

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZIKOS FAKULTETAS  
TEORINĖS FIZIKOS IR ASTRONOMIJOS INSTITUTAS

Šarūnas Jonauskas

AKTYVAUS BRANDUOLIO TĖKMĖS ĮTAKA JUODOSIOS SKYLĖS MAITINIMUI

Magistro baigiamasis darbas

Teorinė fizika ir astrofizika

Studentas

Šarūnas Jonauskas

Darbo vadovas

dr. Kastytis Zubovas

Instituto atstovas

prof. dr. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2024

# Turinys

1	Įvadas .....	2
2	Galaktikos aktyvaus branduolio aplinka .....	3
	2.1 Juodosios skylės .....	3
	2.2 Akrecinis diskas.....	3
	2.3 Grįžtamasis SMBH ryšys.....	4
	2.4 Žvaigždėdara .....	5
3	Modelių paruošimas .....	6
4	Rezultatai .....	8
	4.1 Modelių evoliucija .....	8
	4.2 SMBH akrecija.....	10
	4.3 Žvaigždėdara .....	12
5	Diskusija .....	15
6	Išvados .....	16
	Literatūros sąrašas .....	17
	Priedai .....	19
	Santrauka .....	20

# 1 Įvadas

Tema apie žvaigždžių formavimąsi supermasyvių juodųjų skylių (angl. Supermassive black hole – SMBH) aplinkoje yra esminė, nes tai padeda mums suprasti sudėtingas tarpusavio sąveikas tarp didelių struktūrų galaktikos centre ir aplinkui supančią medžiagą. Daugelyje galaktikų žinoma, kad SMBH yra jų centrų dalis, ir jų gravitacinė trauka gali paveikti aplinkinę medžiagą, galbūt prisidedant prie naujų žvaigždžių susidarymo. Pačiuose artimiausiuose keletu parsekų dydžio regionuose šalia SMBH, Galaktikos centre, yra aptinkama jaunų žvaigždžių skriejančių ekscentrinių žiedų elipsinėmis orbitomis (Paumard ir kt., 2006), (Nayakshin ir Sunyaev, 2005). Tačiau, vis dar yra iššūkis paaiškinti jų prigimtį su dabartiniais žvaigždžių formavimosi modeliais. SMBH gravitacijos kuriama potvyninė jėga turėtų suardyti bet kokį artėjantį molekulinį dujų debesį ir taip jį sunaikinti anksčiau, nei būtų susidariusios tinkamos sąlygos žvaigždžių formavimuisi (Gezari ir kt., 2009). Palieka tik kelios galimybės, tai yra, jau anksčiau susiformavusios žvaigždės persikėlė į Galaktikos centrą (Levin ir Beloborodov, 2003), arba susidaręs fragmentuojantis sukantis dujų diskas apie SMBH (Nayakshin ir Cuadra, 2005).

Šitame darbe yra atkuriamas ir pratęsimas, pagal paskutinį minėtą fragmentuojančio sukančio disko mechanizmą, Bonnell ir Rice (2008) pristatomą skaitmeninį modelį. Autoriai buvo vieni iš pirmųjų, kurie bandė paaiškinti ekscentrinių žiedų orbitomis judančių žvaigždžių prigimtį. Tačiau jų skaitmeniniame modelyje trūko vieno esminio dalyko – SMBH grįžtamojo ryšio. Grįžtamasis ryšys yra AGN energijos išskyrimas spinduliuotės, vėjų ar plazmos čiurkšlių pavidalu, kuris paveikia aplinkinę tarpžvaigždinę terpę. Šių procesų visumos rezultatas, nuspėjama, atvėsina ir pašalina arba bent jau perskirsto dujas, taip atliekant vieną iš pagrindinių vaidmenų galaktikų evoliucijoje (Morganti, 2017). Įtraukus grįžtamąjį ryšį į modelį, būtų įmanoma sukurti rezultatus labiau atitinkančius realybę. Iš tų duomenų būtų galimybė patikrinti, koks iš tikrųjų šio proceso efektas aplinkinėms dujoms.

## Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – ištirti aktyvaus branduolio grįžtamojo ryšio poveikį juodosios skylės maitinimui ir žvaigždžių susidarymui.

## Darbo uždaviniai

1. Ištirti į juodąją skylę krentančio debesies morfologijos evoliuciją ir grįžtamojo ryšio poveikį jai.
2. Ištirti juodosios skylės maitinimo spartos priklausomybę nuo grįžtamojo ryšio stiprumo bei geometrijos.
3. Ištirti žvaigždžių formavimosi krentančiame debesyje spartos priklausomybę nuo grįžtamojo ryšio stiprumo bei geometrijos.

## 2 Galaktikos aktyvaus branduolio aplinka

Įvairios astronomų komandos, stebėdamos jaunų ir masyvių žvaigždžių judėjimą mūsų Galaktikos centre, aptiko  $\sim 4,3 \cdot 10^6 M_{\odot}$  supermasyvią juodąją skylę (angl. supermassive black hole – SMBH;  $M_{\odot}$  – Saulės masė) pavadintą Šaulio A\* (angl. - Sagittarius A\*) ([The GRAVITY Collaboration ir kt., 2019](#)), ([Abuter ir kt., 2023](#)). Šitie masyvūs objektai, iš kurių net šviesa negali išstrūkti, gali būti keliose fazėse – aktyvūs arba neaktyvūs. Pagal dabartinius stebėjimus, Šaulio A\* nėra aktyvi, bet manoma, kad paskutinis aktyvumo epizodas buvo prieš keletą milijonų metų ([Bland-Hawthorn ir kt., 2019](#)). Tuo atveju, kai SMBH yra aktyvi, susidaręs šviesus regionas prie pat SMBH, yra vadinamas aktyviu galaktikos branduoliu (angl. active galactic nucleus – AGN). Šie astrofizikiniai šaltiniai, kurie apima visą elektromagnetinį spektrą, yra maitinami akrecijos į SMBH ([Padovani ir kt., 2017](#)).

