

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Teorinės fizikos ir astronomijos institutas

Martynas Laužikas

**AKTYVAUS GALAKTIKOS BRANDUOLIO KURIAMŌS TĖKMĖS POVEIKIS
ŽVAIGŽDĖDARAI**

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Teorinės fizikos ir astrofizikos studijų programa

Studentas

Martynas Laužikas

Darbo vadovas

doc. dr. Kastytis Zubovas

Recenzentas

dr. Marius Maskoliūnas

Instituto direktorius

prof. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2023

Turinys

Įvadas	4
1 Teorinis pagrindas	6
1.1 Galaktikos centrinė dalis	6
1.1.1 Skersė	7
1.1.2 Centrinė molekulinė zona	8
1.1.3 Turbulencija CMZ	9
1.1.4 Žvaigždėdara	10
1.2 Galaktikos aktyvumas	11
1.2.1 Aktyvus galaktikos branduolys	11
1.2.2 AGN vėjas	12
1.2.3 Galaktinės tėkmės	12
1.2.4 Tėkmė poveikis supančioms dujoms	13
2 Metodai	15
2.1 SPH metodas	15
2.2 Grįžtamasis AGN ryšys	16
2.3 Turbulencija	16
2.4 Šiluminiai procesai	18
2.4.1 Vėsimo funkcija	19
2.5 Žvaigždėdara	20
2.6 Pradinės sąlygos	21
2.7 Statistiniai metodai	22
3 Rezultatai	23
3.1 Morfologija	23
3.2 Medžiagos pernaša	26
3.3 Žvaigždėdara	28
4 Diskusija	32
4.1 CMZ forma	32
4.2 Žvaigždėdara	33
4.3 CMZ istorija	33
Išvados	35
Literatūros sąrašas	36

Santrauka	42
Priedas Nr.1	43
Priedas Nr.2	44

Įvadas

Dauguma masyvių galaktikų centre turi itin masyvią juodąją skylę (SMBH). Šis kompaktiškas darinys suformuoja didžiausio šviesio, pastoviai šviečiančius objektus Visatoje - aktyvų galaktikos branduolį (AGN). Stebimus milžiniškus energijos kiekius sugeneruoja akrecija į SMBH - medžiagos srautui krentant į potencialo duobę pasiekiamas stebėtinai $\sim 10\%$ energijos virsmo efektyvumas. AGN susiformuoti būtini medžiagos srautai į galaktikos centrinę dalį ir pati SMBH. Nors abi sudedamąsias dalis turi dauguma galaktikų, tačiau didesnė dujų masės dalis būdinga jaunoms, diskinėms galaktikoms; aktyvumas yra neatsiejamas masyvių galaktikų evoliucijos etapas. Aktyvumo epizodai trunka ~ 1 mln. m., jie kartojasi, tačiau jų bendra trukmė yra trumpa palyginus su galaktikų amžiumi. Tačiau yra nemažai neatsakytų klausimų - kaip aktyvumas keičia galaktikos branduolį ir jį supančias dujas, koks jo poveikis žvaigždėdarai?

Dėl stebėjimų gausos kaip pavyzdį tikslinga nagrinėti Galaktiką kurioje gyvename. Aukšta skyra ir platus stebimas EM bangų spektras suteikia įžvalgų apie galaktikos aktyvumą ir jo poveikį aplinkinėms dujoms. Nors Galaktika šiuo metu nėra aktyvi, pasižymi pakankamai maža spinduliuote iš centrinės SMBH (Sgr A*), stebimos struktūros, tokios kaip kiloparsekų dydžio Fermi burbulai rodo galimą aktyvumo epizodą per kelis pastaruosius mln. metų. Mūsų Galaktikai, o taip pat ir daugeliui diskinių galaktikų būdinga skersė - kelių kpc struktūra suformuojanti besisukantį potencialą gabentį dujas į kelis šimtus centrinių pc. Šis transportas suformuoja žiedines/diskines struktūras apibūdinamas kaip centrinė molekulinė zona (CMZ). Jose gausu molekulinių dujų, tačiau aplinka skiriasi nuo įprastų žvaigždėdaros regionų disko vijose. Ar tai buvusio AGN aktyvumo požymis, bei koks aktyvumo poveikis žvaigždėdarai yra vienas iš neatsakytų klausimų.

AGN poveikis supančioms dujoms priklauso nuo daugelio faktorių - medžiagos tankio, optinio gylio, geometrijos ir t.t. Aktyvumo epizodo metu, spinduliuotės srautui artėjant prie Edingtono ribos, medžiaga efektyviai išstumama iš gravitacinio potencialo, kaitina supančias dujas ir formuoja tėkmes. Tėkmės plisdamos suspaudžia, kaitina bei maišo dujas, perduoda joms judesio kiekį. Būdingi tėkmių greičiai gali siekti tūkstančius km s^{-1} , šios tėkmės dažniausiai siejamos su tipinių molekulinių debesų suardymu. Tačiau CMZ nėra įprastas žvaigždėdaros regionas, pasižymi eilėmis didesniu vidutiniu tankiu bei temperatūromis eile aukštesnėmis palyginus su disko žvaigždėdaros regionais. Galaktikų tėkmių ir žvaigždėdaros koreliacijos tyrimai nėra naujiena, tačiau dažnai ašine simetrija, neįskaito skersėje vykstančio dujų transporto bei CMZ morfologijos. Koks aktyvumo poveikis CMZ vykstančiai žvaigždėdarai yra mažai ištirta.

Darbo tikslas - **nustatyti galaktikos aktyvumo poveikį dujų evoliucijai CMZ**. Šiam tikslui pasiekti suformuoti uždaviniai:

- Nustatyti galaktikos aktyvumo poveikį CMZ morfologijai
- Nustatyti AGN poveikį žvaigždėdaros spartai
- Nustatyti AGN poveikį žvaigždėdaros erdviniam pasiskirstymui

AGN suformuotos tėkmės ir CMZ sąveikai tirti pasirinktas hidrodinaminis modeliavimas. Darbe naudojamas hibridinis SPH/N-kūnų kodas GADGET 3. Modeliuojama dujų hidrodinamika, gravitacija, šiluminiai procesai, AGN grįžtamasis ryšys ir žvaigždėdara.

Modeliuojama 3 kpc spindulio centrinė galaktikos dalis, kurios savybės artimos mūsų Galaktikai. Erdvė užpildyta mažo tankio foninėmis dujomis, centre patalpinta $4 \times 10^6 M_{\odot}$ SMBH, kurią supa 80-160 pc spindulio CMZ (asimetrinio profilio dujų žiedas), kurį papildo skersės dujų srautas. Kelių kpc atstumais Galaktikoje dominuoja gravitacinis, žvaigždinis skersės potencialas todėl jis pasirinktas kaip atskaitos sistema. Modeliuojamos 3 sistemos su skirtingais AGN šviesiais (0,0; 0,5; 1,0 L_{Edd}). Jos evoliucionuojamos keletą mln. m. po AGN aktyvumo epizodo, trunkančio 1 mln. m. Nustatyta, kad AGN aktyvumas pašalina dujas iš centrinių dešimčių pc, suformuodamas asimetrinį tankių dujų žiedą būdingą stebimai Galaktikos CMZ tačiau morfologija bei dujų savybės mažai priklauso nuo AGN šviesio. Vidutinio 0,5 L_{Edd} šviesio modelyje nustatyta išaugusi žvaigždėdaros sparta, o susiformavę spiečiai savo mase yra artimi Galaktikos CMZ būdingiems spiečiams. Tačiau spiečių orbitų dinamika dera su stebėjimų duomenimis tik esant Edingtono šviesiui. Šie rezultatai rodo, kad dabartinė Galaktikos CMZ būklė yra vidutinio šviesio AGN epizodo prieš 7-5 mln. m. rezultatas.

1 Teorinis pagrindas

Galaktikoms būdinga plati morfologinė įvairovė. Vienas pirmųjų klasifikaciją pasiūlė E. Hablas - suskirstyti galaktikas pagal tai ar jos turi diską, bei diske esančias struktūras (baldžo dydis, skersė) [1]. Šiame darbe nagrinėjama galaktika yra diskinė, evoliucionavusi, turinti skersę, nėra išnaudojusi dujų rezervuaro. Joje vyksta pastovi žvaigždėdara, o dujų transportas skerse į CMZ, o vėliau ir į SMBH aplinką suformuoja aktyvų galaktikos branduolį [2, 3].

Aktyvaus galaktikos branduolio epizodo metu, kurio vidutinė trukmė yra apie 1 mln. m. sugeneruojamas milžiniškas energijos kiekis, kuris formuoja energijos pernašos grandinę siekiančią šimtus kpc. AGN poveikis galaktikai yra netiesioginis - formuojasi tėkmės, kurios paveikia ne tik galaktiką bet ir tarpgalaktinę erdvę [4,5]. Aktyvumao suformuotos tėkmės apima itin platų tankių ir temperatūrų intervalą - AGN formuoja dalelių vėją kurio būdinga temperatūra siekia 10^{10} K, o jo formuojamose evoliucionavusiose tėkmėse didžioji masės dalis tenka molekulinės dujos, kurios būdinga dešimčių K temperatūra [4,5]. Aktyvumo ir tėkmės koevoliucija priklauso nuo AGN šviesio ir supančios medžiagos pasiskirstymo bei tankio gradientų [3].

Pusiau analitiniai darbai rodo, kad kad tėkmės efektyviai pašalina dujas iš centrinio galaktikos telkinio, tačiau vykstant sąveikai su tankiomis dujomis efektyvumas yra eilėmis mažesnis ir didžioji dujų dalis neišstumiama, o suspaudžiama ir kaitinama [6]. Šis papildomas slėgis žvaigždėdarą gali spartinti arba inicijuoti [7]. Tačiau CMZ esantys molekuliniai debesys nėra tipinių savybių ir AGN poveikis CMZ esantiems milžiniškiems dujų kompleksams nėra ištirtas. Tėkmės padidina ISM slėgį ir galaktikos diske paspartina žvaigždėdarą, tačiau AGN epizodo metu CMZ medžiaga yra švitinama spinduliuotės kurios spektrinis energijos pasiskirstymas (SED) ženkliai skiriasi nuo tipinio ISM spinduliuotės lauko. Stebėjimų duomenys ir skaitmeniniai modeliai rodo nevienareikšmius rezultatus, AGN poveikis gali būti įvairus [8], šie skirtumai yra dėl nevienodo erdvinio dujų pasiskirstymo, didelio spinduliuotės lauko intensyvumo ir jo nulemtų molekulių, dulkių formavimosi ar suirimo spartų. Kalbant apie mūsų galaktiką negalime atmesti, kad jos CMZ gali būti tarpinėje būsenoje, susiformavusioje po netolimoje praeityje įvykusio AGN aktyvumo.

Šis skyrius skirtas pagrindinių galaktikos struktūrų aprašymui, apsiribojant keliais centriniais kpc. Apžvelgsiu šio regiono morfologiją, tankio profilius, žvaigždėdaros regionus bei spartas. Antra dalis skirta galaktikos aktyvumui ir jo poveikiui gaubiančioms dujoms ir žvaigždėdarai jose.

1.1 Galaktikos centrinė dalis

Galaktikos sudarytos iš trijų pagrindinių komponentų - tamsiosios materijos, dujų ir žvaigždžių. Nors tamsioji materija sudaro didžiąją galaktikų masės dalį, centriniuose kpc jos įtaka silpna, čia dominuoja žvaigždžių formuojamas potencialas; jis kreipia dujų srautus, kurie vėliau suformuoja žvaigždes.

Nagrinėjant dinamiką žvaigždes galima laikyti taškiniiais objektais, kurių sąveikoje dominuoja gravitacija, o dujoms - priešingai jose dominuoja hidrodinaminiai efektai. Dujos ir žvaigždės yra

išsidėstę pagrinde disko plokštumoje, o tolstant nuo jos eksponentiškai mažėja; būdingas tankio profilis

$$\rho = \rho_0 \exp(-z/z_0) \quad (1)$$

kur ρ_0, z_0 medžiagos tankis disko centre ir būdingas aukštis. Vidutinės tankio vertės kelių kpc atstumu nuo centro nesiekia dešimčių $m_p \text{ cm}^{-3}$ netgi dujomis turtingose galaktikose, o žvaigždėms yra eile didesnis. Disko dujos yra pasiskirsčiusi netolygiai - diskinėms galaktikoms būdingas spiralinis raštas.

Priešingai nei dujos, žvaigždės yra pasiskirstę tolygiau, tačiau orbitos ir jų dinamika yra pakankamai sudėtinga. Vienas pagrindinių skirtumų - nesutampa žvaigždinio disko ir spiralinio rašto rašto sukimosi greičiai. Žvaigždinis diskas sukasi praktiškai pastoviu greičiu, o spiralinis raštas artėjant prie centro sukasi lėčiau už žvaigždinį diską. Kelių kpc atstumu susiformuoja korotacija - sutampa šių struktūrų sukimosi vidutiniai greičiai. Paukščių Takei būdingas korotacijos spindulys yra ~ 7 kpc, čia dujos juda $\sim 230 \text{ km s}^{-1}$ greičiu.

Netgi esant korotacijai žvaigždžių ir spiralinio rašto dinamika yra sudėtinga, žvaigždės juda epiciklais vijos atžvilgiu, tai aplenkdamos, tai atsilikdamos. Tolstant nuo korotacijos spindulio - žvaigždžių greičiai atsilieka arba aplenkia vijų rašto sukimąsi. Sutampant epiciklų kartotiniams skaičiams ir spiralinio rašto periodui formuojasi Linblado rezonansai. Šie rezonansai formuoja disko dinamiką ir nulemia globalių struktūrų tokių kaip skersė susiformavimą.

1.1.1 Skersė

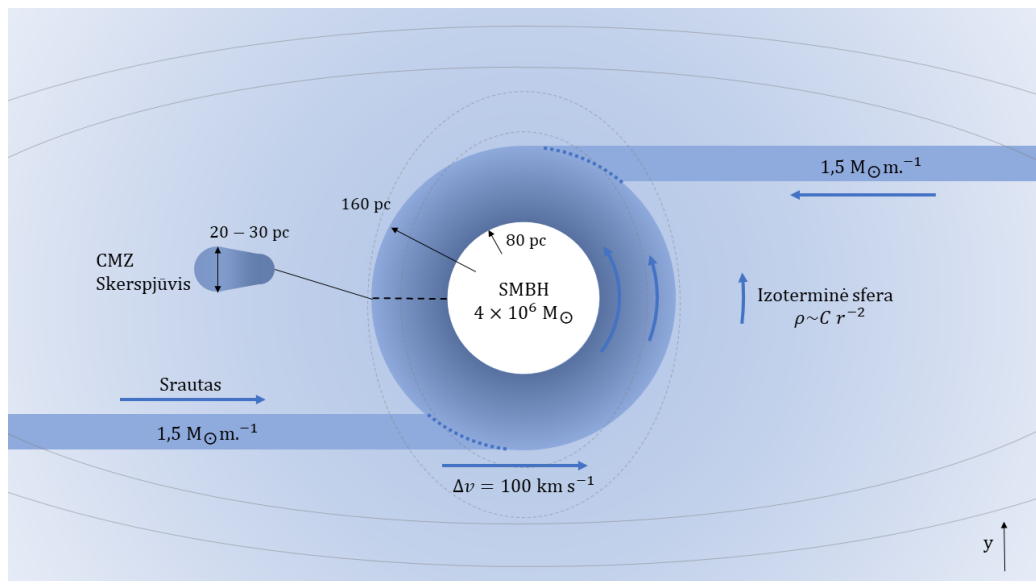
Skersės būdingos 2/3 diskinių galaktikų lokaliaje Visatoje [9], joje dujų pasiskirstymas ir dinamika skiriasi nuo likusios galaktikos. Dujas diske ir skersėje galima laikyti atskiromis sistemomis; skersės ir galaktikos disko susijungimas nėra tolygus, dažnu atveju nesutampa jų sukimosi greičiai. Susijungime formuojasi smūginės bangos, dujos stagnuoja ir jas veikiant skersės potencialui inicijuojamas dujų transportas link galaktikos centro. Galaktikos centrinių dalių dinamika detaliam išnagrinėta pvz. [10].

Skersės potencialą formuoja žvaigždės, todėl paprasčiausia dinamiką nagrinėti skersės atskaitos sistemoje. Pagrindinį skersės potencialą formuojančios žvaigždės pasižymi uždaromis orbitomis - žvaigždės periodiškai grįžta į pradinį tašką (skersės atskaitos sistemoje). Priklausomai nuo rezonanso, žvaigždžių orbitos skirstomos į šeimas; x1 orbitos suformuoja pagrindinį triašio elipsoido formos skersės potencialą [11]. Arčiau galaktikos centro, pasiekus aukštesnės eilės Linblado rezonansą formuojasi potencialas statmenas pagrindiniam, jį suformuoja žvaigždės priklausančios x2 orbitų šeimai, jos yra elipsės formos ir dalinai sutampa su CMZ dujų telkinu. Tačiau realybėje dujos tik apytiksliai seka žvaigždinių orbitas - skirtingai nei žvaigždės dujos negali prasilenkti, o formuoja smūgines bangas, inicijuoja turbulenciją ir kaista. Paukščių Take skersės žvaigždinė masė yra $\approx 1.9 \times 10^{10} M_{\odot}$ ir jos potencialas dominuoja CMZ išorėje - $0,3 \leq R \leq 4$ kpc regione. Ja vyksta dujų transportas suformuojantis CMZ.

