

Iš kur žinome, kiek žvaigždei metų?

Renata Minkevičiūtė

Kosminių objektų amžius yra vienas iš sunkiausiai nustatomų fizikinių parametru, kuriuos mokslininkai bando sužinoti tirdami žvaigždes ir galaktikas. Todėl daugybės kosminių objektų amžiaus dar nežinome arba nustatymai yra netikslūs. Šiame straipsnyje aptarsime pagrindinius metodus ir naujoves, taikomas nustatant žvaigždžių amžių.

Pasakojant žmonėms apie kosminius objektus, neišvengiamai paminimas ir jų amžius. Pavyzdžiui, Saulės amžius yra apie 4.6 mlrd. metų. Nors Saulė yra gana jauna žvaigždė, bet yra ir kur kas jaunesnių. Pavyzdžiui, padrikojo žvaigždžių spiečiaus NGC 2362 amžius viso labo „tik“ 5 mln. metų, o štai kamuolinio spiečiaus M13 amžius yra apie 12 mlrd. metų. Jis daugiau nei dvigubai vyresnis už mūsų Saulę. Paukščių Tako galaktikos amžius yra apie 13 mlrd., o Visatos amžius – 13.8 mlrd. metų. Galvotam žmogui iš karto kyla klausimas – iš kurgi mokslininkai žino, koks žvaigždžių amžius, kaip jie tuos milijardus suskaičiuoja? Mes tiksliai galime žinoti žmogaus amžių, nes žinome jo gimimo datą. Galime atsekti, kiek metų praėjo nuo kažkokio istorinio įvykio, nes jo data užrašyta metraščiuose. Bet kas suskaičiuoja tuos milijardus metų? Juk niekas dar tiek negyveno!

Tiesa, negyveno, bet mokslininkai turi savo metodus, kaip apskaičiuoti žvaigždžių amžių. Žinoma, pradėdant apie tai kalbėti, reikia pabrėžti, kad amžius kaip fizikinis parametras mokslininkams vis dar kelia daug problemų. Paprastai šis fizikinis dydis yra pateikiamas su didesne ar mažesne paklaida.

Viena, kas yra tikrai aišku, kad žvaigždės amžius yra susijęs su jos mase – kuo žvaigždė masyvesnė, tuo trumpiau ji gyvena. Panašiai, kaip ir su laužu – jeigu sumesim į jį visas turimas malkas vienu metu, bus labai didelis ir labai kaitrus, bet ... jis greitai užges, o jeigu malkas į laužą mesim pamažu,



Jaunas padrikasis žvaigždžių spiečius NGC 2362 yra į pietus nuo dangaus pusiaujo Didžiojo Šuns žvaigždynė ir yra tikrai įdomus objektas vidutinio dydžio teleskopams. Pirmą kartą jį 1654 m. paminėjo italų kunigas, entomologas ir astronomas Džovani Batista Hodierna. Šarlis Mesjė į savo ūkų katalogą jo neįtraukė, tačiau 1785 m. kovo 6 d. jį stebėjo Viljamas Heršelis. Spiečius yra maždaug 5 000 šviesmečių atstumu nuo Žemės ir manoma, kad jo amžius yra nuo 4 iki 5 milijonų metų.

to paties kiekio malkų gali užtekti iki ryto visai nakčiai. Taip ir milžiniška žvaigždė – nors kuro turi ji nepalyginamai daugiau nei mažos žvaigždės, ji dega žymiai sparčiau ir ryškiau.

Didžioji dalis žvaigždžių apie 90 % savo gyvenimo laiko praleidžia taip vadinamoje pagrindinės sekos fazėje, kuomet energiją ir šviesą ji gamina centre vykstant vandenilio jungimosi reakcijoms sintetinant helį. Pačios masyviausios ir pačios karščiausios žvaigždės atrodo melsvos, o pačios mažiausios ir vėsiausios – rausvos. Tarp šių dviejų kraštutinių yra mūsų Saulė – geltonoji nykštukė. Kai žvaigždė gimsta, jos ryškumas ir temperatūra paprastai nesikeičia, kol ji būna pagrindinės sekos stadijoje. Kiek ilgai ji užtruks šioje stabilioje stadijoje, būtent ir priklauso nuo masės, t.y. nuo vandenilio kiekio, kokį ji turi sukaupti. Vėliau, kai kuras išsiekvoja, žvaigždė ima pūstis, plėstis, ji gali sprogti kaip supernova ir t.t. 10 kartų už Saulę masyvesnė žvaigždė turi 10 kartų daugiau degalų, tačiau ji sunaudoja tą kurą maždaug 10 000 kartų greičiau nei Saulė. Dėl to jos bendras gyvavimo laikas yra 1 000 kartų trumpesnis nei mūsų Saulės. Panašiai penkis kartus už Saulę masyvesnės žvaigždės gyvavimo laikas yra maždaug 100 kartų trumpesnis nei Saulės, kol ji tampa nestabili ir baigia savo gyvenimą. Tuo tarpu tokios žvaigždės kaip mūsų Saulė bendra stabili gyvenimo trukmė yra apie 10 milijardų metų. Saulė dabar yra