### 2.1 Juodosios skylės

Juodosios skylės yra erdvėlaikio sritis, apribota įvykių horizontu. Dėl labai stipraus gravitacinio lauko iš jos negali išstrūkti nei medžiaga, nei šviesa ([Wald, 1984](#)). Pabėgimo greitis nuo žvaigždės paviršiaus su mase  $M$  ir spinduliu  $R$  yra  $v = (2GM/R)^{1/2}$ , kur  $G$  yra gravitacinė konstanta. Šis greitis pasiekia šviesos greitį,  $c$ , esant spinduliui

$$R = \frac{2GM}{c^2}. \quad (1)$$

Pavyzdžiui, paėmus vienos saulės masės juodąją skylę, jos spindulys bus  $R \lesssim 3$  km. Viena iš pagrindinių juodosios skylės savybių yra tai, kad ji yra nedidelė, lyginant su jos mase. Dėl to, jos artimoje aplinkoje susikuria labai stiprus gravitacinis laukas. Kai medžiaga artėja prie juodosios skylės, orbitinis greitis taip pat artėja prie šviesos greičio. Tačiau esant dideliems atstumams, esantis gravitacinio lauko stiprumas yra toks pat bet kokiam tokios pačios masės objektui.

Būdingas juodosios skylės dydis yra jos gravitacinis spindulys

$$R_g = \frac{GM}{c^2} \simeq 1,5 \times 10^4 M_8 \text{ cm}, \quad (2)$$

kur parametrizuota juodosios skylės masė  $M = 10^8 M_8 M_{\odot}$ .

### 2.2 Akrecinis diskas

Akrecinis diskas esantis AGN sudėtyje, yra dujų diskas, kuris yra kritimo į SMBH procese. Diske esančiai medžiagai artėjant prie juodosios skylės, gravitacinė jėga vis stipriau ją traukia ir dėl judesio kiekio momento tvermės dėsnio, pradeda vis greičiau sukintis. Dėl šio sukimosi, medžiaga diske pradeda įkaisti, o dėl susidariusios trinties, temperatūra gali siekti milijonus laipsnių kelvino ([Liu ir Qiao, 2022](#)). Esant tokiai aukštai temperatūrai, diskas veikia kaip elektromagnetinė spinduliuotės šaltinis,

t. y. nuo radijo bangų iš susidariusios čiurkšlės iki rentgeno spindulių iš vainiko statmenai akreciniam diskui. Dujos galaktikoje sujaukiamos taip, kad migruoja į centrą, ir susidariusi nauja centrinė SMBH tampa apsupta akrecinio disko (Ivanov ir kt., 1998). Tačiau ne visos SMBH turi akrecinius diskus, pavyzdžiui, būnant mažo tankio aplinkoje, kur nėra pakankamai medžiagos tokiai struktūrai susidaryti. Trūkstant disko, SMBH yra ramybės būsenoje (neaktyvi).

Mokslas apie akrecinius diskus, esančius AGN sudėtyje, yra viena pagrindinių astrofizikos tyrinėjamų sričių ir dėl to yra sukurta įvairių skaitmeninių modelių, šių objektų sąveikoms paaiškinti. Tai apima molekulinį dujų debesies kritimą į AGN aplinką (Bonnell ir Rice, 2008), (Armijo de Freitas Pacheco, 2011), (Dittmann ir Miller, 2020) ir galaktikų susidūrimus (Kawaguchi ir kt., 2020). Tačiau daugumoje skaitmeninių modelių nėra implementuotas SMBH grįžtamasis ryšys akreciniam diskui, todėl per pastaruosius metus, šiam įgyvendinimui skiriama daugiau dėmesio. Kuriami modeliai su įvairiais akrecijos metodais ir esant skirtingoms skyroms, t.y. apimantys nuo galaktikos centrinio regiono iki visos galaktikos. (Ruszkowski ir kt., 2019), (Tartėnas ir Zubovas, 2022).

### 2.3 Grįžtamasis SMBH ryšys

Juodosios skylės akretavimo šviesis turi būti susijęs su masės akretavimo sparta  $\dot{M}$

$$L = \eta \dot{M} c^2, \quad (3)$$

kur  $\eta$  yra spinduliuotės efektyvumas, kuris yra bedimensinis ir jos vertė yra  $0,038 < \eta < 0,42$  (Zhang ir Lu, 2020). Tačiau kiekvienam gravituojančiam objektui, akretuojančiam ar ne, yra apribojimas, kokį kiekį šviesio gali išspinduliuoti, nes spinduliuotė sukuria slėgio jėgą kuri gali išsklaidyti medžiagą kuri ir sukuria tą šviesį. Ši jėga paveikia elektronus, nes jie išsklaido elektromagnetinę spinduliuotę, kuri neša judesio kiekį  $1/c$  padaugintą iš energijos srauto  $L/4\pi r^2$ . Protonai turi mažą poveikį spinduliuotei, bet sudaro didžiąją dalį dujų masės. Dėl paprastumo yra laikoma sferinė simetrija tam, kad spinduliuotės slėgio jėga veiktų į išorę. Jos dydis ties spinduliu  $r$  nuo centro yra

$$F_{\text{rad}} = \frac{L\sigma_T}{4\pi cr^2} \quad (4)$$

kur  $\sigma_T \simeq 6.65 \times 10^{-25} \text{cm}^2$  yra Tomsono sklaidos skerspjūvis, t. y. elektrono efektyvaus stabdymo plotas. Elektronas negali laisvai judėti dėl sąveikos su šia išorine jėga, nes esantis krūvio neutralumas reiškia, kad yra stipriai surišta Kulono traukos jėgos (angl. Coulomb attraction) su dujų mase, turinčia vieno protono krūvį. Didžioji dalis dujų sudaro vandenilis, todėl ta masė atitinka protono masę  $m_p$ . Tada gravitacijos jėga, kuri priešinasi spinduliuotės slėgiui yra

$$F_{\text{grav}} \simeq \frac{G(m_p + m_e)}{r^2} \simeq \frac{GMm_p}{r^2}, \quad (5)$$

nes elektrono masė  $m_e$  yra žymiai mažesnė nei  $m_p$ . Abudu  $F_{\text{rad}}$  ir  $F_{\text{grav}}$  priklauso nuo  $r^{-2}$ . Iš to galima matyti, kad jei bet kuris vienas taps didesniu nei kitas ties bet kuriuo spinduliu, tai įvyks ties

visais spinduliais. Tada sferinėje simetrijoje akrecija turi būti prislopinta, kai  $L$  yra pakankamas, kad būtų  $F_{rad} = F_{grav}$ . Tai Edingtono šviesis apibrėžiamas (arba Edingtono riba) kaip

$$L_{Edd} = \frac{4\pi GMc}{\kappa}, \quad (6)$$

kur elektrono neskaidrumas yra  $\kappa \simeq \sigma_T/m_p \simeq 0.34 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  bet kokioms tipinės sudėties dujoms ( $\sim 98 \%$  vandenilis ir helis, o likę  $\sim 2 \%$  yra visi kiti sunkesni elementai), duodant

$$L_{Edd} \simeq 1,3 \cdot 10^{46} M_8 \text{ erg s}^{-1}. \quad (7)$$

Apibendrinant, Edingtono šviesis yra didžiausias galimas objekto šviesis, kai yra pasiekiamas balansas tarp spinduliavimo į išorę ir gravitacinės jėgos į vidų.