1.1.2 Centrinė molekulinė zona

CMZ tai molekuliųjų dujų žiedas būdingas diskinėms galaktikoms su skerse, esantis tipiška kelių šimtų pc atstumu nuo galaktikos centro. Jame yra gausu molekuliųjų debesų kompleksų sudarančių iki ~ 10 % visų galaktikoje esančių molekuliųjų dujų [12]. Paprasčiausias CMZ susiformavimo modelis - dujų transportas skerse natūraliai suformuoja CMZ. Gravitacinis skersės žvaigždžių potencialas formuoja medžiagos srautus kurie susilieja į pailgą žiedą persiklojantį su x_2 žvaigždinių orbitų išorinėmis dalimis; tai rodo, kad kaip ir skersė, CMZ yra dinaminės struktūros.

Paukščių tako CMZ tai pailgas molekuliųjų dujų žiedas esantis ~ 200 pc atstumu nuo Galaktikos centro. Molekuliųjų dujų masė jame yra ~ $5 \times 10^7 M_{\odot}$. Didžioji dalis dujų yra kelių šimtų K temperatūros molekulinės dujos. Šis žiedas sudarytas iš keleto srautų ar pseudo-spiralinių vijų [13], kurios formuojasi dėl šlyties disko medžiagoje ar skersės gabenamų dujų smūginių bangų.



1 pav. Paukščių tako centrinės molekulinės zonos schema. Foninės dujos - izoterminės sferos tankio profilio. CMZ - į išorę plėtantis žiedas į kurį skerse įteka dujos. Skerse judančios medžiagos greitis yra 100 km s^{-1} didesnis nei CMZ sukimasis. Atskaitos sistema - skersės potencialas. Pilkos elipsės rodo apytiksles x_1 , x_2 orbitų šeimas.

Skerse judančių dujų likimas priklauso nuo daugelio faktorių; tēkmės jas gali pašalinti iš centrinės dalies, jos gali kauptis CMZ bei vykti jų transportas į SMBH aplinką ar suformuoti žvaigždes. Bendras CMZ aplinkos ($R < 300 \text{ pc}$ spindulio sferos) masės pokytis

$$\dot{M}_{\text{CMZ}} = \dot{M}_{\text{in}} - \dot{M}_{\text{out}} - \dot{M}_{\text{SMBH}} - \text{SFR}, \quad (2)$$

kur indeksai *in*, *out*, *SMBH* žymi įtekančių dujų ir tēkmių nulemtą masės pokytį, SMBH masės prieaugį, o paskutinis narys - žvaigždėdaros konvertuotas dujas. Pastarojo dešimtmečio matavimai rodo, kad CMZ maitinimo sparta varijuoja $0,4 - 3 M_{\odot} \text{ m}^{-1}$ ribose; CMZ gali susiformuoti per dešimtis mln. m. Šiame darbe pasirinkta viršutinė šio intervalo riba, motyvuojant, kad praeityje prieš Galak-

tikos epizodo aktyvumą padidėjęs dujų srautas gali pamaitina SMBH, kurios aktyvumas prislopina įtekančios medžiagos srautus.

Nors skersės dujų konvejeris veikia itin efektyviai transportuojant dujas iš disko į CMZ, tolesnis dujų migracijos į SMBH mechanizmas nėra aiškus. Tai galėtų būti žvaigždėdaros grįžtamasis ryšys išstumiantis dujas iš CMZ [10], dujų maišymasis, daugiapolis potencialas SMBH kaimynystėje (mini skersė) ar išorinės perturbacijos. Sgr A* maitinimo sparta gali siekti $0.08 M_{\odot} \text{ m.}^{-1}$, ji nedominuoja CMZ masės pokytyje tiesiogiai, tačiau inicijuoja aktyvumo epizodą. AGN išstūmus dujas ir nepakitus skersė judančios medžiagos rautui CMZ vėl susiformuotų ir įgalintų sekantį AGN aktyvumo epizodą, būdingu 10-20 mln. m. periodu, panašiu epizodiškumu turėtų vykti ir žvaigždėdaros ciklai. Dabartinė CMZ žvaigždėdaros sparta yra $< 0,1 M_{\odot} \text{ m.}^{-1}$, eile mažesnė nei įtekančių dujų srautas.

1.1.3 Turbulencija CMZ

Turbulencija formuoja sutankėjimus, kurie inicijuoja medžiagos kolapsą ir vėliau, jai atvėsus, formuoja žvaigždes. Paukščių Tako CMZ ir jos aplinka pasižymi didele ($20 - 50 \text{ km s}^{-1}$) greičių dispersija. Vėsioje molekulinėje ir netgi šiltoje atominėje medžiagoje tokie greičiai yra viršgarsiniai. Didelė greičių dispersija rodo, kad turbulencija yra pastoviai žadinama. Ją gali formuoti žvaigždėdara, ANG aktyvumo suformuoti medžiagos srautai, smūginės bangos ar medžiagos srautai skersė, tačiau nėra aišku kuris mechanizmas yra dominuojantis [14]. CMZ turbulentinės energijos slopimo sparta [15]

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \frac{M_{\text{CMZ}} \sigma^3}{h} \simeq 2.8 \times 10^{39} \left(\frac{M_{\text{CMZ}}}{5 \times 10^7 M_{\odot}} \right) \left(\frac{\sigma}{12 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \left(\frac{h}{20 \text{ pc}} \right)^{-1} \text{ erg s}^{-1}, \quad (3)$$

kur h šios zonos aukštis, o σ greičių dispersija. Tariant, kad CMZ yra dalinai stabili, šią energiją turi sugeneruoti minėti procesai. Skersė judanti medžiaga pasiekia CMZ ir suformuoja smūginius frontus, greičių skirtumas tarp CMZ ir įtekančios medžiagos yra $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$. Toks srautas sugeneruotų energijos pokytį proporcingą [16]

$$\dot{E}_{\text{in}} = \frac{1}{2} \dot{M}_{\text{in}} v_{\text{in}}^2 \simeq 2.5 \times 10^{39} \left(\frac{\dot{M}_{\text{in}}}{0,8 M_{\odot} \text{ m.}^{-1}} \right) \left(\frac{v_{\text{in}}}{100 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \text{ erg s}^{-1} \quad (4)$$

Tačiau jis yra lokalizuotas, vyksta CMZ viršūnėse. Supernovos sugeneruoja energiją proporcingą

$$\dot{E}_{\text{SN}} = \sigma_{\text{SN}} \eta_{\text{SN}} E_{\text{SN}} \simeq 5 \times 10^{39} \left(\frac{\sigma_{\text{SN}}}{15 \times 10^{-4} \text{ m.}} \right) \left(\frac{\eta_{\text{SN}}}{0,1} \right) \left(\frac{E_{\text{SN}}}{10^{51} \text{ erg}} \right) \text{ erg s}^{-1} \quad (5)$$

kur $\sigma_{\text{SN}}, \eta_{\text{SN}}, E_{\text{SN}}$ supernovų sparta, energijos perdavimo efektyvumas ir energija. Šie abu dydžiai dominuoja turbulencijos formavime ir jų įnašas yra palyginamas. Nors šių procesų koreliacija bei stochastiškumas nėra tiksliai žinomi, jų suminė energija yra didesnė nei CMZ turbulentinės energijos slopimas rodo nepusiausvyrą būklę Paukščių Tako CMZ.

1.1.4 Žvaigždédara

Molekuliniai debesys pasižymi fraktališka, filamentiška struktūra - šių filamentų tankiuose mazguose vyksta žvaigždédara. Šiuos mazgus formuoja turbulentinis greičių laukas, formuojantis turbulentinį slėgį suspaudžiantį dujas. CMZ yra ypatinga tuo, kad joje slėgis yra eilėmis aukštesnis nei tipinis žvaigždédaros regionams būdingas slėgis galaktikoje siekiantis $P \sim 10^{-9}$ dyn cm⁻² [17]. Be to CMZ pasižymi dideliu vidutiniu tankiu, siekiančiu $\sim 10^4$ m_p cm⁻³; esant tokiam tankiui bei slėgiui galima tikėtis itin sparčios žvaigždédaros.

Pagrindinis kriterijus rodantis ar dujos yra pusiausvyroje - Jeans'o kriterijus nusako kokios temperatūros T ir vidutinio tankio ρ medžiaga negali likti pusiausvyroje. Sferiniam debesiai tai garso greičio c_s ir tankio funkcija

$$M_J = c_s^3 \sqrt{\frac{\pi^3}{G^3 \rho}}. \quad (6)$$

Kadangi garso greitis priklauso pagrinde nuo temperatūros - didesnė dujų, būdinga CMZ temperatūra padidina stabilią masę. Pasiėkus šį kriterijų medžiaga krenta į potencialo duobę, kaista, kol galiausiai pasiekus pakankamą temperatūrą gimsta žvaigždės.

Be Jeans'o kriterijaus žvaigždédarai būtinas ir debesies gravitacinis stabilumas kuris nusako kinetinės ir gravitacinės energijų santykis - virialo parametras

$$\alpha = \frac{5\sigma^2 R}{GM} \quad (7)$$

čia σ yra greičių dispersija. Kinetinei energijai kelis vartus viršijant potencinę MC būdingas išsisklaidymas dėl didelės greičių dispersijos, o santykiui esant mažesniai nei 2, molekulinę debesį galima laikyti atskira stabilia struktūra. Tačiau molekuliniai debesys nėra sferiški jiems būdinga filamentiška struktūra ir dideli turbulentiniai greičiai, todėl šių idealizuotų kriterijų vertės ne visada galioja realioje CMZ.

Nepaisant didelio slėgio, CMZ yra dalinėje hidrodinaminėje pusiausvyroje - žvaigždédara CMZ turėtų vykti panašia sparta kaip ir galaktikos diske [16]. Tačiau CMZ regionas pasižymi stebėtinai maža žvaigždédaros sparta $\sim 0.1 M_\odot \text{ m}^{-1}$, eile mažesnė negu kokios galima tikėtis iš tokios masės dujų rezervuaro. Šis įvertis remiasi žvaigždédaros spartos ir dujų stulpelio masės dėsniu žinomu Šmito-Kenikuto vardu (angl. Schmidt–Kennicutt). Tačiau šis dėsnis nebūtinai galioja esant mažiems masteliams, jauoms žvaigždžių populiacijoms, be to žvaigždédaros įvertis pasižymi didele sklaida dėl erdvinio CMZ kampo įverčio bei skirtingų metodų [18, 19]. Gali būti, kad ši sparta nėra pastovi, o dabartiniai lėti žvaigždédaros tempai tik laikinas sulėtėjimas dėl išorinių veiksnių ar buvusio AGN aktyvumo epizodo.

Kokia CMZ aplinkos žvaigždédaros istorija nėra tiksliai žinoma. Dažniausiai sutinkama pastovios spartos prielaida, bent jau pastaruosius keletą dešimčių mln. m. Esant tokiai spartai per ke-

letą milijardų metų susiformuosiančių žvaigždžių masė atitinka pasklidusio branduolio žvaigždžių spiečiaus (NSC) masę. Tačiau pastovios žvaigždėdaros prielaida nedera su AGN aktyvumo epizodais, be to centrinės galaktikos dalies žvaigždėdara nėra tolygi. Didžioji žvaigždžių dalis susiformavo 8-1 mlrd. m. laikotarpiu, o vėlyvesnysis epizodas pasižymi pliūpsnine žvaigždėdara, kuri pastaruosius ~ 30 mln. m. buvo eile didesnė nei vidutinė sparta CMZ, be to egzistuoja spartėjančios SFR įrodymų [20]. Pastovios žvaigždėdaros scenarijus CMZ yra mažai tikėtinas, o geriau dera pliūpsnine žvaigždėdara.

Nors nėra pakankamai stebėjimų duomenų žvaigždėdaros istorijos ir dinamikos atkūrimui - AGN aktyvumas prieš 5 – 7 mln. m. gali sukurti žvaigždėdaros pliūpsnį CMZ. Šie epizodai gali suformuoti CMZ aplinkoje esančius jaunus spiečius ir pasklidusias jaunas (3-6 mln. m.) žvaigždes.

1.2 Galaktikos aktyvumas

Nors galaktikų aktyvumas būdingas keliems procentams viso jų amžiaus, AGN išspinduliuoja milžiniškus energijos kiekius, palyginamus su rišančiąja galaktikos energija. Ši milžinišką energijos srautą sukuria medžiagos akrecija į SMBH [21, 22]. Spinduliuotė pasižymi rentgeno, UV, radijo, mikrobangų bei gama spindulių perviršu. AGN pagal stebimus spektro linijų plotį, kontinuumo formą skirstomas į grupes - Seyfert I, II, kvazarai, blazarai ir t.t.

Ši stebimą objektų "zoologijos sodą" gerai paaiškina apibendrintas AGN modelis [2]. Jame AGN yra sudarytas iš SMBH, akrecinio disko, neskaidraus dujų toro, čiurkšlių, supančių dujų bei tėkmių. Šių struktūrų plokštumos nebūtinai sutampa su galaktikos disko ar CMZ plokštuma todėl ir stebime tokią objektų gausą, kurią nulemia AGN orientacija galaktikoje ir stebėjimo kampas.

Kaip formuojasi tėkmės ir kokie procesai dominuoja SMBH kaimynystėje nėra vieningo atsakymo, tačiau šio darbo kontekste būdingiems atstumams stebimas savybes gerai paaiškina energija varomų tėkmių modelis. Jame akrecinio disko ar SMBH sukurta spinduliuotė formuoja reliatyvistinį elektringų dalelių vėją kuris sklinda per supančias retas dujas ir suformuoja tėkmes.

1.2.1 Aktyvus galaktikos branduolys

Palyginus su galaktika SMBH masė yra nykstamai maža - tiesioginis gravitacinis poveikis apsiriboja centriniais parsekais. Tačiau $M-\sigma$ (SMBH masės ir baldžo greičių dispersijos) sąryšis rodo, kad grįžtamasis ryšys egzistuoja ir didesniais atstumais [23]. Be to egzistuoja AGN šviesio, tėkmių masės pernašos koreliacija, rodanti AGN poveikį galaktikai galaktikos diską kelių kpc atstumu.

Mūsų galaktikoje atrasta keletas Sgr A* aktyvumo indikatorių - abipus disko stebimi "hiper apvalkalai" [24] ir šiek tiek mažesni, ~ 10 kpc dydžio Fermi burbulai aptikti rentgeno spinduliuose [25]. Abi šios struktūros turi panašias morfologines savybes, o siauras kelių šimtų pc "kaklas" (dviejų plėtėjančių kūgių susijungimo vieta) galaktikos disko plokštumoje rodo, kad jie susiformavo kompaktiškame galaktikos branduolyje. Be šių struktūrų egzistuoja ir mažesnės, kelių šimtų pc dydžio

struktūros išskiriamos rentgeno spinduliuose kurių šalinis yra 50 pc regionas aplink Sgr A* [26]. Šie požymiai rodo, kad šias struktūras suformavo Sgr A* aktyvumas prieš keletą mln. m.

1.2.2 AGN vėjas

AGN aplinkoje gausu elektringųjų dalelių, dalis medžiagos yra jonizuota. Jame aktyvumo metu sukurta akrecinio disko spinduliuotė stumia aplinkines daleles, suformuodama reliatyvistinį ($\sim 0.1 c$) vėją. Tai yra pradinė stadija grįžtamojo ryšio grandinėje, kuri suformuoja galaktines tėkmės. Šis vėjo modelis gerai dera su stebimais tėkmių parametrais [27]. Jis formuojasi 10^{2-4} Schwarzschild'o spindulių atstumu nuo AGN, tankis $\rho \sim 1 - 100 m_p \text{ cm}^{-3}$, o temperatūra $T \sim 10^7 \text{ K}$. Vėjo masės pernaša priklauso nuo AGN šviesio, kurio vertė tipiniam AGN gali siekti Edingtono šviesį [27]. Edingtono šviesiui sugeneruoti reikalingas masės pokytis yra

$$\dot{M}_{\text{BH}} = \frac{L_{\text{Edd}}}{\eta c^2}, \quad (8)$$

kur \dot{M}_{BH} yra masės prieaugis. Edingtono šviesis priklauso praktiškai tik nuo SMBH masės

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi G M \mu c}{\sigma_{\text{Th}}} \simeq 1.26 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ erg s}^{-1}, \quad (9)$$

kur μ , σ_{T} vidutinė dalelės molekulinė masė ir Tompsono sklaidos skerspjūvis. Tačiau vėjas formuojasi ir esant mažesniai spinduliuotės srautui. Akrecijos sugeneruotas spinduliuotės srautas yra proporcingas SMBH masės prieaugiui [28]

$$L_{\text{AGN}} = \frac{\eta_r}{1 - \eta_r} \dot{M}_{\text{BH}} c^2, \quad (10)$$

kur c - šviesos greitis, o η_r - akrecijos efektyvumas. Paukščių Tako atveju $L_{\text{Edd}} = 5,0 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ šviesis sugeneruojamas esant $\sim 0.08 M_{\odot} \text{ m}^{-1}$ akrecijos spartai, esant $\eta = 0.1$ efektyvumui.

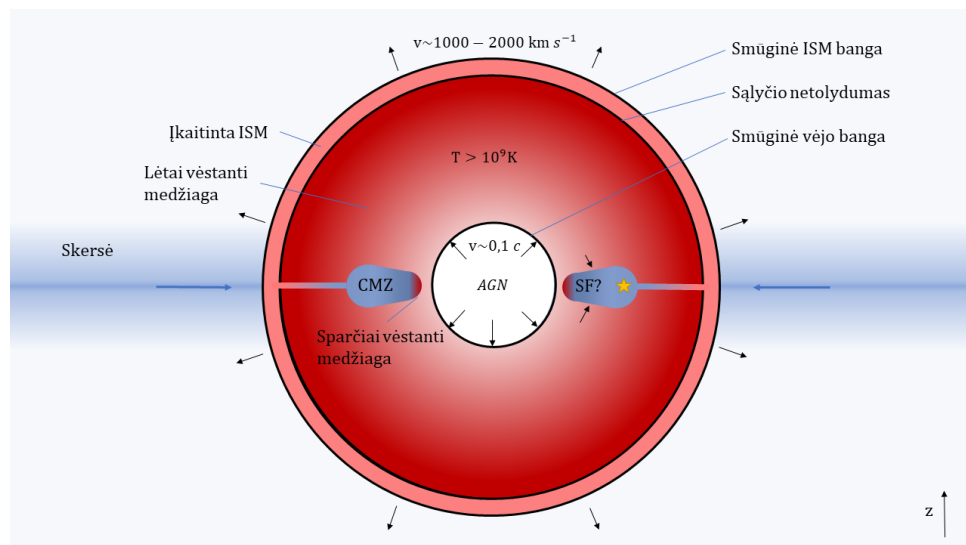
1.2.3 Galaktinės tėkmės

Tėkmės - tai medžiagos srautai iš centrinės galaktikos dalies, kurių greičiai yra didesni nei būdingi turbulentiniai greičiai; aptinkamos nuo stipriai jonizuotų iki dešimčių K molekulių tėkmių. Tėkmės būdingos galaktikoms įvairiose evoliucijos stadijose, jos formuojasi esant galaktikos aktyvumui arba intensyviai žvaigždėdarai.