M13 kamuolinis spiečius, dar žinomas kaip Didysis Heraklio spiečius, yra tankus ir ryškus šimtų tūkstančių žvaigždžių spiečius Heraklio žvaigždynė. 1714 m. jį atrado Edmondas Halis, o 1764 m. spiečius buvo įtrauktas į Šarlio Mesjė katalogą. Jis yra 25 000 šviesmečių atstumu nuo Žemės, o jo skersmuo yra apie 150 šviesmečių. Giedrame ir tamsiame šiauriniame danguje jį galima pamatyti plika akimi arba su žiūronais. (Marco Burali, Tiziano Capecchi, Marco Mancini (Osservatorio MTM))

šiek tiek mažiau nei pusės tokio amžiaus (šis amžius labai tiksliai nustatomas pagal radioaktyvius elementus meteorituose), todėl dar yra maždaug penki milijardai metų, kol turėsime pradėti ieškoti naujų namų, nes, kai Saulė taps raudonąja milžine, ji sieks Marso orbitą pakeliui sudegindama Merkurijų, Venerą ir mūsų Žemę.

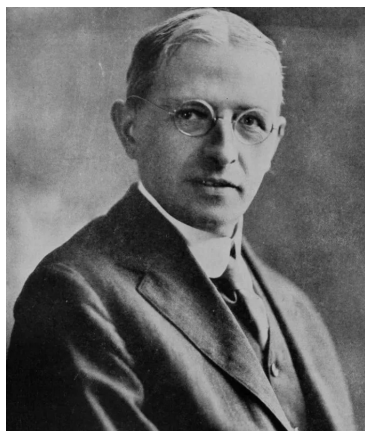
HR diagrama

XX amžiaus pradžioje du astronomai – Einaras Hercšprungas (Ejnar Hertzsprung) ir Henris Raselas (Henry Norris Russell) – nepriklausomai vienas nuo kito sugalvojo diagramoje atidėti žvaigždžių temperatūrą pagal jų ryškumą. Buvo pastebėta, kad tokioje diagramoje žvaigždės išsidėsto ne bet kaip, o sudaro tam tikras sekas. Apie vieną iš tų sekų – pagrindinę – jau pakalbėjome. Vėliau, keliaujant į kitas sekas, t.y. žvaigždei evoliucionuojant, jos temperatūra ir ryškumas keičiasi, bet kiekviena žvaigždė, turėdama savo startinį kuro kiekį (masę) ir energiją (temperatūrą bei ryškį), nucina savitą evoliucijos kelią,



Einaras Hercšprungas
(1873–1967)

žvaigždės ryškumas – kaip greitai ji tą kurą sudegina. Stebėdami visas spiečiaus žvaigždes galime įvertinti, ar mūsų pasirinktoji dar tik ruošiasi tapti nestabili, nes kitos, masyvesnės žvaigždės jau bus palikusios pagrindinę (stabilią) seką. Taip pat žinome, kad jos kuras beveik baigtas. Žvaigždės pradžioje turėto

