

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
TEORINĖS FIZIKOS IR ASTRONOMIJOS INSTITUTAS

Aidas Sadauskas

PAUKŠČIŲ TAKO FERMI BURBULŲ HIDRODINAMINIAI MODELIAI

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

(studijų programa – TEORINĖ FIZIKA IR ASTROFIZIKA)

Studentas	Aidas Sadauskas
Leista ginti	2018-05-24
Darbo vadovas	dr. Kastytis Zubovas
Instituto atstovas	prof. dr. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2018

Turinys

Įvadas	1
1 Paukščių Tako centrinės dalies aktyvumo istorija	3
2 Fermi burbulų kilmės teorijos ir modeliai	4
3 Hidrodinaminiai modeliai	5
3.1 Fizikinis modelis	5
3.2 Skaitmeninis modelis	5
4 Rezultatai	7
4.1 Morfologija	7
4.1.1 Centrinė molekulinė zona	8
4.1.2 Aukštis ir plotis	8
4.1.3 Temperatūra ir rentgeno spinduliuotė	10
4.2 Kinematika	11
4.2.1 Radialinių greičių histogramos	11
4.2.2 Artėjančios ir tolstančios medžiagos santykio kitimas laike	13
4.3 Modeliai su kitokiomis pradinėmis sąlygomis	15
4.3.1 Modeliai su pradinėmis sąlygomis L1t1.3 ir L1.3t1	15
4.3.2 Modeliai su pradinėmis sąlygomis L1t0.7 ir L0.7t1	17
5 Aptarimas	19
Išvados	19
Literatūros sąrašas	21
Santrauka	24
Santrauka (angliškai)	25

Įvadas

Šis skyrius parengtas remiantis kursiniu darbu [8]. Per pastarąjį dešimtmetį vienas iš daugiausiai dėmesio sulaukusių reiškinių, siejamų su mūsų Galaktikos centru (GC), yra 2010 m. atrasti Fermi burbulai [1]. Tiriant Fermi-LAT teleskopu surinktus duomenis buvo aptikti du milžiniški burbulai išsidėstę statmenai Galaktikos plokštumai ir nusidriekiantys apie 55° link Galaktikos pietinio ir šiaurinio polių. Burbulų plotis siekia apie 40° . Tai, jog abu šie burbulai tarsi susiliečia būtent ties GC, leidžia manyti, kad šis regionas yra itin svarbus norint paaiškinti minėtų struktūrų kilmę. Iki šiol vis dar nėra bendro sutarimo, kokie procesai lėmė tokių gama spinduliuotę skleidžiančių struktūrų susidarymą.

Vienas iš kilmės scenarijų teigia, kad Fermi burbulai yra GC esančios supermasyvios juodosios skylės (SMBH) aktyvaus "maitinimosi" padarinys. Tokio epizodo metu aktyvaus galaktikos branduolio (AGN) šviesis gali viršyti visos supančios galaktikos šviesį. Aktyvumo epizodo laikotarpyje AGN aktyviai sąveikauja su aplinkine medžiaga – kuria energingus galaktinius vėjus ir galaktines tėkmes, kurių energija tiek iš stebėjimų [2], tiek iš analitinių [3] ir skaitmeninių [4] modelių siekia apie 5 % AGN šviesio. Remiantis kitu scenarijumi Fermi burbulai yra aktyvios žvaigždėdaros GC sukeltas padarinys [5].

Dėl itin energingų procesų GC galime stebėti įvairių mastelių padarinius, nuo artimiausios kelių šimtų pasekų Sgr A* aplinkos iki tėkmių išpūstų, dešimtis kpc siekiančių struktūrų. Šie padariniai gali išlikti dar ilgai po aktyvumo epizodo, todėl juos tyrinėdami galime pažvelgti į Galaktikos evoliucinę praeitį.

Remiantis [6] stebėjimais, manoma, kad Fermi burbulų amžius siekia apie 6 mln. m. Šis amžius sutampa su laikotarpiu, kuomet centrinėje Galaktikos dalyje vyko aktyvios žvaigždėdaros epizodas. Šio epizodo metu didelis dujų kiekis galėjo patekti į SMBH akrecinį diską. Manoma, kad akrecijos metu sukeltas vėjas, sąveikaudamas su aplinkine tarpžvaigždine medžiaga (ISM), galėjo suformuoti galaktines tėkmes, kurių padariniai ir yra šiuo metu stebimos struktūros. Tačiau tikslus Fermi burbulų amžius nėra žinomas, jo ribos kinta nuo 4-5 milijonų metų remiantis akrecijos į Sgr A* sukeltų tėkmių scenarijumi [7] iki maždaug 8 milijardų metų remiantis aktyvios žvaigždėdaros sukuriamu smūginių bangų scenarijumi [5]. Toks didelis amžiaus neapibrėžtumas yra labai svarbi problema siekiant suprasti, kaip iš tikro susidarė Fermi burbulai.

Šio darbo tikslas yra: įvertinti Paukščių Tako Fermi burbulų amžių, remiantis teorija, kad Fermi burbulai yra akrecijos į Sgr A* dėka sukurtų tėkmių rezultatas.

Darbo uždaviniai:

- Ištirti Fermi burbulų morfologiją - struktūrų geometrinę evoliuciją.
- Ištirti burbulų kinematinės savybės - dujų radialinių greičių pasiskirstymą kintant laikui.

1 Paukščių Tako centrinės dalies aktyvumo istorija

Šis skyrius parengtas remiantis kursiniu darbu [8]. Dabartinis Paukščių Tako centrinės dalies aktyvumas yra stebėtinai mažas $L_{\text{bol}} \sim 300L_{\odot} \sim 10^{-9} L_{\text{Edd}}$ (čia L_{Edd} - Edingtono šviesis - maksimalus šviesis dėl medžiagos akrecijos), tačiau centro aplinkoje galima aptikti likusių aktyvumo pėdsakų, kurie leidžia suprasti, kad praeityje mūsų GC buvo žymiai energingesnis. Įprastai rentgeno spindulių ruože stebimas $4 \times 10^{-12} L_{\text{Edd}}$ šviesis, kas yra mažiausias apskritai stebėtas šviesis tokios masės ($\sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$) juodajai skylėi. Tačiau vidutiniškai kartą per dieną stebimi $\sim 10^{3-4}$ s trukmės rentgeno spindulių žybsniai [10], kurių metu spinduliuotė šiame diapazone vidutiniškai padidėja kelias dešimtis kartų, o kartais net iki 160 kartų [11]. Yra kelios teorijos aiškinančios tokį Sgr A* aktyvumą: žybsnius gali sukelti aplinkinių žvaigždžių kuriamų vėjų medžiaga krintanti į juodąją skylę [12], Sgr A* magnetinio lauko nestabilumas [13] arba asteroidų ir planetų kritimas į Sgr A* [14].

Taip pat stebimi rentgeno spindulių aidai nuo netoliese Sgr A* esančių molekulinio vandenilio debesų [15]. Rentgeno spindulių stebėjimai parodo, kaip kintant laikui (nuo 2004 lapkričio iki 2009 balandžio) nušvinta netoli Sgr A* esantis regionas, "The Bridge", padalintas į kelias smulkesnes zonas. Per maždaug penkis metus iš eilės pradeda ryškiai švytėti tam tikros molekulinė debesų sritys, kurios išilgai driekiasi maždaug penkiolika šviesmečių. Tai reiškia, kad šviesos šaltinis negali būti šių debesų viduje, nes šviesa paprasčiausiai negalėtų nukeliauti tokio atstumo per tokį trumpą laiką (būtų kelis kartus viršytas šviesos greitis). Todėl manoma, kad tai nuo SgrA* sklindančios šviesos atspindžiai, kurie leidžia stebėti šviesos lauko sklidimą per skirtingai nuo šaltinio nutolusius, šviesą atspindinčius, molekulinis debesis.

Maždaug 50 - 100 kpc atstumu [16] pietinio Galaktikos poliaus link nuo Sgr A* matoma pailga dujinė struktūra nusidriekusi tarp Didžiojo (LMC) ir Mažojo (SMC) Magelano debesų - Magelano Srautas (MS). Stebėjimai rodo, kad iš MS sklindanti $H\alpha$ spinduliuotė yra bent penkis kartus stipresnė nei galėtų būti sukurta aktyvios žvaigždėdaros kuriamos ultravioletinės spinduliuotės iš Galaktikos centro. Tokią stiprią spinduliuotę galėtų paaikškinti galingas žybsnis sukeltas medžiagai krentant į Sgr A*. Medžiagos akrecija į juodąją skylę leidžia žymiai efektyviau panaudoti aplinkines dujas kuriant jonizuojančią spinduliuotę, todėl tokiam scenarijui reikėtų mažiau kuro sąnaudų. Tiek vienu, tiek kitu atveju, tikėtina, jog iš MS sklindanti $H\alpha$ spinduliuotė yra Paukščių Tako centrinės dalies aktyvumo pėdsakas.

Dar vienas panašaus mastelio Galaktikos centro aktyvumo įrodymas - 2010 m. atrasti Fermi burbulai [1]. Tai dvi didžiulės gama spinduliuotės struktūros kylančios iš GC ir nusidriekiančios apie 55 laipsnius ($\sim 9-10$ kpc) link abiejų Galaktikos polių. Šių struktūrų prigimtis iki šiol neaiški (kilmės teorijos aptariamoms 2 skyriuje), tačiau dominuojančios teorijos siejamos su AGN aktyvumo epizodu, manoma, vykusiu prieš maždaug 6 mln. metų. Panašios struktūros galimai aptiktos ir kaimyninėje Andromedos galaktikoje [17].

2 Fermi burbulų kilmės teorijos ir modeliai

Šis skyrius parengtas remiantis kursiniu darbu [8]. Čia apžvelgiamos pagrindinės Fermi burbulų kilmės teorijos. Dauguma jų remiasi Galaktinių vėjų arba tėkmių, kylančių iš supermasivios juodosios skylės, sąveika su aplinkine tarpžvaigždine terpe. Šiame darbe naudojamame modelyje remiamasi teorija, kad Fermi burbulus sukelia vėjai, kylantys iš Sgr A* dėl aktyvios akrecijos [18], [19] (detaliau aprašyta 3 skyriuje). Aiškinant Fermi burbulų kilmę reiktų paminėti ir magnetinių laukų įtaką, pvz.: vėjai, kylantys iš karštos akrecijos tėkmės nuo SgrA* magnetinių laukų dėka [20], arba čiurkšlės, susidarancios iš akrecijos tėkmių [21]. Galaktiniai vėjai taip pat gali būti sukeliama periodiško žvaigždžių kritimo į SgrA* [22], arba kilti dėl aktyvios žvaigždėdaros aplink SgrA* [23] – tai būtų ilgas, apie 10 milijardų metų trunkantis procesas.

Fermi burbulai yra gama spinduliuotės struktūros, nagrinėjant jų kilmę, gama spinduliuotės gamybos mechanizmus galima būtų suskirstyti į dvi kategorijas: leptoninę ir hadroninę.