AGN suformuotų tėkmių evoliucija apima energijos pernašą nuo akrecinio disko iki tarp-galaktinės erdvės. Tėkmių savybės yra žinomos tik joms evoliucionavus, o pradiniai tėkmės formavimosi etapai remiasi teoriniais modeliais. Evoliucionavusios AGN tėkmės formuoja karštas, kelių kpc spindulio ertmes kuriose tankis yra mažas, bet slėgas išlieka aukštas netgi po AGN epizodo pabaigos. Šių struktūrų fizikinės savybės nulemia AGN aktyvumas, periodiškumas, AGN supančių dujų geometrija, baldžo, disko tankio profilis ir kitos savybės [27]. Tėkmės efektyviai formuojasi aktyvumo

metu tačiau jos ir toliau plinta ir nesant aktyvumo požymių. Jos perskirsto medžiagą galaktikoje, formuoja smūginės bangas ją suspaudžia ir kaitina. Parametrų erdvė yra plati, tačiau besiformuojančios struktūros yra universalios formos - susiformuoja plintantys karštų dujų burbulai.

Tėkmės formavimasi bei plitimą retoje homogeniškoje aplinkoje aprašo pusiau analitinis modelis, kuriame akrecijos spinduliuotė suformuoja reliatyvistinį dalelių vėją [23,27]. Išskiriami keli vėjo energijos perdavimo ISM dujoms mechanizmai - tėkmės yra varomos judesio kiekio arba besiplečiančio dujų burbulo vidinės energijos. Šią skirtumą nulemia smūginėje bangoje įkaitusio vėjo vėsimo efektyvumas. Retose dujose, pavyzdžiui hale, AGN vėjas smūgiuoja į stacionarią medžiagą suformuodamas smūginės bangas ir sąlyčio netolydumus (paveikslas 2). Galaktines tėkmes suformuoja adiabatiškai besiplečiantis dujų burbulas, kuriame smūginėje bangoje įkaitęs vėjas vėsta neefektyviai. Priešingai vėjui sąveikaujant su tankiomis dujomis (pvz. CMZ), ši medžiaga vėsta sparčiai, formuojasi temperatūros gradientai, ši zona susispaudžia.



2 pav. AGN suformuoto vėjo ir ISM sąveikos schema. SMBH formuoja vėją, kuris kaip ir ISM įkaista smūginėje bangoje. Energija varomose tėkmėse vėjo vėsimas neefektyvus, plečiasi adiabatiškai. Slėgis susiformavusiame burbule išlieka aukštas ir suspaudžia CMZ galbūt paspartindamas žvaigždėdarą. Zonų mastelis neišlaikytas, spalva rodo apytikslę temperatūrą ir jos gradientus.

Tėkmei sklindant centriniuose galaktikų parsekuose yra gausu ne tik pasklidusių bet ir tankių dujų. Medžiaga pasiskirsčiusi nehomogeniškai, tėkmes kolimuoja supanti medžiaga kuri formuoja kūgišką struktūrą. AGN aktyvumas pašalina dujas iš centrinių parsekų, o toliau esančių dujų likimas priklauso nuo tėkmės ir dujų tankių santykių.

1.2.4 Tėkmė poveikis supančioms dujoms

Ilgalaikis galaktikos aktyvumas mažo tankio dujas iš galaktikų baldžo pašalina, sumažėja bendra dujų rezervuaro masė iš kurios gali formuotis žvaigždės. Tačiau plintanti tėkmė tankesnes dujas gali ir suspausti, tai paspartinti jau vykstančią žvaigždėdarą arba ją inicijuoti [7]. Tėkmės slėgis priklaus-

so nuo AGN aktyvumo, tėkmės bei ISM savybių, žvaigždėdaros spartinimas gali būti būdingas tik siauram radialiniam regionui [8].

CMZ egzistuoja dalinė pusiausvyra, jai būdinga dvifazės medžiagos būseną - šaltos ir šiltos dujos yra hidrodinaminėje pusiausvyroje. Energija varomos tėkmės suformuoja trečiąją karštą fazę, padidina ISM slėgi keliomis eilėmis retose dujose - AGN aktyvumas formuoja didesnio slėgio burbulą kurį vis papildo AGN aktyvumo epizodai. Esant ašinei simetrijai ir pakankamam supančios medžiagos tankiui, AGN tėkmės suformuoti slėgiai sąlyčio netolydume ir smūginėje bangoje įkaitintoje ISM yra [7]

$$P_{cd} = \frac{1}{4\pi R^2} \left[\frac{d}{dt} (M\dot{R}) + \frac{GM(M_b + M/2)}{R^2} \right], \quad (11)$$

$$P_{out} = \frac{4}{3} \rho_{amb} \dot{R}^2 \simeq \frac{3}{8} P_{cd}. \quad (12)$$

Šiose lygtyse "cd" - sąlyčio netolydumas, o "out" - smūginėje bangoje įkaitinta ISM, M yra masė esanti spinduliu R nuo AGN. Tėkmės slėgi ($10^{-11} - 10^{-8}$) dyn cm^{-2} nulemia dujų masė, bei pernašos sparta, tačiau detalesni skaitiniai modeliai tiriantys t kmių formavimąsi ir plitimą per netolygiai pasiskirsčiusį diską atskleidžia AGN poveikio diskui įvairovę [29]. Sąveika su CMZ yra sudėtingesnė, joje esančių dujų slėgis yra palyginamas su tėkmės slėgiu, be to šios dujos yra ekranuojamos išorinių CMZ sluoksnių todėl tėkmės sukeltas slėgis nebūtinai yra žymus.

Yra parodyta, kad greitos ($> 500 \text{ km s}^{-1}$) tėkmės individualius molekulinis debesis suardo [30]. Taip pat yra parodyta, kad lėtos karštos tėkmės gali inicijuoti žvaigždėdarą esant pakankamam tėkmės tankiui - slėgiui išliekant aukštam pakankamai ilgą laiką, medžiaga spėja atvėsti ir gali paspartėti žvaigždėdara [7, 31, 32]. Tačiau CMZ pasižymi eile didesniais vidutiniais tankiais ir turbulentinis greičiais, sudėtinga geometrija, todėl kompiuterinis modeliavimas įgalina tiksliau įvertinti t kmių poveikį CMZ regionui.

2 Metodai

2.1 SPH metodas

Astrofizikinių uždavinių skaitmeninis sprendimas pagrįstas tolygios medžiagos diskretizavimu ir sąveikų tarp šių elementų skaičiavimu. Šiame darbe diskretizavimui pasirinktas išskleistų dalelių metodas - SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) [33]. Jis remiasi Lagranžo formalizmu - sąveika vyksta tarp diskrečių medžiagos elementų, kurių Lagranžianas yra

$$L(\mathbf{q}, \mathbf{q}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i \mathbf{r}_i^2 - \sum_{i=1}^N m_i u_i. \quad (13)$$

Diskretieji elementai tai sferinės simetrijos objektai, turintys tolygų tankio profilį, kurį aprašo branduolio išskleidimo funkcija $W(\mathbf{r}, h)$. Šiame darbe panaudota Wendland C2 funkcija [34] su fiksuotu kaimynių skaičiumi (100)

$$W(\mathbf{r}, h) = \begin{cases} \frac{21}{2\pi h^3} \left(1 - \frac{\mathbf{r}}{h}\right)^4 \left(4\frac{\mathbf{r}}{h} + 1\right), & \text{kai } 0 \leq \mathbf{r} \leq h \\ 0, & \text{kai } \mathbf{r} > h \end{cases}, \quad (14)$$

čia pirmasis narys yra normalizavimo konstanta, o išskleidimo ilgis h nusako maksimalų sąveikos su kitomis dalelėmis atstumą. Išskleidimo funkcija yra normuota, tolydi, turinti tolydžias išvestines. Skaitinių resursų taupymui ji nėra begalinė, pasižymi kompaktiškumu - $W = 0$, kai $r > h$.

Diskrečiomis dalelėmis aproksimuoto lauko vertė įvertinama sumuojant persiklojančių SPH dalelių įnašą. Pavyzdžiui lauko $X(\mathbf{r})$ aproksimacija gaunama susumavus SPH dalelių, nutolusių atstumu, mažesniu už išskleidimo ilgį įnašą

$$X(\mathbf{r}) \approx \sum_{i=1}^N m_i \frac{X_i}{\rho_i} W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i, h), \quad (15)$$

kur m_i , ρ_i , X_i yra SPH dalelės masė, tankis bei lauko vertė. Šioje lygtyje naudojami dalelių tankiai kurie yra atvirkščiai proporcingi išskleidimo ilgiui ir juos sieja masės tvermės sąryšis

$$\rho_i = \frac{3m_i}{4\pi h_i^3}. \quad (16)$$

Šiame darbe naudojama SPHS modifikacija [35] kurios apibendrinta dinamikos lygčių forma yra

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} [A_i \rho_i^\gamma + A_j \rho_j^\gamma] \nabla_i [W_{ij}(h_i) + W_{ij}(h_j)] \quad (17)$$

čia W_{ij} , A , ρ , γ branduolio skleidimo funkcija, entropija, tankis bei adiabatinis indeksas. Ši formulė turi gerą skaitmeninį stabilumą ir užtikrina energijos, entropijos, judesio kiekio verčių tver-

mę ir gerai tinka darbe nagrinėjama sistemai modeliuoti. Darbe naudojamas hibridinis SPH/N-kūnų kodas GADGET 3, modeliuojama dujų hidrodinamika, gravitacinė sąveika, šiluminiai procesai ir žvaigždėdara.

2.2 Grįžtamasis AGN ryšys

Grįžtamojo ryšio skaičiavimui naudojama erdvinė gardelė - kuri papildo SPH metodą ir leidžia sparčiai skaičiuoti judesio kiekio ir energijos pernašą dujoms. Skirtingai nei SPH, šis metodas remiasi Oilerio formuluote, kurioje modeliuojamas laukas yra perduodamas į kaimynines ląsteles, o gardelė yra statiška. Grįžtamasis AGN ryšys tai AGN vėjas kurio radialinis greitis nuo SMBH yra $v_{\text{wind}} \sim 0.1c$, vertė būdinga AGN formuojamam dalelių vėjui [36, 37].

Šiame darbe naudojamas modernus modifikuotos sferinis stačiakampis vienodo ploto gardelės metodas SREAG [38]. Ši gardelė pasižymi vienodo erdvinio kampo elementais sferinės simetrijos apvaskale užtikrinanti skaitmeninį stabilumą polių ir centriniuose gardelės regionuose.

Gardelė sudaryta iš koncentrinų sferinių apvaskalų, kurių kiekviena ląstelė apima fiksuotą erdvės dalį. SPH dalelės priskiriamos ląstelei nustatant jos atstumą nuo ląstelės centro, o ląstelėje esanti masė yra visų šių dalelių įnašų suma

$$M_{\text{cell}} = \sum_i M_i = \frac{4}{3} \pi h_i^3 m_i W_{i-\text{cell}}, \quad (18)$$

kur M_{cell} yra bendra ląstelės skaitinis svoris ir M_i yra i -tosios dalelės įnašas į jį, m_i - SPH dalelės masė, o branduolio funkcijos vertė ląstelės centre yra $W_{i-\text{cell}}$.

Dalelei tenkantis grįžtamojo ryšio kiekis yra įvertinamas pagal jos svorio įnašą į bendrą sumą. Pvz energijos atveju:

$$E_i = \sum_{\text{cell}} E_{\text{cell}} \frac{M_i}{M_{\text{cell}}}, \quad (19)$$

kur E_{cell} yra vėjo energijos kiekis esantis ląstelėje, o E_i ląstelei perduodama energijos dalis. Analogiška procedūra atliekama ir judesio kiekio atveju.

2.3 Turbulencija

Statistinis nespūdzios medžiagos turbulentinių judesių aprašymas, vadinamas Kolmogorovo turbulencijos formuluote. Joje galioja izotropiškumo, homogeniškumo, medžiagos nespūdumo ($\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$) prielaidos. Ši teorija susieja turbulentišką greičių lauką, klampą ir susiformuojančių struktūrų fizikinius parametrus. Didelius sūkurius formuoja išoriniai veiksniai (SN, tėkmė), o maži sūkuriai disipuoja.

Esant pasikartojančioms erdvinėms struktūroms, patogiau sistemą nagrinėti Furjė erdvėje. Sūkuriai turi būdingą dydį kuriems tenkanti kinetinė energija - integralas k erdvės tūryje (1D atveju)

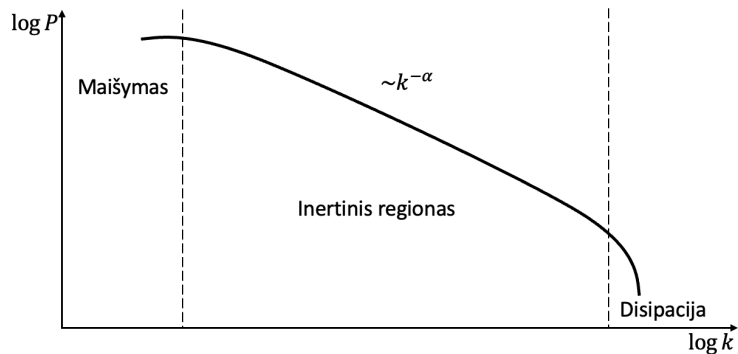
$$E' = \int_{k_1}^{k_2} E(k) dk \quad (20)$$

kur $E(k)$ energijos spektras Furjė erdvėje, E' energijos kiekis k rėžyje.

Turbulencijai esant pusiausvyroje būklėje be disipacijos egzistuoja ir jos formavimas - jis vyksta dideliuose sūkuriuose, kuriuos nulemia astrofizikiniai procesai. Įdomiausias sūkurių ruožas, kuriame disipacijos įtaka yra maža vadinamas inertiniu (Paveikslas 3). Šiame regione galios spektras priklauso tik nuo k . Jame kinetinės energijos pasiskirstymą trimatėje k erdvėje apibūdina galios spektras, kuris nespūdžios Kolmogorovo turbulencijos atveju yra:

$$P_v(k) \equiv \langle |v_k|^2 \rangle \propto k^{-11/3}, \quad (21)$$

kur P_v yra galios spektas, o $\langle |v_k|^2 \rangle$ būdingo greičio kvadrato vidurkis. Ši priklausomybė vadinama Komlogorovo galios spektru. Būdingų regionų grafikas pateikiamas paveiksle 3.



3 pav. Turbulentinės kinetinės energijos P pasiskirstymas Furjė erdvėje. Išskiriami trys regionai. Medžiagos maišymas, vyksta mažuose k , realioje erdvėje tai atitiktų mastelius palyginamus su debesies dydžiu. Inertiniame regione vyksta energijos pernaša iš didelių sūkurių į mažus. Energijos pasiskirstymą šiame regione aprašo parametras α . Dešinėje esantis disipacinis regionas- jam mažiausių sūkurių energija dėl klamos virsta dujų vidine energija.

Pakankamai glodų vektorinį turbulentinių greičių lauką galima suformuoti ir išskaidyti į solenoidinį ir spaudžiamąjį (bedivergencinį)

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_\perp + \mathbf{V}_\parallel = -\nabla \cdot \Phi + \nabla \times \mathbf{A}. \quad (22)$$

Nespūdus vektorinis laukas generuojamas iš potencialo \mathbf{A} . Paprasčiausia tą atlikti k erdvėje, joje turbulentinio greičių lauko komponentų vidutinis galios spektras yra

$$\langle |\mathbf{A}_k|^2 \rangle \propto k^{-17/3}. \quad (23)$$

Kadangi Furjė erdvėje lauko vertės yra kompleksinės, be absoliučios vertės sugeneruojama ir fazė

(kompleksinė dalis). Apibendrinus turbulentinis greičių laukas generuojamas iš vektorinio potencialo \mathbf{A}_k kurio absoliučias vertes aprašo lygtis 23, k_x, k_y, k_z parenkami atsitiktinai iš Reilėjaus skirstinio, o fazės paskirstomos tolygiai erdviniame kampe nuo 0 iki 2π . Taip sugeneruotas laukas yra nespūdas, o skirtingų tipų turbulencija suformuojama naudojant projekcijos operatorių Furjė erdvėje (k erdvėje) [39, 40]

$$V_{ij}^\zeta(k) = \zeta V_{ij}^\parallel + (1 - \zeta) V_{ij}^\perp = \zeta \delta_{ij} + (1 - 2\zeta) \frac{k_i k_j}{|k|^2}. \quad (24)$$

Kur \mathbf{V} vektorinis laukas, kurio indeksai i, j - komponentų indeksai. Ši lygtis analogiška lygčiai 22, vektorinio lauko komponentai gali būti suformuoti iš ortogonalinių vektorinių laukų. Laukų santykis keičiamas parametru $\zeta \in [0 - 1]$ nusakančiu lauko tipą. Parinkus $\zeta = 0$ laukas yra spaudžiamasis, o $\zeta = 1$ - solenoidinis. Šiame darbe naudojama nespūdi turbulencija.