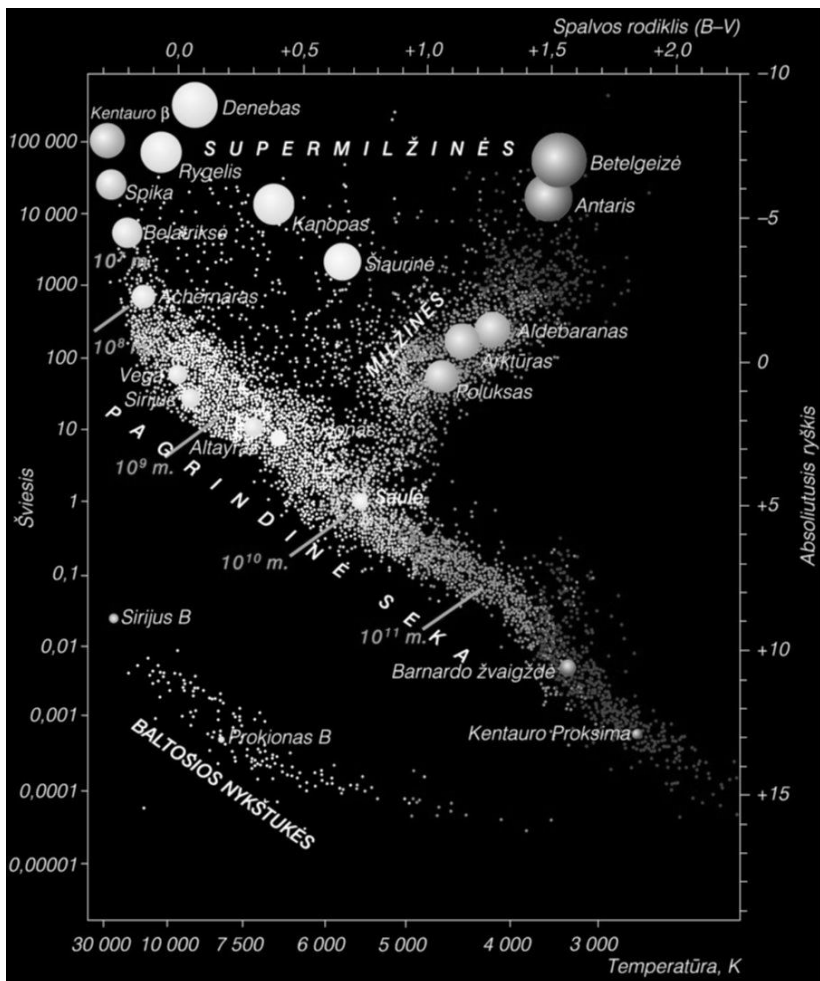


Henris Raselas (1877–1957)

kuris ir atsispindi Hercšprungo-Raselo arba tiesiog HR diagramoje.

Kalbant apie pavienę žvaigždę, jos ryškumas ir temperatūra mums nelabai daug ką pasako, kadangi, kaip minėjau, šios savybės išlieka gana pastovios 90 % jos gyvenimo. Žvaigždė gali būti gana jauna arba gana sena, ir mes nematytume skirtumo. Žvaigždžių spiečiai (taip mokslininkai vadina dideles tarpusavy gravitaciškai susijusių žvaigždžių grupes) suteikia pranašumą, nes juose galime rasti visų masių žvaigždžių, ir jos visos susiformavo maždaug tuo pačiu metu tame pačiame vandenilio dujų debesyje. Taigi mums tereikia pažvelgti į spiečių ir nustatyti, kokia masyvi žvaigždė yra karščiausia ir mėlyniausia ir kuri dar neįžengė į vėlyvą, nestabilų savo gyvenimo laikotarpį. Žvaigždės masė parodo, kiek kuro turėjo žvaigždė, kai gimė, o

kuro ir to kuro degimo greičio santykis parodo, kiek laiko žvaigždė gyvuoja. (Pagal analogiją, jei žinome, kiek žibalo buvo mūsų žibalinėje lempos, kai ją uždegėme, ir, kaip greitai ji sunaudoja žibalą, tuo momentu, kai ji pradeda gesti, galime apskaičiuoti, kiek laiko ji degė su turėtu žibalo kiekiu.) Kadangi visos spiečiaus žvaigždės yra vienodo amžiaus, tos vienos žvaigždės amžius mums parodo viso spiečiaus amžių. Šiandien mokslininkai mano, kad šis metodas leidžia įvertinti žvaigždžių amžių su maždaug 10–20 % paklaida. Tai reiškia, jeigu mes sakome, kad spiečiaus žvaigždėms yra apie 12 mili-



Saulės aplinkos Hertzsprungo ir Russello (HR) diagrama: skaičiai prie linijų rodo vidutinę žvaigždės gyvavimo trukmę įvairiose pagrindinės sekos vietose. (MELC archyvas)

jardų metų, jos gali būti ir 9 milijardų arba net 15 milijardų metų amžiaus. Labai mažai tikėtina, kad dauguma jų galėtų būti jaunesnės arba senesnės nei šis diapazonas.