Leptoninės teorijos principas - atvirkštinė Komptono sklaida. Tai procesas, kurio metu labai energingi elektronai (kosminių spindulių elektronai - CRe) perduoda savo energiją „minkštiesiems“ – mažų energijų tarpžvaigždinės spinduliuotės ir kosminio mikrobangų fono (CMB) fotonams. Šioje teorijoje CRe kūrimasis gali būti aiškinamas įvairiais modeliais: Fermi pirmos eilės greitėjimas smūginių bangų fronte, žvaigždėms krintant į Sgr A* [22]; CRe tiesiogiai pernešami iš čiurkšlės [21], CRe pagreitinti vėjų, sukeltų ankstesnės aktyvios žvaigždėdaros (supernovų sprogo metu) [23]. Pagal leptoninę teoriją susikūrę kelių šimtų GeV elektronai turėtų atvesti per maždaug 1 mln. metų [1]. Jei jie kyla iš Galaktikos centro dėl vėjų ar čiurkšlių, tuomet Fermi burbulų amžius irgi turėtų neviršyti 1-2 mln. metų [21].

Hadroninės teorijos principas – gama fotonai išspinduliuojami skylant neutraliems pionams, kosminių spindulių protonų (CRp) ir ISM susidūrimų metu (pp susidūrimai). Šiuo atveju CRp vėsimas trukmė būtų apie $t_{pp} > 3.5 \times 10^9$ metų [24]. Šis modelis patrauklus tuo, kad nereikalauja labai galingų kinetinių energijų iš Galaktikos centro, be to natūraliai paaiškina gama spinduliuotės kritimą ties 1 keV [5]. Vienas iš CRp kūrimosi modelių pavyzdžių: CRp įpučiami į vėjus (tėkmes), kylančius dėl žvaigždžių formavimosi Galaktikos centre. Toks modelis reikalautų labai ilgo laikotarpio - maždaug $10^8 - 10^9$ metų. Labiau tikėtina, jog CRp įgreitinami Sgr A* akrecijos kuriamo spinduliuotės slėgio AGN aktyvumo metu.

3 Hidrodinaminiai modeliai

Šiame skyriuje aprašomi fizikinis ir skaitmeninis modeliai analogiškai [25], kuriuos analizuojant buvo gauti sekančiame skyriuje pateikti rezultatai. Remtasi kursiniu darbu, [8].

3.1 Fizikinis modelis

Nagrinėjamo fizikino modelio centre supermasyvi juodoji skylė - Sgr A*. Sgr A* supa akrecinis diskas, kuriame dėl didelės temperatūros, tankio ir trinties atsirandantis spinduliuotės slėgis nugalė juodosios skylės gravitaciją ir taip kuria energingų dalelių srautą - AGN vėją. Šis energingų dalelių vėjas susiduria su aplinkine tarpžvaigždine terpe (ISM) ir sukelia smūgines bangas, kurios plečiasi ir stumia ISM iš Galaktikos centro, taip sukurdamos galaktines tėkmes. Šios tėkmės toliau turėtų sklisti sferiškai simetriškai, tačiau Galaktikos plokštumoje jas stabdo tanki centrinė molekulinė dujų zona - CMZ. Tai masyvus $M_{\text{CMZ}} = 10^8 M_{\odot}$ molekulinė debesų diskas, pro kurį tėkmė negali prasiskverbti, todėl didžioji tėkmės energijos dalis nukreipiama mažiausio pasipriešinimo kryptimi - statmenai Galaktikos plokštumai. Taip suformuojamos dvi disko plokštumai simetriškos "lašo" formos struktūros.

3.2 Skaitmeninis modelis

Naudojamas hibridinis glotnintų dalelių hidrodinamikos (Smoothed Particle Hydrodynamics – SPH) ir N-kūnų uždavinio programinis kodas GADGET-3 [26], turintis individualius dalelių laiko žingsnius ir adaptyvų glotninimą. Esminis tokio modeliavimo principas yra daugelio diskrečių dalelių glotninimas į tolydžią erdvę, kuomet konkretus erdvės taškas yra veikiamas aplink jį esančių dalelių, o veikimas priklauso nuo atstumo iki dalelės. Juodosios skylės grįžtamasis ryšys (vėjas) išreiškiamas virtualiomis dalelėmis, kurios, sklisdamos iš akrecinio disko, sąveikauja su SPH dalelėmis (SPH dalelių realus atitikmuo yra aplinkinės dujos). Virtuali dalelė, patekusi į SPH dalelės glotninimo branduolį, pradeda perdavinėti savo energiją SPH dalelei. Energijos perdavimas vyksta tol, kol virtualios dalelės yra SPH dalelės glotninimo branduolyje. Kai virtualios dalelės energija sumažėja iki 1 %, ji laikoma sunaikinta. Tokiu būdu modeliuojama SMBH grįžtamojo ryšio ir aplinkinių dujų sąveika. Šis metodas detalčiau aprašytas [27].

Skaitmeninio modelio pradinės sąlygos:

Modelio centre - supermasyvi juodoji skylė $M_{\text{BH}} = 4.3 \times 10^6 M_{\odot}$. Juodosios skylės įtakos zona tik $R_{\text{infl}} \sim 1 \text{ pc}$, todėl SMBH nedaro reikšmingos gravitacinės įtakos toliau išsidėsčiusių dujų dinamikai. Juodąją skylę supa gravitacinis skersės potencialas leidžiantis natūraliai susiformuoti molekulinė dujų žiedui, esančiam maždaug 100 pc atstumu nuo Sgr A*. Šio žiedo masė apie $10^8 M_{\odot}$, kas atitinka centrinės molekulinės zonos (CMZ) masę. CMZ sudaryta iš dalelių, kurių kiekvienos masė $m_{\text{SPH}} = 200 M_{\odot}$, jų skyra modelyje $m_{\text{res}} = 40 m_{\text{SPH}} = 8000 M_{\odot}$. Diskas apsuptas išorinio 16 kpc spindulio pasklidusių dujų halo. Halo tankis mažėja atvirksčiai

proporcingai atstumo kvadratui nuo sistemos centro. Naudojama halo temperatūra $T_h = 2.4 \times 10^5$ K, ši temperatūra yra lygi virialo temperatūrai statiškam sferiškam izoterminiam fono potencialui su radialinių greičių pasiskirstymu $\sigma = 100$ km/s. Halo dalelių masė lygi CMZ dalelių masei. Halo dujų tankis apibrėžiamas kaip funkcija nuo atstumo:

$$\rho = \frac{f_g \sigma^2}{2GR^2},$$

čia f_g yra halo dujų dalis, t.y. dujų tankio ir viso tankio santykis hale.

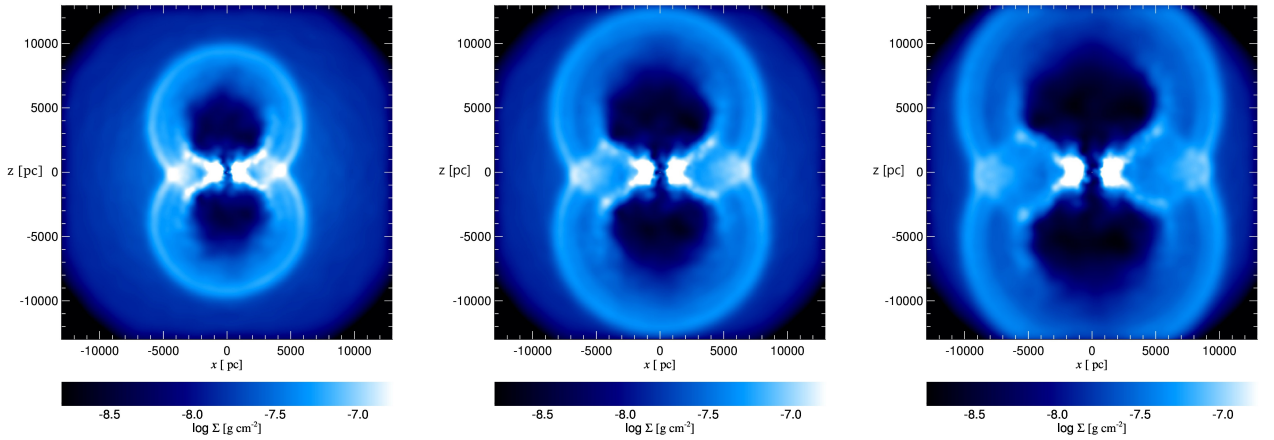
Iš viso tiriami 5 modeliai su skirtingais pradinių sąlygų rinkiniais: L1t1, L1t1.3, L1.3t1, L1t0.7, L0.7t1. Šie rinkiniai susideda iš skirtingų AGN šviesio bei AGN aktyvumo trukmės kombinacijų. Modelių pavadinimuose užkodotos jų pradinės sąlygos. Prie raidės L esantis skaičius žymi AGN šviesį Edingtono šviesiais, o prie raidės t esantis skaičius žymi AGN aktyvumo trukmę milijonais metų. Pavyzdžiui modelio pavadinimas L1t1 reiškia, kad jo pradžioje buvo įjungtas AGN, kurio šviesis $L = L_{\text{Edd}}$, o aktyvumo trukmė $t_q = 1$ mln. m.

Skaičiavimų pradžioje AGN įsijungia ir pradeda šviesti (priklausomai nuo modelio) Edingtono šviesiu $L_{\text{Edd}} \sim 5 \times 10^{44}$ erg/s. Po laiko t_q AGN išsijungia ir sistema paliekama toliau evoliucionuoti iki 10 mln. metų nuo modelio pradžios. Būtent AGN kuriamas vėjas, sąveikaudamas su ISM, sukuria nuo centro sferiškai sklindančias tėkmes. Šios tėkmės, spaudžiamos aplinkinių, tankių CMZ dujų, kyla nuo Galaktikos centro ir suformuoja apie 10 kpc aukščio struktūras.

4 Rezultatai

4.1 Morfologija

Analizuojant hidrodinaminčius modelius buvo gauti dujų tankio žemėlapiai, pavaizduoti 1 pav. Juose pavaizduotos AGN vėjo sukeltų tėkmių struktūros, išsidėsčiusios statmenai Galaktikos plokštumai. Šios galaktinės tėkmės stipriausiai plečiasi vertikalia kryptimi, nes Galaktikos plokštumoje plėtimąsi stabdo tankus molekulinė dujų žiedas. Tėkmėms plečiantis nuo GC yra išstumama didelė dalis dujų ir atsiranda retų dujų zonos (tamsiai mėlyna spalva), kurių tankis apie 10 kartų skiriasi nuo aplinkinės medžiagos. Šios sritys ir yra modeliuojami Fermi burbulai. Aplink Fermi burbulus matomos šviesios tankių dujų sritys - tai smūginės bangos, sukeltos AGN vėjo.

