VILNIAUS UNIVERSITETO
FIZIKOS FAKULTETAS
TEORINĖS FIZIKOS IR ASTRONOMIJOS INSTITUTAS

Paulius Kazlauskas

Statistiškai reiškmingi skirtumai tarp aktyvių ir fosilinių tėkmių parametrų

BAKALAURO STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Fizikos studijų programa

Studentas	Paulius Kazlauskas
Leista ginti	2024-05-23
Darbo vadovas	Dr. Kastytis Zubovas
Instituto direktorius	Prof. Dr. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2024

Turinys

Įvadas **2**

1 Metodologija **3**

1.1 Tėkmių fizikinis modelis 3

1.2 Dujų mechanika 3

1.3 Skaitmeninis modelis 4

1.4 Pradinės sąlygos 5

2 Rezultatai **7**

2.1 Modelių morfologija 7

2.2 Fosilinių tėkmių dujų istorija 8

2.2.1 Atstumas nuo SMBH 9

2.2.2 Tankis 11

2.2.3 Temperatūra 14

2.2.4 Radialinis greitis 16

2.2.5 Patekimo į tėkmę laikas 19

Darbo išvados **20**

Literatūra **21**

Summary **22**

Įvadas

Šis įvadas yra parengtas pagal profesinės praktikos įvadą [1].

Didžiojoje dalyje mūsų Visatoje esančių galaktikų centrų yra juodosios skylės, daug masyvesnės, nei sukurtos žvaigždžių gravitacinio kolapso. Šių supermasyvių juodųjų skylių (toliau - SMBH) egzistavimą įrodo tai, jog kai kurių galaktikų centrai spinduliuoja visai likusiai galaktikai prilygstančią energiją. Šias dideles energijas galima paaiškinti dujų akrecija į juodąją skylę. Akrecija išlaisvina nuo 5,5 iki 42% dujų rimties masės (palyginus su sintezės 0,7%)[2]. Tokios galaktikos, kuriose vyksta akrecija vadinamos aktyviais galaktikos branduoliais (AGN). Galaktikos turinčios AGN vadinamos aktyviomis.

Supančiai galaktikai tokie energingi reiškiniai gali daryti didelę įtaką. Vienas iš aktyvių galaktikos branduolių sukeltų procesų yra dujų tėkmės galaktikose. Šias tėkmes generuoja AGN sukurtas vėjas - dėl vainiko spinduliavimo nuo akrecinio disko nustumtos dujos. Tuomet, šis vėjas trenkiasi į taržvaigždinę medžiaga - ISM - ir taip jo kinetinė energija virsta šilumine. Galiausiai, įkaitusios dujos pradeda plėstis, o dėl šios plėtros susiformuoja tėkmė [2].

Suformuotų tėkmių greičiai būna $10^2 - 10^3$ km/s eilės, ir šios tėkmės gali pernešti keliskelis šimtus saulės masių dujų per metus (žvaigždėdaros sparta tipiškai panaši: $10^0 - 10^2$ $M_\odot$/m. [3]). Be abejo, tai gali daryti nemenką įtaką visos galaktikos evoliucijai. Tėkmės gali iš galaktikos visiškai išstumti dujas, taip slopindamos naujų žvaigždžių gimimą. Be žvaigždėdaros slopinimo, tai taip pat sulėtina juodosios skylės augimą [4]. Tai gali paaiškinti tokius reiškinius kaip labai masyvių galaktikų ($M_* > 10^{11} M_\odot$) mažą skaičių ir didelį kiekį masyvių-pasyvių (tokių, kuriose nevyksta žvaigždėdara) galaktikų vietinėje Visatoje [3].

Dėl didelės svarbos galaktikų evoliucijos supratimui, tėkmių supratimas irgi vertingas. Pasibaigus AGN aktyvumui, tėkmė nepranyksta iškarto. Kurį laiką išlieka fosilinė tėkmė. Tokios tėkmės gali sudaryti iki 60% [5] visų stebimų tėkmių. Šio darbo tikslas: **nustatyti fosilines tėkmes sudarančių dujų savybių raidą**. Tam, kad pasiekti šį tikslą, išsikelti du uždaviniai:

1. Ištirti dujų, sudarančių fosilines tėkmes, kinematinių savybių istorijas prieš patenkant į tėkmę ir esant joje;

2. Nustatyti pradinių savybių skirtumus tarp dujų, sudarančių fosilines tėkmes ir kitų dujų.

1 Metodologija

1.1 Tėkmių fizikinis modelis

Šis skyrelis parašytas remiantis tėkmių fizikinio modelio aprašymu profesinės praktikos apraše [1].

AGN vėjo varomų tėkmių pagrindas - kvazi-reliatyvistinis vėjas, plačiu kampu paleistas iš akrecinio disko. AGN spinduliuotė šį vėją pagreitina iki greičių, esančių tarp $0,03\,c$ ir $0,3\,c$ [2]. Įgreitintas vėjas atsitrenkia į tarpžvaigždinę terpę (ISM) ir ją smarkiai įkaitina ($T_{\rm sh} = 10^{10}$K). Vienintelis efektyvus būdas dujoms vėsti tokioje temperatūroje yra atvirkštinė Komptono sklaida; tokiu atveju ISM perduodamas tik vėjo judesio kiekis. Tėkmėi pasiekus atstumą, kuriame Komptono sklaida nebeefektyvi (tipiškai $R < 1$ pc [6]), lyginant su kitais energijos pernašos būdais, sistema pasidaro adiabatinė; išsivysto energijos varoma tėkmė, kuri yra pakankamai galinga dujas išmesti iš galaktikos - tai smarkiai malšina žvaigždėdarą.

Tėkmės spindulio ir greičio santykis - jos dinaminė laiko skalė - yra nuo 10^5 iki 10^6 metų eilės, tačiau galaktikos aktyvumo epizodo - 10^4-10^5 metų eilės. Kitais žodžiais, nors AGN deaktyvuojasi, tėkmė vis dar išlieka nemažą laiko tarpą [5]. Tokios - fosilinės - tėkmės savybės gali padėti suprasti, kada galaktika paskutinį kartą buvo aktyvi.

1.2 Dujų mechanika

Dujų judėjimas aprašomas išskleistų dalelių hidrodinamikos skaitmeniniu modeliu, toliau vadinamu SPH. Šiame modelyje dujų būsena aprašoma diskrečiomis dalelėmis, o dujas aprašantys tolydūs dydžiai įvertinami naudojant skleidimo funkciją. Daleles aprašo jų koordinatės $r_{\rm i}$, greičiai $v_{\rm i}$, masės $m_{\rm i}$, tankiai $\rho_{\rm i}$, o jų termodinaminę būseną nusako entropija į masės vienetą $s_{\rm i}$. Papildomai, apibrėžiama entropinė funkcija $A \equiv P/\rho^\gamma$, su kuria patogiau atlikti skaičiavimus nei su s_i tiesiogiai [7].

SPH formuluotėje ypatingai svarbus yra tankio įvertinimas:

$$\rho_{\rm i} = \sum_{\rm j=1}^{N} m_{\rm j} W\left(|\vec{r}_{\rm ij}|,\ h_{\rm i}\right), \tag{1}$$

čia $|\vec{r}_{\rm ij}| \equiv |\vec{r}_{\rm i} - \vec{r}_{\rm j}|$ ir $W(r,\ h)$ yra SPH išskleidimo kernelis. Jis simetriškas bei normuotas:

$$\int_V W(|\vec{r} - \vec{r}\,'|,\ h)\, d^3r' = 1; \tag{2}$$

bei atitinka sąlygą [8]:

$$\lim_{h\to 0} W(|\vec{r} - \vec{r}\,'|,\ h) = \delta(|\vec{r} - \vec{r}\,'|). \tag{3}$$

Naudojamas Wendland C^2 kernelis[1]:

$$W(q) = \frac{21}{16\pi h^3}\left(1 - q/2\right)^4 (2q+1)\,, \qquad 0 \leq q \leq 2, \tag{4}$$

$$= 0, \qquad q > 2. \tag{5}$$

Čia $q = r/h$;h_i - adaptyvūs išskleidimo ilgiai kiekvienai dalelei. Šie ilgiai bei tankio įvertinimas turi tenkinti

$$\frac{4\pi}{3} h_\mathrm{i}^3 \rho_\mathrm{i} = N_\mathrm{sph} \bar{m}$$

sąryšį (N_sph - skleidimo kaimynių dalelių skaičius, $\bar{m}$ - tipinė dalelės masė). Kitais žodžiais, h_i parenkamas toks, kad kernelio tūryje esanti masė apskaičiuotąjam tankiui būtų konstanta [7]. Naudojamas kaimynių skaičius - 100 [5].

SPH dalelių judėjimo lygtis, išvesta iš diskretizuotų fluido Lagranžo lygčių:

$$\frac{\mathrm{d}v_\mathrm{i}}{\mathrm{d}t} = -\sum_{\mathrm{j}=1}^{N} m_\mathrm{j} \left[f_\mathrm{i} \frac{P_\mathrm{i}}{\rho_\mathrm{i}^2} \nabla_\mathrm{i} W_\mathrm{ij}(h_\mathrm{i}) + f_\mathrm{j} \frac{P_\mathrm{j}}{\rho_\mathrm{j}^2} \nabla_\mathrm{i} W_\mathrm{ij}(h_\mathrm{j}) \right] \tag{6}$$

f_i apibrėžimas [7]:

$$f_\mathrm{i} = \left(1 + \frac{h_\mathrm{i}}{3\rho_\mathrm{i}} \frac{\delta\rho_\mathrm{i}}{\delta h_\mathrm{i}}\right)^{-1}.$$

Į modelį galima įtraukti gravitaciją ir kitas veikiančias jėgas, dirbtinę klampą ir t.t.

1.3 Skaitmeninis modelis

Šis bei **1.4** skyreliai parengti remiantis [5] straipsniu. Juose pateikiama santrauka apie GADGET-3 modelio SPH implementaciją bei parengimą modeliavimui.