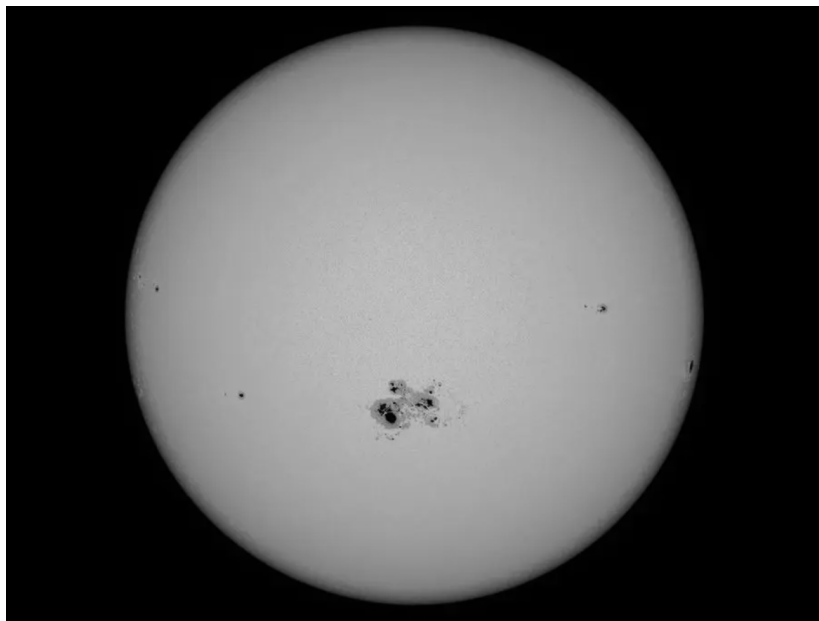
Nors pabrėžiau, kad šis metodas daugiausia taikomas žvaigždėms, esančioms spiečiuose, bet blogiausiu atveju jį galima taikyti ir pavienėms žvaigždėms. Mokslininkai turi sukūrę teorinių modelių tinklą ir, žinant

žvaigždės temperatūrą ir ryškį, HR diagramoje galima pritaikyti teorinį amžiaus modelį, bet suprantama, kad tokio nustatymo tikslumas būtų dar mažesnis.

Sukimosi greitis

Aštuntajame dešimtmetyje astrofizikai pastebėjo tendenciją: jaunesnių spiečių žvaigždės sukasi greičiau nei žvaigždės senesniuose spiečiuose. Kitaip sakant, žvaigždės yra linkusios lėtėti senstant, tik mokslininkai vis dar tiksliai nežino kiek. 1972 m. astronomas Andrew Skumanichas pasiūlė paprastą lygtį žvaigždės amžiui įvertinti: sukimosi greitis = $1/(\text{amžius})^2$. Šis metodas dešimtmečius buvo taikomas pavienėms žvaigždėms, tačiau nauji duomenys sumenkino jo naudingumą. Pasirodo, kai kurios žvaigždės nesulėtėja ir visą gyvavimo laikotarpį išlaiko tą patį sukimosi greitį. Panašu, kad sukimosi greičio metodas labiau tinka naudoti jaunesnėms už Saulę žvaigždėms. Bet, kaip ten bebūtų, šio metodo nėra atsisakoma.

O kaipgi šiais laikais yra nustatomas žvaigždės sukimosi greitis? Atsakymas būtų toks – stebint dėmes žvaigždės paviršiuje. Saulė turi saulės dėmes, o žvaigždės – žvaigždžių dėmes. Su antžeminiais teleskopais stebėti žvaigždžių dėmes yra sudėtinga, bet kosminiai teleskopai, tokie kaip, pavyzdžiui, šiuo metu



2014 m. spalio mėn. Saulės paviršiuje stebėtos saulės dėmės (GSFC/NASA)

jau savo misiją baigęs *Kepler* teleskopas, gali jas užfiksuoti, net jeigu žvaigždės dėmės sumažina bendrą žvaigždės spindulių srautą vos 1–2 %. *Kepler* teleskopu nustatytas greitis, kuriuo žvaigždės dėmės vėl pasirodo žvaigždės paviršiuje ir gali pasakyti, kaip greitai sukasi žvaigždė. O toliau, žinodami žvaigždės masę ir jos sukimosi greitį, galime nustatyti ir amžių.

