų mechanizmus. Tačiau Edingtono laikais stebėjimų duomenys buvo nepakankami, todėl nebuvo galimybės jo idėjas pritaikyti praktikoje.

Helioseismologija ir asteroseismologija

Praktinė asteroseismologija prasidėjo nuo helioseismologijos – mokslo, nagrinėjančio Saulės vidinę sandarą, remiantis jos pulsacijų stebėjimais. Helioseismologija buvo pradėta taikyti anksčiau nei asteroseismologija, nes Saulę lengviau iširti nei kitas žvaigždes. Helioseismologijos pradžia laikomi 1960 m., kai buvo atrastos Saulės viduje sklindančios garso bangos, dėl kurių Saulės plazma juda aukštyn ir žemyn, sudarydama paviršiuje kintančias karštesnes ir vėsesnes sritis. Šių sričių temperatūros kitimai lemia Saulės šviesio kitimus, kurie vadinami pulsacijomis arba virpesiais. Mokslininkai suprato, kad šis medžiagos judėjimas nėra paprasta konvekcija, dėl kurios paviršiuje formuojasi granulės ir supergranulės. Granuliacija ir supergranuliacija yra chaotiški procesai, o atskiros jų struktūros išlieka matomos nevienodą laiką. Tuo tarpu garso bangų sukelti virpesiai turi apibrėžtus periodus (Saulėje apie 5 min. arba 3 mHz dažnį) ir yra vienodi visame paviršiuje. Garso bangos sklinda visame Saulės tūryje ir gali būti aptiktos bet kurioje paviršiaus vietoje, stebint periodinius Saulės šviesio kitimus. Dėl savo periodiškumo ir didesnės amplitudės, lyginant su konvekcijos sukeltais reiškiniais, šios pulsacijos lengvai išsiskiria iš chaotiško paviršiaus granulių judėjimo. Garso bangos



2 pav. Saulės pulsacijų spektras gautas 1997 m. prietaisu GOLF tarptautinėje Saulės ir heliosferos observatorijoje (SOHO) remiantis 8 mėn. stebėtais Saulės šviesos spektrais (Lazrek ir kt., *Solar Physics*, 1997)

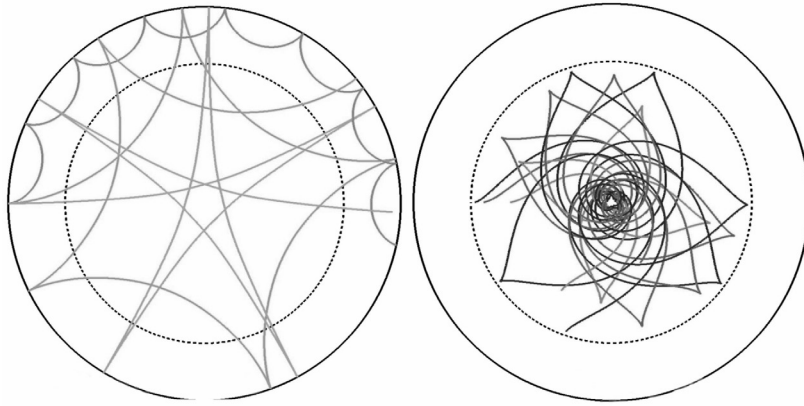
atsiranda Saulės konvekciniame sluoksnyje, kur intensyviai verdanti plazma konvekcijos būdu perneša šilumą iš gelmių į paviršių. Kai karšta plazma pakilusi į paviršių atvėsta, ji tampa tankesnė ir leidžiasi gilyn, sukeldama slėgio pokyčius ir generuodama garso bangas, kurios sklinda visame žvaigždės tūryje. Helioseismologiniai Saulės pulsacijų tyrimai padėjo suprasti jos vidinę struktūrą, branduolinės sintezės procesus, konvekcijos dinamiką, magnetinio lauko generavimą bei aptikti tachokliną – svarbią pereinamąją zoną tarp spindulinės ir konvekcinės sričių, kurioje formuojasi Saulės magnetinis laukas. Be to, šie tyrimai pateikė vertingas informacijas ir apie Saulės evoliuciją.

Saulėje aptikta tūkstančiai p bangų sukeltamų pulsacijų, kurių dažniai svyruoja nuo 1 iki 5 mHz, o amplitudės tesiekia vos milijoninę dalį magnitudės (žr. 2 pav.). Šie itin maži šviesio pokyčiai reikalauja labai jautrių matavimo prietaisų. Modernios observatorijos, tokios kaip SOHO (angl. *Solar and Heliospheric Observatory*) ir SDO (angl. *Solar Dynamics Observatory*), leidžia labai tiksliai išmatuoti Saulės paviršiaus virpesius ir šviesio kitimus. Saulė, kaip p bangų kintamoji žvaigždė, yra svarbi laboratorija, padedanti suprasti žvaigždžių fizikos pagrindus. Garso bangų atradimas Saulėje buvo pirmasis žingsnis link asteroseismologijos – mokslo apie kintamąsias žvaigždes. Asteroseismologija pradėjo vystytis 1970–1980 m., kai technologijų ir stebėjimo metodų pažanga leido detaliau tirti žvaigždžių pulsacijas. 1980-aisiais pasirodė pirmieji teoriniai darbai, kurie tyrė, kaip skirtingos žvaigždžių pulsacijos gali padėti nustatyti jų vidinę sandarą. Šiandien asteroseismologija ne tik padeda tyrinėti pavienes žvaigždes, bet ir nagrinėti žvaigždžių populiacijas bei galaktikų evoliuciją.