Sugeneruoti tiriamuosius duomenis naudotas GADGET-3 programinis paketas, kuris yra modifikuota viešai prieinamo GADGET-2 [7] paketo versija.

AGN grįžtamasis ryšys sekamas virtualių dalelių metodu: AGN skleidžia žyminčiąsias daleles, judančias tiesia trajektorija greičiu $v_\mathrm{w} = 0,1\ c$ tol, kol pasiekia SPH dalelės skleidimo kernelį. Tuomet, AGN dalelė per kelis laiko žingsnelius perduoda perneštą judesio kiekio momentą bei energiją SPH dalelei. Toks metodas pranašus tuo, jog realistiškai atkartoja sferiškai nesimetriškas tėkmes atvejais, kai dujų distribucija netolygi.

Dujų terminė evoliucija aprašoma subraiškiniu receptu. Virš slenkstinės $T_\mathrm{thresh} = 10^4$ K, modeliuojama Komptono sklaida (ir vėsimui ir kaitimui), Bremsstrahlung, vėsimas metalo linijų emisija optiškai retose dujose, švitinamose AGN spinduliuotės. Kai AGN neaktyvus, aktyvi tik vėsimo funkcijos dalis. Žemesnėms nei slenkstinė temperatūroms, naudojama kita funkcija, neturinti kaitimo nuo AGN spinduliuotės. Įvertinama dujų jonizacijos dalis bei vidutinė atominė masė kiekvienoje SPH dalelėje, kuri svyruoja nuo $\mu_\mathrm{max} = 1,22$ žemiau slenkstinės temperatūros ir iki $\mu_\mathrm{min} = 0,63$ aukščiau jos. Tam, jog dujų Jeans masė nenukristų žemiau simuliacijos raiškos ($m_\mathrm{res} = 100\ m_{SPH}$), priskiriamas temperatūros mini-

[1] https://pysph.readthedocs.io/en/latest/reference/kernels.html

mumas:

$$T_{\text{floor}} = \rho^{1/3} \frac{\mu m_{\text{p}} G}{\pi k_{\text{B}}} (m_{\text{res}})^{2/3}.$$

Galiausia, dujos, kurių dalelių tankis $n > 100$ cm^{-3} ir temperatūra minimume, paverčiamos žvaigždėmis atsitiktinai, su 10% tikimybe per dinaminį laiką.

1.4 Pradinės sąlygos

Pradinės sąlygos parinktos taip, kad sudarytų idealizuotą centrinį galaktikos telkinį. Koordinačių centre padedama SMBH, o ją supa vidinio spindulio $R_{\text{in}} = 100$ pc dujų kevalas. Jame yra $N_{\text{gas}} \simeq 10^6$ dalelių. Šioms dujoms priskiriamas $\nabla \cdot \vec{v} = 0$ turbulentiškas greičių laukas. Turbulencija nevaroma simuliacijos metu.

Originaliame straipsnyje iš viso simuliajami 20 modelių, tačiau šiame darbe tiriame tik 4: M7L10T1, M7L12T1, M8L10T1, M8L12T1. Pirmieji du simboliai modelio pavadinime nurodo SMBH masę: M7 modeliuose juodoji skylė yra 10^7 M$_\odot$, o M8 modeliuose - 10^8 M$_\odot$. SMBH masė taip pat nulemia kitus parametrus: visą centrinio telkinio (baldžo) masę, išorinį kevalo spindulį bei foninio gravitacinio potencialo stiprumą.

Baldžo masė randama iš stebėjimų gauto sąryšio su SMBH mase:

$$\log\left(\frac{M_{\text{b}}}{10^{11}\text{M}_\odot}\right) = \frac{\log\left(\frac{M_{\text{BH}}}{\text{M}_\odot}\right) - 8,46}{1,05}; \tag{7}$$

turimoms dviems masių grupėms:

$$M_{\text{b,M7}} = 4,1 \cdot 10^9\,\text{M}_\odot;\ M_{\text{b,M8}} = 3,7 \cdot 10^{10}\,\text{M}_\odot.$$

Dujų masė nustatoma lygi 10% baldžo masės.

Randama baldžo greičių dispersija iš M-σ sąryšio:

$$\log\left(\frac{\sigma}{200\text{kms}^{-1}}\right) = \frac{\log\left(\frac{M_{\text{BH}}}{\text{M}_\odot}\right) - 8,32}{5,64}; \tag{8}$$

tada mūsų simuliacijoms:

$$\sigma_{\text{M7}} = 127\ \text{kms}^{-1};\ \sigma_{\text{M8}} = 191\ \text{kms}^{-1}.$$

Sukuriamas statinis, izoterminis gravitacinis potencialas, suteikiantis $v_{\text{c}} = \sqrt{2\sigma}$ apskritiminio judėjimo greitį. Dujas veikia jų pačių ir SMBH gravitacija.

Baldžo spindulys apskaičiuojamas:

$$R_{\text{bulge}} = \frac{GM_{\text{tot,b}}}{2\sigma^2}; \tag{9}$$

abiejų masių simuliacijų vertės:

$$R_{\mathrm{b,M7}} = 0,64 \text{ kpc};\ R_{\mathrm{b,M8}} = 2,57 \text{ kpc}.$$

Šis spindulys - išorinis dujų kevalo spindulys.

Sekantys trys modelio pavadinimo simboliai nusako AGN aktyvumo šviesį Edingtono frakcija: L10 simuliacijose $l = L_{\mathrm{AGN}}/L_{\mathrm{edd}}$ yra 1, o L12 modeliuose - 1,2. Edingtono šviesis yra $L_{\mathrm{edd}} \simeq 1,3 \cdot 10^{45}\ M_{\mathrm{BH}}/(10^7\,\mathrm{M}_\odot)\ \mathrm{erg\,s^{-1}}$. AGN aktyvuojasi $t = 1 \cdot 10^6\,m.$ ir epizodas trunka iki $t_q = 2 \cdot 10^6\,m.$ Daugiau aktyvumo epizodų nėra.

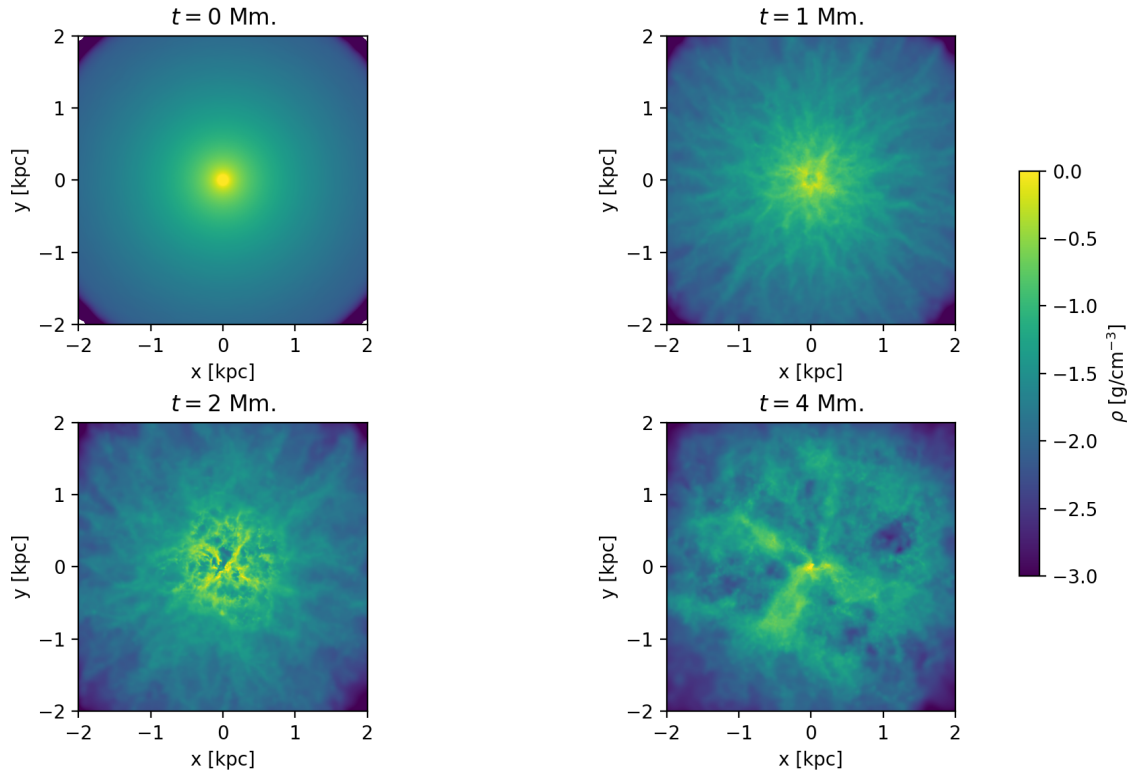
2 Rezultatai

Modelis kas 50 tūkst. metų padaro visos sistemos momentinę nuotrauką: nuotraukoje įrašomi dujų (SPH) dalelių tankis, masė, greičio ir pozicijos vektoriai, vidinė energija; SMBH masė, pozicija ir greitis (juodoji skylė visada koordinačių centre ir nejuda) ir t.t. Kiekviena SPH dalelė taip pat turi savo ID numerį, pagal kurį galima sekti atskiras daleles skaitmeninio modeliavimo eigoje.

Duomenys analizuojami naudojantis „Python“ kalba parašytais įrankiais: pygadgetreader[2] naudojamas pakrauti nuotraukas, kurios įšsaugomos dvejetainiu (binary) formatu; poeticpenny, naudojamas gadget fizikinių dydžių vienetams nustatyti, duomenų atvaizdavimui ir t.t. Be to, naudojamos NumPy, SciPy ir matplotlib [3] bibliotekos skaičiavimas bei duomenų atvaizdavimui.

2.1 Modelių morfologija

Modelių morfologija pristatoma nubraižant keturis M8L12T1 modelio tankio žemėlapius įvairiais laiko momentais: modelio pirminėmis sąlygomis; prieš prasidedant AGN aktyvumo epizodui; epizodui pasibaigus; 2 Mm. po aktyvumo epizodo.