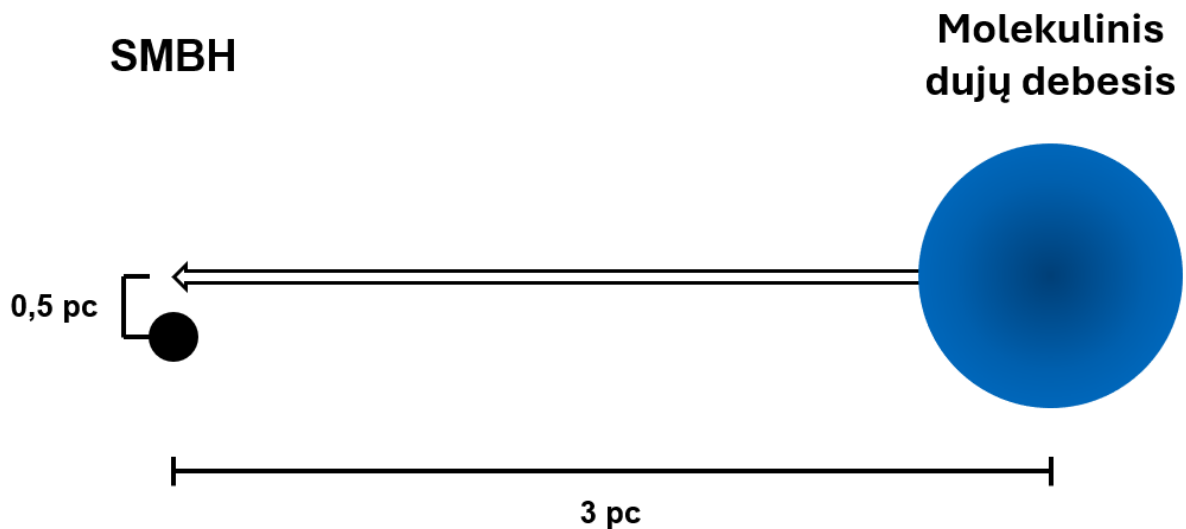
## 2.4 Žvaigždėdara

Naujų žvaigždžių formavimasis yra sudėtingas reiškinys, kuriam įtaką daro įvairūs fizikiniai procesai, pavyzdžiui, dujų dinamika ir gravitacija. Taip pat šiluminiai procesai, vykstantys tankiuose molekulinė dujų debesyse, ir magnetiniai laukai, kurie paveikia dujų judėjimą ir struktūrą debesyse. Žvaigždžių grįžtamasis ryšys apima žvaigždžių vėją, fotojonizuojančią spinduliuotę ir supernovų sprogiumus (McKee ir Ostriker, 2007), (Dale, 2015). Kalbant apie Galaktikos centrą, ten aptinkamos žvaigždės gali atsirasti dėl keleto priežasčių. Žvaigždžių spiečius galėtų migruoti į Galaktikos centrą, netekdamas energijos, dėl Galaktikos foninių žvaigždžių gravitacinio trikdymo. Tačiau yra pastebima, kad šis procesas trunka per ilgai, paaiškinti aptinkamas jaunas žvaigždes (Gurkan ir Rasio, 2005). Labiau tikėtina, kad žvaigždėdara, kurią matome iš stebėjimų, yra dėl susidariusio akrecinio disko apie SMBH, kuris yra pakankamai masyvus (Nayakshin ir kt., 2007) ir gali pakankamai greitai vesti (Gammie, 2001), (Rice ir kt., 2003). Taip pat yra modelių, kurie parodo, kad AGN teoriškai gali neigiamai paveikti žvaigždėdarą įkaitinant arba išpučiant esamas dujas. Vis dėlto yra galimybė, kad paskatins žvaigždėdarą, suspaudžiant dujas kuriamo vėjo pagalba. Dujos taptų tankesnės ir sukeltų staigius žvaigždžių formavimosi pliūpsnius (Shin ir kt., 2019).

### 3 Modelių paruošimas

Šiame darbe esantys modeliai buvo paruošti naudojant GADGET-3 (Springel, 2005) hidrodinaminį modeliavimo kodą. Šiame kode naudojamas SPH (angl. Smoothed particle hydrodynamics) skaičiavimo metodas, kuris yra skirtas modeliuoti skystų arba kietų kūnų mechanikai kontinuumo lauke. GADGET yra tinkamas spręsti įvairaus tipo astrofizikines problemas – nuo susiduriančių ar susiliejančių galaktikų (Tulasi, 2022), didelio masto struktūrų formavimosi Visatoje (Springel ir kt., 2021) iki tarpgalaktinės medžiagos dinamikos (Meiksin ir kt., 2014) ir žvaigždžių formavimosi.

Šiame pristatomame darbe yra svarstomi trys modeliai, kur į esamą  $3 \cdot 10^6 M_{\odot}$  juodąją skylę krenta  $3 \cdot 10^5 M_{\odot}$  molekulinis dujų debesis. Debesis buvo patalpintas 3 pc atstumu nuo juodosios skylės. Modelių pradinės būsenos schema yra pavaizduota 1 pav. Debesyje buvo palaikoma turbulencija ir dujų dalelės turėjo minimalią 10 K temperatūrą. Tankios žvaigždžių dalelės gali akretuoti aplinkui esančias kitas daleles (dujų daleles ir taip pat kitas žvaigždžių daleles), kurios priartėja 200 astronominių vienetų (angl. astronomical unit – AU) iki jų. Šios dalelės formuojasi, kai dujų dalelių vidutinis tankis yra pakankamai didelis erdvėje, mažesnėje nei akrecijos spindulys. Taip pat gravitacinė potencinė energija turi būti didesnė nei kinetinė, kuri sukelia sistemos griūvimą. Mažiausia galima dalelių masė modeliuose yra  $\sim 0,1 M_{\odot}$ .



1 pav. Modelių pradinių sąlygų schema.