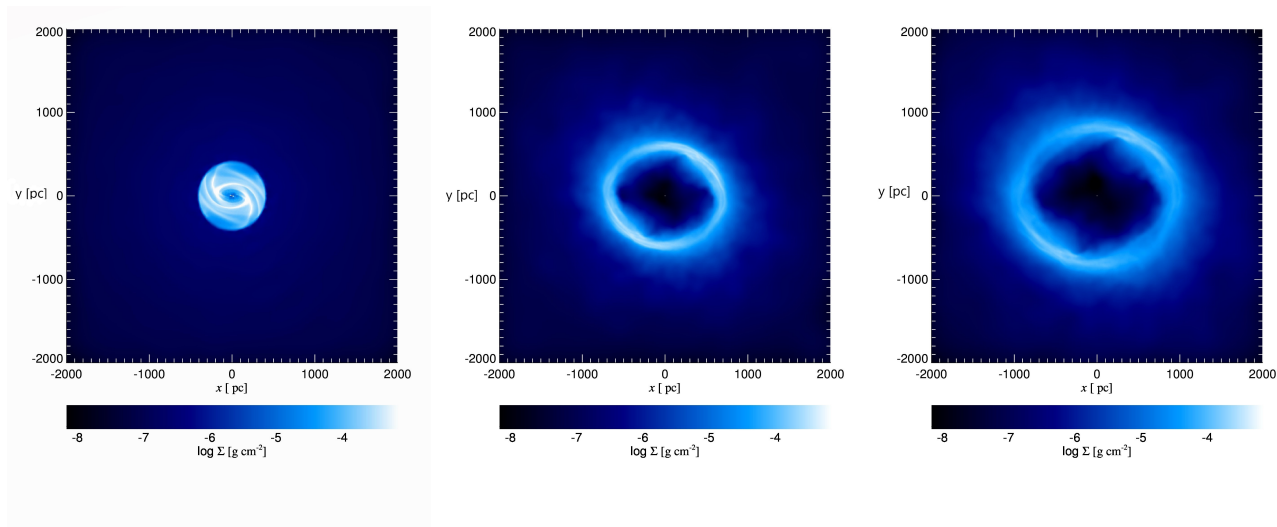


1 pav. Fermi burbulų evoliucija laike. Tankio žemėlapiai, L1t1 modelio atveju. Kairėje - 4 mln. m., centre - 6 mln. m., dešinėje - 8 mln. m. Vaizdas iš šono, z ašis statmena Galaktikos plokštumai.

1 pav. pateikti tankio žemėlapių pleištiniai pjūviai, juose dalelės atrenkamos pagal kampą: $|tg(y/r)| < 1/4$. Šiuose žemėlapiuose iki maždaug 5 kpc matoma aiški Fermi burbulų šonų riba, tačiau nėra aiškiai matomas burbulų aukštis. Gautos struktūros yra panašios į realybėje matomus Fermi burbulus. Ties 6 mln. m. burbulų aukštis pasiekia apie 9.5 kpc, o stebėjimų duomenimis Fermi burbulų aukštis siekia 9-11 kpc. [1]. Sumodeliuoti šiaurinis ir pietinis burbulai yra simetriški, jų matmenys praktiškai nesiskiria. Stebėjimų duomenyse [1] išvelgiama nedidelė asimetrija, pietinis burbulas yra apie 2 kpc aukštesnis. Manoma, kad tokia asimetrija gali atsirasti dėl stochastikos, realaus halo tankio netolygumo ir dėl papildomų energingų procesų į kuriuos šiame darbe nėra atsižvelgiama.

4.1.1 Centrinė molekulinė zona

Modelio centrinėje dalyje matoma ryški sritis skirianti šiaurinį ir pietinį burbulus yra centrinė molekulinė zona.



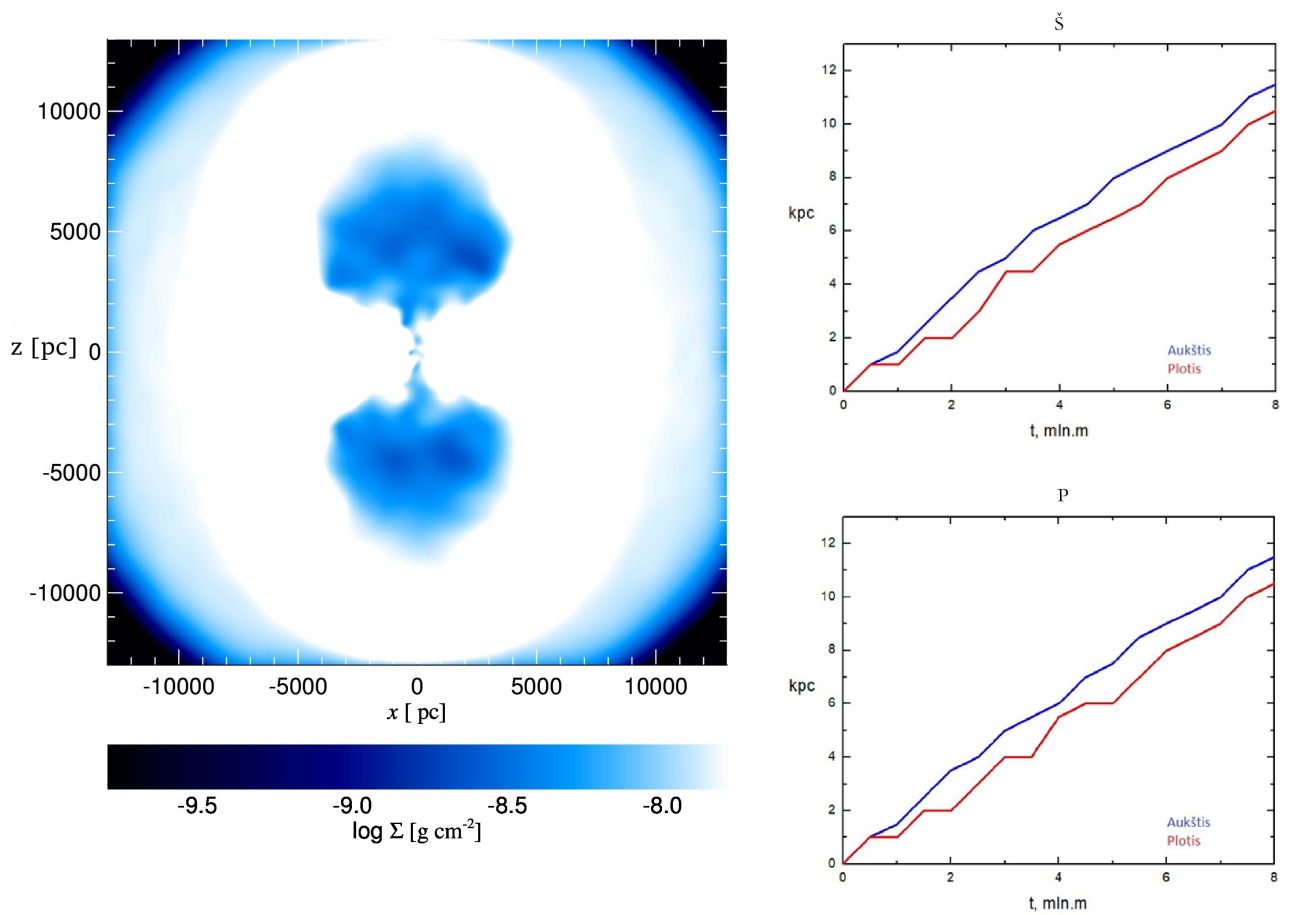
2 pav. CMZ evoliucijos laike žemėlapiai, L1t1 modelio atveju. Kairėje - 0 mln. m., centre - 4 mln. m., dešinėje - 6 mln. m. Vaizdas iš viršaus, x ir y ašys lygiagrečios Galaktikos plokštumai.

2 pav. pateiktuose tankio žemėlapiuose pavaizduota centrinės molekulinės zonos evoliucija nuo modelio pradžios iki 6 mln. m. amžiaus. Prieš paleidžiant modelį CMZ yra 1 kpc skersmens tankus molekulinųjų dujų diskas. Įjungus AGN šis diskas yra plečiams stipraus AGN vėjo sklindančio iš Galaktikos centro. Kadangi CMZ stabdo plėtimąsi Galaktikos plokštumoje, didžioji dalis AGN vėjo energijos nukreipiama statmenai šiai plokštumai ir yra panaudojama besiplečiantiems Fermi burbulams, likusi energijos dalis per 6 mln. m. išplečia CMZ iki ~ 2 kpc skersmens žiedo. AGN vėjas nėra pakankamai stiprus, kad suardytų CMZ žiedą; modeliui evoliucionuojant iki 10 mln. m., žiedo išorinis skersmuo pasiekia apie 2.5 kpc.

4.1.2 Aukštis ir plotis

Nustatant burbulų aukštį 3 pav. tankio žemėlapiuose buvo naudojama kitokia tankio skalė nei prieš tai pateiktuose paveiksluose. Tokia tankio skalė nebeleidžia matyti aplink burbulą esančių smūginių bangų, ar kitų struktūrų, tačiau ji leidžia geriau įžiūrėti pačių burbulų kontūrus, kas ir yra svarbiausia tiriant šių burbulų morfologiją.

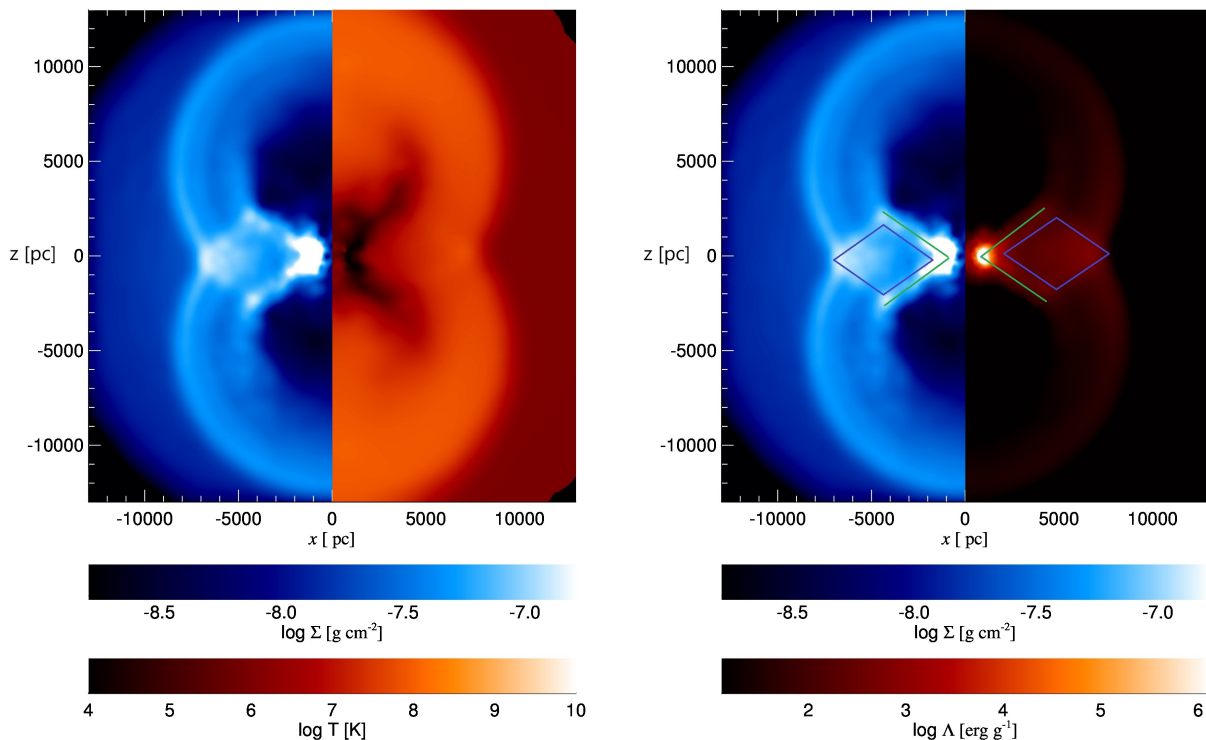
Iš dešinėje pusėje pateiktų aukščio ir pločio kitimo grafikų matyti, kad šiaurinio ir pietinio burbulų matmenys augo simetriškai. Tiek šiauriniame tiek pietiniame burbuluose pirmąjį mln. m. aukštis ir plotis augo panašiu greičiu, vėliau visuomet aukščio vertė buvo apie 1 kpc didesnė nei pločio, tačiau abiejų parametų augimo greitis išliko panašus.