1 pav.: M8L12T1 modelio tankio žemėlapiai skirtingais laiko momentais.

1 pav. pavaizduoti modelio tankio žemėlapiai. $t = 0$ Mm. momentu yra tankus regionas aplink SMBH, toliau retėjančios dujos $1/r^2$ dėsniu. Pasiskirstymas tolydus.

[2] https://github.com/jveitchmichaelis/pygadgetreader
[3] https://github.com/matplotlib/matplotlib

$t = 1$ Mm., prieš prasidedant aktyvumo epizodui, jau matyti modelio sutankėjimai (gravitacijos ir dalelėm suteikto turbulentiško greičių lauko sukeltas medžiagos telkimasis) - dujos nebepasiskirsčiusios tolydžiai, modelis relaksavęs.

$t = 2$ Mm., AGN aktyvumo epizodo gale, tėkmė sukuria keturias pagrindines sutankėjimo sritis - tai 4 plonos pailgos gijos, einančios iš centro išorėn. Virš SMBH susidaro burbulas kuriame dujų tankis ženkliai mažesnis už aplinką. Šiuo metu tėkmės spindulys yra apie 500 parsekų.

$t = 4$ Mm., 2 Mm. po aktyvumo epizodo baigties, vis dar matomos 4 tėkmės gijos, šiuo metu jau išplitusios kartu su tėkme iki 1,5 kpc atstumo. Viduje tėkmės fronto ties šiuo spinduliu ir tarp tankesnių 4 filamentų, matyti 4 retesnių dujų burbulai, iš kurių tėkmė išstumė dalį dujų.

2.2 Fosilinių tėkmių dujų istorija

Sekami 4 dujų parametrai: atstumas nuo SMBH, dujų tankis, temperatūra bei radialinis greitis. Iš pozicijos, greičių, tankio bei vidinės energijos išvedami visi likę dujų parametrai, todėl jų savybės itin svarbios. Tam, kad duomenis būtų lengviau analizuoti bei atvaizduoti, pozicijos vektoriai normuojami $r = \sqrt{r_{\mathrm{x}}^2 + r_{\mathrm{y}}^2 + r_{\mathrm{z}}^2}$; iš greičių ir pozicijos vektorių apskaičiuojami radialiniai greičiai $v_{\mathrm{r}} = \dfrac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{r}$; $r = \|\vec{r}\|$; iš vidinės energijos apskaičiuojama temperatūra.

Išskiriami trys skirstiniai:

1. Dalelės, kurios išlieka tėkmėje iki 4 Mm. Toliau vadinamas fosilinių tėkmių skirstiniu.
2. Visos dalelės esančios tėkmėje laiko momentu $t = 2\,\mathrm{Mm}$. Toliau - aktyvių tėkmių skirstinys.
3. Visos egzistuojančios dalelės laiko momentu $t = 2\,\mathrm{Mm}$. Tai visų dalelių skirstinys.

Dalelė laikoma esanti tėkmėje tuomet, kai jai galioja sąlyga:

$$v_{\mathrm{r}} \geq 2\sigma$$

t.y., dalelės radialinis greitis turi būti didesnis nei dviguba greičių dispersijos vertė [5].

1 lentelė: Tiriamų modelių skirstinių dydžių lentelė.

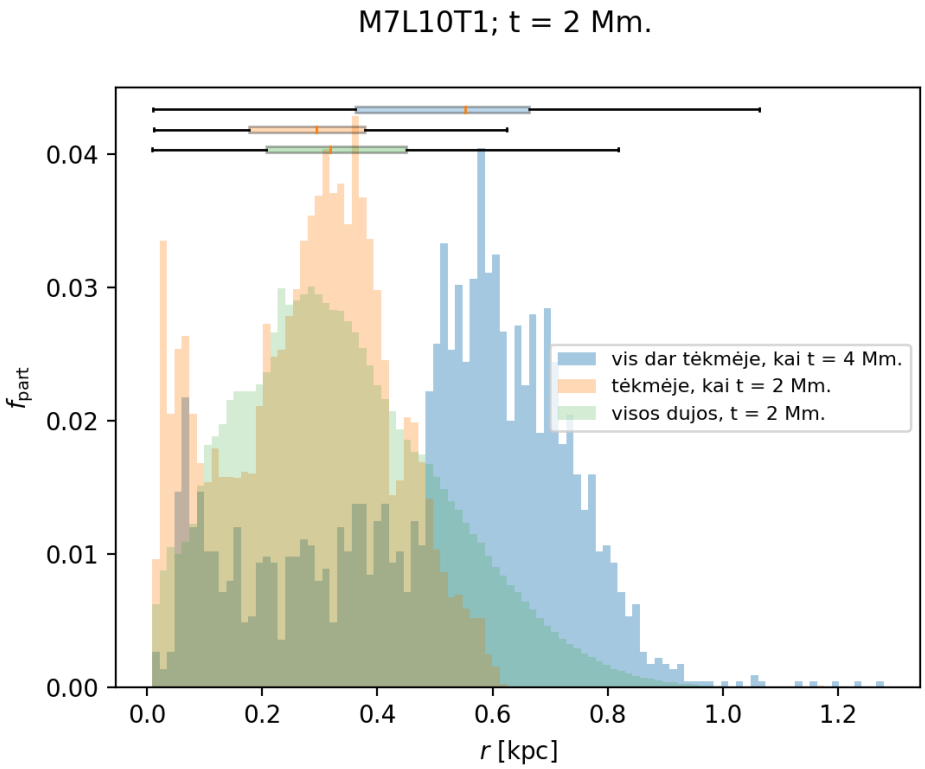
Skirstinys	M7L10T1	M7L12T1	M8L10T1	M8L12T1
Fosilinių tėkmių	2250	24360	335	4205
Aktyvių tėkmių	17430	56408	34941	55242
Visų dalelių	867912	871848	923185	923481

Šie skirstiniai pavaizduoti histogramose; virš histogramų taip pat yra vadinamieji dėžių grafikai (angl. „box and whiskers plot“). Raudona linija parodo skirstinio medianą, o pati

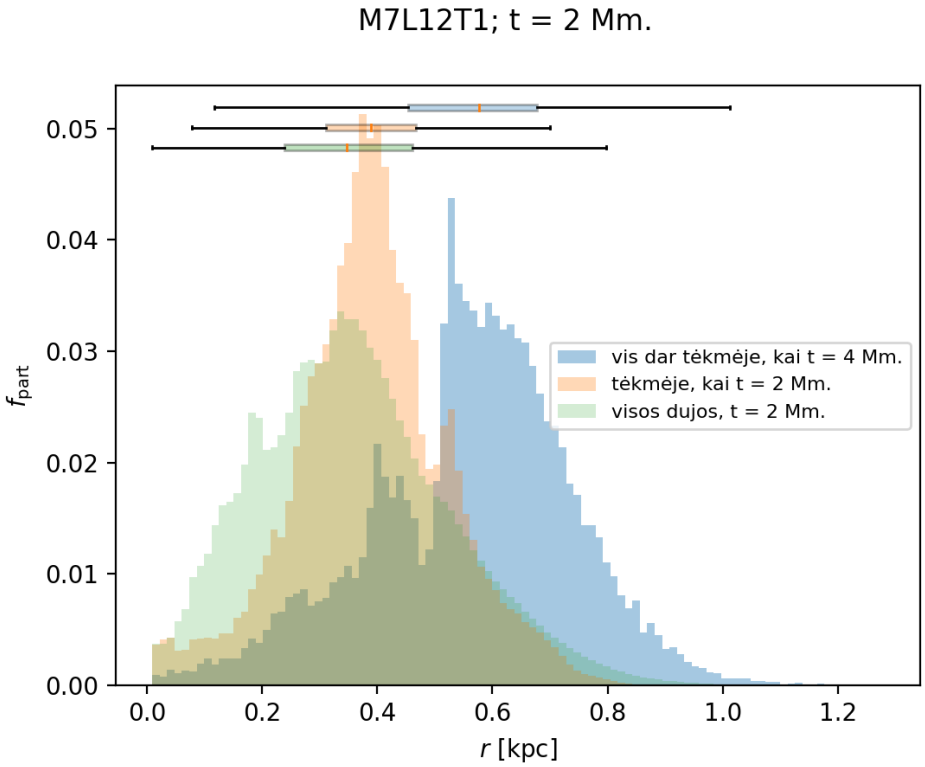
dėželė eina nuo pirmojo iki trečiojo kvartilio (atitinkamai atskiria žemiausius ir aukščiausius 25% duomenų). „Ūsai“ apima $1,5 \cdot (Q_3 - Q_1)$. Skirstiniams atliekami Kolmogorovo-Smirnovo testai įvertinti skirtumų tarp jų statistinį reikšmingumą. Pagal KS testų rezultatus, visos imtys skirtingos - p-vertė visais atvejais nykstamai maža.