Astroseismologija

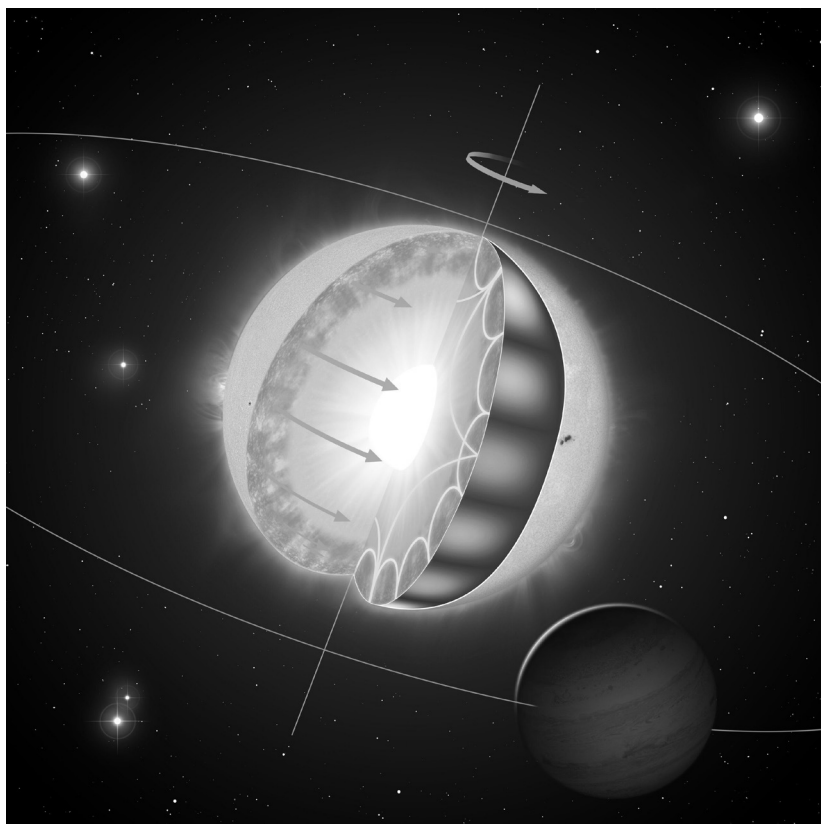
Kad jau paminėjau *Kepler* teleskopą, turiu priminti, kad jo pagrindinis darbas nebuvo žvaigždžių sukimosi greičio tyrimai. Šis teleskopas į kosmoso platybes buvo paleistas tam, kad ieškotų planetų prie kitų žvaigždžių – egzoplanetų. *Kepler* teleskopas ne tik tapo tikra palaima egzoplanetų tyrimams, bet ir atskleidė žvaigždžių seismologijos naudą amžiaus nustatymui. Teleskopo pranašumas buvo tas, kad jis galėjo žiūrėti į tas pačias žvaigždes ilgą laiką.

Žvaigždžių viduje sklinda akustinės bangos, panašiai kaip ir Žemės gilumoje sklinda seisminės bangos, kurios sukelia drebėjimus Žemės paviršiuje. Vidiniai akustiniai virpesiai sukelia osciliacijas žvaigždės paviršiuje, o dėl šių osciliacijų periodiškai kinta žvaigždės paviršiaus temperatūra ir šviesis. Stebėdami žvaigždę per atstumą mes matome kintamą, pulsuojančią žvaigždę. Šio žvaigždės „mirkėjimo“ stebėjimas gali suteikti užuominų apie jos amžių, nes pulsacijų dažnis priklauso nuo vidinių sluoksnių, kuriais sklinda akustinės bangos, temperatūros, cheminės sudėties ir kt., o tai, savo ruožtu, priklauso nuo žvaigždės amžiaus ir masės. Mokslininkai žiūri į žvaigždės šviesio pokyčius kaip į rodiklį, kas vyksta po paviršiumi, ir naudodami kompiuterinį modeliavimą apytiksliai apskaičiuoja žvaigždės amžių. Norint tai padaryti, reikia tikrai didelio duomenų rinkinio apie žvaigždės šviesį, ir kosminiai teleskopai tam yra tinkamiausi, nes jie gali ilgai nepertraukiamai stebėti tą patį objektą.