3 pav. Modelio 11t1 burbulų aukščio nustatymas. Kairėje - 6 mln. m. tankio žemėlapis, dešinėje - burbulų aukščio (mėlyna spalva) ir pločio (raudona spalva) priklausomybės nuo laiko. Viršuje - šiaurinis burbulas, apačioje - pietinis.

Anksčiau tirtuose modeliuose [19] burbulų aukštis ir plotis per pirmus 2 mln. m. pasiekė ~ 6 kpc, vėliau abiejų parametrų augimas sulėtėjo, tačiau burbulai vis tiek greičiau augo nei plėtėsi. Skirtingą aukščio ir pločio kitimą lemia tai, kad burbulai veikiami Archimedo jėgos kyla vertikalia kryptimi, tačiau šie skirtumai išlieka nežymūs iki ~ 2 kpc. Tikėtina, kad skirtumai tarp modelių atsiranda dėl matavimo paklaidų nustatant šiuos dydžius ir dėl skirtingai pasirenkamų tankio žemėlapių skalių. Stebėjimų duomenyse šiaurinio burbulo aukštis 9.5-11.5 kpc [1] kas paklaidų ribose atitinka šio modelio 6 mln. m. aukštį, tačiau realus burbulų plotis ~ 6.5 kpc, o šiuose modeliuose gaunamas 8 kpc su ± 0.5 kpc paklauda vis dar yra šiek tiek per didelis.

4.1.3 Temperatūra ir rentgeno spindulių

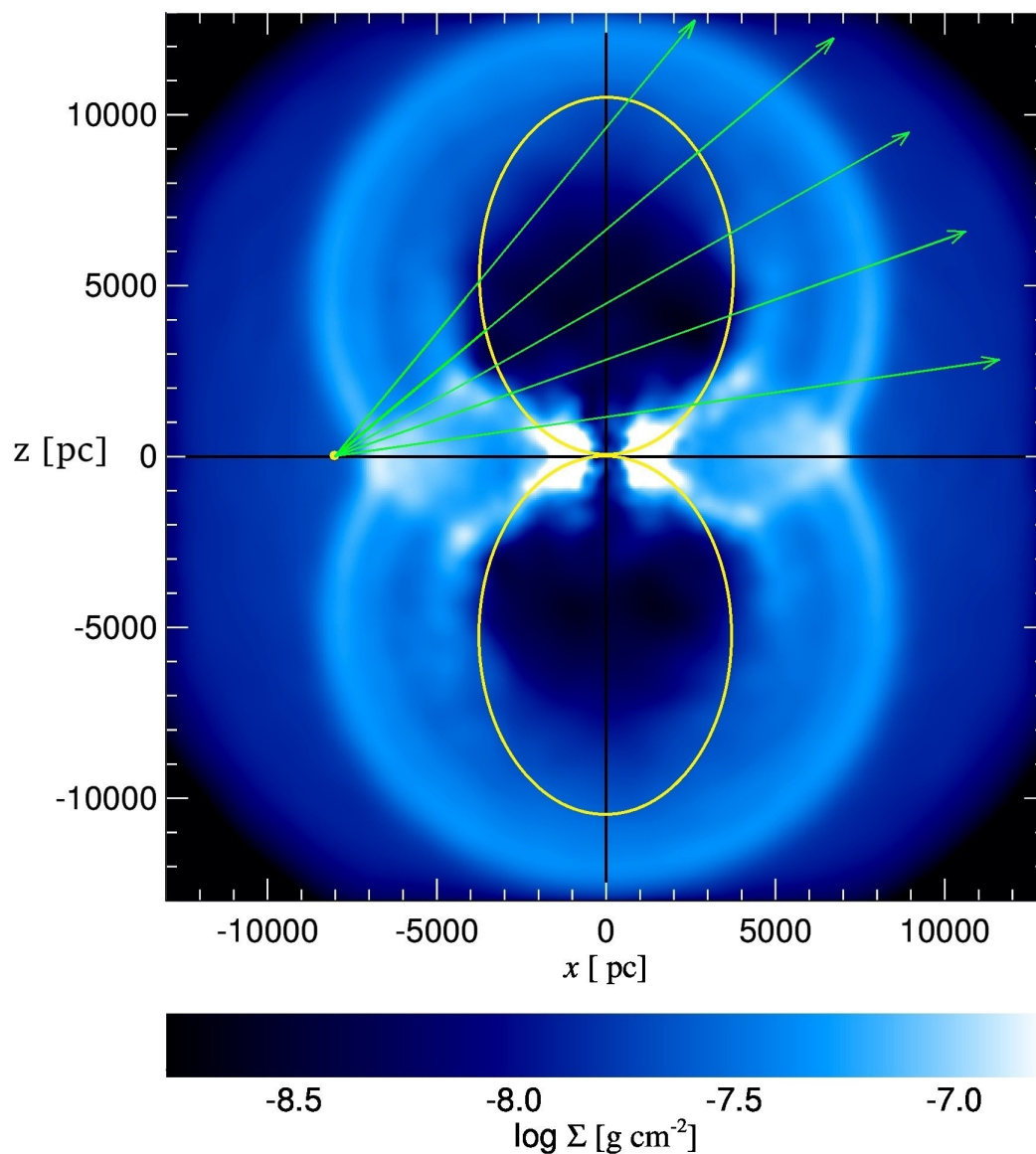


4 pav. Kairėje - Fermi burbulų tankio ir temperatūros, dešinėje - tankio ir rentgeno spindulių žemėlapiai. Modelis L1t1, amžius 6 mln. m.

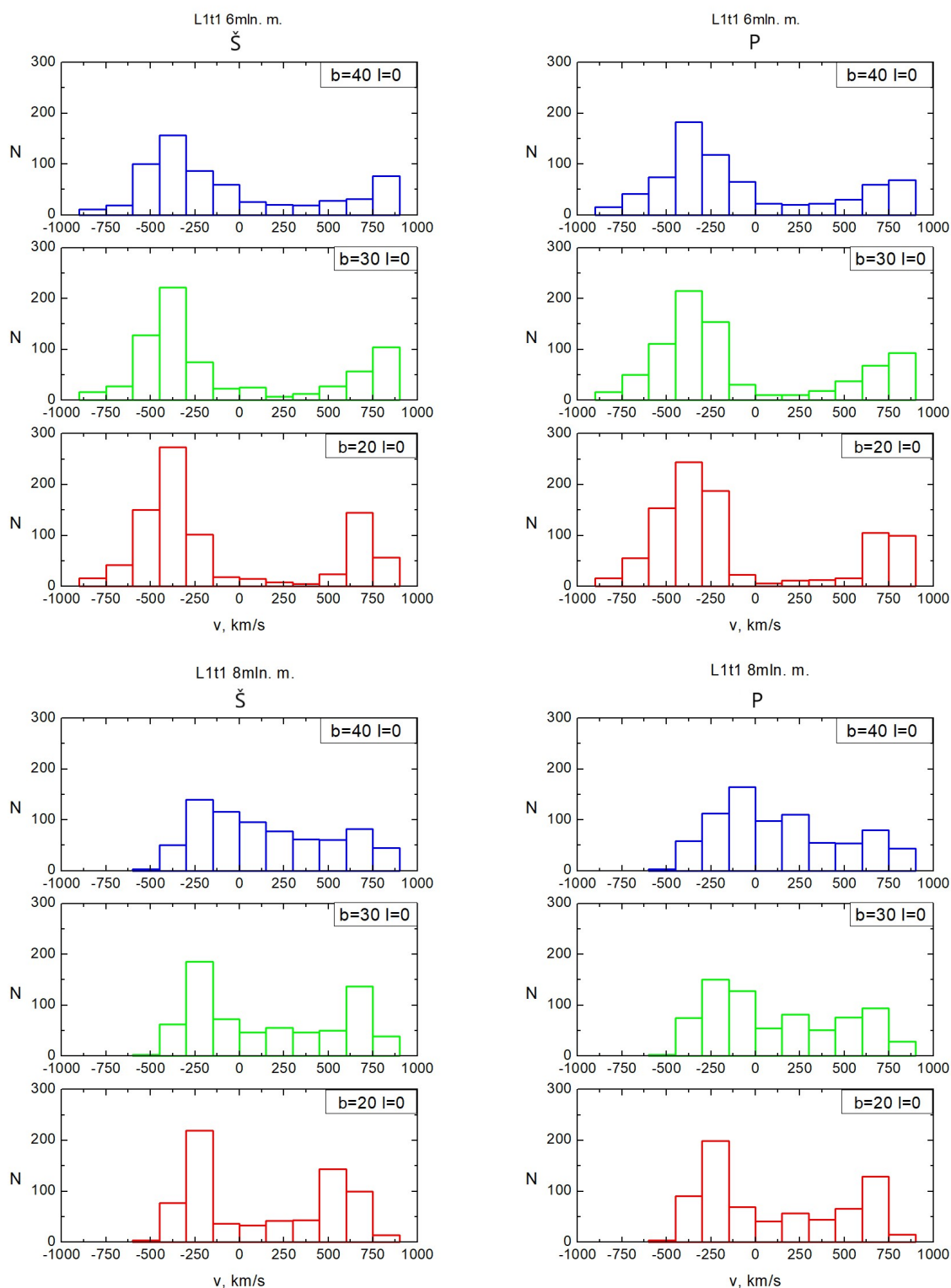
4 pav. pavaizduotuose tankio ir temperatūros bei tankio ir rentgeno spindulių žemėlapiuose Galaktikos centre matoma X formos struktūra (pažymėta žalia linija) simetriška Galaktikos plokštumai ir nuo jos nutolstanti apie 3 kpc. Ši struktūra tai tankios ir šaltos $\sim 6 \times 10^6$ K dujos spinduliuojančios minkštus 1.5 keV rentgeno spindulius. Spinduliuotės prigimtis - laisvų elektronų lėtėjimas (Bremsstrahlung spinduliuotė). Šios struktūros aptiktos ir realiuose stebėjimų duomenyse [28], jų prigimtis siejama su Galaktikos centre esančios SMBH aktyvumo epizodu. Šiuo modeliu siekiama kiek įmanoma realiau atkurti stebėjimų duomenis, todėl nors šios rentgeno struktūros ir nėra pagrindinis tiriamojo darbo objektas, jos yra papildoma realius stebėjimus atitinkanti detalė. Tiek tankio, tiek rentgeno spindulių žemėlapiuose taip pat matomos šviesesnės zonos netoli X formos struktūros išilgai Galaktikos plokštumai (pažymėta mėlynai). Šios zonos tai besiplečiančių šiaurinio ir pietinio burbulų susiliejiimo vietos. Realybėje jos nėra stebimos, nes joms susidaryti neleistų Galaktikos diskas, kuris šiame modelyje nėra atkuriamas.