2.2.1 Atstumas nuo SMBH

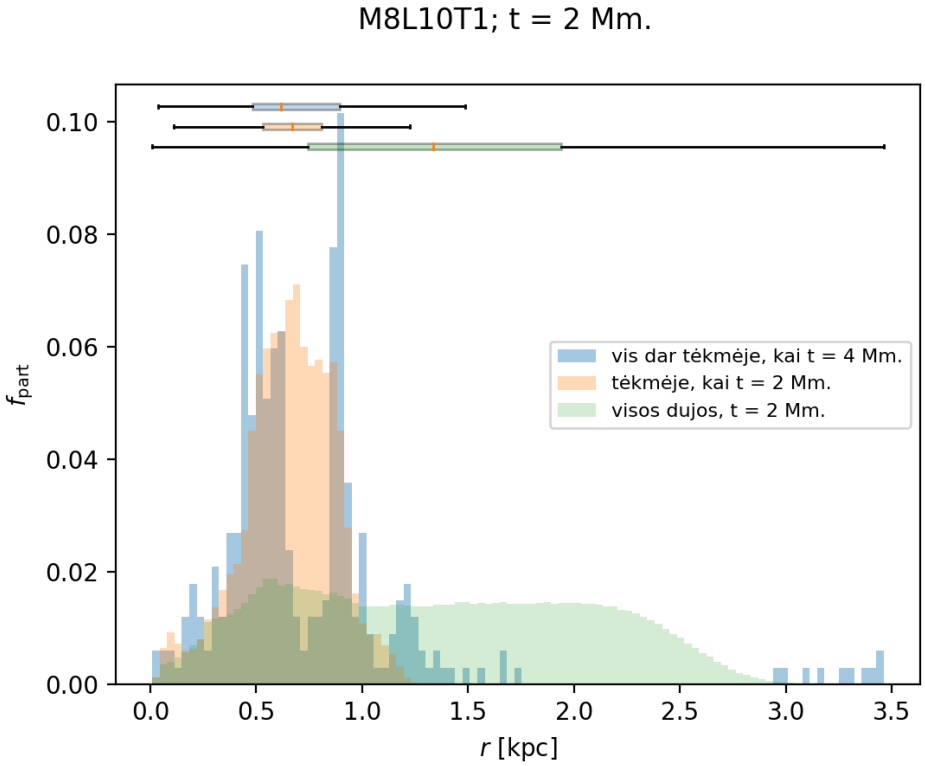
Pirmas sekamas dujų parametras yra jų atstumas nuo juodosios skylės. Pagal bendrą duomenų pasiskirstymą, tvirtai teigti, jog skirstiniai tikrai skirtingi teigti negalima. Iš dėžių grafikų matyti, jog skirstiniai daugumoje atvejų persidengia vienas su kitu.



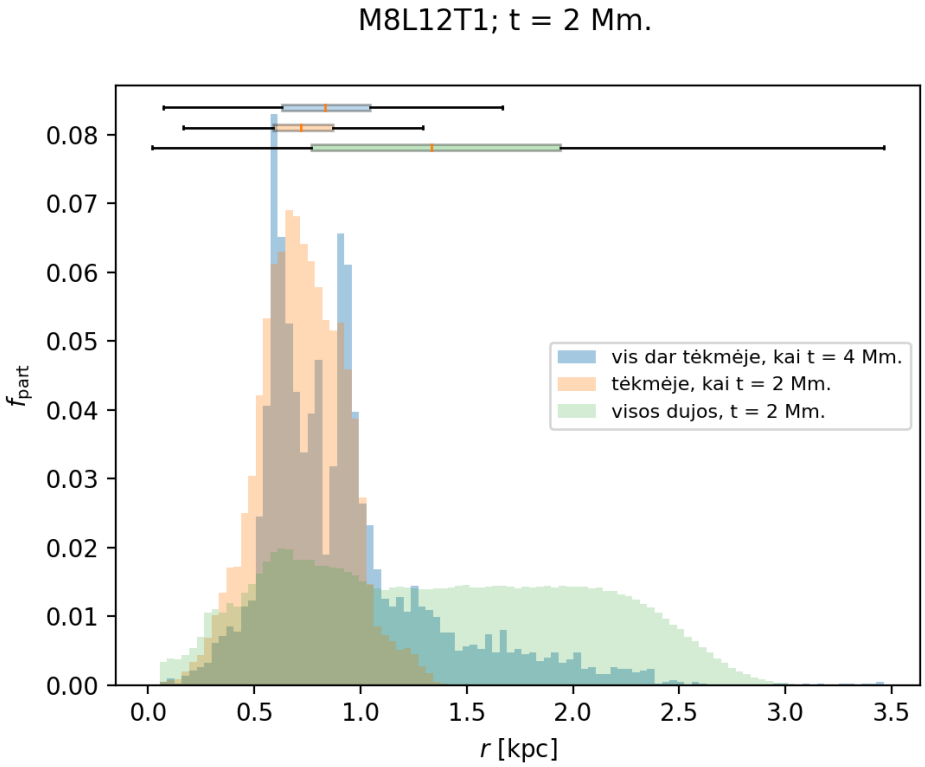
2 pav.: Atstumo nuo SMBH histogramos M7L10T1 modelyje. Mėlyna spalva pavaizduotas pirmasis (fosilinių tėkmių dalelių) skirstinys; oranžine - antrasis (aktyvių tėkmių dalelių); žalia - trečiasis (visų dalelių). Pavaizduota, kokia buvo šių dalelių pozicija laiko momentu $t = 2\,\text{Mm}$. x ašyje atstumas kiloparsekais, y ašyje normuotas kiekis. Kiekis normuotas taip, jog visos histogramos dėželės susidėtų į 1.



3 pav.: Toks pat, kaip 2 pav., tik M7L12T1 modelis.



4 pav.: Toks pat, kaip 2 pav., tik M8L10T1 modelis.



5 pav.: Toks pat, kaip 2 pav., tik M8L12T1 modelis.

Pav. 2 matoma, jog ilgiau fosilinėje tėkmeje išlikusios dujos aktyvumo epizodo gale yra toliau nuo SMBH nei kitų skirstinių dujos. Būdamos toliau, jos toliau nuo SMBH gravitacinio potencialo. Taip pat, tai gali lemti jų nepatekimą į atgalinę tėkmę, susidariusią po AGN aktyvumo epizodo.

3 pav. matomas labai panašus rezultatas į 2 pav.: fosilinių tėkmių skirstinio dalelės AGN epizodo pabaigoje yra apie 0,6 kpc atstumu nuo SMBH. Mažesnysis spyglys ties 0,4 kpc paaiškinamas tuo, jog jis sutampa su tankiausia aktyvių tėkmių skirstinio sritimi. Tai yra, tikėtina, jog iš tikėtiniausio atstumo to skirstinio dujų ateityje susidarys fosilinė tėkmė.

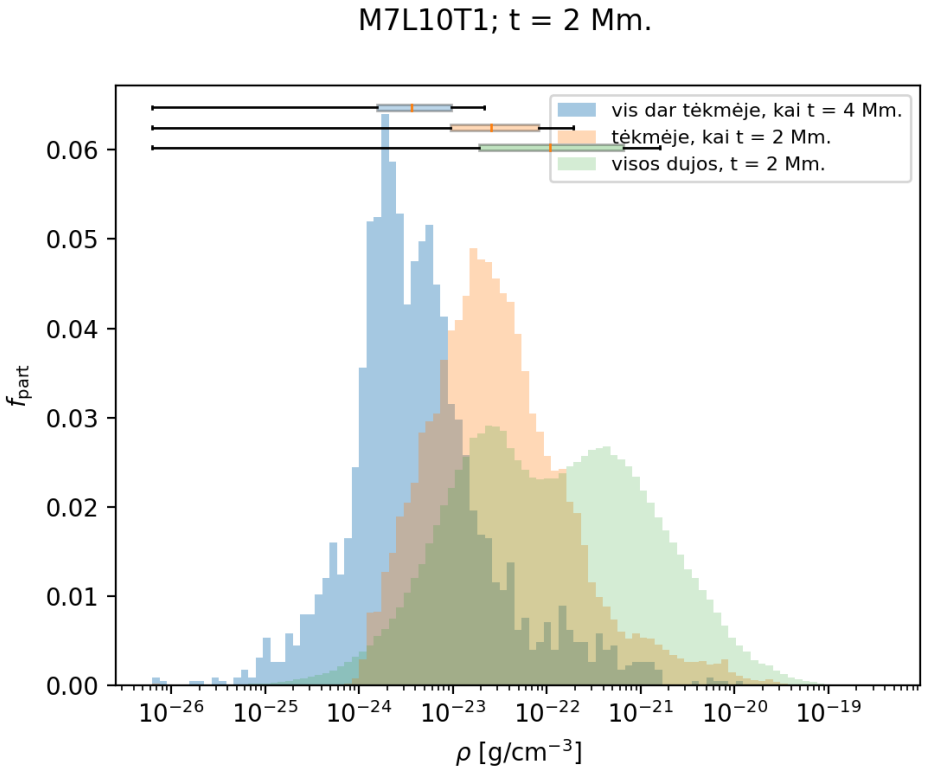
4 pav. matosi, jog fosilinių tėkmių skirstinio dydis mažesnis, nei M7 modeliuose. Masyvesnė SMBH turi ir didesnę gravitacinį potencialą - AGN epizodo šviesis nebuvo pakankamai didelis, jog sukurtų ilgalaikes fosilines tėkmes. Ties $t = 5$ Mm., tėkmės beveik išvis nebelieka.

Iš 5 pav. matyti, jog M8L12T1 fosilinės tėkmės pagrinde susidaro tiesiog iš dalies aktyvioje tėkmėje buvusių dalelių.

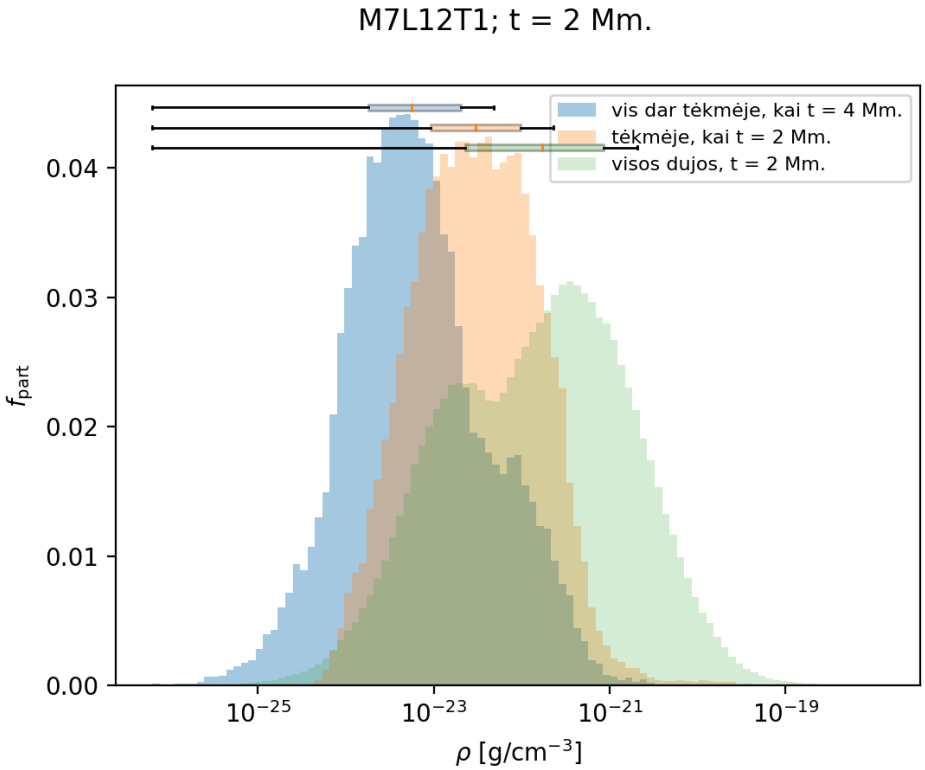
Iš rezultatų matyti, jog mažesnės masės galaktikose (M7), fosilinės tėkmės formuojasi iš toliau esančių dujų, nei tos kurios patenka į aktyviąją tėkmę. Didesnės masės galaktikose gravitacinis potencialas didesnis, todėl fosilinės tėkmės formuojasi būtent iš aktyvioje tėkmėje dalyvavusių dujų.