Pradinis modelis kuris atitinka Bonnell ir Rice (2008) pristatomą skaitmeninį modelį, bus vadinamas „Kontroliniu“, o pačių autorių darbas „Bonnell“ modeliu. Siekiant atkurti Bonnell modelį buvo parinkta autorių naudojama mažesnė SMBH masė (Genzel ir kt., 1997), (Ghez ir kt., 2005). Tačiau norint kuo labiau priartėti prie Edingtono ribos šviesio, molekulinio debesies masė buvo padidinta iš  $10^5 M_{\odot}$  iki  $3 \cdot 10^5 M_{\odot}$ . Šiuo atveju SMBH turėtų gauti pakankamai masės akretuoti ir ilgesnį laiko

periodą išlikti aktyviu galaktikos branduoliu.

Antrasis modelis pavadintas „**Sferiniu**“. Šiuo atveju akrecija vyksta palaipsniui, dalelės iš pradžių patenka į akrecinį diską ir ten užsibūna. Tikrinamas judesio kiekio momentas, dalelės orbitos spindulys ir ar dalelė yra surišta su juodąja skylė. Iš esmės yra sprendžiama 1D difuzijos lygtis ir galiausiai dalelės yra suvalgomos (Tartėnas ir Zubovas, 2022). Paskutiniame modelyje, pavadintu „**Kūginiu**“, yra naudojamas  $45^\circ$  kūginės formos grįžtamasis ryšys statmenai SMBH, vietoj sferinės kurios minėtos antrame modelyje. Visi modeliai buvo išvystyti iki  $\sim 40$  tūkst. m.

Grįžtamais ryšys yra įgyvendintas pagal Nayakshin ir kt. (2009) straipsnį, kuriame naudojamas Monte Carlo spinduliuotės pernašos metodas. AGN vėjas yra pateikiamas kaip sferiškai simetriškas trimatis tinklelis, į kurį kiekvieną laiko žingsnį paduodama energija ir judesio kiekis. **Sferiniame** modelyje sferiškai simetriškai, o **Kūginiame** tik dalis sferos. Tos savybės propaguojamos radialiai, o kai pasiekia SPH dalelę, atiduodamos jai (Tartėnas ir Zubovas, in preparation). Visa energija, kuri yra išskiriama į dujas

$$E_{wind} = \frac{\eta^2}{2} M_{acc} c^2, \quad (8)$$

kur  $\eta = L_{disc}/\dot{M}_{BH}c^2$  yra spinduliavimo efektyvumas. SMBH augimas yra ribojamas Edingtono akrecijos sparta,  $\dot{M}_{Edd} = L_{Edd}/(\epsilon c^2)$ , kur  $\epsilon \sim 0,1$  yra akrecijos spinduliavimo efektyvumas. SMBH masė gali augti ne greičiau nei  $\exp(t/t_{Salp})$ , kur

$$t_{Salp} = \frac{M_{BH}}{\dot{M}_{Edd}} = \frac{\kappa \epsilon c}{4\pi G} = 4,5 \cdot 10^7 \epsilon_{0,1} \text{ met}, \quad (9)$$

o tai yra Salpeter laikas su  $\epsilon_{0,1} = \epsilon/0,1$ . Šis laikas yra daug ilgesnis už modelių skaičiavimo laiką, todėl modelio skaičiavimo metu SMBH masė praktiškai nekinta.

Šituose modeliuose yra akrecinis diskas (detali implementacija aprašyta Tartėnas ir Zubovas (2022) straipsnyje), kuris evoliucionuoja naudodamas potencialą (PW – potencialas)

$$\phi = \frac{-GM_{BH}}{R - R_g}, \quad (10)$$

kur R yra atstumas nuo SMBH ir  $R_g$  yra Schwarzschildo spindulys (Paczynsky ir Wiita, 1980). Klampios evoliucijos diske lygtis:

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[ \frac{(R - R_g)^2}{R^{1/2}(R - 3R_g)} \frac{\partial}{\partial R} \left( v \Sigma R^{3/2} \frac{R - \frac{1}{3}R_g}{(R - R_g)^2} \right) \right]; \quad (11)$$

su klampumu  $v = \alpha c_s H$ , kur  $c_s$  yra garso greitis, H yra disko aukštis ir  $\alpha = 0,1$  (Shakura ir Sunyaev, 1973). Skaičiuojamas visas akrecinio disko šviesis, iš kurio nustatoma kiek energijos ar/ir momento turi būti suleista į aplinkines dujas. Spinduliavimo efektyvumas yra arti PW potencialo vertės  $\eta \sim 6,25\%$ .