4.2 Kinematika

4.2.1 Radialinių greičių histogramos



5 pav. Modelio L1t1 6mln. m. tankio žemėlapis ir jame geltona spalva schematiškai pažymėti Fermi burbulų kontūrai iš stebėjimų [1], bei žaliomis linijomis pažymėtos atrenkamų modelio dalelių kryptys iš Saulės padėties (Geltonas taškas 8 kpc nuo GC) 10° , 20° , 30° , 40° ir 50° galaktinėmis platumomis b , galaktinė ilguma visais atvejais $l = 0^\circ$. Šiomis kryptimis 1 kpc skersmens spinduliu buvo atrenkamos dalelės, kurių temperatūra $T > 2 \times 10^6$ K. Šios dalelės naudojamos toliau pateiktose dujų projekcinių greičių histogramose.



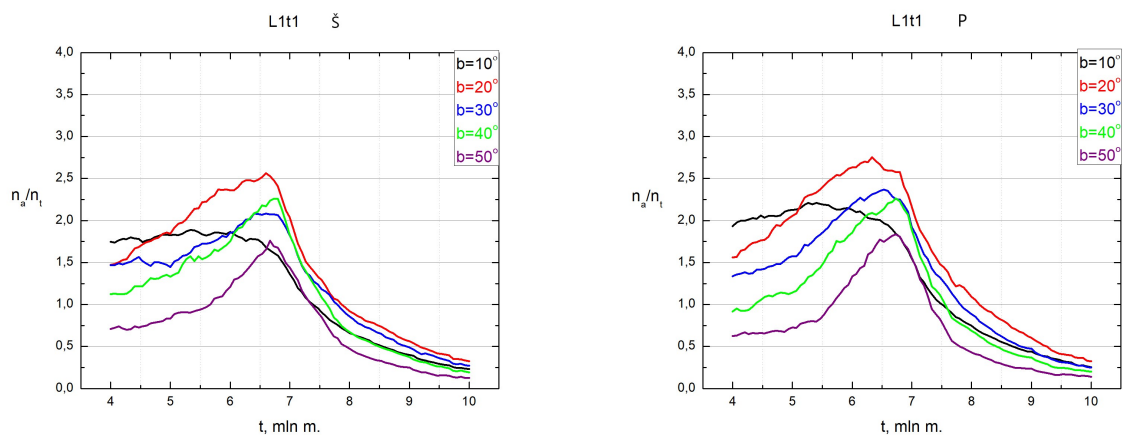
6 pav. Modelio L1t1 Radialinių greičių projekcijų histogramos. Viršuje 6 mln. m. šiaurinis ir pietinis burbulai, apačioje analogiškai 8 mln. m. burbulai. Kiekvienu atveju pateiktos 20° , 30° , ir 40° galaktinės platumos kryptimis atrinktos dalelės. Stebėjimuose [6], [9] tiek artėjančių, tiek tolstančių dalelių greičiai kinta nuo ~ 250 km/s žemose $b \sim 10^\circ$ platumose iki ~ 100 km/s burbulų viršuje $\sim 50^\circ$.

6 paveikslėlyje vaizduojamos modelio L1t1 projekcinių greičių histogramos iš atrinktų dujų dalelių (5 pav.). Šios histogramos suskaičiuotos tam, kad galėtume jas palyginti su vertėmis iš stebėjimų, kurios yra gaunamos stebint kvazarų spinduliuotę kiaurai veriančią Fermi burbulus ir joje matomas ultravioletinės spinduliuotės sugerties linijas [6], [9]. Viršutinėje 6 pav. dalyje vaizduojamose 6 mln. m. histogramose matyti, kad tiek šiauriniame, tiek pietiniame burbuluose stebimos artėjančių bei tolstančių dalelių greičių vidutinės vertės skiriasi nuo realiai stebimų medžiagos greičių verčių. Stebėjimuose [6], [9] tiek artėjančių, tiek tolstančių dalelių greičiai kinta nuo ~ 250 km/s žemose $b \sim 10^\circ$ platumose iki ~ 100 km/s burbulų viršuje $\sim 50^\circ$. Modelyje artėjančių dalelių vidutiniai greičiai ~ 100 km/s didesni, o tolstančių ~ 300 km/s viršija realius greičius. Tokie skirtumai, bei faktas, kad dalelių vidutiniai greičiai beveik nekinta stebint įvairiomis platumomis reiškia, kad modeliuojamas 6 mln. m. burbulas plečiasi vis dar per greitai.

Apatinėje 6 pav. dalyje matome to paties modelio 8mln m. amžiaus burbulų greičių histogramas. Čia vidutinės artėjančių dalelių greičių vertės sumažėja ir atitinka [6] stebėjimų vertes ~ 250 km/s, tačiau tolstančių greičių vertės išlieka stipriai per didelės. Lyginant su 6 mln. m rezultatais matyti, kad pasikeičia artėjančios bei tolstančios medžiagos kiekio santykis - padaugėja tolstančių dalelių.

Bendrai žvelgiant į histogramas matoma šiaurinio ir pietinio burbulų simetrija - greičių pasiskirstymai išlieka panašūs, taip pat ir santykinai padidėjęs tolstančių dalelių skaičius 8 mln. m. burbuluose matomas tiek šiaurinėje, tiek pietinėje Galaktikos dalyje.

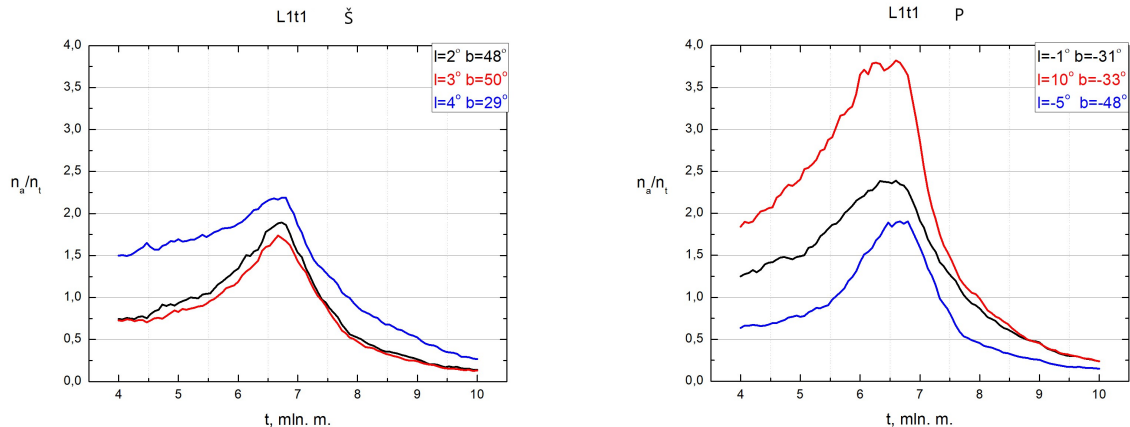
4.2.2 Artėjančios ir tolstančios medžiagos santykio kitimas laike



7 pav. Artėjančios ir tolstančios medžiagos santykio pokytis laike. Kairėje šiaurinis burbulas, dešinėje - pietinis. Santykio kitimas pateiktas stebint galaktinėmis platumomis nuo $b = 10^\circ$ iki $b = 50^\circ$, galaktinė platumą $l = 0^\circ$.

7. Paveiksliuke vaizduojamos artėjančios ir tolstančios medžiagos santykio n_a/n_t kitimas nuo 4 mln. m. iki 10 mln. m., bei šio santykio priklausomybė nuo galaktinės platumos. Kaip ir anksčiau stebima šiaurinio ir pietinio burbulų simetrija - skirtumai tarp n_a/n_t evoliucijos laike yra nežymūs. Abiem atvejais nuo 4 mln. m iki ~ 7 mln. m n_a/n_t auga. Taip yra dėl to, kad kuo burbulai darosi didesni, tuo daugiau artėjančių dalelių patenka į mūsų stebėjimo kryptis, kadangi žiūrime iš Saulės, esančios Galaktikos diske padėties (5 pav.). Taip pat kuo didesnėmis platumomis žiūrime, tuo didesnė dalis artėjančios į mus medžiagos patenka į atrenkamų dalelių spindulį, todėl n_a/n_t skirtingomis platumomis skiriasi. Čia reikėtų išskirti arti Galaktikos plokštumos stebimas daleles $b = 10^\circ$, stebint tokiu mažu kampu atrenkamų tolstančių ir artėjančių dalelių skaičius dalelių skaičius beveik nesiskiria, nes besiplečiančio į mus burbulo dalis patenkanti į stebėjimo spindulį yra beveik tokio paties dydžio kaip ir besiplečiančio nuo mūsų burbulo dalis.

Tačiau burbulai ne tik plečiasi, tai yra retų karštų dujų struktūros, kurų tankis apie 10 kartų skiriasi nuo aplinkos tankio, dėl to burbulai veikiami Archimedo jėgos kyla vertikaliai Galaktikos plokštumai. Ties 6.5 - 7 mln. m. grafikuose atsirandančios smailės ir tolimesnis n_a/n_t mažėjimas reiškia, kad dalelių greičių komponentės atsirandančios dėl burbulų kilimo tampa didesnės nei greičio komponentės susidaranti dėl burbulų plėtimosi. Taigi n_a/n_t mažėjimas reiškia, kad burbulas pradeda greičiau kilti nei plėstis.



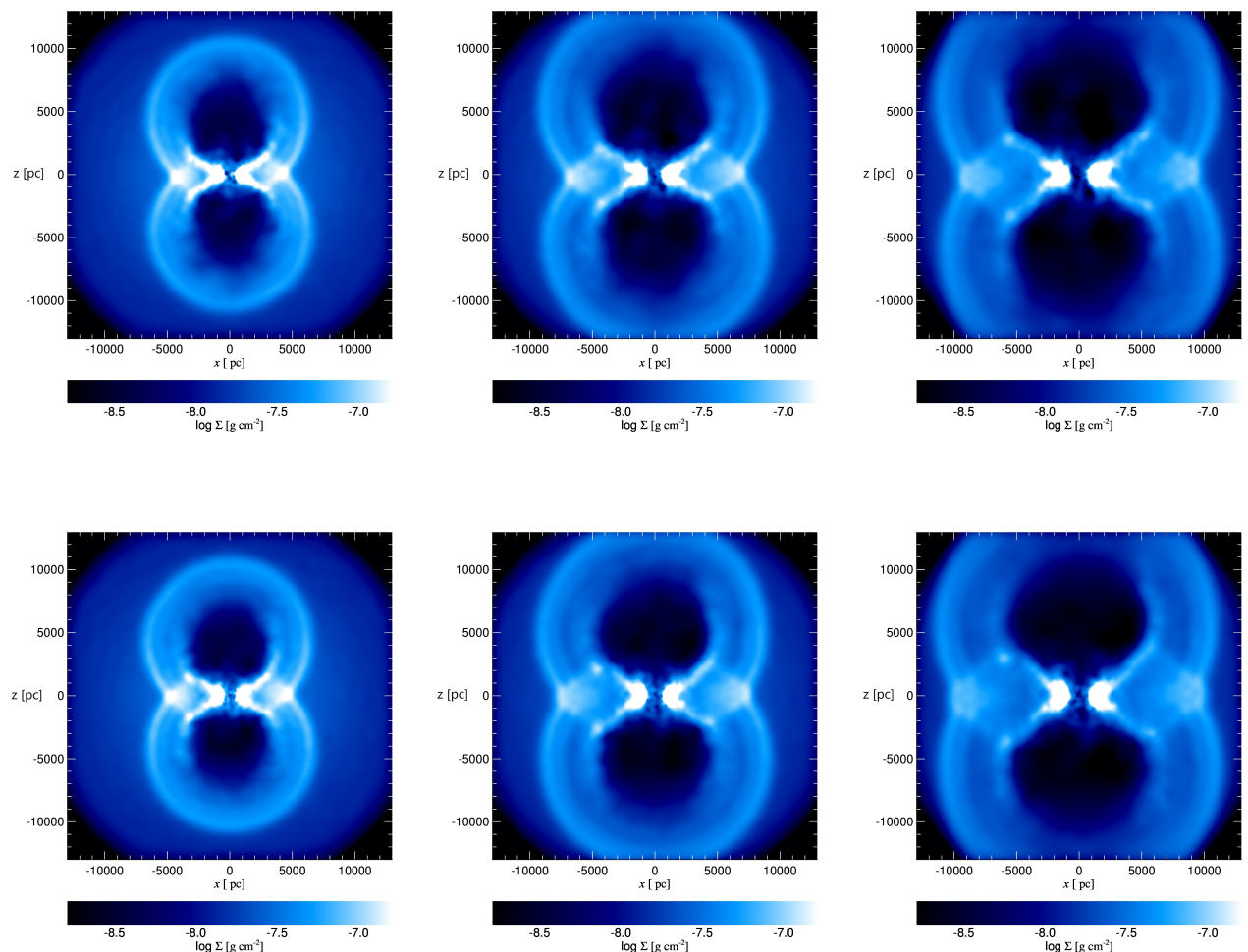
8 pav. Artėjančios ir tolstančios medžiagos santykio pokytis laike. Kairėje šiaurinis burbulas, dešinėje - pietinis. Santykio kitimas pateiktas stebint kryptimis, kuriomis buvo stebimos kvazarų sugerties linijos. Kvazarų koordinatės nurodytos legendose. Remiantis realių stebėjimų [6], [9] duomenimis santykio n_a/n_t vertė lygi ~ 1 .