2.2.2 Tankis

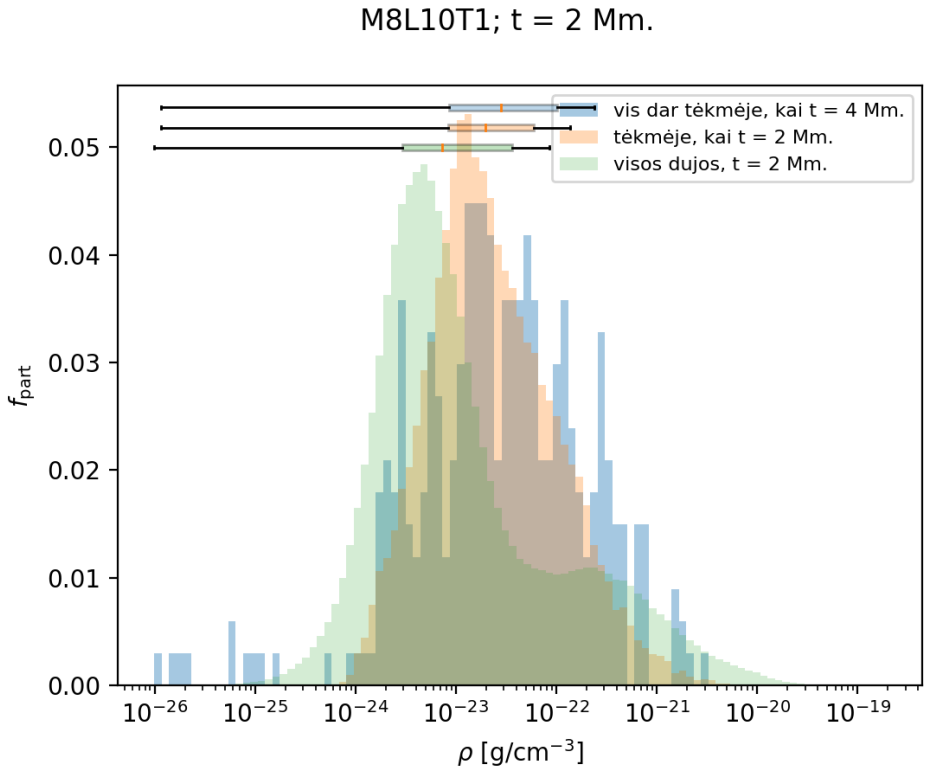
Antras sekamas dujų parametras - dujų tankis SPH dalelėje. Skirstiniai tie patys, kaip atstumo skiltyje.



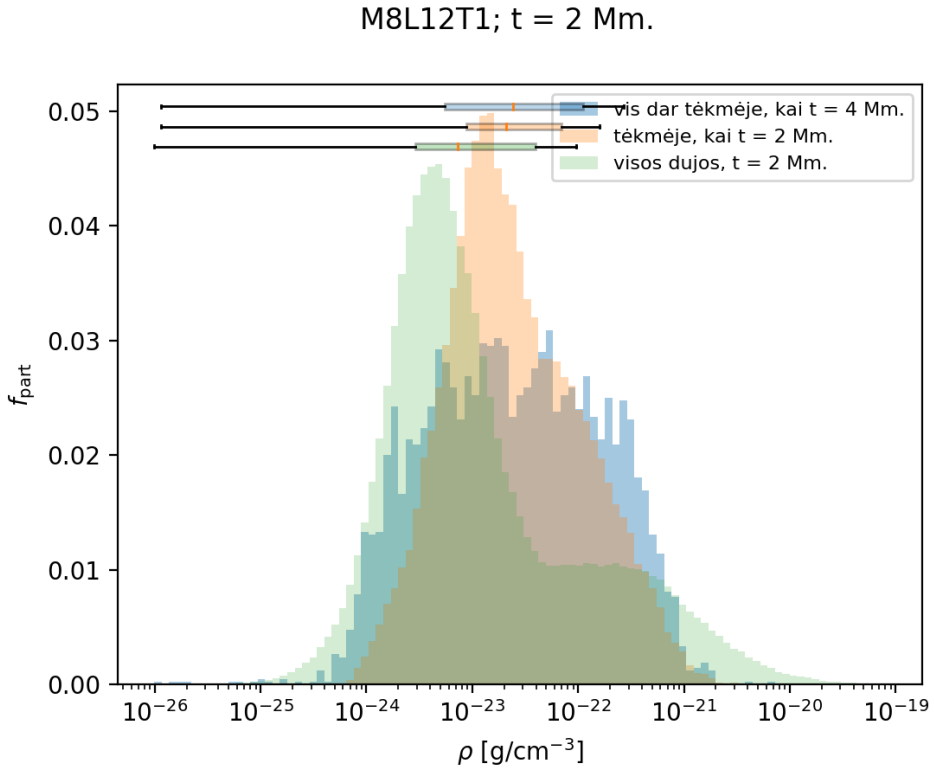
6 pav.: Dujų tankio M7L10T1 modelyje histograma. Mėlyna spalva pavaizduotas pirmasis (fosilinių tėkmių dalelių) skirstinys; oranžine - antrasis (aktyvių tėkmių dalelių); žalia - trečiasis (visų dalelių). Pavaizduota, koks buvo šių dalelių tankis laiko momentu $t = 2\,\text{Mm}$. x ašyje tankis g/cm^{-3}, y ašyje normuotas kiekis. Kiekis normuotas taip, jog visos histogramos dėželės susidėtų į 1.



7 pav.: Toks pat, kaip 6 pav., bet M7L12T1 modelis.



8 pav.: Toks pat, kaip 6 pav., bet M8L10T1 modelis.



9 pav.: Toks pat, kaip 6 pav., bet M8L12T1 modelis.

Pav. 6 pavaizduotos M7L10T1 SPH dujų tankio histogramos. Fosilines tėkmes sudaro rečiausios dujos, aktyvias tėkmes tankesnės, o visų dujų skirstinys turi 2 viršūnes: vieną sutampančią su aktyvių galaktikų tėkmių, kitą - dar tankesnę. Taigi, matosi koreliacija tarp

tankio ir tėkmės amžiaus: retesnės dujos tėkmėje išlieka ilgiau.

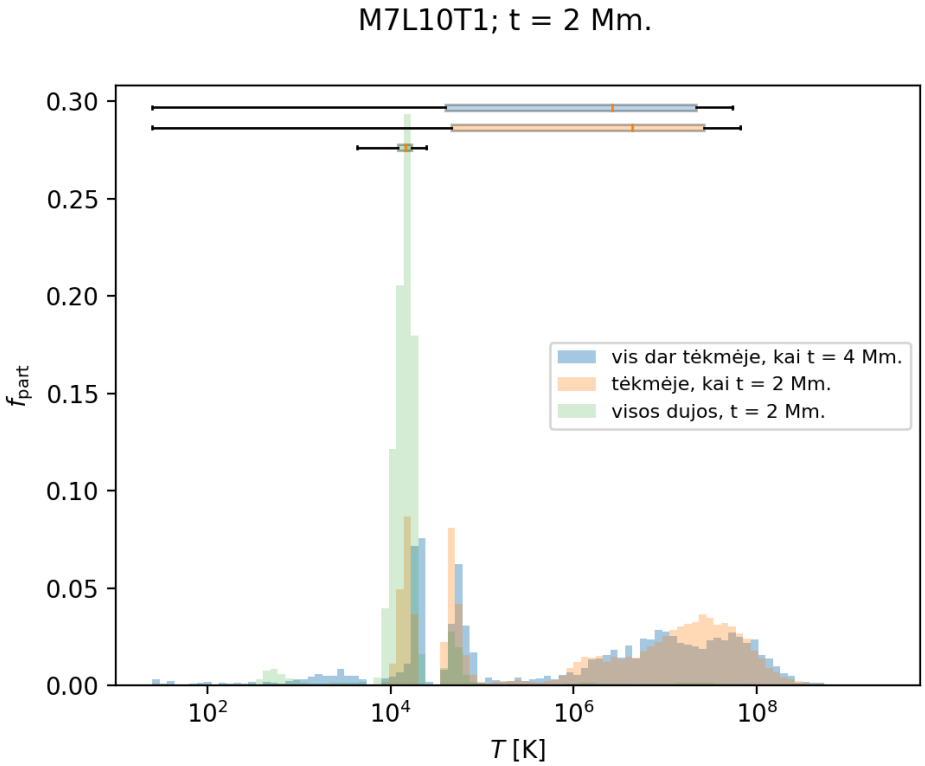
Pav. 7 pavaizduotos M7L12T1 SPH dujų tankio histogramos. Matomas panašus pasiskirstymas, kaip pav. 6. Tėkmių skirstiniai labiau pasklidę - energingesnė tėkmė įtraukia tankesnes dujas. Visų dujų skirstinyje dominuoja tankesnės dujos. Tai rodo, jog energingesnė tėkmė sukuria daugiau didelio tankio sričių.