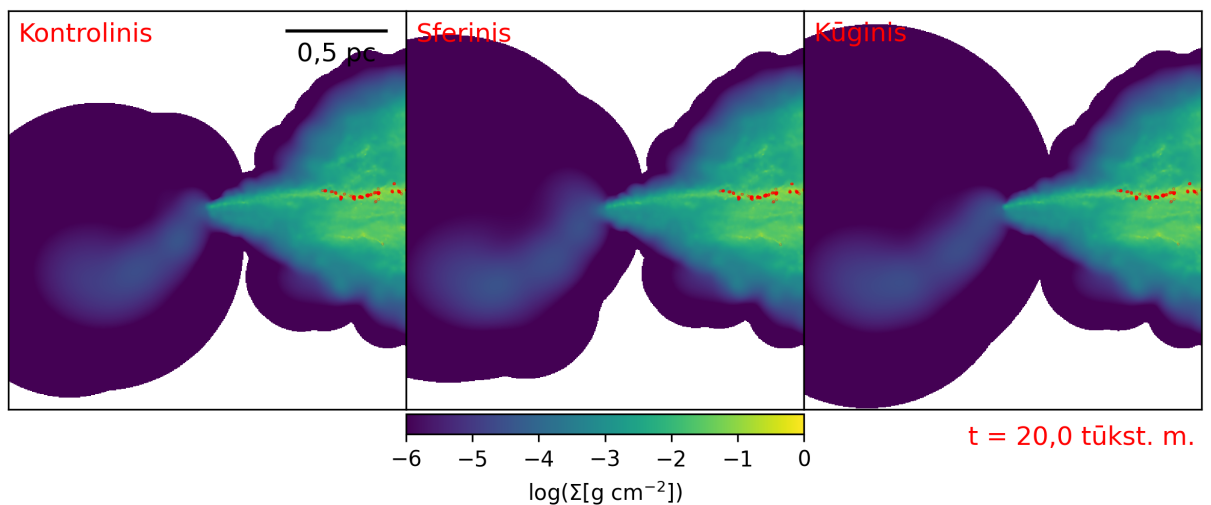
## 4 Rezultatai

### 4.1 Modelių evoliucija

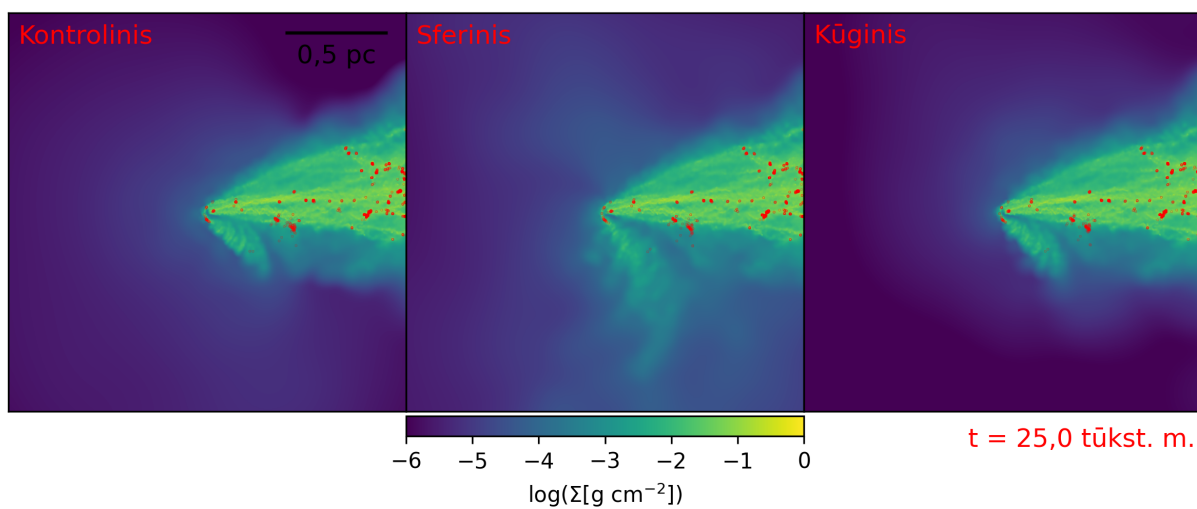
Pradiniame modelių evoliucijos laikotarpyje, molekuliniam debesiui pasiekti SMBH prirėikė  $\sim 18$  tūkst. m. Kol molekulinis debesis krito į SMBH (2 pav.), jis tapo iškraipytas, dėl stipraus gravitacinio lauko traukos debesyje arčiau SMBH ir mažesnės traukos tolimojoje debesies pusėje. Viduje esanti turbulencija leido susiformuoti lokalioms, mažesnio masto struktūroms, iš kurių gimė žvaigždės. Modeliuose pirmosios žvaigždės susiformavo po 12 tūkst. m., o toms, kurioms pavyko susiformuoti prieš pasiekiant SMBH, turėjo galimybę ištrūkti iš AGN aplinkos, nes jau būdavo per toli, kad būtų susietos prie sistemos.

Debesies potvyninis suardymas savigravituojančiame molekuliniam debesyje, formavo susietas spiralines struktūras 3 pav., kurios perkėlė savo orbitinį judesio kiekio momentą į išorę. Susidariusios krintančių dujų smūginės bangos, praeinančios šalia juodosios skylės (pirma  $\sim 0,01 - 0,015$  pc ir antra  $\sim 0,02$  pc spinduliu nuo SMBH 13 pav.), tuo pačiu metu pašalindavo orbitinį judesio kiekio momentą iš dujų, leisdamos susikurti matomoms elipsinių diskų formos struktūroms. Šitų krintančių dujų esama struktūra užtikrino, kad akrecinio disko dujos būtų gumulėtos ir diskas didėtų (iki  $\sim 2$  pc skersmens) dėl savigravitacijos, taip galiausiai suformuojant individualias žvaigždes. Didžioji dalis žvaigždžių, susiformavusių bekrintančiame debesyje, yra išmetamos iš sistemos, ir tai matoma 6 pav. kraštuose.

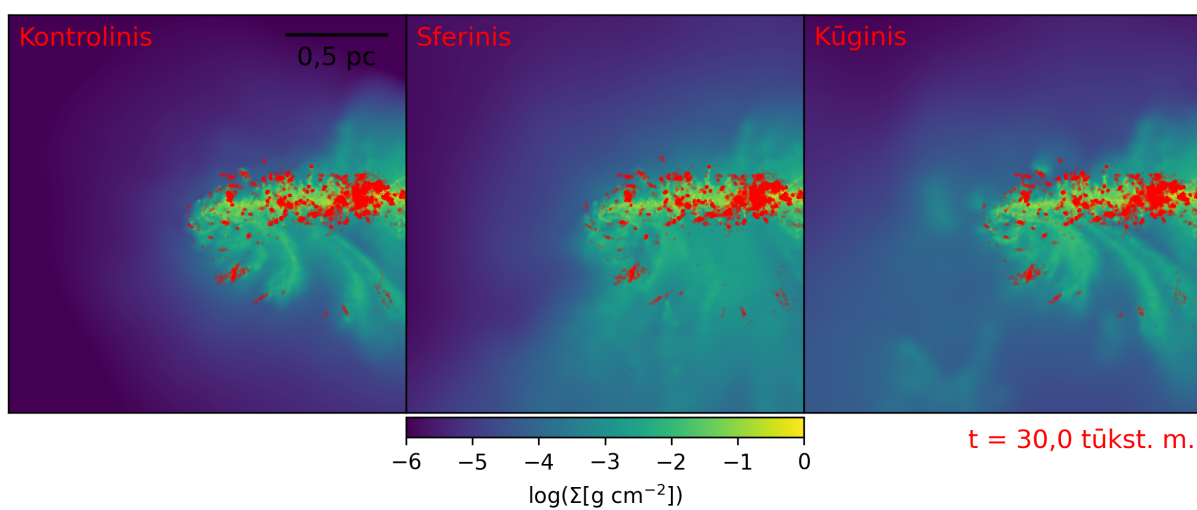
Pagrindiniai skirtumai tarp modelių prasideda praėjus daugiau nei pusei evoliucijos laikotarpiui, kur 4 pav. pradeda matytis didesnis dujų tankis aplinkoje, dėl modeliuose esančio grįžtamojo ryšio. Pats akivaizdžiausias skirtumas matomas paskutiniame evoliucijos etape 6 pav., kur **Sferiniame** modelyje dujų diskas tapo visiškai išardytas.