Greičių laukas realioje erdvėje gaunamas atlikus atvirkštinę suformuoto vektorinio potencialo \mathbf{A}_k Furjė transformaciją. Greičių lauko komponentai (v_x, v_y, v_z) - šios transformacijos realioji dalis. Skaičiavimams naudojama diskrečioji Furjė transformacija. Greičių lauko vertės (k ir realioje erdvėje) skaičiuojamos ant tolygiai išsidėsčiusios gardelės mazgų. Šiame darbe naudojama 512^3 taškų gardelė. Parinkta skyra yra didesnė nei modeliuojamos sistemos elementų dydis. Pavienių SPH dalelių greičiai gaunami tiesiškai interpoliuojant mazguose apskaičiuotas turbulentiško greičio vertes.

Skaitmeniniuose modeliuose mažiausių sūkurių formavimąsi dirbtinai slopina modeliuojamos sistemos baigtinis dalelių dydis. Būdingas realių turbulentinių struktūrų mažiausias dydis yra keliomis eilėmis mažesnis nei išskleidimo ilgis ($\ll 10$ pc), o didžiausi sūkuriai, yra palyginami su debesies dydžiu. Didesniems sūkuriams būdingas ilgesnis dinaminis laikas - laikas reikalingas būdingu greičiu nukeliauti debesies skersmeniui lygų atstumą

$$t_{\text{dyn}} = \frac{R_{\text{typ}}}{v_{\text{turb}}} \simeq 1 \left(\frac{R_{\text{typ}}}{pc} \right) \left(\frac{v}{\text{km s}^{-1}} \right)^{-1} \text{Myr}. \quad (25)$$

Šis laikas yra palyginamas su skaitmeninių efektų nulemtu turbulencijos gesimo laiku ir yra dešimčių mln. m. metų eilės supančių SMBH foninių dujų atveju todėl jo galima nepaisyti. Kompaktiškesniuose CMZ regionuose dinaminis laikas yra mln. m. tačiau yra pastoviai žadinamas įtekančios medžiagos bei šlyties, todėl gesimo įtaka yra mažai reikšminga.

2.4 Šiluminiai procesai

Tam tikros temperatūros medžiaga spinduliuoja fotonus kurių spinduliuotės dažninį pasiskirstymą apibūdina spektrinės energijos pasiskirstymo funkcija (SED). Medžiagai esant termodinaminėje pusiausvyroje tai Planko funkcija

$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1}. \quad (26)$$

Dalelių greičius aprašo Maksvelo-Boltzmano skirstinys

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} 4\pi v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right), \quad (27)$$

o Saha lygtis leidžia įvertinti energetinių lygmenų užimtumą.

$$\frac{n_{i+1}n_e}{n_i} = \frac{2}{n_e} \frac{g_{i+1}}{g_i} \left(\frac{2\pi m_e k_B T}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{\epsilon_{i+1} - \epsilon_i}{k_B T}\right]. \quad (28)$$

Tačiau tarpžvaigždinė terpė yra dinamiška ir šie skirstiniai negalioja. Supančiai medžiagai esant skirtingos temperatūros sistema nėra pusiausvyroje būklėje, tačiau kinta lėtai ir nuokrypiai nuo minėtų skirstinių nedideli - ši būklė tai lokali termodinaminė pusiausvyra (LTE). Esant intensyviai AGN spinduliuotei nebegalima taikyti netgi LTE prielaidų - reliatyvistinis vėjas ir jo smūginiai frontai nėra smūginėje pusiausvyroje; susiformuoja dvitemperatūre plazma kurioje protonai ir elektronai yra drastiškai skirtingų temperatūrų.

Daugiatemperatūres plazmos ir pilnos spindulinės pernašos modeliavimas yra bene daugiausiai skaitmeninių resursų reikalaujantis procesas. Alternatyvus metodas yra vietoje tiesioginės pilnos spinduliuotės pernašos, fiksuoti medžiagos dalelių greičių skirstinį (kinetinę temperatūrą) ir apskaičiuoti šiai medžiagai būdingus šiluminius mainus esant pasirinktam spinduliuotės laukui. Šioms vertėms pritaikius analitinę išraišką gaunama vėsimo funkcija, įgalinanti spartų spindulinio vėsimo įvertį nmodeliuojant pilnos spindulinės pernašos.

2.4.1 Vėsimo funkcija

Darbe naudojama vėsimo funkcija kuri priklauso nuo tankio, temperatūros ir jonizacinio parametro. Medžiagos sudėtis, bei vidutinė dalelės molekulinė masė yra fiksuota, naudojama standartinė Saulės aplinkos vertė [41]. Medžiaga yra skaidi ir chemiškai stabili - nekinta molekulių, atomų santykiai, o adiabatinio indekso vertė $\gamma = 5/3$.

Vėsioms dujoms ($< 10^4$ K) naudojama vėsimo funkcija [42]. Į šią funkcija įtraukti pagrindiniai vėsioms dujos būdingi šiluminiai procesai [43] užtikrina platų taikymo temperatūrų intervalą. Bendras energijos pokytis yra [42]

$$\rho_n \mathcal{L} = n_n (-\Gamma + n_n \Lambda) \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}. \quad (29)$$

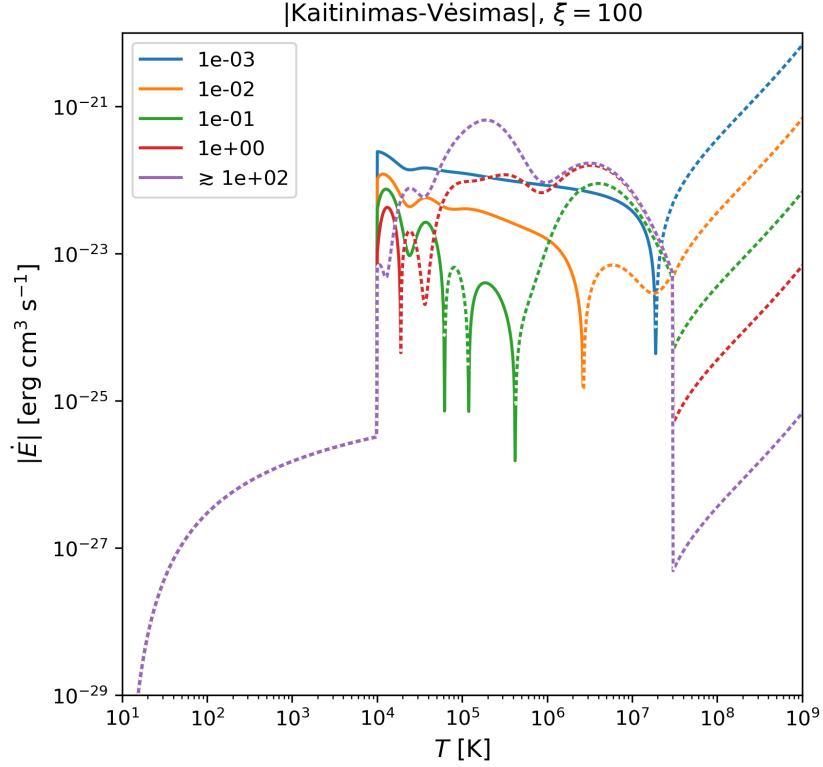
Kaitinimo ir vėsimo spartos atitinkamai

$$\Gamma = 2 \times 10^{-26} \text{ erg s}^{-1}, \quad (30)$$

$$\Lambda = 2 \times 10^{-19} \exp\left(\frac{-118400}{T+1000}\right) + 2.8 \times 10^{-28} \sqrt{T} \exp\left(\frac{-92}{T}\right) \text{ erg s}^{-1}. \quad (31)$$

Tokia šiluminių procesų aproksimacija yra skaitmeniškai stabili, gerai tinkama žemų, dešimčių K

temperatūrų būdingų žvaigždes formuosiančių dujų regionams.



4 pav. Absoliučios vėsimo funkcijos vertės kai jonizacinis parametras $\xi = 100$. Spalva rodo dalelių koncentraciją. Ištininės kreivės rodo medžiagos kaitimo intervalus, o brūkšninės - vėsimo. Iki 10^4 K temperatūros kreivės persikloja, jų vėsimas nepriklauso nuo jonizacinio parametro. Žemyn nukreiptos smailės tai medžiagos stabilumo regionai - medžiaga evoliucionuoja adiabatiškai.

Karštesnėms nei 10^4 K dujoms naudojama vėsimo funkcija kuri priklauso ne tik nuo tankio, temperatūros bet ir jonizacinio parametro [44]. Šis parametras nusako jonizuojančios spinduliuotės srautą tenkantį dalelei

$$\xi = \frac{L_{\text{bol}}}{nr^2} \quad (32)$$

kur L_{bol} yra bolometrinis SMBH šviesis, r atstumas iki AGN. Energijos pokytis

$$\dot{E} = \begin{cases} n^2(S_1 + S_2 + S_3), & \text{kai } 10^4 \leq T \leq 3 \times 10^7 \text{ K} \\ n^2(S_1 + S_2), & \text{kai } T > 3 \times 10^7 \text{ K} \end{cases}, \quad (33)$$

Vėsimo funkcijos koeficientai $S_i(T, \xi(R))$ pateikti priede 4.3.

2.5 Žvaigždėdara

Žvaigždėdara - SPH dalelių pavertimas tik gravitaciškai sąveikaujančiomis žvaigždinėmis dalelėmis atliekamas naudojant tankio ir Jeans'o stabilumo kriterijų, kurio skaitinė vertė yra

$$\rho_J = \left(\frac{\pi k_B T}{\mu m_p G} \right)^3 m^{-3} \simeq 1.5 \times 10^{-12} \left(\frac{T}{1000 \text{ K}} \right)^4 \text{ g cm}^{-3}, \quad (34)$$

kur m dujų regiono masė bei temperatūra. Sparta modeliuojama stochastiškai, naudojant žvaigždėdaros efektyvumą. Esant pakankamai dideliame tankiui $> 10^6 \text{ m}_p \text{ cm}^{-3}$ ir atitinkant Jeans' o kriterijų, dalis dujų virsta žvaigždėmis. Žvaigždėdaros spartą riboja SPH dalelės virtimo žvaigždine tikimybė

$$P_{\text{SF}} = 1 - \exp\left(-\eta \frac{t}{t_{\text{dyn}}}\right), \quad (35)$$

čia η žvaigždėdaros efektyvumas, o t, t_{dyn} laiko tarpas bei dinaminis laikas. Darbe naudojamas žvaigždėdaros efektyvumas CMZ yra mažesnis nei būdingas disko žvaigždėdaros regionams, jo vertė yra $\eta = 0,05$.

2.6 Pradinės sąlygos

Skaitmeniniame modeliavime balansuojama skiriamąja geba, skaitmeniniu tikslumu bei turimais resursais. Jų parinkimas tai kompromisas; pastaraisiais metais prisideda ir tvarumo įvertis susijęs su klimato kaitos ir energijos resursų tikslingu panaudojimu. Šiame darbe siekta balanso ir pasirinkta mažiausia pakankama skyra modeliuojamiems procesams galaktikos centrinėje dalyje išskirti. Skyros viršutinę ribą lemia būdingi staigūs tankio šuoliai bei greičio, energijos gradientai.

Pradinės sąlygos suformuotos naudojant WVTIC programinį paketą [45]. Šis paketas įgalina suformuoti pradines sąlygas naudojant SPH diskretizavimo metodą, todėl nesukuria dirbtinių smūginių bangų kurios gali iškreipti modeliuojamos sistemos evoliuciją. SPH dalelės masė nekinta $\sim 228 M_\odot$, kiekvienas modelis sudarytas iš $\sim 1\,000\,000$ dalelių, CMZ, srautui ir pasklidusiai medžiagai tenka $\sim 500\,000; \sim 200\,000; \sim 300\,000$; atitinkamai dalelių. Sistemos centre patalpinta stacionari SMBH kurios masė artima Sgr A* masei - $4 \times 10^6 M_\odot$. SMBH supa $\sim 80 \text{ pc}$ spindulio tuščia erdvė. Ši sistemos dalis yra sparčiai užpildoma pasklidusia turbulentiška medžiaga. Šios sferos pakrašyje suformuojama CMZ, kūgiško toro formos turbulentiška struktūra kurios pradinė koncentracija yra $10^3 \text{ m}_p \text{ cm}^{-3}$. CMZ forma - toras su nesimetriniu skerspjūviu 1, kurio storis yra 20 – 30 pc, išorinė CMZ riba yra 160 pc atstumu nuo Sgr A*. Masė artima Galaktikos centrinei molekulinei zonai $5 \times 10^7 M_\odot$. Pradinė temperatūra - 1000 K, būdinga $10^3 \text{ m}_p \text{ cm}^{-3}$ medžiagai esančiai kelių šimtų pc nuo Galaktikos centro.

CMZ maitinama skersės potencialo suformuotais cilindriniais srautais susijungiančiais liestine su CMZ žiedu. Srautas įsiliejimo greiti yra 100 km s^{-1} didesnis nei CMZ dujų orbitinis greitis. Masės pernaša skerse yra artima dabartinei PT skerse transportuojamai medžiagos masei $\sim 3 M_\odot$, vidutinė koncentracija mažesnė nei CMZ - $10^2 \text{ m}_p \text{ cm}^{-3}$. Šios struktūros patalpinta į mažo tankio izotermine turbulentiškę sferą kurios tankis 1 kpc atstumu yra $10 \text{ m}_p \text{ cm}^{-3}$.

Minėtoms struktūroms suteikti pradiniai turbulentiniai greičiai būdingi PT centriniam regionui. Izoterminei sferai parinktas 40 km s^{-1} vidutinis greitis, CMZ bei į ją įtekančiai medžiagai - 20 km s^{-1} . Dėl besiskiriančių turbulencijų žadinančių mastelių turbulencija generuojama skirtinguose atvirkš-

tinio bangos ilgio režiuose. Izoterminei sferai $k_{\min} = 2\pi$, likusiai medžiagai $k_{\min} = 128\pi$, tai atitinka ~ 1 kpc ir 15 pc.

AGN aktyvumas suformuojamas dirbtinai SMBH suteikiant būdingą šviesį. Modeliuojama 3 sistemos kuriose šviesis - 0,0; 0,5; 1,0 Edingtono šviesio.

2.7 Statistiniai metodai

Modeliavimas astronomijoje sulaukia kritikos dėl rezultatų gaunamų iš vieno modelio, ar tai būtų Visatos modelis kuriame tiriamos galaktikų imtys ar didesnės skyros dujų sąveika. Šiame darbe pasirinkta sumažinti modelio skyrą ir skaičiavimo resursus skirti keletu sistemų besiskiriančių tik procesų stochastiškumu modeliavimui. Kiekvienam AGN šviesiui modeliuojama po 3 sistemas, kurios skiriasi atsitiktine turbulentinio lauko kryptimi. Tankio žemėlapiuose naudojamas tik vienas iš modelių, o žvaigždėdaros spartos ar kitų dydžių įvertinimui naudojamas vidurkis.

Daroma prielaida, kad matavimo duomenys (pvz.: SFR tam tikru laiko momentu) yra pasiskirstę pagal Gauso skirstinį, kurių dispersija yra vienoda tarp skirtingų modelių. Atliekant matavimą - gautami 3 skaičiai, kuriems parinkus patikimumo lygį įvertinamas tikrojo vidurkio nuokrypio tikimybė nuo išmatuoto vidurkio

$$\bar{X} = \bar{X}_n \pm t_{\alpha, n-1} \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \quad (36)$$

kur \bar{X}_n tai išmatuotas imties vidurkis, $t_{\alpha, n-1}$ Stjudent'o koeficientas, kuris priklauso nuo pasikliautinio intervalo ir laisvės laipsnių skaičiaus. Šiame darbe naudojamas dvipusė t vertė ir 90 % pasikliautinis intervalas. Tiesinei regresijai panaudotas Markovo grandinių Monte Karlo metodas [46].

3 Rezultatai

Pirma trumpai apžvelgsiu tiriamas sistemas; tiriamas centrinis galaktikos kpc, galaktikos sąvybės artimos PT galaktikai. Iš viso modeliuojamos 3×3 sistemos, trejetas skirtingų AGN šviesių $0,0; 0,5; 1,0$; L_{Edd} , bei po tris modelius kiekvienam šviesiui besiskiriančius atsitiktiniu turbulentinių greičių lauku. Aktyvumo epizodas trunka 1 mln. m., kuris prasideda praėjus 1,4 mln. m. nuo modeliavimo pradžios. Aktyvumo epizodo metu aplinkinė medžiaga yra kaitinama AGN spinduliuotės, formuojasi tėkmės, kurios plinta per CMZ bei jos aplinką. Po aktyvumo epizodo pabaigos sistema evoliucionuoja dar ~ 2 mln. m. ir modeliavimas sustabdomas. Darbo tikslas ištirti galaktikos aktyvumo poveikį žvaigždėdarai CMZ aplinkoje.

Nors modeliavimui pasirinkta PT galaktika, šie rezultatai pritaikomi ir kitoms su masyvesne SMBH; pagrindinis AGN šviesio kriterijus yra SMBH maitinimo sparta. Rezultatų apžvalgą suskirsčiau į skyrius - pirmajame aptarsiu morfologiją esant skirtingiems AGN šviesiams; antrasis skirtas dujų srautų ir jų būvio analizei; trečiajame aptariama žvaigždėdara.