Saulės tipo pulsacijos žvaigždėse

Vienos geriausiai ištirtų kintamųjų žvaigždžių yra žvaigždės su Saulės tipo pulsacijomis. Dėl gausios stebėjimų medžiagos buvo sukurti išsamūs teoriniai modeliai. Saulę ir kitas žvaigždes su Saulės tipo pulsacijomis sieja konvekcinis išorinis sluoksnis, kuriame dėl aktyvaus medžiagos konvekcinio maišymosi susidaro įvairaus dažnio garso p bangos. Priklausomai nuo žvaigždės dydžio, masės ir vidinės sandaros, vienu dažnių bangos nuslopsta, o kitų – sustiprėja, nuolat sklinda žvaigždės viduje ir sukelia paviršiaus virpesius bei šviesio kitimus. Tam, kad šios pulsacijos būtų stabilios ir periodiškos, garso bangos turi formuoti stovinčiąsias bangas žvaigždės viduje. Tai reiškia, kad išlieka tik rezonansinių dažnių bangos. Kokie yra tie rezonansiniai dažniai, priklauso nuo žvaigždės vidinių savybių. Stovinčiosioms bangoms būdinga, kad tam tikrose vietose (mazguose) bangos amplitudė lygi 0, o kitose (antinoduose) amplitudė būna maksimali.

Kadangi žvaigždės vidus nėra homogeniškas ir gilesniuose sluoksniuose temperatūra bei tankis yra didesni, bangos sklinda ne tiesiai, o lankais (žr. 3 pav.). Tai panašu į šviesos lūžį, kai šviesa pereina iš vienos terpės į kitą,



3 pav. Bangos sklindančios žvaigždžių viduje ir sukeliančios žvaigždžių šviesio kitimus: kairėje – garso arba slėgio p bangos, dešinėje – gravitacijos g bangos (DAP-CEA)

pavyzdžiui, iš oro į vandenį, ir keičia kryptį dėl skirtingo greičio tose terpėse.

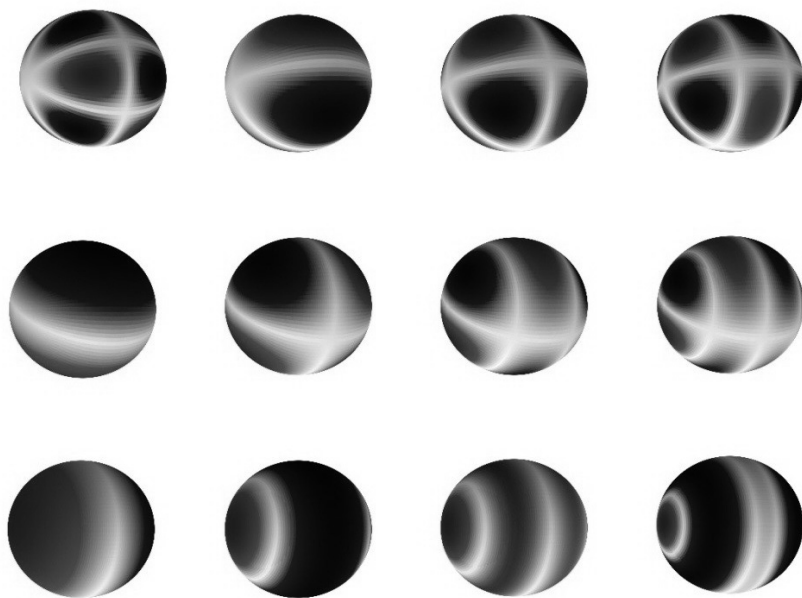
Stebimų pulsacijų dažnis priklauso nuo laiko, per kurį garsas nukeliauja nuo vieno paviršiaus taško iki kito, taip pat nuo vidutinio garso greičio tame kelyje. Jei stebime daug skirtingų dažnių bangų, kurios prasiskverbia į įvairius gylius, galime sudaryti žvaigždės garso greičio žemėlapi.

Daugiausia informacijos mokslininkams suteikia žemiausio dažnio bangos, nes jos gali prasiskverbti arčiausiai žvaigždės centro. Tuo tarpu aukšto dažnio bangos sklinda tik paviršiuje. Tai leidžia nustatyti plazmos temperatūrą skirtinguose žvaigždės sluoksniuose.

Ką naujo galime sužinoti tyrinėjami žvaigždės asteroseisminiais metodais

Norint pamatyti asteroseisminius šviesio kitimus, žvaigždės reikia stebėti ilgai. Tam naudojami antžeminiai ir kosminiai teleskopai su astronominiais stebėjimams pritaikyta kamera. Tokie tyrimai leidžia gana tiksliai apskaičiuoti žvaigždės masę, spindulį, paviršiaus gravitacijos pagreitį ir šviesį.