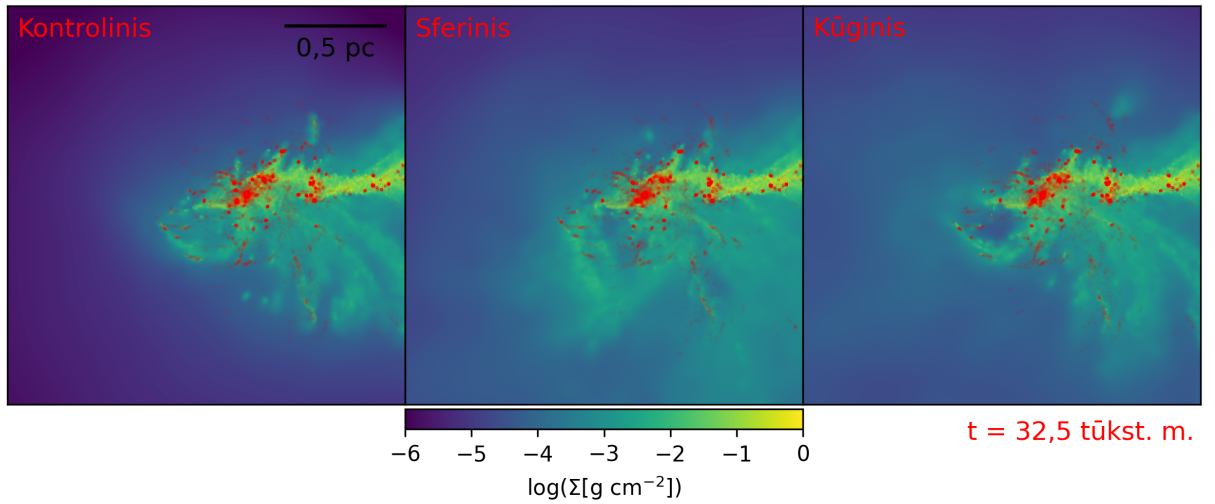
2 pav. Modelių evoliucijos tankio žemėlapiai ties 20 tūkst. m. laiko žingsniu. Kiekvieno žemėlapių kraštinės ilgis yra 2 pc. Raudonais taškais pažymėtos žvaigždės susidariusios modeliuose.



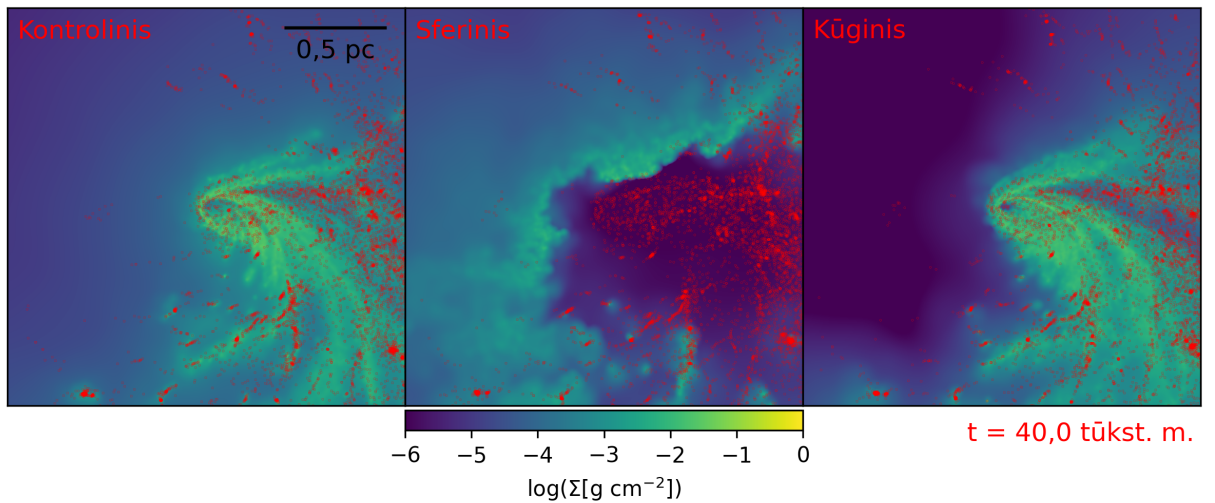
3 pav. Taip pat kaip 2 pav., tik vaizduojama būseną ties 25 tūkst. m.



4 pav. Taip pat kaip 2 pav., tik vaizduojama būseną ties 30 tūkst. m.



5 pav. Taip pat kaip 2 pav., tik vaizduojama būseną ties 32,5 tūkst. m.



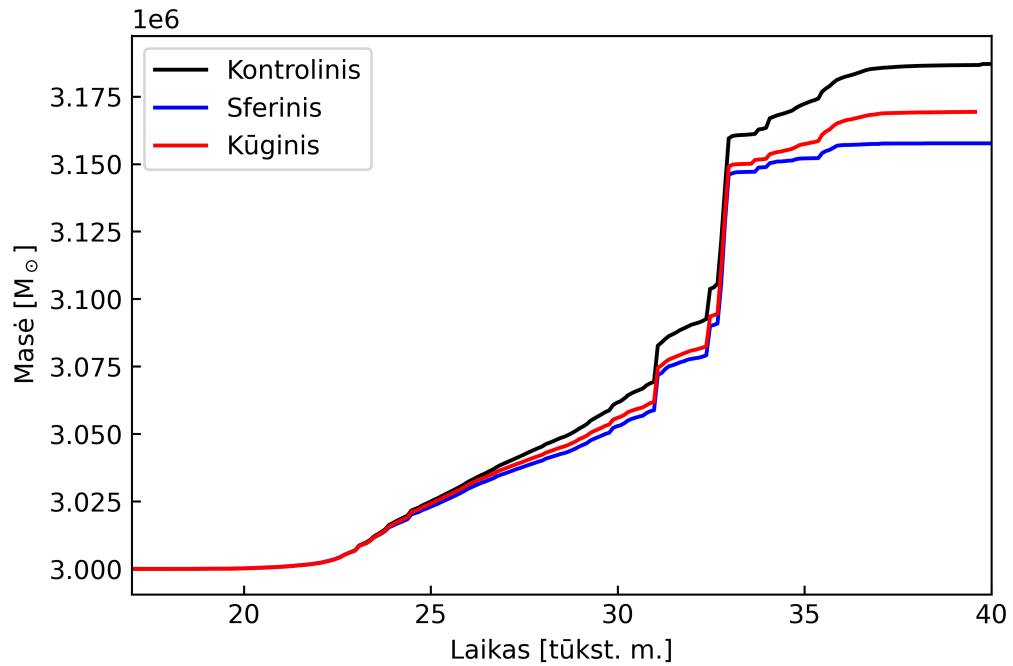
6 pav. Taip pat kaip 2 pav., tik vaizduojama būseną ties paskutiniu laiko žingsniu 40 tūkst. m.