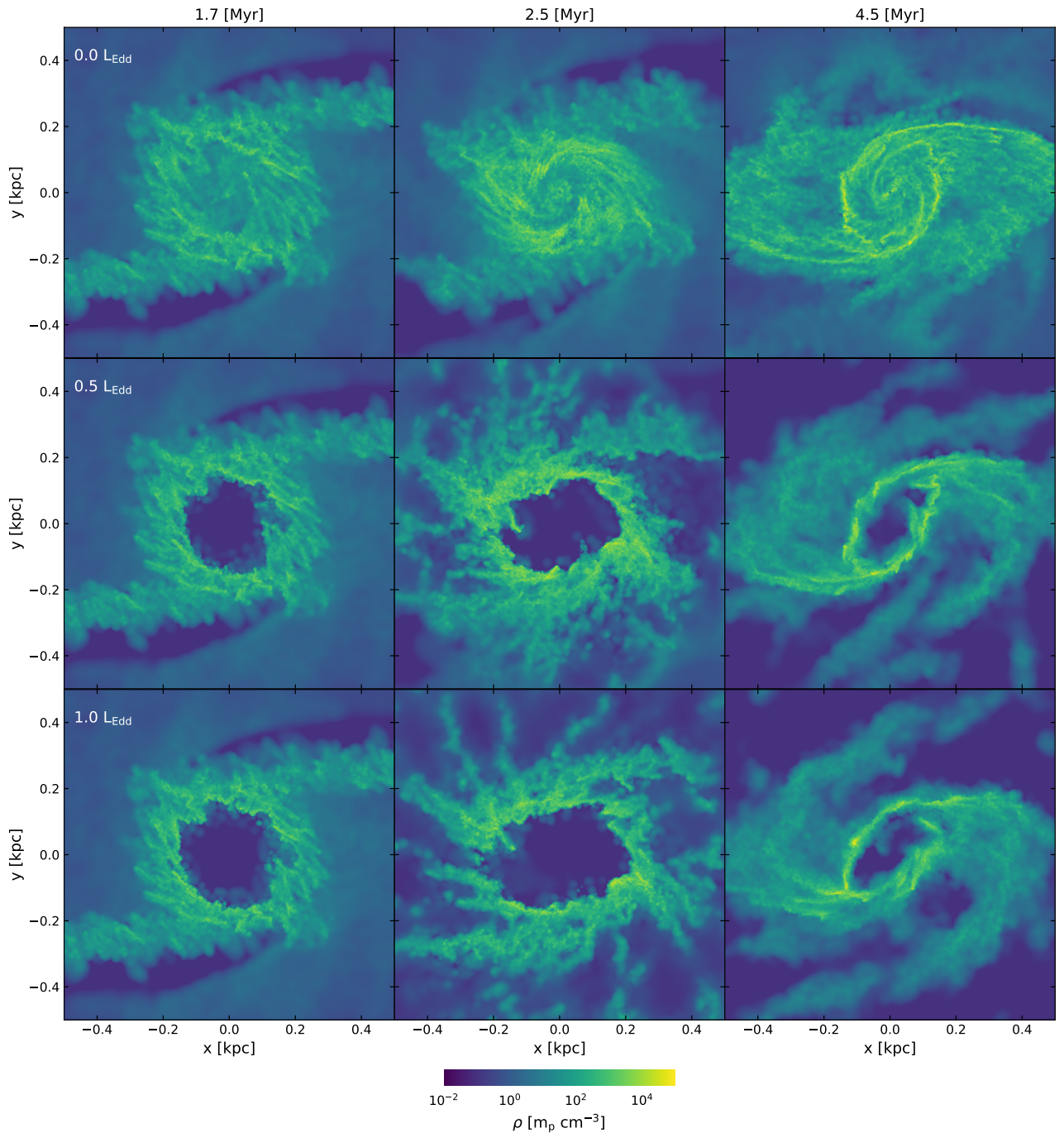
3.1 Morfologija

Sistemų evoliucija (tankio žemėlapiai) pateikti paveiksluose 5, 6. Skerse vyksta dujų transportas kuris papildo CMZ, šis srautas pradžioje yra $3,0 M_{\odot} \text{ m}^{-1}$ po kelių mln. m. sumažėja iki $\sim 1,0 M_{\odot} \text{ m}^{-1}$. Ši skerse judanti medžiaga susilieja su CMZ $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ greičiu. Keli procentai įtekančios masės pralenkia CMZ ir susijungia su įtekančiu medžiagos srautu priešingoje skersės pusėje.

Nesant AGN susiformavusi CMZ yra dešimčių pc storio disko formos turinti tankio maksimumus SMBH aplinkoje bei ~ 200 pc atstumu. Disko medžiaga pasiskirsčiusios tolygiai, mažiausias tankis yra $\sim 10^2 m_p \text{ cm}^{-3}$. Centrinuose 50 pc susikaupusi medžiaga sudaro $\sim 5\%$ visos CMZ masės, čia būdingas vidutinis tankis mažesnis nei CMZ - $10^3 m_p \text{ cm}^{-3}$. Evoliucijos pabaigoje susiformuoja dešimčių pc mini skersės ir spiralinės vijos kuriomis dujos patenka į SMBH aplinką. CMZ žiedas yra elipsės formos ($e \simeq 0,9$), medžiaga iš skersės į ją patenka per pagrindines elipsės viršūnes.

AGN epizodo metu, iš centrinės CMZ dalies visos dujos yra pašalinamos per keliasdešimt tūkstančių metų nuo aktyvumo pradžios. Supanti mažo tankio, atominė, jonizuota medžiaga išstumtama, formuoja tėkmes, o CMZ vidinis spindulys padidėja iki ~ 250 pc. Pasibaigus aktyvumo epizodui ($t \sim 2.5$ mln. m.) centriniai ~ 200 pc turi nykstantai mažai dujų; pakinta CMZ elipsiškumas - pagrindinė elipsės ašis sutampa su pagrindine skersės ašimi. Iš CMZ išstumtą medžiagą AGN suformuota tėkmė suspaudžia, ši medžiaga su daro kelių laipsnių kampą su disko plokštuma (paveikslas 6). Veikiant Koriolio jėgai formuojasi radialiniai išlenkti filamentai, kurie veikiant potencialui papildo įtekančią medžiagos srautą skersėje. Tėkmės pašalina tik mažo tankio ($\leq 10 m_p \text{ cm}^{-3}$) dujas; didesnio tankio atomines, molekulinės dujas tėkmės maišo ir kaitina, šiai tankiai medžiagai perduotas judesio kiekis yra nepakankamas jų išmetimui iš CMZ aplinkos.

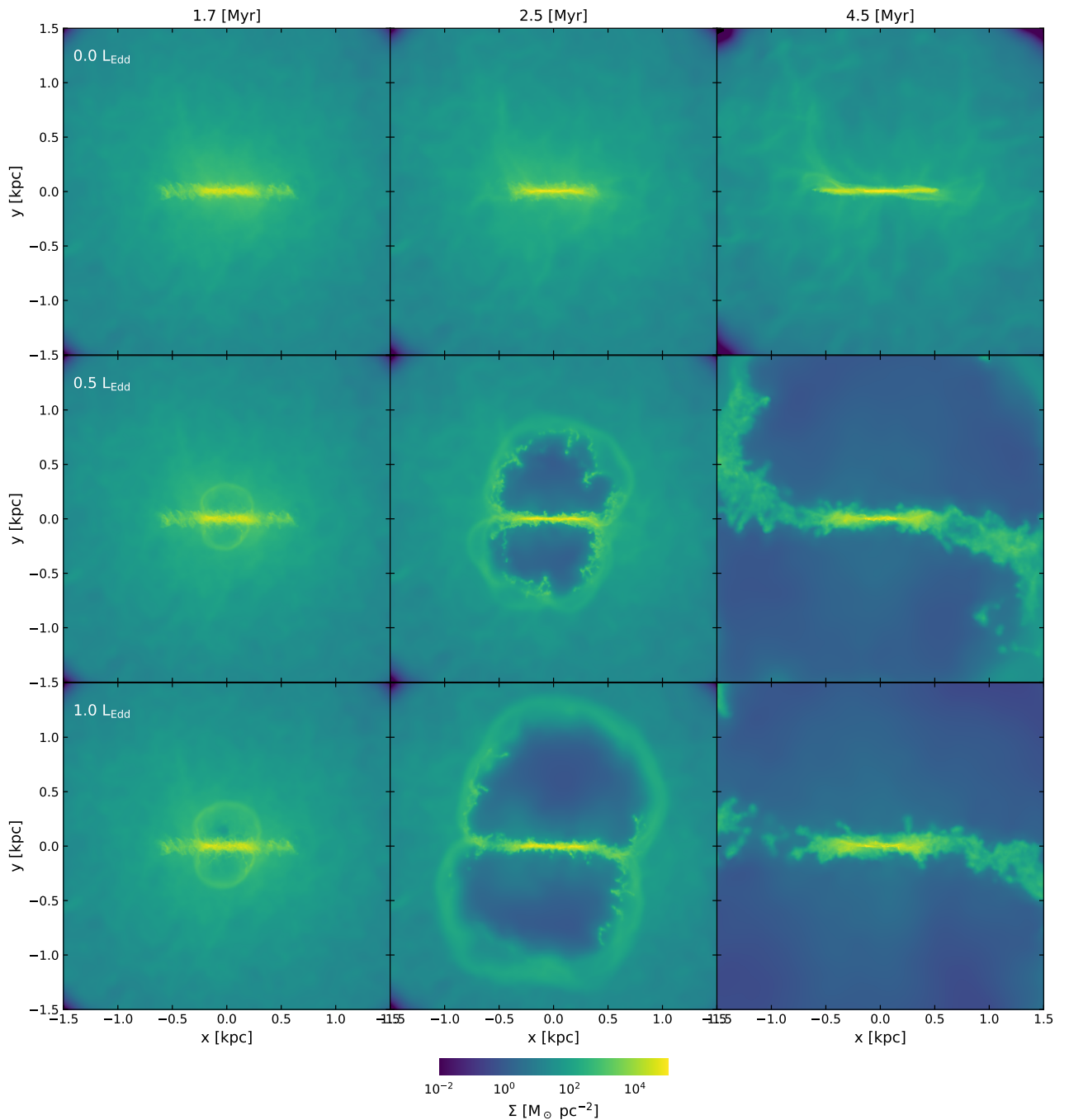
Aktyvumo metu išstumta CMZ vidinė medžiaga dėl didesnio sukimo greičio formuoja šlyties regionus. Didesnį orbitinį greitį turinčios vidinės dujos sąveikauja su išorinėje dalyje esančiomis



5 pav. Plonas tankio pjūvis CMZ plokštumoje. Sistemos atskaitos taškas - skersė. Šviesis didėja iš viršaus į apačią, laikas iš kairės į dešinę. Pirmajame stulpelyje būvis prasidėjus AGN epizodui, antrajame pasibaigus, o trečiajame modeliavimo pabaigoje. AGN aktyvumo poveikis morfologijai mažai priklauso nuo aktyvaus branduolio šviesio.

lėtesnėmis, prarasdamos judesio kiekio momentą. Po aktyvumo epizodo, centrinėje dalyje praktiškai nėra dujų, tačiau skersė toliau vykstant medžiagos transportas, išstumtos sulėtėjusios dujos grįžta į orbitas esančias arčiau SMBH nei prieš aktyvumo epizodą. Šis medžiagos transporto ciklas užtrunka > 2 mln. m. Pagrindiniai galaktikos aktyvumo morfologiniai požymiai - sumažėjęs CMZ žiedo

skerspjūvis, padidėjęs CMZ elipsiškumas (elipsės ašių santykis pasiekia 1:2) ir žiedo nehomogeniškumas. Po aktyvumo epizodo, skersė toliau vykstant medžiagos transportui medžiaga migruoja iš CMZ į SMBH aplinką, centrinius ~ 50 pc užpildo besiformuojančios mini spirales (paveikslas 5). Įdomu, kad ilgalaikis galaktikos aktyvumo poveikis CMZ morfologija nepriklauso nuo AGN šviesio.



6 pav. Tankio žemėlapiai CMZ plokštumoje. Šviesis didėja iš viršaus į apačią, laikas iš kairės į dešinę. Centre - CMZ bei plintanti tėkmė, kuri suspaudžia molekulinės ir išstumia mažesnio tankio pasklidusias dujas.

AGN formuojamų tėkmių tankio žemėlapis pateiktas paveiksle 6. AGN energija varomos tėkmės

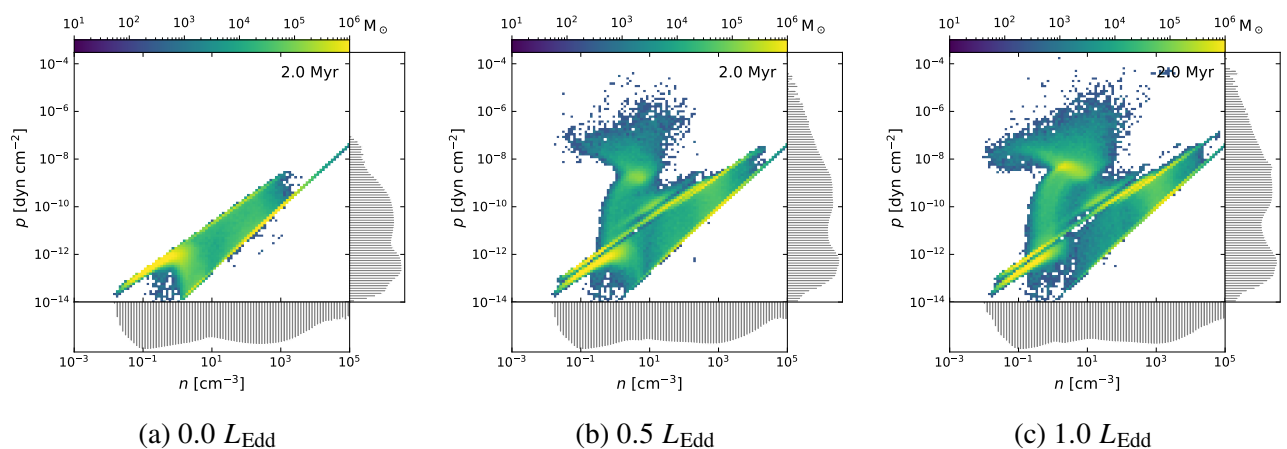
ir toliau plinta pasibaigus aktyvumo epizodui - slėgis besiplečiančio dujų burbulo viduje išlieka aukštas, medžiaga jame nevėsta. AGN aktyvumas sumažina dujų transportą skersė, tačiau jo pilnai nenušlopina; dujos suspaudžiamos šis srautas tampa netolygus. Šie medžiagos srautai sudaro $\sim 5^\circ$ kampą su disko plokštuma ir suformuoja persuktą CMZ žiedą. Didesnis AGN šviesis suformuoja didesnio greičio tėkmės, tačiau masės pernaša ir poveikis CMZ reikšmingai nesiskiria.

3.2 Medžiagos pernaša

Šiame poskyryje nagrinėjamas trumpalaikis ir ilgalaikis aktyvumo poveikis supančioms dujoms, jų fizikinėms savybėms.

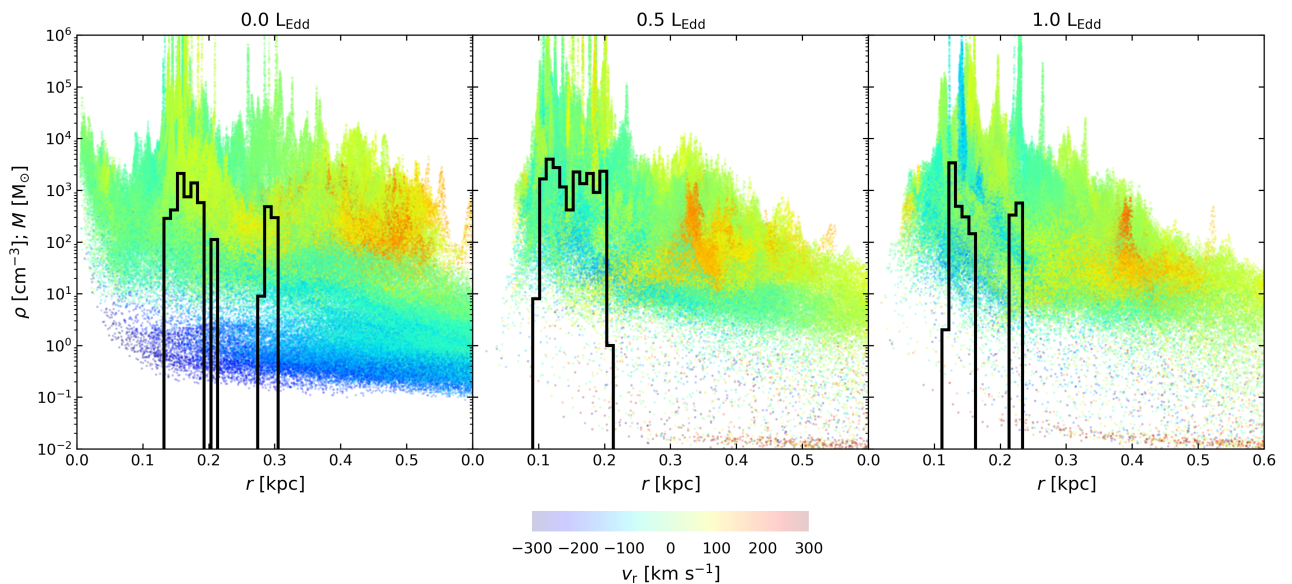
Nesant AGN spinduliuotės medžiaga yra dvifazėje pusiausvyroje, ji sudaryta iš šimtų K temperatūros daugiausia molekulinųjų dujų ir panašaus vidutinio slėgio foninių dujų kurių temperatūra $\sim 10^4$ K (paveikslas 7). Iki AGN poveikio šiltos molekulinės ir atominės dujos yra hidrostatinėje pusiausvyroje pusiausvyroje, tačiau AGN suformuotos trečiąją karštos medžiagos fazę, ISM slėgį padidina iki $\sim 10^{-9}$ dyn cm $^{-2}$ ir jis išlieka aukštas visą modeliuojamą laikotarpį. Tėkmės kuriamas slėgis yra keliomis eilėmis didesnis už vidutinį ISM slėgį ($\sim 10^{-12}$ dyn cm $^{-2}$), jose dujos suspaudžiamos (paveikslas 6). Tačiau CMZ esančioms dujom būdingas gerokai didesnis slėgis siekiantis $\sim 10^{-10}$ dyn cm $^{-2}$, todėl tėkmės poveikis yra prislopintas; egzistuoja dalinė pusiausvyra.