Pav. 8 nubraižytos M8L10T1 SPH dujų tankio histogramos. Ne taip kaip M7 modeliuose, šiame modelyje dominuoja retesnės dujos. Tačiau tėkmės vis tiek pagrinde susidaro iš 10^{-24}–10^{-21} g/cm^{-3} tankio dujų, kaip ir M7 modeliuose. Pastebima stipri koreliacija tarp fosilinių ir aktyvių tėkmių skirstinių.

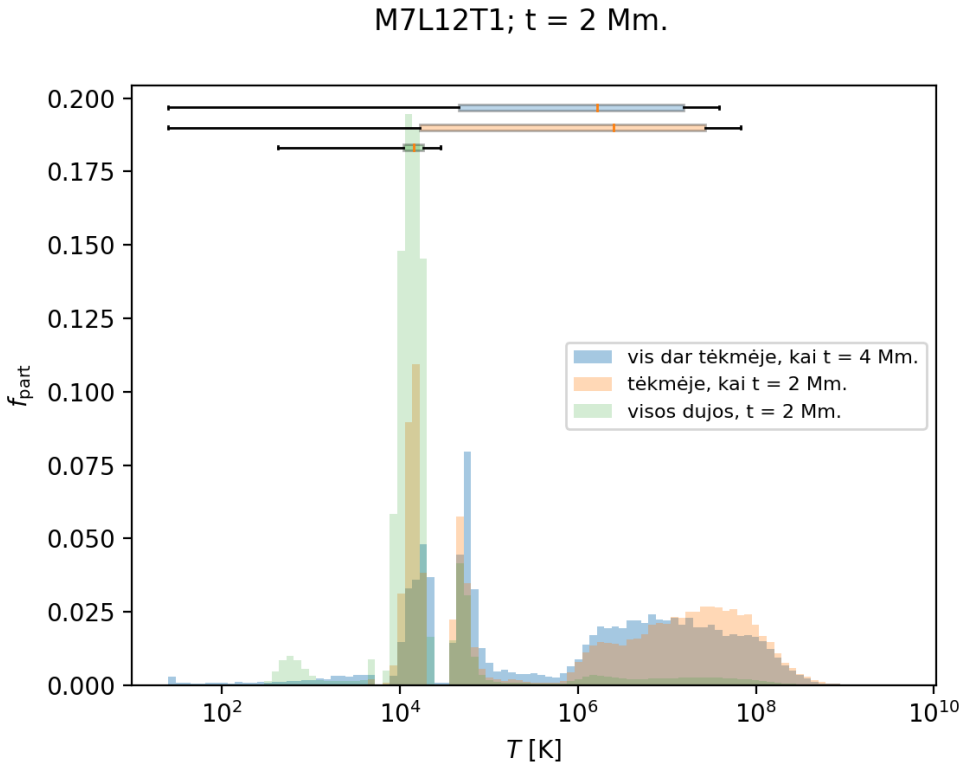
Pav. 9 matomos M8L12T1 SPH dujų tankio histogramos. Aktyvių ir visų dujų skirstiniai beveik sutampa su M8L10T1 modeliu - didesnis šviesi tankių pasiskirstymo nelabai paveikia. Tačiau fosilinių tėkmių skirstinio rezultatai labai išplitę - nebematoma tokia stipri koreliacija tarp fosilinių ir aktyvių tėkmių skirstinių, kaip M8L10T1. Tai gali reikšti, jog tankis stipriai neįtakoja tokios stiprios tėkmės.

2.2.3 Temperatūra

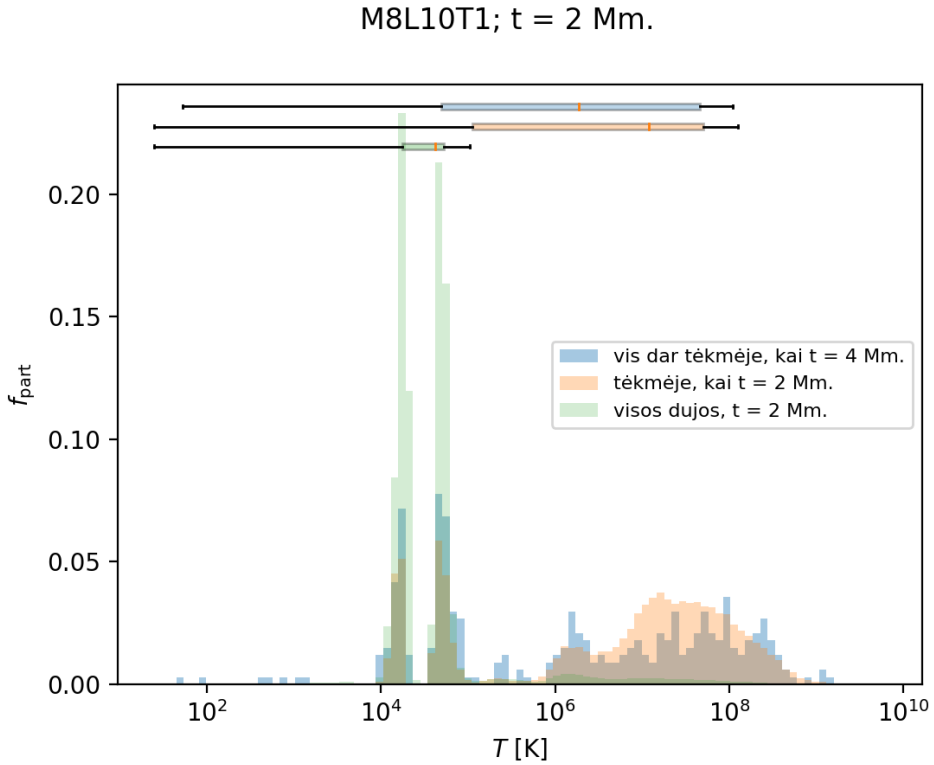
Trečias sekamas dujų parametras - dujų temperatūra SPH dalelėje. Temperatūra apskaičiuojama iš dujų vidinės energijos. Skirstiniai tie patys, kaip atstumo bei tankio poskyriuose.



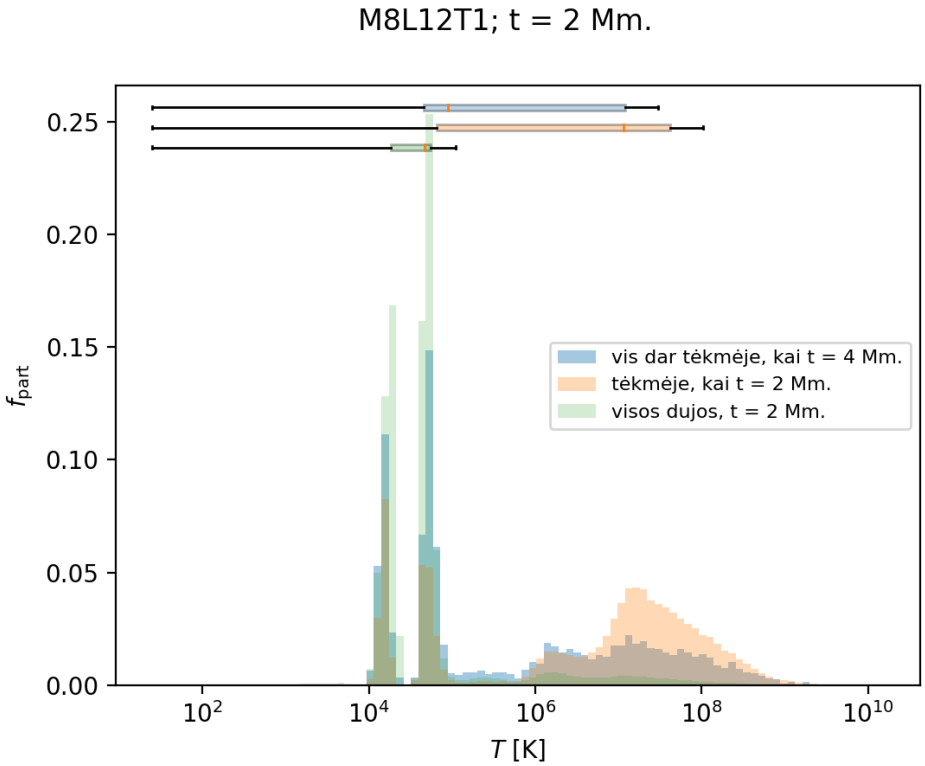
10 pav.: Dujų temperatūros M7L10T1 modelyje histograma. Mėlyna spalva pavaizduotas pirmasis (fosilinių tėkmių dalelių) skirstinys; oranžine - antrasis (aktyvių tėkmių dalelių); žalia - trečiasis (visų dalelių). Pavaizduota, kokia buvo šių dalelių temperatūra laiko momentu $t = 2\,\mathrm{Mm}$. x ašyje temperatūra kelvinais, y ašyje normuotas kiekis. Kiekis normuotas taip, jog visos histogramos dėželės susidėtų į 1.



11 pav.: Toks pat, kaip 10 pav., tik M7L12T1 modelis.



12 pav.: Toks pat, kaip 10 pav., tik M8L10T1 modelis.



13 pav.: Toks pat, kaip 10 pav., tik M8L12T1 modelis.

10 pav. nubrėžtos M7L10T1 temperatūros histogramos. Abu tėkmių skirstiniai statistiškai panašūs - artimos medianos bei duomenų pasiskirstymas. Didžioji dauguma visų dujų yra 10^4 K temperatūros; tėkmės susideda iš šios temperatūros dujų, bet tokia pati proporcija dujų yra šiek tiek karštesnės, apie 10^5 K. Taip pat tėkmėse yra nemažas kiekis ženkliai karštesnių dujų, $10^6 - 10^8$ K temperatūros.