8 pav. vaizduojamose projekcinių greičių histogramose dalelės buvo atrenkamos pasirinkus stebėjimų duomenyse šiauriniame [6] ir pietiniame [9] burbuluose naudojamų kvazarų koordinatės. Realiuose duomenyse matomos artėjančios bei tolstančios medžiagos santykį tiksliai įvertinti sudėtinga. Tik keliomis stebėjimo kryptimis užfiksuotos tiek artėjančios, tiek tolstančios medžiagos sugerties linijos. Apytiksliai vertinant šių linijų gylius (kur matomos ir raudonąją ir mėlynąją poslinkį turinčios linijos) nustatyta, kad šio santykio vertė lygi ~ 1 . Šį santykį galima

panaudoti kaip papildomą priemonę nustatant Fermi burbulų amžių. Kadangi stebėjimuose [6], ir [9] panašus n_a/n_t matomas tiek mažomis platumomis $b \sim 10^\circ$, tiek burbulo viršuje $b \sim 50^\circ$ burbulų modeliuose taip pat galime nustatyti kokiu laiko momentu šis santykis sutampa stebint įvairiomis platumomis ir yra apytiksliai lygus 1. Iš 7 ir 8 pav. vaizduojamų n_a/n_t kitimo grafikų matome, šis santykis, stebint beveik visomis platumomis, pasiekia 1 ties $\sim 7.5 - 8$ mln. m.

4.3 Modeliai su kitokiomis pradinėmis sąlygomis

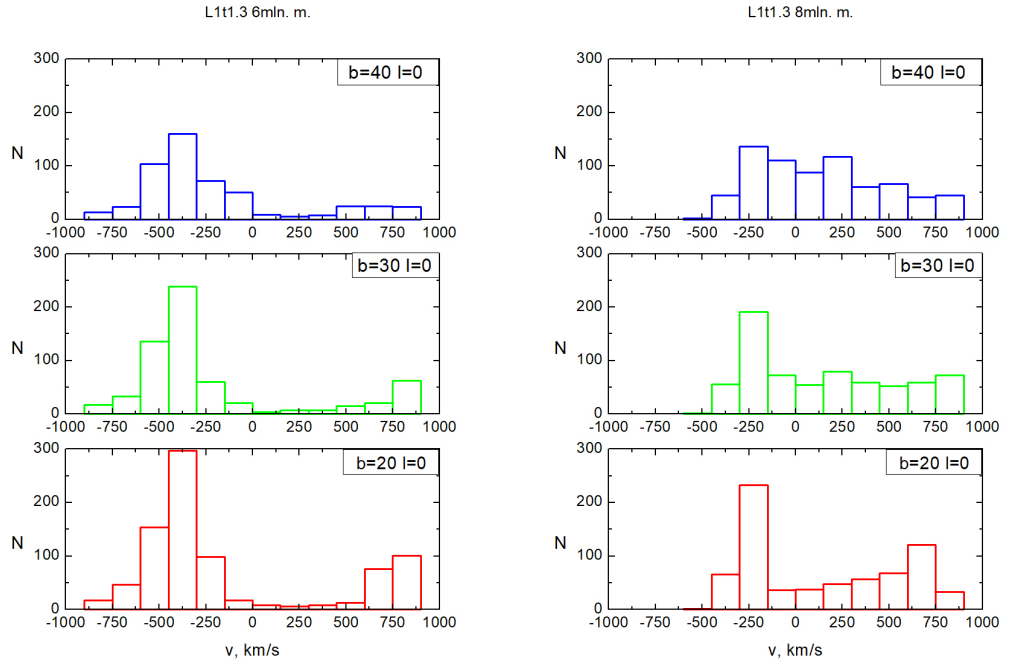
4.3.1 Modeliai su pradinėmis sąlygomis L1t1.3 ir L1.3t1



9 pav. Fermi burbulų tankio žemėlapiai. Viršuje - modelis L1t1.3, apačioje - modelis L1.3t1. iš kairės į dešinę 4, 6 ir 8 mln. m. evoliucijos laiko tarpniai.

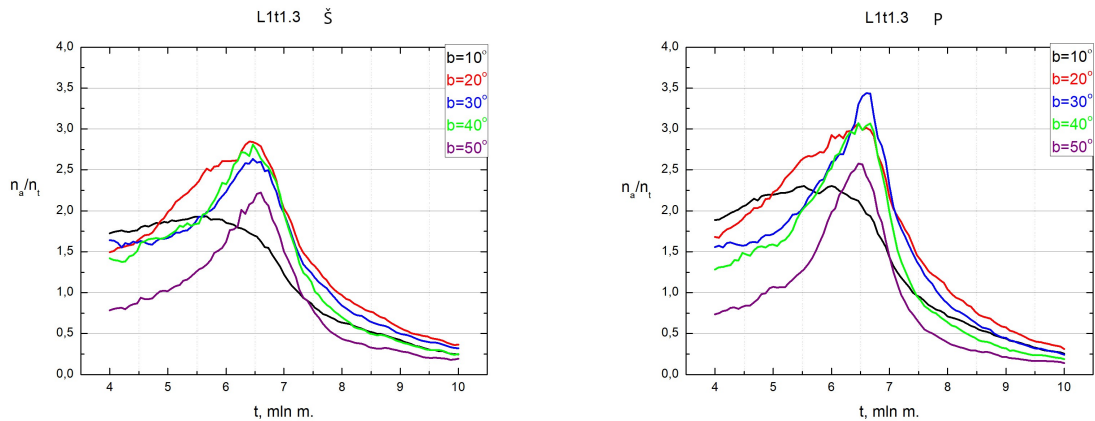
9 pav. pateiktuose tankio žemėlapuose matoma energingesnių modelių evoliucija. Morfolo-ginių skirtumų tarp šių modelių beveik nėra, taip pat jų forma bei simetrija praktiškai sutampa su prieš tai tirtu modelio L1t1 parametrais. Modelio L1t1.3 aukštis didžiausias, jis ties 6mln.

m pasiekia 11kpc, kuomet L1.3t1 pasiekia apie 10 kpc., o L1t1 apie 9 kpc. Tarpusavyje L1.3t1 ir L1t1.3 labai panašūs, todėl toliau aptariamas energingesnis L1t1.3 modelis.



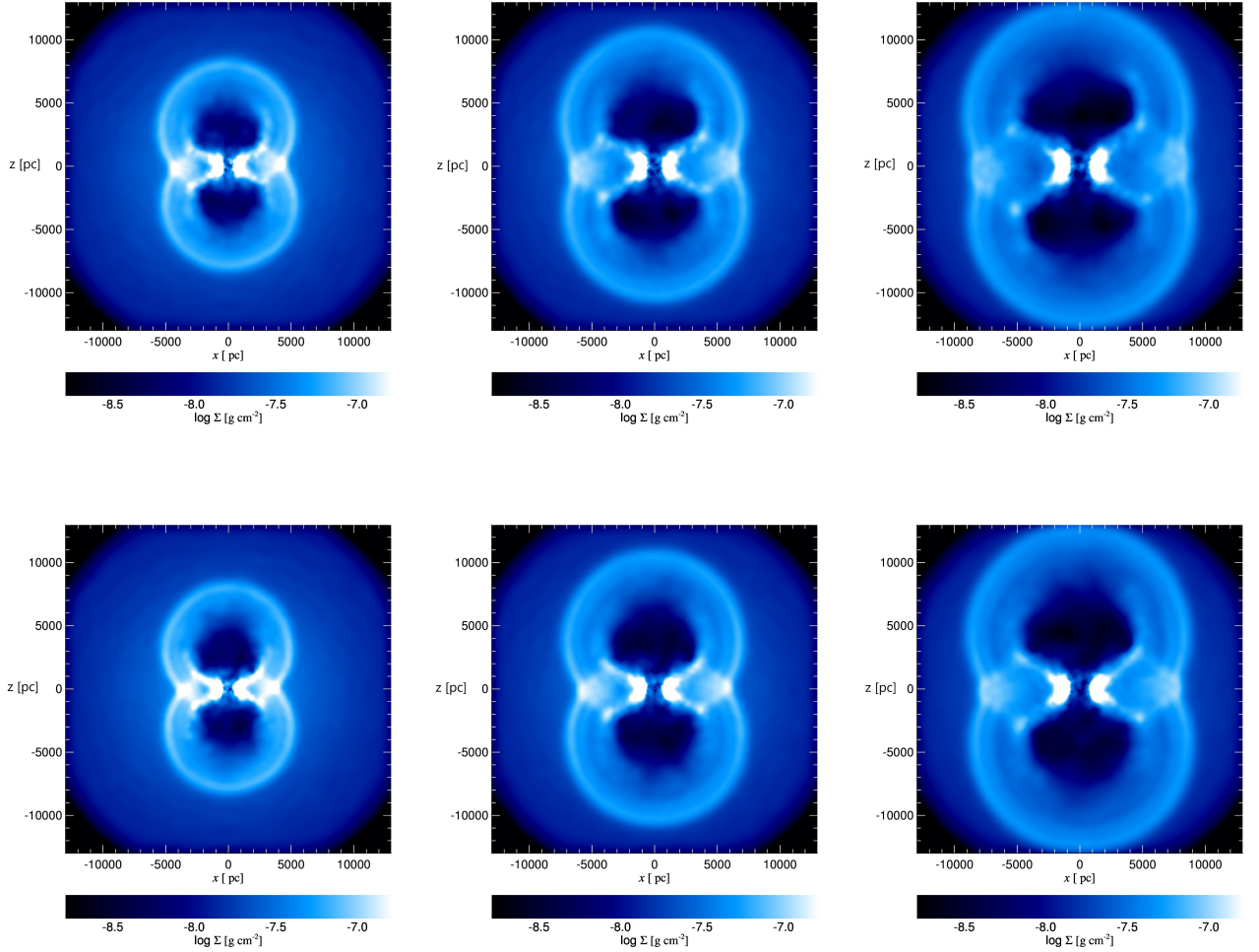
10 pav. Modelio L1t1.3 radialinių greičių projekcijų histogramos, kairėje - 6 mln. m., dešinėje - 8 mln. m. nuo modelio pradžios.