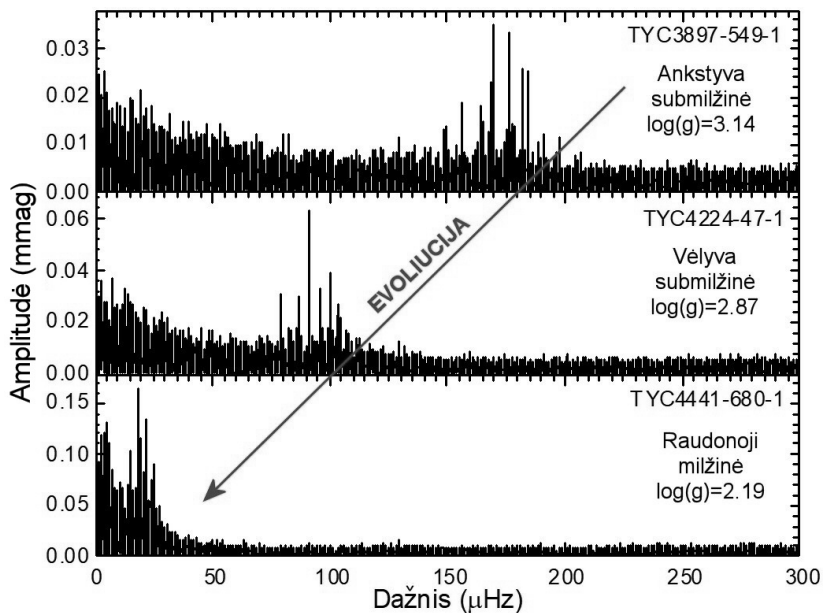
Kai žvaigždė evoliucionuoja nuo pagrindinės sekos link milžinių ir ima plėstis, pulsacijų spektras ima keistis, virpesių dažniai mažėja (žr. 5 pav.), o dar vėlesnėse evoliucijos stadijose ima ryškėti ir gravitacinių g bangų požymiai. Apibendrinus šią informaciją asteroseisminiais metodais gaunama ne tik informacija apie žvaigždės vidinę sandarą, bet įvertinamas ir jos amžius. Žvaigždžių amžiaus nustatymas yra sudėtingas uždavinys. Daugelis astrofizikoje naudojamų metodų nustato žvaigždžių amžių su didelėmis pa-



4 pav. Žvaigždžių paviršiuje susidarančių vėsesnių ir karštesnių sričių išsidėstymas esant skirtingoms pulsacijoms. Baltos juostos vaizduoja stovinčių bangų mazgų padėtis paviršiuje (Henryka Netzel)

klaidomis. Naudojantis asteroseisminiais duomenimis nustatomi žvaigždžių amžiai yra daug tikslesni. Problema yra tik ta, kad ne visos žvaigždės turi Saulės tipo pulsacijas, o nemažos dalies žvaigždžių pulsacijų išvis nepavyksta nustatyti. Tokiais atvejais reikia rasti papildomų parametrų, jautrių žvaigždės amžiui. Vienas iš tokių parametrų gali būti tam tikrų cheminių elementų gausų santykis žvaigždėse.

Vilniaus universiteto Teorinės fizikos ir astronomijos instituto astrofizikų grupėje siekiame patobulinti žvaigždžių amžiaus nustatymo tikslumą. Naudojame metodą, pagrįstą cheminių elementų gausų, tokių kaip $[Y/Mg]$ bei $[C/N]$, priklausomybe nuo žvaigždžių amžiaus. Pirmiausia ištyrėme žvaigždžių su Saulės tipo pulsacijomis šviesos spektrus ir nustatėme šių elementų gausas. Tada, remdamiesi NASA (angl. *National Aeronautics and Space Administration*) kosminio teleskopo TESS (angl. *Transiting Exoplanet Survey Satellite*) fotometriniiais stebėjimais, apskaičiavome žvaigždžių asteroseisminius parametrus ir amžius. 5 pav. pateiktame grafike parodyti kelių skirtingų evoliucijos stadijų žvaigždžių Saulės tipo pulsacijų spektrai, nustatyti pagal NASA TESS kosminio teleskopo duomenis. Po to nustatėme gausų $[Y/Mg]$ ir $[C/N]$ priklausomybes nuo asteroseisminio žvaigždžių amžiaus.



5 pav. Grafike parodyti kelių skirtingų evoliucijos stadijų žvaigždžių Saulės tipo pulsacijų spektrai, stebėti NASA TESS kosminiu teleskopu. Matyti, kad žvaigždei evoliucionuojant virpesių dažniai mažėja

Šios pagal kintamąsias žvaigždes nustatytos priklausomybės bus taikomos ir kitų žvaigždžių amžiui įvertinti.

Pristatytas asteroseisminių ir spektrinių duomenų apjungimo metodas yra daug žadantis žvaigždžių amžiaus nustatymo būdas, kurį svarbu tobulinti. Tyrimus remia Lietuvos mokslo taryba (LMTLT, grantas Nr. P-MIP-23-24).