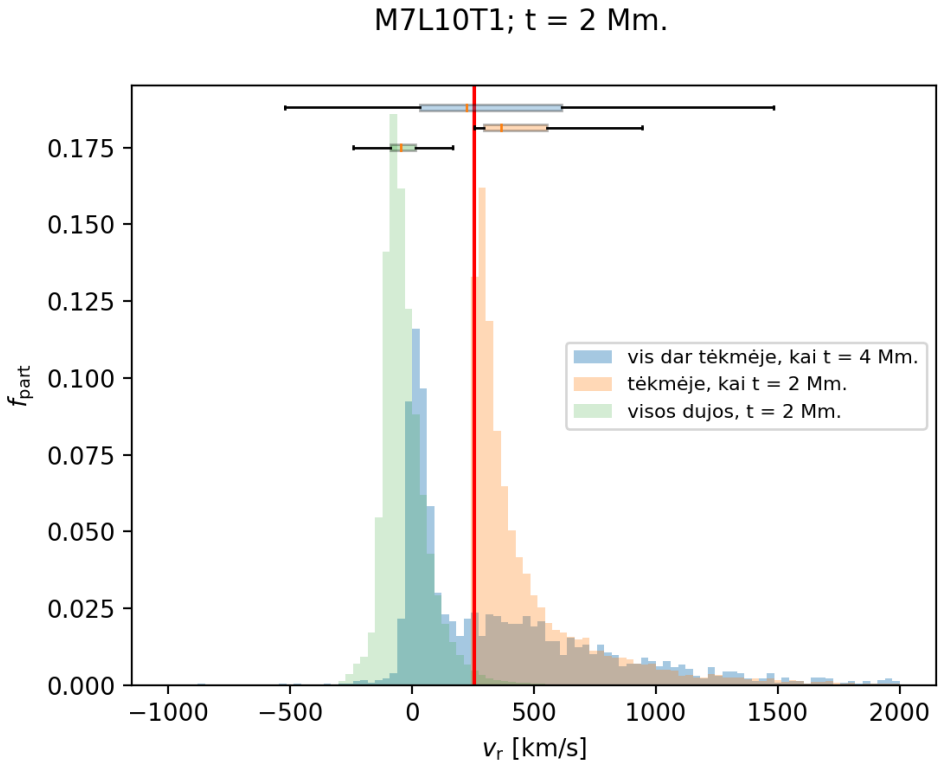
11 pav. nubrėžtos M7L12T1 temperatūros histogramos ir matoma labai panaši situacija į M7L10T1. Rezultatai yra labiau išplitę - bendras karštų dujų kiekis didesnis dėl energingesnio AGN epizodo. Didesnė aktyvių tėkmių skirstinio dalis yra žemos temperatūros, nei M7L10T1.

12 pav. nubrėžtos M8L10T1 temperatūros histogramos. Duomenų pasiskirstymas panašus į M7 modelius, tačiau bendra temperatūra dar didesnė. Visų dujų skirstinyje yra antra viršūnė ties 10^5 K, kur pasislinko ir mediana. Tėkmių skirstiniai vis tiek labai išplitę, bet fosilinių tėkmių skirstinio mediana išlieka truputėlį mažesnė už aktyvių galaktikų tėkmių skirstinio.

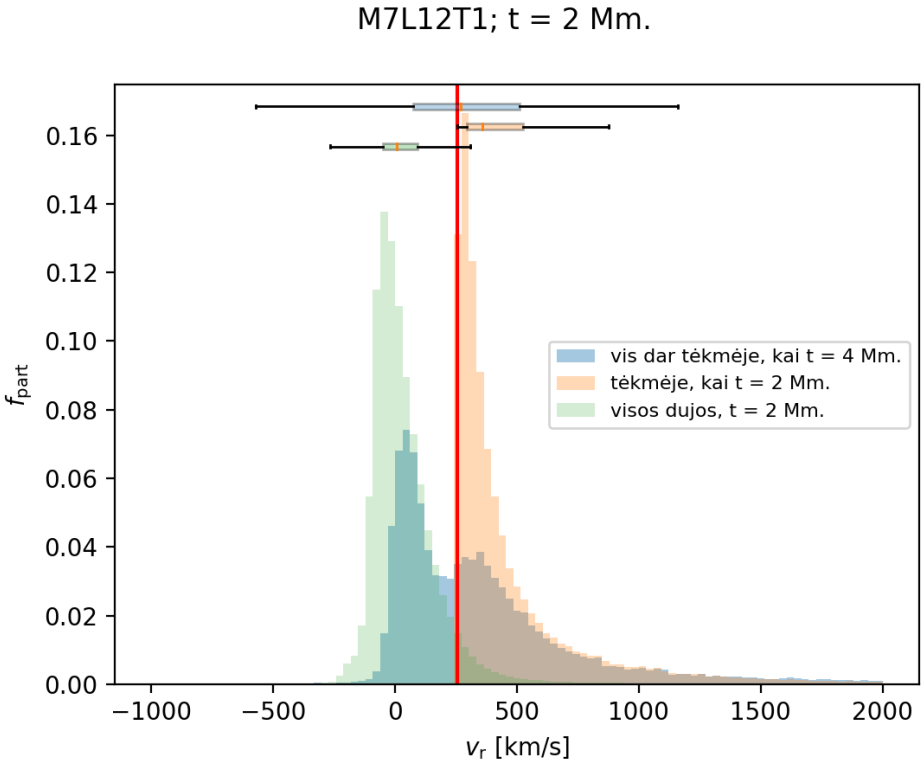
13 pav. nubrėžtos M8L12T1 temperatūros histogramos. Čia didžioji dalis fosilinių tėkmių skirstinio yra tokios pat temperatūros, kaip visos dujos. Tai gali indikuoti, jog daug fosilinių tėkmių skirstinio dujų šiuo laiko momentu dar net nėra tėkmėje.

2.2.4 Radialinis greitis

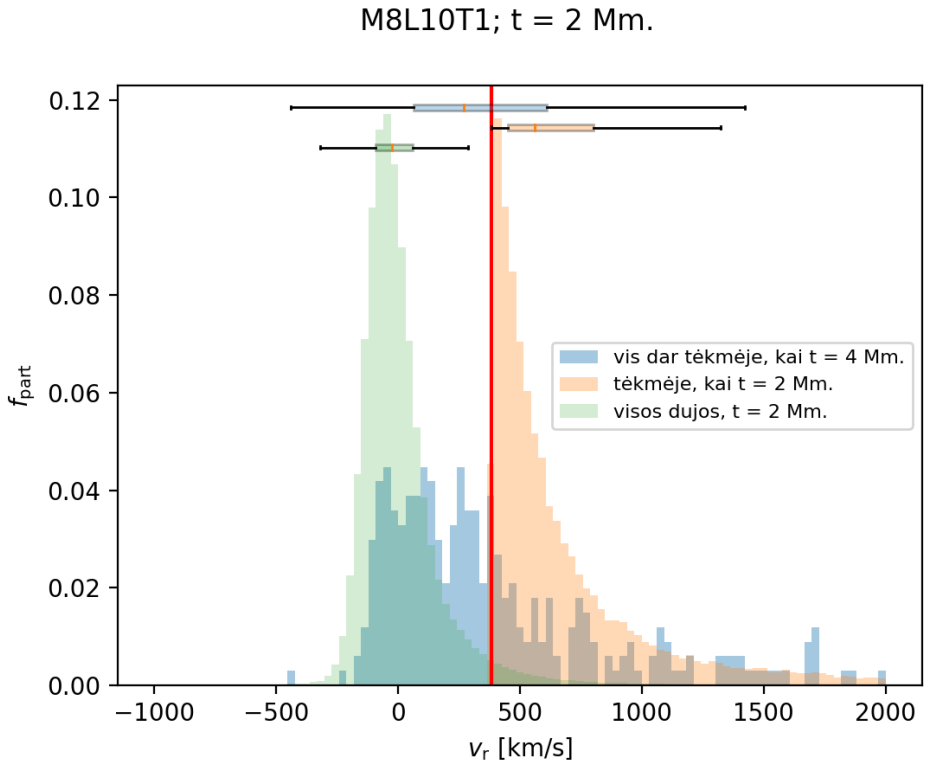
Ypač svarbus yra radialinio greičio apskaičiavimas, nes jis apibrėžia, kurios dujos dalyvauja tėkmėje.



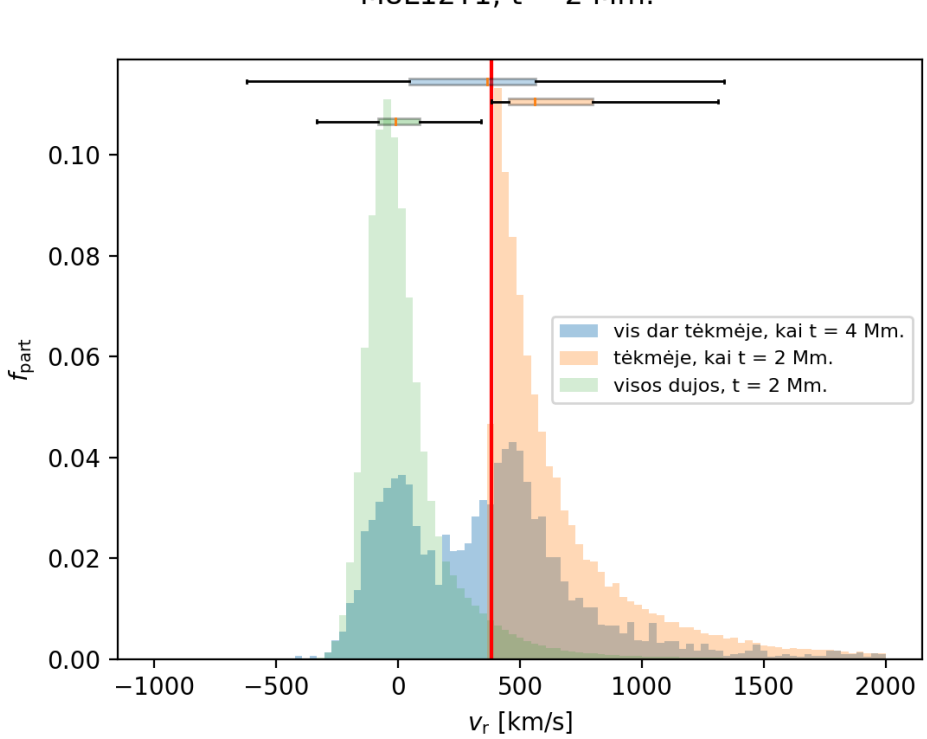
14 pav.: Radialinio greičio M7L10T1 modelyje histograma. Mėlyna spalva pavaizduotas pirmasis (fosilinių tėkmių dalelių) skirstinys; oranžine - antrasis (aktyvių tėkmių dalelių); žalia - trečiasis (visų dalelių). Raudona linija pažymėtas slenkstis, virš kurio dalelė laikoma tėkmės dalimi. Pavaizduota, koks buvo šių dalelių greitis laiko momentu $t = 2\,\mathrm{Mm}$. x ašyje radialinis greitis km/s, y ašyje normuotas kiekis. Kiekis normuotas taip, jog visos histogramos dėželės susidėtų į 1.