10 pav. projekcinių greičių histogramose išlieka panašios dalelių greičių vertės kaip ir L1t1 modelyje. Taip pat ties 6 mln. m. išlieka panašus tolstančių ir artėjančių dalelių kiekių santykis. Tarp šiaurinio ir pietinio burbulų atsiranda nedidelė n_a/n_t kreivės asimetrija 11 pav. taip yra dėl to, kad burbulai yra didesni ir retesni, todėl atrenkamų dalelių skaičius yra mažesnis ir nedidelis stochastinis tolstančių arba artėjančių dalelių kiekio pokytis gali lemti didelį n_a/n_t pokytį.



11 pav. Tolstančios ir artėjančios medžiagos santykio pokytis laike. Modelis l1t0.7. Kairėje šiaurinis burbulas, dešinėje - pietinis.

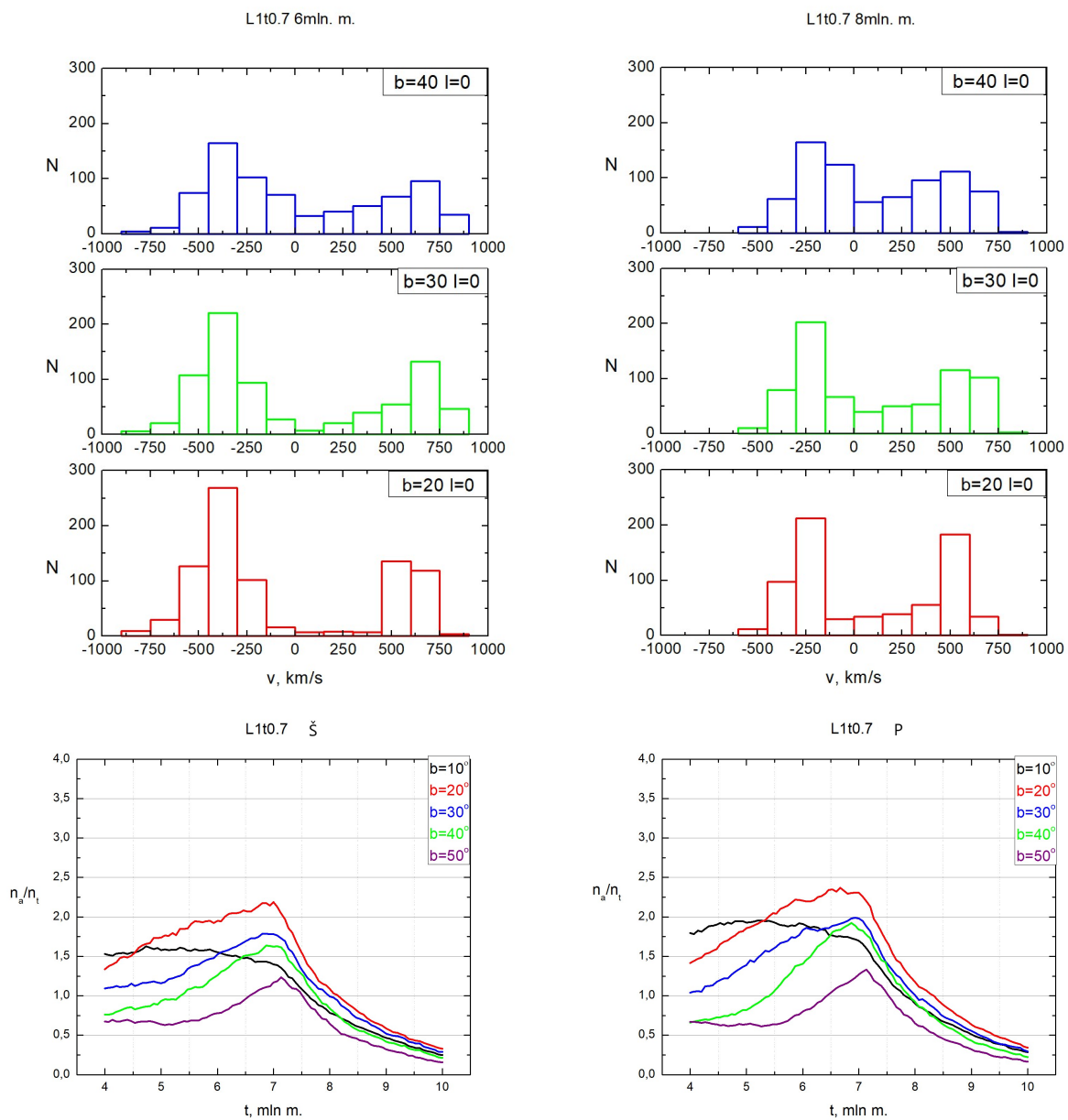
4.3.2 Modeliai su pradinėmis sąlygomis L1t0.7 ir L0.7t1



12 pav. Fermi burbulų tankio žemėlapiai. Viršuje - modelis L1t0.7, apačioje - modelis L0.7t1 iš kairės į dešinę 4, 6 ir 8 mln. m. evoliucijos laiko tarpniai.

12.pav vaizduojamuose tankio žemėlapiuose matomi mažesni nei pagrindiniame modelyje susiformuojantys burbulai. Net energingesnio modelio L0.7t1 suformuoti burbulai stebimo realių struktūrų aukščio nepasiekia net po 8 mln. m. Skiriasi ir burbulų forma. Ties 6 mln. m. tiek modelio L0.7t1, tiek L1t0.7 aukštis nuo Galaktikos plokštumos tampa beveik lygus pločiui.

Iš 13 pav. pateiktų greičio histogramų matyti, kad net mažiausius burbulus suformuojančiame modelyje po 6 mln. m. vidutinės dalelių greičių vertės vis dar stipriai skiriasi nuo stebėjimų rezultatų, skirtumas išlieka panašus kaip ir visose kituose tiruose modeliuose, artėjančioms dalelėms ~ 100 km/s, tolstančioms ~ 400 km/s. Šis skirtumas beveik išnyksta ties 8 mln. m. artėjančioms dalelėms, tačiau tolstančioms pasikeičia nežymiai.



13 pav. Viršuje - modelio L1t0.7 radialinių greičių projekcijų histogramos, kairėje - 6 mln. m., dešinėje - 8 mln. m. nuo modelio pradžios. Apačioje - tolstančios ir artėjančios medžiagos santykio pokytis laike. Kairėje šiaurinis burbulas, dešinėje - pietinis

13 pav. pateiktose diagramose matyti, kad santykis n_a/n_t ties maksimumu įgija mažesnes vertes nei, anksčiau aptartų modelių. Taip pat didžiausias vertes santykio kreivės pasiekia šiek tiek vėliau, ties ~ 7 mln. m. Tačiau vieneto vertę pasiekia panašiu laiku kaip ir visi kiti modeliai $\sim 7.5-8$ mln. m.

5 Aptarimas

Šiame darbe buvo tiriamos hidrodinaminiais modeliais sukurtų Fermi burbulų morfologinės bei kinematinės savybės. Taip pat buvo siekiama nustatyti Fermi burbulų amžių. Buvo tiriamas pagrindinis modelis su pradinėmis sąlygomis AGN šviesiu $L = L_{\text{Edd}}$ ir aktyvumo trukme $t_q = 1$ mln. m. Taip pat papildomi modeliai: L1t1.3, L1.3t1, L1t0.7 ir L0.7t1. Pagrindiniai rezultatai - Fermi burbulų tankio žemėlapiai, dalelių projekcinių greičių histogramos, bei artėjančios ir tolstančios medžiagos santykio n_a/n_t kitimo laike diagramos.

Tiriant tankio žemėlapius nustatyta, kad pagrindiniame modelyje sugeneruotų 6 mln. m. amžiaus struktūrų aukštis ir forma 10% paklaidų ribose atitinka realių Fermi burbulų matmenis. Kituose modeliuose realų aukštį burbulai pasiekia būdami šiek tiek kitokio amžiaus priklausomai nuo pradinių sąlygų. Tiriant modelius su įvairiais pradinėmis sąlygų rinkiniais pastebėta, kad AGN aktyvumo trukmė t_q morfologijai daro didesnę įtaką nei AGN šviesis.

Papildomai tiriant tankio ir temperatūros, bei tankio ir rentgeno spinduliuotės žemėlapius buvo pastebėta, kad centrinėje Galaktikos dalyje esanti X formos struktūra savo matmenimis, temperatūra, tankiu ir skleidžiamos rentgeno spinduliuotės kiekiu atkuria realybėje, 1.5 keV minkštų rentgeno spindulių žemėlapiuose [28] matomą struktūrą. Anksčiau atliktuose darbuose [8] tokių struktūrų nebuvo aptikta. Tokios papildomos stebėjimų duomenis atkuriančios detalės padeda susidaryti tikslesnę Galaktikos aktyvumo istorijos vaizdą.

Nagrinėjant radialinių greičių histogramas pastebėta, kad tiek pagrindiniame, tiek papildomuose modeliuose dalelių greičiai 6 mln. m. burbuluose ženkliai skiriasi nuo stebėjimo duomenų [6]. Nėra visiškai aišku kas galėjo sukelti tokį didelį greičių skirtumą. Tiriant 8 mln. m. burbulus artėjančios medžiagos greičiai beveik sutampa su stebėjimų duomenimis, tačiau skirtumas tarp tolstančių dalelių ir stebimų rezultatų išlieka ženklus.

Analizuojant artėjančios ir tolstančios medžiagos santykio kitimą laike nustatyta, kad šiaurinio ir pietinio burbulų kinematinė kaip ir morfologinių savybių skirtumai atsirandantys dėl stochastikos yra nežymūs. Tiriant n_a/n_t santykio kitimą laike galima nustatyti grubias amžiaus ribas, jas patikslinti būtų galima turint daugiau artėjančios ir tolstančios medžiagos stebėjimo duomenų įvairiomis galaktinėmis platumomis.

Toliau tiriant šiuos hidrodinaminis modelius būtų vertinga sugeneruoti jų sintetinius spektrus ir juos palyginti su vis gausėjančiais stebėjimų duomenimis. Tai būtų papildomas būdas detaliam kinematinėi analizei leidžiančiai tiksliau įvertinti vieną iš svarbiausių Fermi burbulų parametrų - jų amžių.