Kaip minėjau, *Kepler* teleskopas jau baigė savo misiją, bet „gera vieta ilgai tuščia nebūna“ – dabar kosmose skrieja kitas egzoplanetų medžiotojas, TESS teleskopas. Šiuo teleskopu gauti duomenys ne tik yra naudojami egzoplanetų paieškai bet ir žvaigždžių, aplink kurias planetos skrieja, tyrimams, pavyzdžiui, amžiaus nustatymui. TESS duomenys yra gana aukštos kokybės ir amžiaus nustatymo paklaida neviršija 10 %. Šiais laikais astroseismologija yra laikoma vienu tiksliausių metodų pavienių žvaigždžių amžiaus nustatymui. Bet kaip ir visi metodai, taip ir šis turi savo silpnąją vietą – astroseisminiai amžiai negali būti nustatyti toms žvaigždėms, kurių astroseisminis aktyvumas yra menkas.

Cheminis „laikrodis“

Pastaraisiais metais pasirodė ne vienas mokslinis straipsnis, kurių autoriai bando įrodyti, jog yra ryšys ir tarp žvaigždės cheminės sudėties bei amžiaus.



Garso bangos, sklindančios žvaigždžių viduje, verčia jas vibruoti tam tikrais dažniais. Šios vibracijos matomos paviršiuje, astronomai gali jas išmatuoti naudodami kosminius teleskopus. Kai žvaigždė sukasi, šie virpesių dažniai šiek tiek pasikeičia, todėl galima išmatuoti žvaigždės sukimosi žiūrint, kaip keičiasi jos paviršius laikui bėgant. Šių virpesių tyrimas (vadinamas astroseismologija) taip pat gali būti naudojamas matuojant tokias savybes kaip žvaigždės masė ir amžius. (Mark Garlick/University of Birmingham)

Kitaip sakant, nustatę tam tikrų cheminių elementų gausą (šiuo įmantriu žodžiu mokslininkai vadina apskaičiuotą cheminių elementų kiekį) žvaigždėje, galime įvertinti ir jos amžių. Šis metodas paremtas prielaida, kad mes turime pakankamai gerą supratimą apie žvaigždžių evoliuciją, ir kad žvaigždės gyvena „pagal vadovėlį“. Saulės tipo žvaigždės, palikusias pagrindinę seką, tampa raudonosiomis milžinėmis – jos išsipučia, o jų išoriniai sluoksniai šiek tiek atvėsta. Viduje ir toliau vyksta termobranduolinės reakcijos, o išorinių sluoksnių

plazma maišosi atnešdama reakcijų produktus į išorę. Mokslininkai, stebėdami tokias žvaigždes, gali įvertinti tam tikrų cheminių elementų – azoto ir anglies, taip vadinamų maišymuisi jautrių elementų – gausas. Žinant žvaigždės masę galime pritaikyti jai teorinį amžiaus modelį, kuris priklauso nuo šių cheminių elementų gausų pokyčių, tokiu būdu įvertinant amžių. Kai kiti metodai sunkiai pritaikomi brandų raudonosios milžinės raidos laikotarpį pasiekusioms žvaigždėms, šis metodas lieka vos ne vienintelis amžiaus įvertinimui.

Tiriant spiečių žvaigždes buvo pastebėta ir cheminio elemento bario gausos priklausomybė nuo žvaigždės amžiaus, t.y. pasirodė, jog bario gausa jaunesnėse žvaigždėse yra didesnė nei senesnėse. Panašus efektas matyti ir tiriant kitus, to paties proceso, kuomet sintetinamas baris, metu gaminamus cheminius elementus – itriją, cirkonį, lantaną, cerį. Tai galima paaiškinti tuo, kad jaunesnės žvaigždės formavosi dujų debesyse, kurie buvo labiau praturtinti šiais cheminiais elementais negu senesnės žvaigždės. Su taip vadinamais *alfa* proceso cheminiais elementais (šie elementai sintetinami masyvių žvaigždžių viduje reakcijų metu, kuomet yra prijungiamos *alfa* dalelės – helio branduoliai), tokiais kaip magnis, silicis, kalcis ir titanas, yra atvirksčiai – senesnės žvaigždės yra labiau jais praturtintos nei jaunesnės. Senos žvaigždės formavosi iš dujų, turinčių daugiau *alfa* elementų. Vėliau, vykstant Galaktikos cheminei evoliucijai, į tarpžvaigždinę terpę buvo išmesta daugiau geležies ir už geležį sunkesnių elementų. Taigi kaip ir natūralu, kad, žinant, kokie ir kada vyko Galaktikos tarpžvaigždinės terpės praturtinimo etapai, ištyrę žvaigždžių cheminę sudėtį galime spręsti ir apie jų amžių.