15 pav.: Toks pat, kaip 14 pav., tik M7L12T1 modelis.



16 pav.: Toks pat, kaip 14 pav., tik M8L10T1 modelis.



17 pav.: Toks pat, kaip 14 pav., tik M8L12T1 modelis.

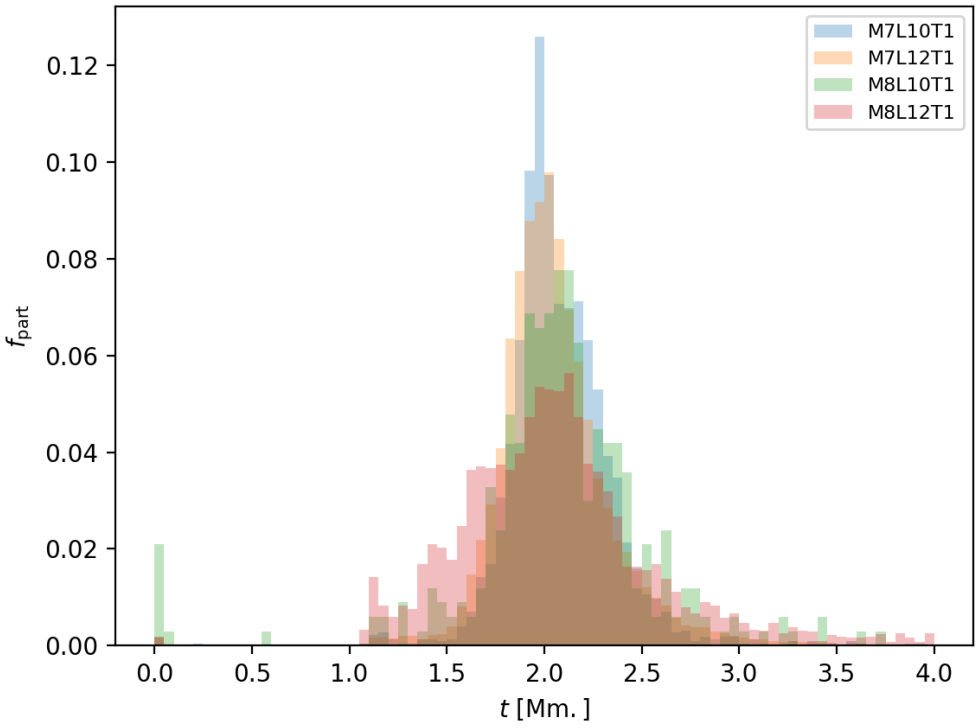
14 pav. pavaizduotos radialinio greičio histogramos M7L10T1 modelyje. Matoma, jog didelė dalis fosilinių tėkmių skirstinio dujų AGN aktyvumo epizodo gale nėra tėkmėje - mediana žemiau slenksčio. Tai reiškia, jog tos dujos į tėkmę patenka tik pasibaigus aktyvumui.

15 pav. pavaizduotos radialinio greičio histogramos M7L12T1 modelyje. Panašiai kaip ir M7L10T1, šiuo laiko momentu maždaug pusė būsimos fosilinės tėkmės dujų dar nebuvo tėkmėje

16 pav. nubrėžtos radialinio greičio histogramos M8L10T1 modelyje. Mediana žemiau slenksčio. Vėl matyti, jog didelė dalis fosilinių tėkmių skirstinio dujų dar nėra tėkmėje.

17 pav. nubrėžtos radialinio greičio histogramos M8L12T1 modelyje. Dėl stipresnių tėkmių didesnės SMBH masės ir šviesio galaktikoje, didesnė dalis fosilinių tėkmių skirstinio dujų jau tėkmėje, tačiau mediana vis dar žemiau slenksčio.

2.2.5 Patekimo į tėkmę laikas



18 pav.: SPH dujų dalelių patekimo į tėkmę laikų histograma. x ašyje pavaizduotas laikas mega metais, y ašyje normuotas svoris.

18 pav. pavaizduota kokiu laiko momentu fosilinių tėkmių skirstinio dujos patenka į tėkmę. AGN aktyvumo epizodas pasibaigia 2 Mm., taigi matyti, jog apie pusė dujų į tėkmę patenka tik aktyvumui pasibaigus.

Darbo išvados

- Dujos, sudarančios fosilines tėkmes, aktyvumo epizodo metu buvo toliau nuo SMBH, nei aktyvioje tėkmėje buvusios dujos - skirtingiems modeliams atstumo mediana $\simeq 0,6-0,7$ kpc. Aktyvių tėkmių skirstinio dujų atstumo mediana tarp modelių svyruoja daugiau, $\simeq 0,3-0,7$ kpc. Rezultatai pateikti 2.2.1 skyrelyje.

- Mažesnės SMBH masės M7 modeliuose fosilines tėkmes sudaro ženkliai retesnės dujos, palyginus su aktyvių tėkmių ar visų dujų skirstiniais ($\simeq 10^{-23}$ g/cm^{-3}). Didesnės masės, M8, galaktikose, šios savybės nėra: fosilines tėkmes sudarančių dujų tankio pasiskirstymas išplitęs nuo 10^{-24} iki 10^{-21} g/cm^{-3} . Rezultatai aprašyti 2.2.2 skyriuje.

- M7 galaktikose fosilines tėkmes sudaro panašaus į aktyvių tėkmių temperatūrinio profilio dujos. M8 modeliuose fosilines tėkmes pagrinde sudaro vėsesnės dujos. 2.2.3 skyrelyje pateikti rezultatai.

- Rasta, jog didelė (kai kurių modelių atveju, didžioji) dalis fosilinių tėkmių dujų į tėkmę patenka tik pasibaigus aktyvumo epizodui. Rezultatai aprašyti 2.2.4 bei 2.2.5 skyriuose.

Iš šių rezultatų matyti, jog fosilinės tėkmės pagrinde susidaro iš toliau esančių, retesnių ir vėsesnių dujų, lyginant su aktyvias tėkmes sudarančiomis dujomis. Didelė dalis fosilinių tėkmių dujų apskritai nepatenka į tėkmę AGN aktyvumo epizodo metu. Tai ir gali paaiškinti skirtumus tarp fosilinių tėkmių ir aktyvių tėkmių skirstinių.

Literatūra

[1] P. Kazlauskas, "Statistiškai reiškmingi skirtumai tarp aktyvių ir fosilinių tėkmių parametrų," *VU*, 2024.

[2] K. Zubovas and A. R. King, "The M - σ relation between supermassive black holes and their host galaxies," *General Relativity and Gravitation*, vol. 51, May 2019.

[3] A. Fluetsch, R. Maiolino, S. Carniani, A. Marconi, C. Cicone, M. A. Bourne, T. Costa, A. C. Fabian, W. Ishibashi, and G. Venturi, "Cold molecular outflows in the local universe and their feedback effect on galaxies," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Dec. 2018.

[4] R. Morganti, "The many routes to agn feedback," *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 4, Nov. 2017.

[5] K. Zubovas and G. Maskeliūnas, "Life after agn switch off: evolution and properties of fossil galactic outflows," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 524, p. 4819–4840, June 2023.

[6] C.-A. Faucher-Giguère, E. Quataert, and N. Murray, "A physical model of FeLoBALs: implications for quasar feedback," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 420, pp. 1347–1354, 01 2012.

[7] V. Springel, "The cosmological simulation code gadget-2," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 364, p. 1105–1134, Dec. 2005.

[8] J. I. Read, T. Hayfield, and O. Agertz, "Resolving mixing in smoothed particle hydrodynamics," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 405, pp. 1513–1530, 06 2010.

Summary

Statistically significant differences in active and fossil outflow characteristics

Paulius Kazlauskas

Active galactic nuclei (AGN) may cause gas outflows which can impede star formation and even eject gas from the galaxy. The majority of observed outflows may be made up of fossil outflows, which persist after the conclusion of an AGN episode. The aim of this work is to compile histories of fossil outflow gas parameters. It is achieved by analysing kinematic histories of fossil outflow gas before and after entering an outflow and determining the difference in fossil outflow and other gas initial conditions. Outflow data is generated using smoothed particle hydrodynamics software GADGET-3.

Results:

- Fossil outflows are formed from gas which is farther from the SMBH than gas currently in active outflows. The median fossil outflow distance is $\simeq 0.6 - 0.7$ kpc, compared to median active outflow distance $\simeq 0.3 - 0.7$ kpc.
- In lower SMBH mass models, fossil outflows are made up of lower density gas ($\simeq 10^{-23}$ g/cm^{-3}), whereas fossil outflow gas density varies between 10^{-24} and 10^{-21} g/cm^{-3} in higher SMBH mass models.
- In lower SMBH mass models, fossil outflows are formed from gas which is of similar temperature to gas in active outflows. In higher SMBH mass models, fossil outflows are made up of cooler gas.
- A large part of gas which later forms a fossil outflow enters an outflow only after the conclusion of an AGN episode.