Didesnis AGN šviesis nepakeičia tėkmės slėgio, tačiau keičia dinamiką - formuoja greitesnes tėkmes, jų greičiai plintant per CMZ žiedo regioną yra < 1000 km s $^{-1}$. Tėkmės slėgis išlieka aukštas ir po aktyvumo pabaigos, tačiau nesant jonizuojančios spinduliuotės CMZ medžiaga vėsta, vėliau joje prasideda žvaigždėdara. Galaktikos aktyvumas padidina šiltų didelio tankio (> 10) m $_p$ cm $^{-3}$ dujų masės dalį CMZ aplinkoje, jas suspaudžia, pasiekus Jeans'o kriterijų - padidėja tankių dujų rezervuaras iš kurio gali formuotis žvaigždės (paveikslas 7).



7 pav. Medžiagos slėgio-tankio histograma, spalva rodo dujų masę. Kiekvieno grafiko dešinėje pusėje ir apačioje atvaizduotos masės pasiskirstymo histogramos. Atvaizduota sistemos būklė po 2 mln. m. tėkmės frontui plintant per CMZ. Iš kairės į dešinę atvaizduoti didėjančio šviesio modeliai. Esant tėkmei susiformuoja trifazė sistema, kurioje karštos fazės slėgis yra $\sim 10^{-10} - 10^{-6}$ dyn cm $^{-2}$ intervale.

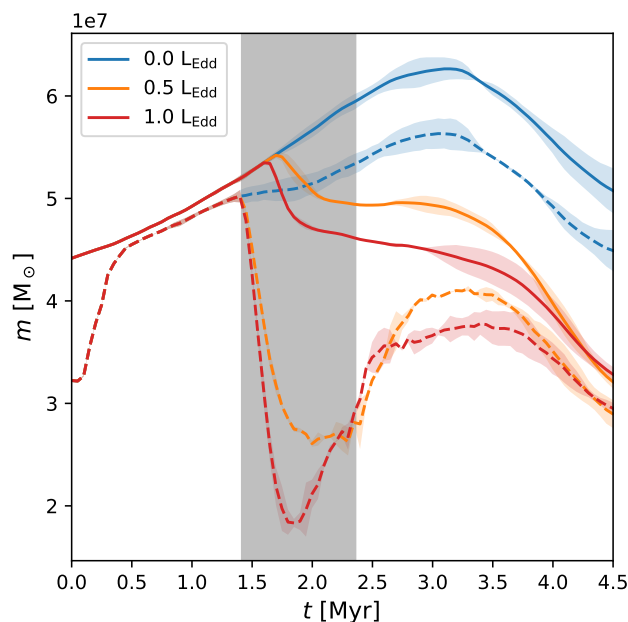
Kaip ir aptarta ankstesniame skyriuje esant neaktyviai galaktikai, CMZ būdinga diskinė struktūra su dviem tankiais regionais - centrinis ir kelių šimtų pc atstumu esantis pagrindinis CMZ žiedas (paveikslas 8). Centrinėje dalyje, esančioje ~ 50 pc vidutinis tankis yra $\sim 10^3 \text{ m}_p \text{ cm}^{-3}$, dujų orbitos yra stabilios, tačiau čia žvaigždėdara nevyksta. CMZ žiede esančiame ~ 200 pc atstumu formuojasi žvaigždės, jis pasižymi didesne greičių dispersija dėl turbulencijos ir žiedo asimetrijos. Išoriniuose regionuose randami $\sim 200 \text{ km s}^{-1}$ srautai - skersės, bei supančių dujų medžiaga 8.



8 pav. Sistemų radialinė struktūra modeliavimo pabaigoje. Atvaizduotas dalelių tankis bei susiformavusių žvaigždžių masė (pastaba: ašių vertės persikloja). Spalva rodo radialinius greičius. AGN aktyvumas pašalina mažo tankio dujas. Juoda linija - susiformavusių žvaigždžių masių histograma. Žvaigždės formuojasi 0.1 – 0.2 kpc atstumu, tankis siekia $10^6 \text{ m}_p \text{ cm}^{-3}$. Nesant galaktikos aktyvumo žvaigždėdara centriniuose 100 pc nevyksta tačiau ~ 10 pc atstume nuo SMBH yra labai arti formavimosi ribos. Tokiu atstumu potvyninės jėgos ir maišymasis neleidžia medžiagai pasiekti didesnio tankio.

Tėkmės formuojasi iš mažo tankio dujų, jų greitis 200 pc atstumu yra $\sim 1000; 1600 \text{ km s}^{-1}$ atitinkamai esant 0.5; 1,0 L_{Edd} šviesiui. Tankiose zonose dominuojant judesio kiekio tėkmių formavimo mechanizmui, tėkmės poveikis nepakankamas tankios dujos pašalinti. Pirmaisiais evoliucijos mln. m. CMZ masė didėja visuose modeliuose - pasklidusios halo dujos veikiamos skersės potencialo krenta į disko plokštumą bei tėkmė papildo CMZ; $\sim 90 \%$ dujų yra molekulinės. Prasidėjus AGN epizodui, spinduliuotės srautas kaitina aplinkinę medžiagą, vyksta molekulių disociacija, mažėja molekulių dujų masės dalis.

Dalelių vėjo ir tėkmių poveikis yra uždelstas $\sim 0,5$ mln. m. AGN šviesiui esant $0.5L_{\text{Edd}}$ tėkmės pašalina 15 % visų dujų CMZ aplinkoje; $1.0L_{\text{Edd}}$ ši vertė padidėja iki 20 %. Molekulių dujų masė aktyvumo epizodu sumažėja 60-70 % tačiau vėliau, po aktyvumo epizodo pabaigos, dujoms atvėsus sudaro didžiąją dalį visų dujų. Masės sumažėjimą po 3 mln. m. nulemia žvaigždėdara. Evoliucijos pabaigoje esant AGN aktyvumui, CMZ masė sumažėja sudaro pusę palyginus su modeliu be aktyvumo,



9 pav. Dujų masė 300 pc spindulio cilindre. Pilkai atvaizduotas AGN aktyvumo epizodas trunkantis 1 mln.m. Užtušuosas sistemų pasikliautinis intervalas. Esant aktyvumui bendra dujų masė (ištisinė linija) sumažėja, jas pašalina tėkmės. Molekulinėse dujose (punktyrinė linija) šis efektas yra stipriau išreikštas, tačiau čia dominuoja dujų kaitinimas AGN spinduliuote, kurios po aktyvumo epizodo atvėsta. Tėkmėms pašalinus pasklidusias dujas praktiškai visa likusi dujų masė yra molekulinėje formoje.

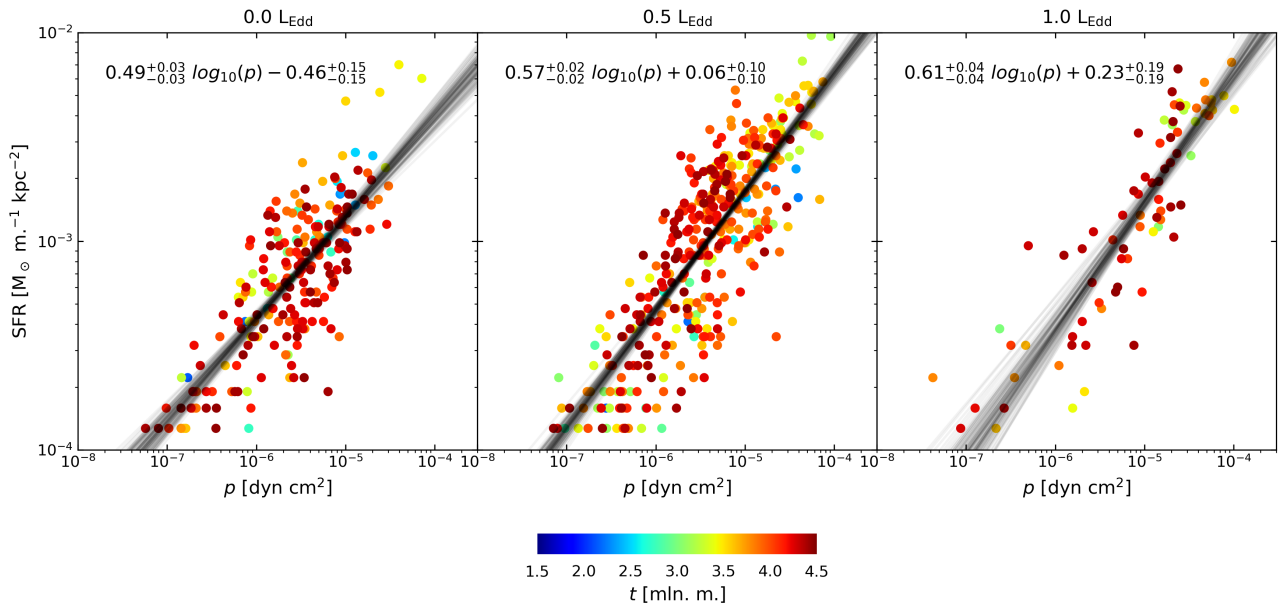
tik keli procentai dujų yra atominės ar jonizuotos.

Po AGN epizodo pabaigos, nesant jonizuojančios spinduliuotės $> 10^2 m_p \text{ cm}^{-3}$ medžiaga sparčiai vėsta, tačiau išorinis supančios medžiagos išlieka aukštas. Paveiksle 10 atvaizduota slėgio ir žvaigždėdaros spartos priklausomybė. Slėgio ir žvaigždėdaros spartos sąryšis nėra tiesioginis; tankiose žvaigždėdaros centruose dujų slėgis yra palyginamas su tėkmės slėgiu arba viršija jį. Tačiau tėkmės slėgio poveikis žymus žvaigždėdaros regionus supančioms retoms dujoms - paspartina jų kritimą į potencialo duobę. Šios kolapsuojančios dujos padidina žvaigždėdaros efektyvumą, vykstanti žvaigždėdara paspartinama ir efektyviau formuoja žvaigždes, tačiau pokytis yra nežymus $\sim 10\%$ (paveikslas 10). $0.5L_{\text{Edd}}$ šviesio modelyje žvaigždėdaros efektyvumas padidėja tik po AGN epizodo - žvaigždėdaros šuolį formuoja ne padidėjęs tėkmės slėgis, o molekulinį debesų susidūrimai CMZ.

Apibendrinant, AGN keičia CMZ morfologiją, formuoja tėkmes, AGN įkaitinta medžiaga išlieka karšta, tačiau po 4–5 mln. m. jai atvėsus nelieka tiesioginių aktyvumo požymių CMZ dujų būvyje.

3.3 Žvaigždėdara

Šiame skyriuje nagrinėjami ilgalaikis aktyvumo poveikis žvaigždėdarai, jos spartai, istorijai ir erdviniam žvaigždžių pasiskirstymui. Žvaigždėdaros regionai, žvaigždėdaros istorija ir susiformavusių žvaigždžių spiečiai atvaizduoti paveiksle 11. Pilki regionai rodo žvaigždžių formavimosi regionus, o



10 pav. Aplinkos slėgio ir žvaigždėdaros spartos priklausomybė - žvaigždėdaros efektyvumas. Esant AGN efektyviau formuojasi žvaigždės. AGN šviesis didėja iš kairės į dešinę, spalva rodo žvaigždėdaros epizodo laiką nuo modeliavimo pradžios. Linijos ir lygtys, rodo pritaikytų tiesių parametrų sklaidą.

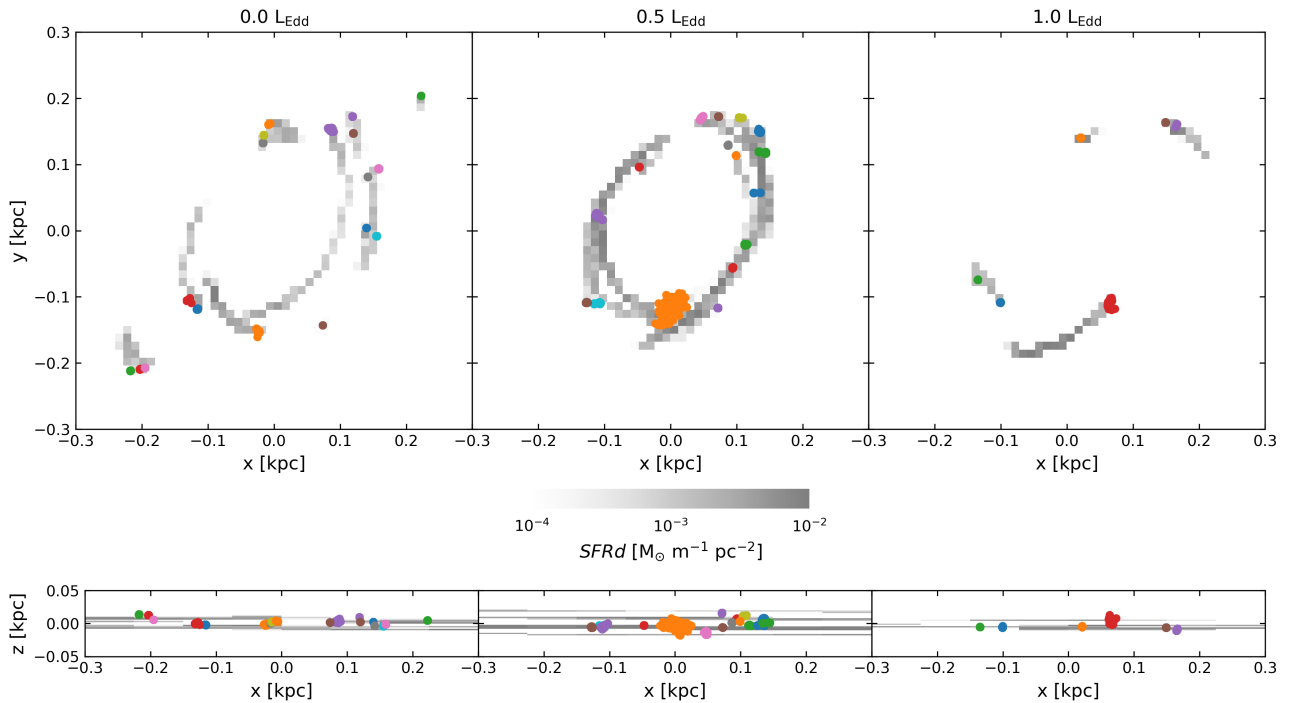
taškai susiformavusius spiečius modeliavimo pabaigoje. Kaip ir minėta, AGN keičia CMZ dujų žiedo elipsiškumą, tačiau poveikis žvaigždžių dinamikai nebūtinai sutampa su dujų orbitomis - žvaigždėms hidrodinaminių jėgų poveikis yra nykstantai mažas.

Žvaigždėdara pagrįdai vyksta skersėje į CMZ įtekančios medžiagos regionuose. Žvaigždėdaros regionus ir spartą nulemia įtekančių dujų dinamika, o galaktikos aktyvumas nesustabdo dujų transporto skersėje. Žvaigždės formuojasi "konvejeriu" - įtekanti medžiaga suspaudžiama, formuoja termodinamiškus nestabilumus, inicijuoja žvaigždėdarą kuri toliau vyksta žvaigždėms ir medžiagai keliaujant $x2$ ar artimoms joms orbitomis.

Žvaigždėdara skersėje, vyksta tik nesant aktyviam AGN šios žvaigždės formuojasi ~ 250 pc atstumu nuo SMBH. Aktyvumo epizodais čia vykstanti žvaigždėdara yra nuslopinama susiformavusių tėkmių. Nenustatyta žymaus vertikalios žvaigždėdaros centrų aukščio virš CMZ ar vertikalios žvaigždžių dispersijos pokyčio. Spiečių suirimo laikas yra didesnis nei modeliuojamas sistemos laikas, todėl pasklidusių žvaigždžių dinamikos analizė neatlikta. Žvaigždžių spiečiai identifikuoti naudojant DBSCAN grupavimo algoritmą. Grafikuose neatvaizduoti spiečiai kurių masė $< 10^3 M_{\odot}$, jie sudaro 70–90 % visų žvaigždžių masės.

Žvaigždėdaros spartos evoliucija pavaizduota paveiksle 12. Pavaizduoti modelių vidurkiai ir pasikliautiniai intervalai, apskaičiuoti naudojant dvipusį Stjudent'o koeficientą pasirinkus 90 % patikimumą. Pirmosios žvaigždės pradeda formotis po ~ 2 mln. m. aktyvumo epizodo metu, tačiau esant Edingtono šviesiui, žvaigždėdara aktyvumo metu nuslopinama.

Pradinė žvaigždėdaros sparta visuose modeliuose pirmąjį ~ 1 mln. m. yra $< 0.5 M_{\odot} m^{-1}$. AGN

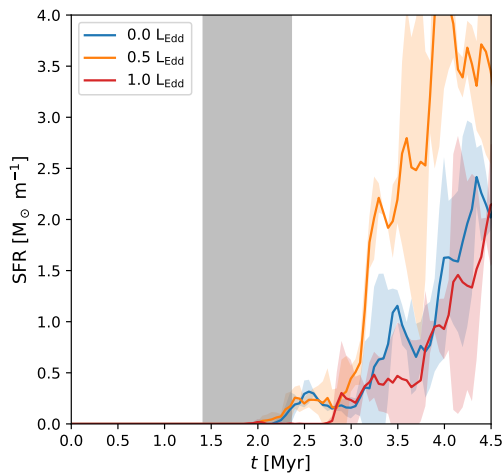


11 pav. Žvaigždėdaros spartos istorija bei susiformavę žvaigždžių spiečiai. AGN aktyvumas didėja iš kairės į dešinę. Pilka spalva pažymėta žvaigždėdaros sparta skirtinguose evoliuciniuose žingsniuose. Spalvos žymi identifikuotus spiečius evoliucijos pabaigoje. Pagrindiniai žvaigždėdaros inicijavimo regionai - skersės įsiliejimo į CMZ taškai. Apatiniame pelyje atvaizduota vertikalus žvaigždėdaros ir spiečių pasiskirstymas.