## 4.2 SMBH akrecija

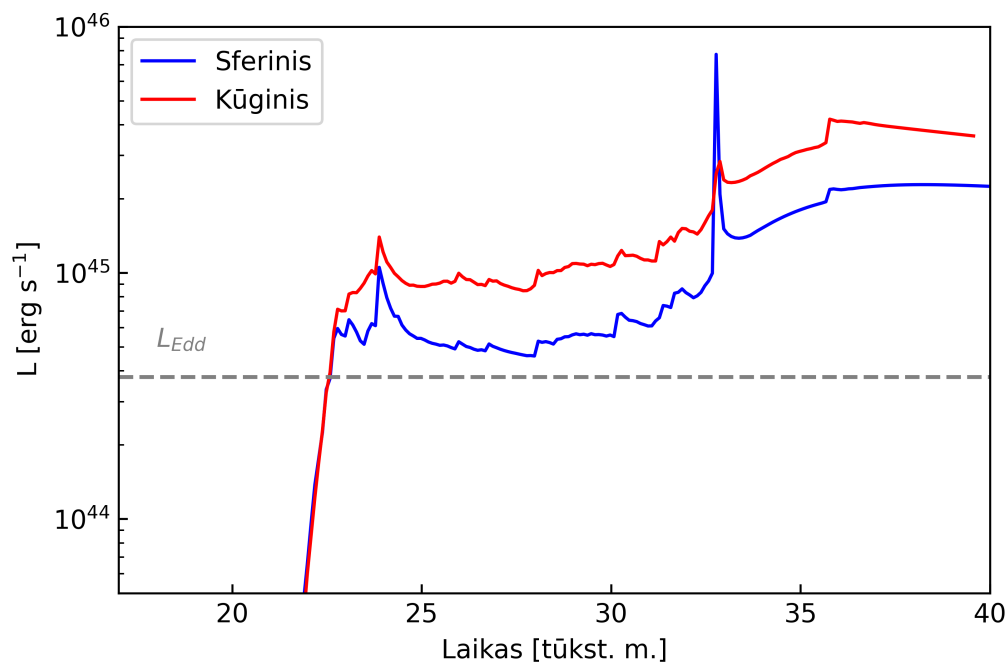
Vėlesniame **Kontrolinio** modelio evoliucijos etape 7 pav., akretuodama SMBH priaugo masės iki  $\sim 3,19 \times 10^6 M_{\odot}$ . Nesant grįžtamajam ryšiui, kaip ir buvo galima tikėtis, akretuoti dujoms į SMBH niekas netrukde ir visas procesas vyko gana tolydžiai, išskyrus vieną staigios akrecijos epizodą, ties  $\sim 32,5$  tūkst. m. kuris matomas 5 pav. Paskutiniame **Kontrolinio** modelio evoliucijos žingsnyje  $\sim 62,7$  % visos pradinės dujų masės akretavo į SMBH. Tuo tarpu **Sferiniame** modelyje  $\sim 52,6$  % ir **Kūginiame** modelyje  $\sim 56,4$  %.

SMBH generuojamas šviesis yra matomas 8 pav., o **Kontrolinis** modelis nėra pavaizduotas, nes be grįžtamojo ryšio mechanizmo, šviesis nėra sukuriamas ir neturi jokios įtakos evoliucijai. SMBH Edingtono šviesis yra  $\sim 3,77 \cdot 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ , o **Sferiniam** ir **Kūginiam** modeliams pavyko pasiekti

šviesį didesnį, nei Edingtono riba ir tikrai galima teikti, kad SMBH perėjo į aktyvaus galaktikos branduolio epizodą ties 22,6 tūkst. m. Pagrindinis skirtumas tarp modelių yra matomas antroje evoliucijos laikotarpio pusėje (5 pav.), kur buvo staigus šviesio šuolis ties 32,5 tūkst. m. Dėl **Sferinio** modelio grįžtamojo ryšio visomis kryptimis, atkeliavus tankiam žvaigždžių "spiečiui" ir jam akretavus į SMBH, pasiekta aukščiausia šviesio vertė –  $\sim 7,71 \cdot 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ . Viso to pasekmė yra matoma 6 pav. tankio žemėlapyje. Dujos nebuvo pakankamai tankios, kad atlaikytų tokį išeinantį energijos srautą iš AGN.



7 pav. Modeliuose esančios SMBH masės priklausomybė nuo laiko.

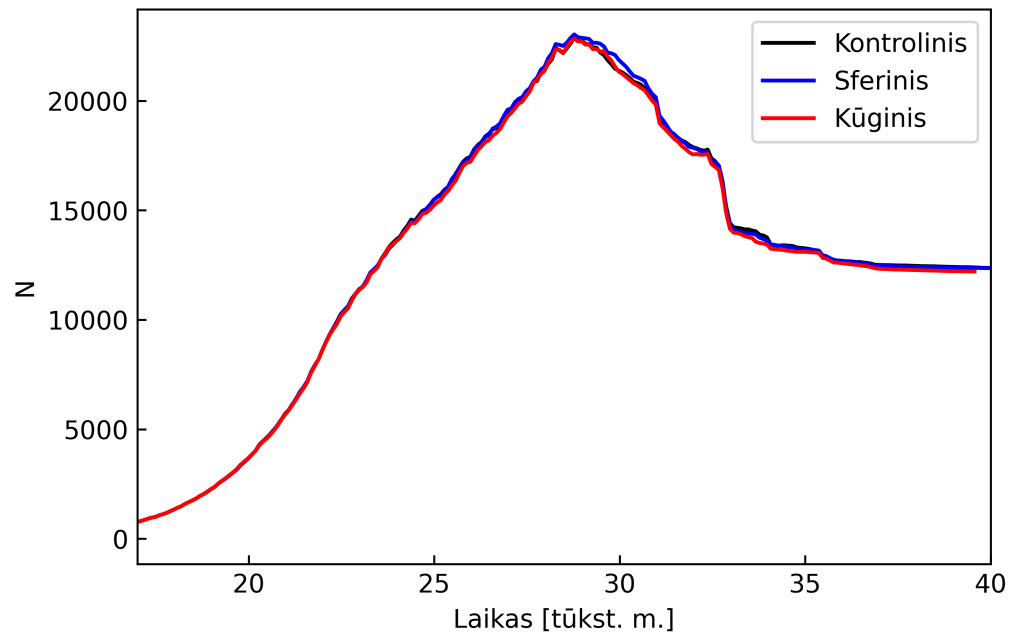


8 pav. Modeliuose esančios SMBH generuojamas šviesis.