Išvados

Šiame darbe buvo analizuojamos hidrodinaminio modelio pagalba sukurtų Fermi burbulų savybės. Buvo siekiama ištirti sumodeliuotų struktūrų morfologiją bei kinematiką, taip pat nustatyti Fermi burbulų amžių. Padarytos tokios išvados:

- Remiantis Fermi burbulų hidrodinaminių modelių kinematikos bei morfologijos tyrimais struktūrų amžius patenka į 6 - 8 mln. m. amžiaus ribas
- Pradinis AGN šviesis bei aktyvumo trukmė daro didesnę įtaką Fermi burbulų morfologijai, nei kinematikai.
- Nagrinėtas hidrodinaminis modelis kiekybiškai atkuria Fermi burbulų morfologiją, tačiau kinematinės savybės ženkliai skiriasi nuo realių struktūrų
- Fermi burbulų amžiui nustatyti naudojant n_a/n_t santykį reikalingi papildomi stebėjimų duomenys, tačiau šis metodas kartu su kinematikos ir morfologijos tyrimais leidžia kiekybiškai įvertinti amžiaus ribas.

Literatūros sąrašas

- [1] M. Su, T. R. Slatyer, D. P. Finkbeiner, Giant Gamma-ray Bubbles from Fermi-LAT: Active Galactic Nucleus Activity or Bipolar Galactic Wind?, *The Astrophysical Journal* 724, 1044–1082 (2010).
- [2] C. Cicone, R. Maiolino, E. Sturm, J. Graciá-Carpio, C. Feruglio, R. Neri, S. Aalto, R. Davies, F. Fiore, J. Fischer, S. García-Burillo, E. González-Alfonso, S. Hailey-Dunsheath, E. Piconcelli, S. Veilleux, Massive molecular outflows and evidence for AGN feedback from CO observations, *Astronomy and Astrophysics* 562, A21 (2014).
- [3] K. Zubovas, A. King, Clearing Out a Galaxy, *The Astrophysical Journal, Letters* 745, L34 (2012).
- [4] T. Costa, D. Sijacki, M. G. Haehnelt, Fast cold gas in hot AGN outflows, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 448, L30–L34 (2015).
- [5] R. M. Crocker, F. Aharonian, Fermi Bubbles: Giant, Multibillion-Year-Old Reservoirs of Galactic Center Cosmic Rays, *Physical Review Letters* 106(10), 101102 (2011).
- [6] R. Bordoloi, A. J. Fox, F. J. Lockman, B. P. Wakker, E. B. Jenkins, B. D. Savage, S. Hernandez, J. Tumlinson, J. Bland-Hawthorn, T.-S. Kim, Mapping the Nuclear Outflow of the Milky Way: Studying the Kinematics and Spatial Extent of the Northern Fermi Bubble, *The Astrophysical Journal* 834, 191 (2017).
- [7] M. J. Miller, J. N. Bregman, The Interaction of the Fermi Bubbles with the Milky Way’s Hot Gas Halo, *The Astrophysical Journal* 829, 9 (2016).
- [8] A. Sadauskas, Paukščių Tako Fermi burbulų hidrodinaminio modelio analizė, magistrantūros studijų mokslo tiriamasis darbas, Vilniaus universitetas (2018).
- [9] M. T. Karim, A. J. Fox, E. B. Jenkins, R. Bordoloi, B. P. Wakker, B. D. Savage, F. J. Lockman, S. M. Crawford, R. A. Jorgenson, J. Bland-Hawthorn, Probing the Southern Fermi Bubble in Ultraviolet Absorption using Distant AGNs, *ArXiv e-prints* (2018).
- [10] F. K. Baganoff, M. W. Bautz, W. N. Brandt, G. Chartas, E. D. Feigelson, G. P. Garmire, Y. Maeda, M. Morris, G. R. Ricker, L. K. Townsley, F. Walter, Rapid X-ray flaring from the direction of the supermassive black hole at the Galactic Centre, *Nature* 413, 45–48 (2001).
- [11] D. Porquet, P. Predehl, B. Aschenbach, N. Grosso, A. Goldwurm, P. Goldoni, R. S. Warwick, A. Decourchelle, XMM-Newton observation of the brightest X-ray flare detected so far from Sgr A*, *Astronomy and Astrophysics* 407, L17–L20 (2003).

- [12] F. Melia, An accreting black hole model for Sagittarius A, *The Astrophysical Journal, Letters* 387, L25–L28 (1992).
- [13] E. Mossoux, N. Grosso, F. H. Vincent, D. Porquet, Study of the X-ray activity of Sagittarius A* during the 2011 XMM-Newton campaign (Corrigendum), *Astronomy and Astrophysics* 580, C2 (2015).
- [14] K. Zubovas, S. Nayakshin, S. Markoff, Sgr A* flares: tidal disruption of asteroids and planets?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 421, 1315–1324 (2012).
- [15] G. Ponti, L. C. Gallo, A. C. Fabian, G. Miniutti, A. Zoghbi, P. Uttley, R. R. Ross, R. V. Vasudevan, Y. Tanaka, W. N. Brandt, Relativistic disc reflection in the extreme NLS1 IRAS13224-3809, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 406, 2591–2604 (2010).
- [16] J. Bland-Hawthorn, P. R. Maloney, R. S. Sutherland, G. J. Madsen, Fossil Imprint of a Powerful Flare at the Galactic Center along the Magellanic Stream, *The Astrophysical Journal* 778, 58 (2013).
- [17] M. S. Pshirkov, V. V. Vasiliev, K. A. Postnov, Evidence of Fermi bubbles around M31, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459, L76–L80 (2016).
- [18] S. Nayakshin, K. Zubovas, Quasar feedback: accelerated star formation and chaotic accretion, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 427, 372–378 (2012).
- [19] K. Zubovas, S. Nayakshin, Fermi bubbles in the Milky Way: the closest AGN feedback laboratory courtesy of Sgr A*?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 424, 666–683 (2012).
- [20] G. Mou, F. Yuan, D. Bu, M. Sun, M. Su, Fermi Bubbles Inflated by Winds Launched from the Hot Accretion Flow in Sgr A*, *The Astrophysical Journal* 790, 109 (2014).
- [21] F. Guo, W. G. Mathews, The Fermi Bubbles. I. Possible Evidence for Recent AGN Jet Activity in the Galaxy, *The Astrophysical Journal* 756, 181 (2012).
- [22] K.-S. Cheng, D. O. Chernyshov, V. A. Dogiel, C.-M. Ko, W.-H. Ip, Origin of the Fermi Bubble, *The Astrophysical Journal, Letters* 731, L17 (2011).
- [23] E. Carretti, R. M. Crocker, L. Staveley-Smith, M. Haverkorn, C. Purcell, B. M. Gaensler, G. Bernardi, M. J. Kesteven, S. Poppi, Giant magnetized outflows from the centre of the Milky Way, *Nature* 493, 66–69 (2013).
- [24] G. Mou, F. Yuan, Z. Gan, M. Sun, The Accretion Wind Model of Fermi Bubbles. II. Radiation, *The Astrophysical Journal* 811, 37 (2015).

- [25] K. Zubovas, A. R. King, S. Nayakshin, The Milky Way's Fermi bubbles: echoes of the last quasar outburst?, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 415, L21–L25 (2011).
- [26] V. Springel, The cosmological simulation code GADGET-2, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 364, 1105–1134 (2005).
- [27] S. Nayakshin, S.-H. Cha, A. Hobbs, Dynamic Monte Carlo radiation transfer in SPH: radiation pressure force implementation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 397, 1314–1325 (2009).
- [28] S. L. Snowden, R. Egger, M. J. Freyberg, D. McCammon, P. P. Plucinsky, W. T. Sanders, J. H. M. M. Schmitt, J. Trümper, W. Voges, ROSAT Survey Diffuse X-Ray Background Maps. II., 485, 125–135 (1997).

PAUKŠČIŲ TAKO FERMI BURBULŲ HIDRODINAMINIAI MODELIAI

Santrauka

Šiame darbe nagrinėjama Fermi burbulų kinematika bei morfologija. Siekiama išsiaiškinti, ar remiantis akrecijos į Sgr A* kilmės teorija (struktūrų amžius 6 mln. m.) bei hidrodinaminio modeliavimo pagalba, galima atkurti stebimas Fermi burbulų savybes. Šiuo darbu siekiama prisidėti prie gilesnio astrofizikinio Galakties evoliucijos istorijos pažinimo.

Darbo tikslas: įvertinti Paukščių Tako Fermi burbulų amžių, remiantis teorija, kad Fermi burbulai yra akrecijos į Sgr A* dėka sukurtų tėkmių rezultatas.

Darbo uždaviniai:

- Ištirti Fermi burbulų morfologiją - struktūrų geometrinę evoliuciją.
- Ištirti burbulų kinematinės savybes - dujų radialinių greičių pasiskirstymą kintant laikui.

Darbo rezultatai: sumodeliuotų Fermi burbulų tankio, temperatūros bei rentgeno spinduliuotės žemėlapiai, radialinių greičių histogramos, artėjančios ir tolstančios medžiagos santykio kitimo laike diagramos, burbulų plėtimosi greičio grafikai.

Išvados: Šiame darbe buvo analizuojamos hidrodinaminio modelio pagalba sukurtų Fermi burbulų savybės. Buvo siekiama ištirti sumodeliuotų struktūrų morfologiją bei kinematiką, taip pat nustatyti Fermi burbulų amžių. Padarytos tokios išvados:

- Remiantis Fermi burbulų hidrodinaminių modelių kinematikos bei morfologijos tyrimais struktūrų amžius patenka į 6 - 8 mln. m. amžiaus ribas
- Pradinis AGN šviesis bei aktyvumo trukmė daro didesnę įtaką Fermi burbulų morfologijai, nei kinematikai.
- Nagrinėtas hidrodinaminis modelis kiekybiškai atkuria Fermi burbulų morfologiją, tačiau kinematinės savybės ženkliai skiriasi nuo realių struktūrų
- Fermi burbulų amžiui nustatyti naudojant n_a/n_t santykį reikalingi papildomi stebėjimų duomenys, tačiau šis metodas kartu su kinematikos ir morfologijos tyrimais leidžia kiekybiškai įvertinti amžiaus ribas.

HYDRODYNAMIC MODELS OF THE FERMI BUBBLES IN THE MILKY WAY

Summary

In this work I study the morphology and kinematics of the Fermi bubbles. Using a hydrodynamic model I estimate the age of these structures, assuming that their origin can be explained by an accretion episode of Sgr A*. This work contributes to the astrophysical understanding of the history of Galactic evolution and formation of the Fermi bubbles.

The aim of the work is to determine the morphological and kinematic properties of the Fermi bubbles, such as the distribution of observable radial velocities, by using hydrodynamical modelling and to determine the age of the Fermi bubbles.

Tasks :

- Examine the morphology of Fermi bubbles - how structures evolve in time.
- Examine the kinematic properties of Fermi bubbles - evolution of gas radial velocity distribution.

Results: Density, temperature and X-ray maps of models of the Fermi bubbles, histograms of radial velocities and expansion rate diagrams. Also evolution of the ratio of the numbers of approaching and receding gas particles observed at different Galactic latitudes.

Conclusions:

- According to the studies of the kinematics and morphology of hydrodynamic models of Fermi bubbles, the age of the structures falls between 6 - 8 million years.
- The initial AGN luminosity and the duration of quasar activity have a greater influence on the morphology of Fermi bubbles than on their kinematics.
- The studied hydrodynamic model reproduces similar morphology of Fermi bubbles but some kinematic properties differ significantly from observational data.
- Determining the age of the Fermi bubbles by using the relation n_a / n_t requires additional observations but this method, combined with kinematic and morphological studies, allows to narrow down the age limits.