Bet šis cheminio „laikrodžio“ metodas dar tik pradėdamas taikyti, dar daug klausimų yra neatsakytų ir dar daug papildomų tyrimų reikia atlikti. Turime būti tikri, kaip šis amžiaus – cheminės sudėties ryšys priklauso nuo žvaigždės padėties Galaktikoje, nes panašu, jog skirtingose Galaktikos regionuose žvaigždžių formavimosi sąlygos buvo nevienodos. Reikia patikrinti, kaip jis priklauso nuo žvaigždės fizikinių parametrų, pavyzdžiui, geležies gausos. Be to, turime žinoti, kaip šis efektas keičiasi ar nesikeičia žvaigždei evoliucionuojant.

Prie šių tyrimų prisideda ir Vilniaus universiteto astrofizikų grupė, vadovaujama habil. dr. Gražinos Tautvaišienės. Nuo 2023 m. tyrimų projektą finansuoja Lietuvos mokslo taryba (S-MIP-23-24). Grupė jau ne pirmus metus dirba Galaktikos cheminės evoliucijos tyrimų srityje, tad ir projekto tikslai ambicingi – numatyta ištirti 2 000 Galaktikos lauko žvaigždžių bei 100 padrikųjų žvaigždžių spiečių. Tam bus pasitelkta ne tik nacionalinė infrastruktūra – Vilniaus universiteto Molėtų astronomijos observatorijos 1.65 m teleskopas bei prie jo primontuotas aukštos skiriamosios gebos VUES spektrografas – bet bus naudojami ir su užsienio partnerių dėka gauti žvaigždžių spektrai. Taip pat šiame projekte bus naudojami ir kosminių misijų duomenys. Pavyzdžiui,



Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto Teorinės fizikos ir astronomijos instituto Astrospektroskopijos ir egzoplanetų grupės nariai (iš kairės): A. Sharma, dr. R. Minkevičiūtė, dr. J. Chorniy, B. Bale, dr. Š. Mikolaitis, habil. dr. G. Tautvaišienė, dr. A. Drazdauskas, dr. E. Stonkutė, V. Bagdonas, dr. E. Pakštienė, M. Ambrosch, dr L. Piliugin, Š. Jacevičius, dr. C. Viscasillas Vazquez.

TESS teleskopo duomenys bus naudojami žvaigždžių amžiaus nustatymui iš astroseismologijos, o kosminio *Gaia* teleskopo duomenys leis įvertinti tikslią žvaigždžių gimimo vietą Galaktikoje.

Iš aukštos kokybės spektrų bus nustatyta žvaigždžių cheminė sudėtis. Didžiausias dėmesys bus skirtas tiems cheminiams elementams, kurių gausos pokyčiai yra priklausomi nuo amžiaus – anglis, azotas, deguonis, magnis, itris, baris ir kt. Šie tyrimai yra labai laiku ir reikšmingai prisidės prie cheminių laikrodžių metodo plėtojimo. Tikimasi, kad šių tyrimų dėka pamatysime, kiek šis naujas amžiaus nustatymo metodas galioja skirtingose Galaktikos platumose ir koks jis yra jautrus žvaigždžių evoliucijai. Astronomijos mokslininkų bendruomenei labai reikia patikimų priemonių, kuriomis būtų tiesiogiai nustatomas žvaigždžių amžius pagal jų cheminę sudėtį.

„Tai yra vienas mažas žingsnelis žmogui ir vienas milžiniškas šuolis žmonijai“ – šie Neilo Armstrongo (Neil Alden Armstrong) 1969 m. liepos 21 d. ištarti žodžiai jau yra tapę sparnuotąja fraze. Taip ir šis projektas, kurio ėmėsi G. Tautvaišienė bei jos vadovaujama komanda, yra mažas, bet labai svarbus indėlis bandant suprasti sudėtingą Galaktikos cheminės evoliucijos portretą.