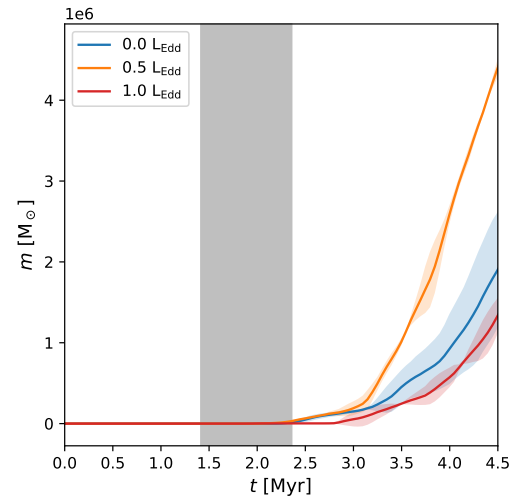
tėkmės poveikis žvaigždėdarai yra uždelstas, tėkmė, didžiausias pokytis stebimas $0,5L_{\text{Edd}}$ AGN šviesio modelyje, sparta padidėja $\sim 5\times$ ir išlieka aukšta visą modeliavimo laiką. Priešingai esant Edingtono šviesiui žvaigždėdaros sparta ir susiformavusių žvaigždžių masė nesiskiria nuo modelio be AGN aktyvumo.

Paveiksle 13(a) atvaizduoti visų modelių spiečiai sugrupuoti pagal AGN šviesį. Esant $0,5L_{\text{Edd}}$ AGN šviesiui spiečių masės reikšmingai skiriasi nuo likusiųjų. Esant šiam formuojasi didesnės masės $2\times 10^5 - 6\times 10^5 M_{\odot}$ spiečiai. Esant Edingtono šviesiui nors ir spiečių bendras skaičius yra mažesnis jų masių skirstinys reikšmingai nesiskiria nuo bazinio modelio be AGN aktyvumo. Tačiau šis rezultatas gali būti dėl per mažos imties.

Spiečių dinamikos įverčiui išmatuotas žvaigždžių radialinis greitis SMBH atžvilgiu. Nustatyta, kad esant Edingtono šviesiui skirstinys reikšmingai skiriasi nuo kitų modelių. Jis pasižymi didesniais neigiamai radialiniais greičiais ir greičių asimetrija (paveikslas 13(b)). Šie neigiami greičiai yra didesni nei CMZ dujų orbitų maksimalūs radialiniai greičiai.

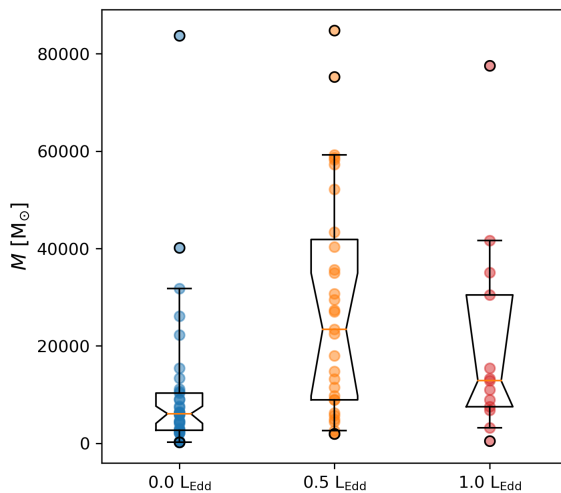


(a) Žvaigždėdaros sparta

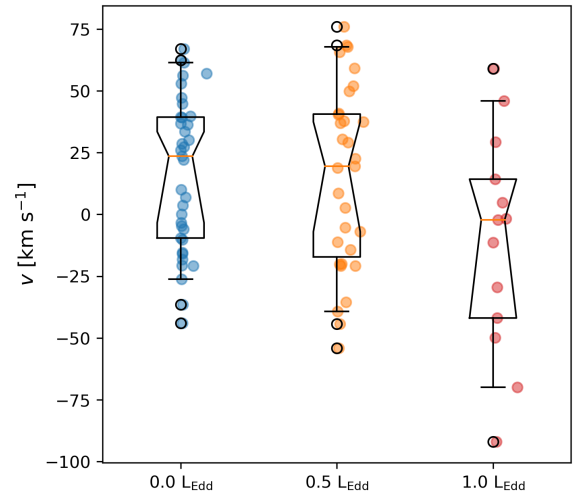


(b) Suminė susiformavusių žvaigždžių masė

12 pav. a) Sistemų žvaigždėdaros spartos evoliucija. b) Suminė susiformavusių žvaigždžių masė. Pilkai atvaizduotas AGN aktyvumo epizodas trunkantis 1 mln.m. Užtušuotas sistemų pasikliautinis intervalas (90 % tikimybė, kad tikrasis vidurkis yra šiame intervale). Reikšmingi skirtumai bendrai susiformavusių žvaigždžių masei būdingi tik 0,5 Edingtono šviesio modeliams. Esant Edingtono šviesiui žvaigždėdara aktyvumo metu sustabdoma tačiau evoliucijos pabaigoje žvaigždėdara nesiskiria nuo neaktyvios galaktikos.



(a) Spiečių masės



(b) Spiečių radialiniai greičiai

13 pav. a) Susiformavusių žvaigždžių spiečių masės. Sugrupuota pagal AGN šviesį. 0,5 L_{Edd} šviesio modelyje nustatytas statistškai reikšmingas skirstinio vidurkio pokytis. Esant šiam aktyvumui formuojasi daugiau didelės masės spiečių ($2,0 - 6,0 \times 10^5 M_{\odot}$) b) Žvaigždžių radialiniai greičiai. Esant Edingtono šviesiui padidėja spiečių radialiniai greičiai link SMBH. Abiejuose diagramose apskritimai rodo individualius spiečius, diagramoje (b) masyvesni spiečiai pastumti į dešinę. Apskritimo juodi kontūrai rodo atmetas kraštutines vertes esančias už 5-to ir 95-to procentilio. Geltonos horizontalios linijos rodo medianą, ją apsupa kvartiliai. Susiaurėjimas rodo medianos pasikliautinį intervalą (kai kuriais atvejais jis yra didesnis negu kvartiliai). Nuo kvartilių tolstančios linijos nurodo maksimalias ir minimalias vertes.

4 Diskusija

Diskusiją pradėsiu nuo darbo santraukos; šiame darbe tirta galaktika savo savybėmis yra artima Paukščių Tako centrinei daliai. Tirtas galaktikos aktyvumo epizodo trunkančio 1 mln. m. poveikis centrinei molekulinei zonai (CMZ) ir ją supančiai medžiagai. Pagrindinis dėmesys skirtas žvaigždėdarai ir jos evoliuciniams pokyčiams siekiant susieti modeliuojamą sistemą su stebėjimų duomenimis.

4.1 CMZ forma

Galaktikų centrinių kpc ir skersės modeliavimas nėra naujiena; pirmieji mažos skyros dvimačiai modeliai nagrinėjo dinamiką, skersių formavimąsi [47]. Pastaraisiais metais daugiausia sutinkami trimačiai modeliai apimantys 5–6 kpc spindulį, o sistemų evoliuciją seka kelis šimtus mln. m. Tiriama dinamika, žvaigždėdara, tačiau juose neįskaitomas aktyvaus galaktikos branduolio (AGN) poveikis [10,48,49]. Įskaitantys AGN epizodą darbai apsiriboja keliais šimtais pc ir neįskaito medžiagos srautų skersė [50].

Šiame darbe modeliuojamos sistemos apjungia medžiagos pernašą skersė ir jos potencialą bei galaktikos branduolio aktyvumą. CMZ yra didelio vidutinio tankio $> 10^4 \text{ m}_p \text{ cm}^{-3}$ elipsinio žiedo formos, esanti 100-200 pc atstumu nuo SMBH, sudaryta daugumoje iš šiltų molekulinųjų dujų. Pagrindiniai skirtumai morfologijoje rodantys AGN epizodą - be AGN epizodo susiformuoja dešimčių pc storio dujų diskas kuriuo vyksta dujų transportas į SMBH aplinką. Šiam diskui būdingos didelio tankio žiedai $< 50; \sim 200$ pc atstumu nuo SMBH. Šiame diske žvaigždėdara vyksta tik išoriniame žiede. Centrinėje dalyje žvaigždėdara nevyksta, tačiau dujų tankis yra artimas žvaigždėdaros slenkstinei vertei. Šių struktūros geometrija sutampa su kitų autorių rezultatais [48] arba sutampa tik pakankamai trumpais evoliucijos etapais [10]. Esant AGN epizodui reta disko medžiaga pašalinama, lieka tik tankus dujų žiedas. AGN sumažina CMZ skerspjūvį, padidina jo elipsiškumą, kurio vertės nepriklauso nuo AGN šviesio. Skersės dujų srautas visose modeliuose išstumiamas iš disko plokštumos ir suformuoja $\sim 5^\circ$ kampą kuris yra būdingas stebimai PT CMZ. Šis srautas padidina CMZ vertikalų aukštį bei formuoja susuktą žiedą būdingą PT [51].

Tačiau CMZ yra dinamiška struktūra ir tankus asimetrinis žiedas ar diskas gali susiformuoti tiek veikiant AGN tiek esant netolygiems skersės srautams; todėl morfologiniai CMZ požymiai nėra vienareikšmiškas galaktikos aktyvumo epizodo indikatorius. Aktyvus galaktikos branduolio epizodas pašalina dujas iš CMZ ir užtrunka > 3 mln. m. kol šis regionas pradeda užsipildyti dujomis iš naujo, medžiagos srautai iš CMZ - susiformuoja mini spiralės. Kadangi PT centrinėje dalyje randami dujų žiedai ir spiralės [52], tai rodo galimą aktyvumo epizodą įvykusį daugiau nei prieš ~ 5 mln. m.

4.2 Žvaigždėdara

Šiame skyriuje pagrindinis dėmesys skiriamas jauniems spiečiams SMBH aplinkoje. Paukščių Take centriniuose < 30 pc randami keletas jaunų masyvių spiečių su dideliu ekscentricitetu [53] - *Arches* ir *Quintuplet*, kurių masės yra $\sim 10^4 M_{\odot}$. *Arches* amžius $\sim 2 - 3$ mln. m. [54], *Quintuplet* ~ 5 mln. m. [55].

Tačiau masyvių spiečių formavimasis SMBH aplinkoje yra mažai tikėtinas dėl juos ardančių potvyninių jėgų. Masyvūs spiečiai su didelio ekscentriciteto orbitomis darbe tirtose sistemose dera tik su Edingtono šviesio epizodu. Spiečių formavimosi scenarijus yra pakankamai paprastas - po aktyvumo epizodo, atvėsusi medžiagai yra išstumta iš gravitacinio potencialo ir dėl šlyties su išorine medžiaga jos judesio kiekio momentas yra sumažėjęs. Še debesys nėra suardomi ir skerse įsilieja į CMZ viršūnes, šis debesų susidūrimas yra pagrindinis spiečių formavimosi iniciatorius CMZ. Šie spiečiai pasižymi dideliais radialiniais greičiais (~ 50) km s^{-1} , jų periapsis yra dešimtys pc.

Spiečių formavimasis SMBH aplinkoje yra mažai tikėtinas, čia yra randama jaunų žvaigždinių objektų (YSO) [56] jų bendra masė $3,5 \times 10^4 M_{\odot}$. Žvaigždėdarą netoli SMBH patvirtina ir pastarųjų metų stebėjimų rezultatai - nors skiriasi žvaigždėdaros sparta, ji vyksta visuose regionuose [48]. CMZ regionas nėra statiškas, dešimčių mln. metų laikotarpyje jis pakinta gali suformuoti žiedines ar diskines struktūras [10] tačiau žvaigždėdara dominuoja siaurame žiede [57]. Darbe tirtuose modeliuose centriniuose pc žvaigždėdara nevyksta, tai rodo tikėtiną šių objektų migravimo scenarijų arba centriniuose parsekuose dominuojantį potencialą neįskaitytą šiame darbe.

4.3 CMZ istorija

Praėjusiuose poskyriuose aptarti žvaigždėdaros požymiai rodo, kad PT CMZ ir jo aplinkoje esanti medžiaga yra tarpinė būsenoje, kurią suformavo Edingtono šviesio AGN aktyvumo epizodas prieš > 5 mln.m. su būdinga 1 mln. m. trukme. Esant šiam aktyvumui susiformuoja jauni masyvūs spiečiai turi neigiamus radialinius greičius ir jų orbitos yra artimos stebimai spiečių dinamikai.

Šis scenarijus dera su pastarųjų metų centrinių galaktikų dalių stebėjimais. Pavyzdžiui galaktika NGC 1365 turinti silpną aktyvų branduolį, kurio šviesis $2 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ [58], o SMBH masė artima PT. Tačiau šioje galaktikoje CMZ yra ~ 1 kpc atstumu nuo SMBH, taigi aktyvumo įtaka jai yra silpnė. Nepaisant mastelių skirtumo CMZ elipsiškumas ir geometrija yra panaši į darbe tirtus modelius su AGN aktyvumu. Tai rodo, kad AGN įnašas į geometriją nėra dominuojantis ir didelio elipsiškumo CMZ gali susiformuoti stochastiškai [59]. Tačiau priešingai nei PT galaktikoje jauni žvaigždžių spiečiai randami tik NGC 1365 CMZ žiede - dėl mažesnio AGN įnašo šių spiečių migravimas link CMZ nevyksta.

Nors vėjo varomų tėkmių modelis gerai paaiškina stebimas tėkmes, reikšmingą įnašą gali turėti ir kiti efektai - spinduliuote varomos tėkmės arba čiurkšlės. Šiems efektams įvertinti būtinas realistiškas akrecijos modelis ir neišvengiamai magnetinių laukų modeliavimas. Be to šiame darbe neįskaitytos dulkės ir policikliniai aromatiniai angliavandeniliai (PAH), darant prielaidą, kad centrinėse galaktikų

dalyse jų įtaka nežymi ir esant AGN epizodui jos suyra. Tačiau tankiose debesyse gali išlikti net ir esant AGN [60].

Darbe Edingtono šviesio modelyje žvaigždėdara aktyvumo metu yra pilnai nuslopinama, tačiau, esant didesnei CMZ masei žvaigždėdara gali ir toliau vykti. Pavyzdžiui galaktikoje NGC 7469, nepaisant eile masyvesnės SMBH, branduolio aktyvumo epizodo metu žvaigždėdara vyksta ~ 200–500 pc atstumu esančiame šiltų molekulinų dujų žiede [61]. Tačiau ar žvaigždėdara vyksta AGN epizodo metu ar po jo < 100 pc regione nėra aišku. Darbe modeliuotose sistemose aktyvumas pilnai pašalina dujas iš centrinio regiono ir žvaigždėdara nevyksta. Tačiau stebėjimo duomenys rodo, kad yra žvaigždėdaros įrodymų netgi 1 pc atstumu [62]. Be to Sgr A* supa ~ $5 \times 10^5 M_{\odot}$ masės spirales ir srautai centrinėje dalyje. Tai rodo, kad aktyvumo epizodas turėjo įvykti daugiau nei prieš 3-4 mln. m. ir šios struktūros turi susiformuoti per kelis mln. m.

Išvados

Vidutinio $0,5L_{\text{Edd}}$ šviesio galaktikos aktyvumo epizodas spartina žvaigždėdarą centrinėje molekulinėje zonoje, o esant Edingtono šviesiui – keičia spiečių dinamiką.

1. Galaktikos aktyvumas padidina molekulių dujų masės dalį, suformuoja tankų, elipsišką ($e \simeq 0.87$) žiedą.
2. Esant $0,5L_{\text{Edd}}$, formuojasi masyvūs $2 \times 10^5 - 6 \times 10^5 M_{\odot}$ spiečiai.
3. Esant $1,0L_{\text{Edd}}$ šviesiui, spiečių orbitos pasižymi didesniu ekscentricitetu, kurių periapsis dešimtys pc.

Artimas Edingtono šviesiui, 1 mln. m. trukmės aktyvumo epizodas prieš > 5 mln. m. paaiškina Galaktikos centrinės molekulinės zonos morfologiją, žvaigždėdarą bei spiečių *Arches*, *Quintuplet* orbitas.

Literatūros sąrašas

- [1] E. P. Hubble, Extragalactic nebulae., *ApJ* , Dec. 1926, **64**, 321–369.
- [2] H. Netzer, Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei, *ARA&A* , Aug. 2015, **53**, 365–408.
- [3] C. M. Harrison, T. Costa, C. N. Tadhunter, A. Flütsch, D. Kakkad, M. Perna, and G. Vietri, AGN outflows and feedback twenty years on, *Nature Astronomy*, Feb. 2018, **2**, 198–205.
- [4] S. Veilleux, R. Maiolino, A. D. Bolatto, and S. Aalto, Cool outflows in galaxies and their implications, *A&A Rev.*, Apr. 2020, **28**, 2.
- [5] S. Laha, C. S. Reynolds, J. Reeves, *et al.*, Ionized outflows from active galactic nuclei as the essential elements of feedback, *Nature Astronomy*, Jan. 2021, **5**, 13–24.
- [6] R. Morganti, The many routes to AGN feedback, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, Nov. 2017, **4**, 42.
- [7] K. Zubovas and A. King, The small observed scale of AGN-driven outflows, and inside-out disc quenching, *MNRAS* , Nov. 2016, **462**, 4055–4066.
- [8] J. Mercedes-Feliz, D. Anglés-Alcázar, C. C. Hayward, *et al.*, Local positive feedback in the overall negative: the impact of quasar winds on star formation in the FIRE cosmological simulations, *arXiv e-prints*, Jan. 2023, arXiv:2301.01784.
- [9] C. Wegg and O. Gerhard, Mapping the three-dimensional density of the Galactic bulge with VVV red clump stars, *MNRAS* , Nov. 2013, **435**, 1874–1887.
- [10] R. G. Tress, M. C. Sormani, S. C. O. Glover, *et al.*, Simulations of the Milky Way’s central molecular zone - I. Gas dynamics, *MNRAS* , Dec. 2020, **499**, 4455–4478.
- [11] E. Athanassoula, Morphology of bar orbits., *MNRAS* , Nov. 1992, **259**, 328–344.
- [12] F. P. Israel, Central molecular zones in galaxies: ^{12}CO -to- ^{13}CO ratios, carbon budget, and X factors, *A&A* , Mar. 2020, **635**, A131.
- [13] W. D. Langer, T. Velusamy, M. R. Morris, P. F. Goldsmith, and J. L. Pineda, Kinematics and properties of the central molecular zone as probed with [C II], *A&A* , Mar. 2017, **599**, A136.
- [14] J. M. D. Kruijssen, S. N. Longmore, B. G. Elmegreen, N. Murray, J. Bally, L. Testi, and R. C. Kennicutt, What controls star formation in the central 500 pc of the Galaxy?, *MNRAS* , June 2014, **440**, 3370–3391.

- [15] M.-M. Mac Low and R. S. Klessen, Control of star formation by supersonic turbulence, *Reviews of Modern Physics*, Jan. 2004, **76**, 125–194.
- [16] J. D. Henshaw, A. T. Barnes, C. Battersby, A. Ginsburg, M. C. Sormani, and D. L. Walker, Star Formation in the Central Molecular Zone of the Milky Way, *arXiv e-prints*, Mar. 2022, arXiv:2203.11223.
- [17] J. M. Rathborne, S. N. Longmore, J. M. Jackson, *et al.*, Turbulence Sets the Initial Conditions for Star Formation in High-pressure Environments, *ApJL*, Nov. 2014, **795**, L25.
- [18] G. Nandakumar, M. Schultheis, A. Feldmeier-Krause, *et al.*, Near-infrared spectroscopic observations of massive young stellar object candidates in the central molecular zone, *A&A*, Jan. 2018, **609**, A109.
- [19] A. T. Barnes, S. N. Longmore, C. Battersby, J. Bally, J. M. D. Kruijssen, J. D. Henshaw, and D. L. Walker, Star formation rates and efficiencies in the Galactic Centre, *MNRAS*, Aug. 2017, **469**, 2263–2285.
- [20] J. R. Lu, T. Do, A. M. Ghez, M. R. Morris, S. Yelda, and K. Matthews, Stellar Populations in the Central 0.5 pc of the Galaxy. II. The Initial Mass Function, *ApJ*, Feb. 2013, **764**, 155.
- [21] C. Wolf, F. Bian, C. A. Onken, *et al.*, Discovery of the Most Ultra-Luminous QSO Using GAIA, SkyMapper, and WISE, *PASA*, June 2018, **35**, e024.
- [22] M. J. Rees, Black Hole Models for Active Galactic Nuclei, *ARA&A*, Jan. 1984, **22**, 471–506.
- [23] K. Zubovas and A. R. King, The M - σ relation between supermassive black holes and their host galaxies, *General Relativity and Gravitation*, May 2019, **51**, 65.
- [24] Y. Sofue, A. Habe, J. Kataoka, *et al.*, Galactic Centre hypershell model for the North Polar Spurs, *MNRAS*, June 2016, **459**, 108–120.
- [25] M. Su, T. R. Slatyer, and D. P. Finkbeiner, Giant Gamma-ray Bubbles from Fermi-LAT: Active Galactic Nucleus Activity or Bipolar Galactic Wind?, *ApJ*, Dec. 2010, **724**, 1044–1082.
- [26] Y. Sofue and T. Handa, A radio lobe over the galactic centre, *Nature*, Aug. 1984, **310**, 568–569.
- [27] A. King and K. Pounds, Powerful Outflows and Feedback from Active Galactic Nuclei, *ARA&A*, Aug. 2015, **53**, 115–154.
- [28] J. Silk and M. J. Rees, Quasars and galaxy formation, *A&A*, Mar. 1998, **331**, L1–L4.
- [29] Z. Dugan, V. Gaibler, and J. Silk, Feedback by AGN Jets and Wide-angle Winds on a Galactic Scale, *ApJ*, July 2017, **844**, 37.

- [30] P. F. Hopkins and M. Elvis, Quasar feedback: more bang for your buck, *MNRAS* , Jan. 2010, **401**, 7–14.
- [31] K. Zubovas, S. Nayakshin, A. King, and M. Wilkinson, AGN outflows trigger starbursts in gas-rich galaxies, *MNRAS* , Aug. 2013, **433**, 3079–3090.
- [32] R. Bieri, Y. Dubois, J. Rosdahl, A. Wagner, J. Silk, and G. A. Mamon, Outflows driven by quasars in high-redshift galaxies with radiation hydrodynamics, *MNRAS* , Jan. 2017, **464**, 1854–1873.
- [33] R. A. Gingold and J. J. Monaghan, Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars., *MNRAS* , Nov. 1977, **181**, 375–389.
- [34] W. Dehnen and H. Aly, Improving convergence in smoothed particle hydrodynamics simulations without pairing instability, *MNRAS* , Sept. 2012, **425**, 1068–1082.
- [35] J. I. Read and T. Hayfield, SPHS: smoothed particle hydrodynamics with a higher order dissipation switch, *MNRAS* , June 2012, **422**, 3037–3055.
- [36] A. King, Black Holes, Galaxy Formation, and the $M_{BH}-\sigma$ Relation, *ApJL* , Oct. 2003, **596**, L27–L29.
- [37] A. R. King, Black hole outflows, *MNRAS* , Mar. 2010, **402**, 1516–1522.
- [38] Z. Malkin, A New Equal-area Isolatitudinal Grid on a Spherical Surface, *AJ* , Oct. 2019, **158**, 158.
- [39] S. Khullar, C. Federrath, M. R. Krumholz, and C. D. Matzner, The density structure of supersonic self-gravitating turbulence, *MNRAS* , Nov. 2021, **507**, 4335–4351.
- [40] C. Federrath, R. S. Klessen, and W. Schmidt, The Density Probability Distribution in Compressible Isothermal Turbulence: Solenoidal versus Compressive Forcing, *ApJL* , Dec. 2008, **688**, L79.
- [41] M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, The Chemical Composition of the Sun, *ARA&A* , Sept. 2009, **47**, 481–522.
- [42] T. Inoue and S.-i. Inutsuka, Two-Fluid Magnetohydrodynamic Simulations of Converging H I Flows in the Interstellar Medium. I. Methodology and Basic Results, *ApJ* , Nov. 2008, **687**, 303–310.
- [43] H. Koyama and S.-I. Inutsuka, Molecular Cloud Formation in Shock-compressed Layers, *ApJ* , Apr. 2000, **532**, 980–993.

- [44] S. Y. Sazonov, J. P. Ostriker, and R. A. Sunyaev, Quasars: the characteristic spectrum and the induced radiative heating, *MNRAS*, Jan. 2004, **347**, 144–156.
- [45] J. M. F. Donnert, A. M. Beck, K. Dolag, and H. J. A. Röttgering, Simulations of the galaxy cluster CIZA J2242.8+5301 - I. Thermal model and shock properties, *MNRAS*, Nov. 2017, **471**, 4587–4605.
- [46] D. Foreman-Mackey, D. W. Hogg, D. Lang, and J. Goodman, emcee: The MCMC Hammer, *PASP*, Mar. 2013, **125**, 306.
- [47] E. Athanassoula and J. A. Sellwood, Bi-symmetric instabilities of the Kuz'min/Toomre disc., *MNRAS*, July 1986, **221**, 213–232.
- [48] L. Armillotta, M. R. Krumholz, E. M. Di Teodoro, and N. M. McClure-Griffiths, The life cycle of the Central Molecular Zone - I. Inflow, star formation, and winds, *MNRAS*, Dec. 2019, **490**, 4401–4418.
- [49] H. P. Hatchfield, M. C. Sormani, R. G. Tress, C. Battersby, R. J. Smith, S. C. O. Glover, and R. S. Klessen, Dynamically Driven Inflow onto the Galactic Center and its Effect upon Molecular Clouds, *ApJ*, Nov. 2021, **922**, 79.
- [50] K. Zubovas, AGN activity and nuclear starbursts: Sgr A* activity shapes the Central Molecular Zone, *MNRAS*, Aug. 2015, **451**, 3627–3642.
- [51] S. Molinari, J. Bally, A. Noriega-Crespo, *et al.*, A 100 pc Elliptical and Twisted Ring of Cold and Dense Molecular Clouds Revealed by Herschel Around the Galactic Center, *ApJL*, July 2011, **735**, L33.
- [52] K. Ferrière, Interstellar gas within ~ 10 pc of Sagittarius A*, *A&A*, Apr. 2012, **540**, A50.
- [53] M. W. Hosek, T. Do, J. R. Lu, M. R. Morris, A. M. Ghez, G. D. Martinez, and J. Anderson, Measuring the Orbits of the Arches and Quintuplet Clusters Using HST and Gaia: Exploring Scenarios for Star Formation near the Galactic Center, *ApJ*, Nov. 2022, **939**, 68.
- [54] J. S. Clark, M. E. Lohr, F. Najarro, H. Dong, and F. Martins, The Arches cluster revisited. I. Data presentation and stellar census, *A&A*, Sept. 2018, **617**, A65.
- [55] A. Liermann, W. R. Hamann, and L. M. Oskinova, The Quintuplet cluster. III. Hertzsprung-Russell diagram and cluster age, *A&A*, Apr. 2012, **540**, A14.
- [56] F. Yusef-Zadeh, J. W. Hewitt, R. G. Arendt, *et al.*, Star Formation in the Central 400 pc of the Milky Way: Evidence for a Population of Massive Young Stellar Objects, *ApJ*, Sept. 2009, **702**, 178–225.

- [57] M. C. Sormani, R. G. Tress, S. C. O. Glover, *et al.*, Simulations of the Milky Way's Central Molecular Zone - II. Star formation, *MNRAS*, Oct. 2020, **497**, 5024–5040.
- [58] Y. Gao, F. Egusa, G. Liu, *et al.*, The Nuclear Region of NGC 1365: Star Formation, Negative Feedback, and Outflow Structure, *ApJ*, June 2021, **913**, 139.
- [59] E. Schinnerer, E. Emsellem, J. D. Henshaw, *et al.*, PHANGS-JWST First Results: Rapid Evolution of Star Formation in the Central Molecular Gas Ring of NGC 1365, *ApJL*, Feb. 2023, **944**, L15.
- [60] I. García-Bernete, D. Rigopoulou, A. Alonso-Herrero, *et al.*, A high angular resolution view of the PAH emission in Seyfert galaxies using JWST/MRS data, *A&A*, Oct. 2022, **666**, L5.
- [61] T. S. Y. Lai, L. Armus, V. U, *et al.*, GOALS-JWST: Tracing AGN Feedback on the Star-forming Interstellar Medium in NGC 7469, *ApJL*, Dec. 2022, **941**, L36.
- [62] F. Yusef-Zadeh, B. Cotton, M. Wardle, *et al.*, ALMA and VLA Observations: Evidence for Ongoing Low-mass Star Formation near Sgr A*, *MNRAS*, May 2017, **467**, 922–927.
- [63] J. M. Salas, M. R. Morris, and S. Naoz, Modeling Turbulence in Galactic Centers, *AJ*, May 2021, **161**, 243.

Martynas Laužikas. *Aktyvaus galaktikos branduolio kuriamos tškms poveikis žvaigždėdarai*: Teorinės fizikos ir astrofizikos studijų programos, magistro studijų baigiamasis darbas. Vad. doc. dr. Kastytis Zubovas. Vilnius: Vilniaus universitetas Fizikos fakultetas, 2023, 44 p

Darbe tiriama aktyvių galaktikų kuriamų tškmių poveikis žvaigždėdarai centrinėje molekulinėje zonoje. Analizuota dujų fragmentacija, žvaigždėdara bei kinematika. Galaktikos aktyvumas sumažina žvaigždžių spiečių orbitų periapsį.

Martynas Laužikas

THE EFFECT OF AN ACTIVE GALACTIC NUCLEUS-DRIVEN OUTFLOWS ON STAR FORMATION

Summary

It is well established that nearly every massive galaxy hosts a super massive black hole (SMBH). Matter accretion onto this massive and compact object produces vast amounts of energy, creating an active galactic nucleus (AGN). Episodes of activity are common during galactic evolution, usually lasting for up to a Myr, with luminosities near the Eddington limit. The AGN produces vast amounts of ionizing radiation, heats surrounding matter and forms a relativistic particle wind. The wind interacts with the surrounding diffuse medium, forming galaxy-wide outflows. Our Galaxy is no exception, there is evidence of a recent activity episode in the form of the Fermi bubbles.

Barred spiral galaxies commonly have substantial amounts of molecular gas in the central kpc. Gravitational potential of the bar mediates gas transport from the galactic disc to the vicinity of the SMBH and forms ring-like structures. In our Galaxy a ~ 200 pc twisted ring is observed known as the Central Molecular Zone (CMZ); similar structures are prevalent in other barred spiral galaxies. CMZ is known for high densities, elevated amounts of ionizing radiation and surprisingly low star formation rates. The effect of the galactic activity on this warm gas is largely unexplored, but such conditions could indicate a transient state - a CMZ recovering from an episode of galactic activity.

Effects of AGN-driven outflows on star formation have been explored quite extensively, but conditions in the CMZ are peculiar, thus the effect of the outflow is largely unknown. In general, outflows can compress the gas and induce star formation, or expel the gas quenching it. They also can inhibit gas transport to the CMZ producing long-lasting effects.

I use the hybrid SPH/N-body code GADGET 3 to model an episode of galactic activity and measure star formation rates and morphological changes of CMZ. Initial conditions resemble the central few kpc of our Galaxy. I model multiple systems, with AGN luminosities of (0; 0,5; 1,0 L_{Edd}). I include hydrodynamics, gravitation, cooling, AGN feedback and star formation. I find increased star formation rates and more massive star clusters with AGN luminosity of 0,5 L_{Edd} compared to other luminosities. AGN of Eddington luminosity produces clusters with elliptical orbits, with periapses of tens of pc. Such clusters could be used as indicators of a recent episode of activity. The findings are consistent with observed young, massive clusters near Sgr A*, suggesting an episode of near-Eddington luminosity that lasted ~ 1 Myr; the CMZ is in a transient state recovering from such an episode that ended ~ 5 Myr ago.

Priedas Nr.1 AGN aplinkos vésimo funkcijos koeficientai

$$S_1 = -3.8 \times 10^{-27} \sqrt{T} \quad (37)$$

$$S_2 = 4.1 \times 10^{-35} (1.9 \times 10^7 - T) \xi \quad (38)$$

$$S_3 = 10^{-23} \frac{a + b(\xi/\xi_0)^c}{1 + (\xi/\xi_0)^c} \quad (39)$$

$$a = -\frac{18}{\exp(25(\log T - 4.35)^2)} - \frac{80}{\exp(5.5(\log T - 5.2)^2)} - \frac{17}{\exp(3.6(\log T - 6.5)^2)} \quad (40)$$

$$b = \frac{1.7 \times 10^4}{T^{0.7}} \quad (41)$$

$$c = 1.1 - \frac{1.1}{\exp(T/1.8 \times 10^5)} + \frac{4 \times 10^5}{T^4} \quad (42)$$

$$\xi_0 = \frac{1}{1.5/\sqrt{T} + 1.5 \times 10^{12}/\sqrt{T^5}} \quad (43)$$

Priedas Nr.2 Skersės potencialas

Skersės potencialas suformuotas asimetrinis, kvadrupolio formos [63]

$$\Phi(r, \theta, \phi) = 4\pi G \rho_0 r_0^2 \left(\frac{r}{r_0}\right)^\alpha P(\theta, \phi) \quad (44)$$

kur (r, θ, ϕ) yra standartinės sferinės koordinatės. SMBH patalpintas centre ($\mathbf{r} = \mathbf{0}$). Pagrindinė skersės ašis nukreipta x ašies kryptimi. P yra Ležandro polinomas

$$P(\theta, \phi) = \frac{1}{\alpha(1+\alpha)} - \frac{Y(\theta, \phi)}{(2-\alpha)(3+\alpha)} \quad (45)$$

$$Y(\theta, \phi) = -b_{20}P_{20}\cos(\phi) + b_{22}P_{22}\cos(\theta)\cos(2\phi) \quad (46)$$

$$P_{22} = 3\left(1 - \cos(\theta)^2\right) \quad (47)$$

$$P_{20} = \frac{3\cos(\theta)^2 - 1}{2} \quad (48)$$

koeficientų vertės parinktos $\alpha = 0,25; b_{20} = 0,3; b_{22} = 0,3$, suformuoja skersę kurios ašių santykiai yra (1:0,75:0,65). Parinktas skersės sukimosi greitis $\Omega = 40 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$. Korotacijos spindulys 5 kpc atstumu, o $x_1 - x_2$ orbitos susikerta 200 pc atstumu nuo SMBH.

Naudotas potencialas yra stacionarus, todėl įskaitytos išcentrinės ir Koriolio jėgos

$$F_{\text{Cor}} = -2m(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) \quad (49)$$

$$F_{\text{Cent}} = -m\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) \quad (50)$$

non est ad astra mollis e terris via