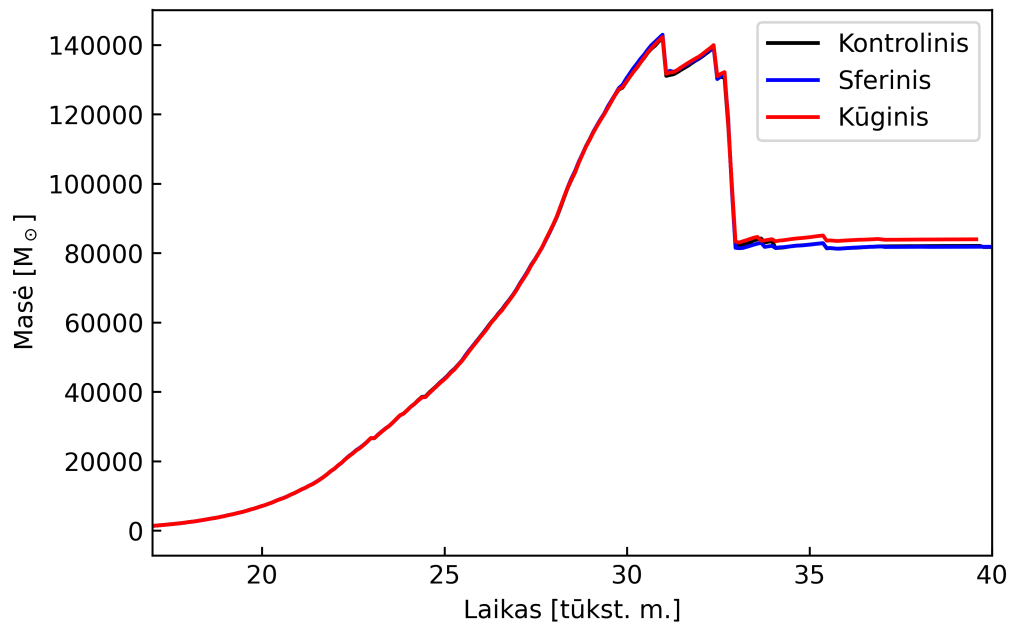
### 4.3 Žvaigždėdara

Modelio pradžioje, dėl grįžtamojo ryšio, masės akretavimas į SMBH buvo šiek tiek prislopintas, tačiau evoliucionuojant, užsilikusios dujos elipsinės formos dujų diske užlaikė žvaigždes, neleido ištrūkti iš jos įtakos srities. Taip leidžiant joms būti prarytomis SMBH. Nors visų žvaigždžių skaičius yra beveik vienodas (9 pav.), yra pastebimas skirtumas, lyginant modeliuose jų vidutinę kiekvienos žvaigždės masę (11 pav.). **Kūginiam** modelyje, susidarė geriausios sąlygos žvaigždžių masei didėti. Esant kūginiam grįžtamajam ryšiui, dujos esančios statmenai akrecinio disko, buvo išstumtos atgal į aplinką. Šitaip leidžiant daliai dujų papildomai būti įsisavintos į žvaigždžių mases.

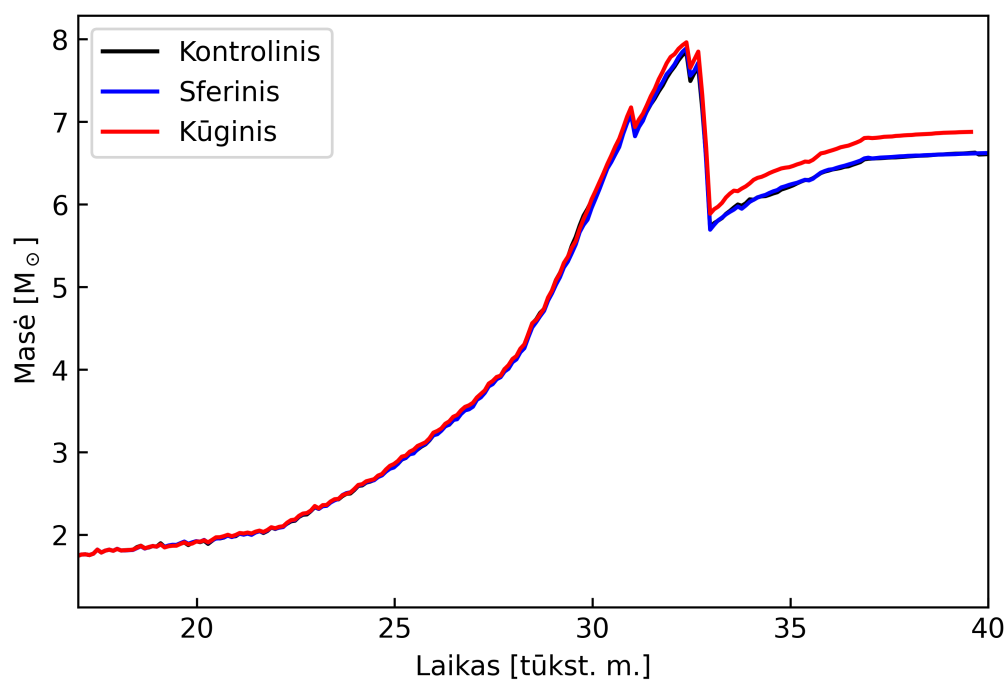
Galima pastebėti 12 pav., kad modeliuose kuriasi daug „naujų“ žvaigždžių. Toks reiškinys susidaro, nes visoms žvaigždėms yra galimybė būti prarytomis kitų. Susijungus dviem ar daugiau žvaigždžių, nauja žvaigždė skaitmeniškai laikoma visiškai unikaliu objektu. Didžiąjai daliai palaidų ir tankių dujų nebelikus modeliuose, žvaigždėdara pradeda greitai slopti, ir ties  $\sim 37$  tūkst. m. žvaigždės jau visiškai nustoja formuotis. Akreciniame diske gimusios žvaigždės pradėjo judėti savo elipsinėmis orbitomis apie SMBH arba paprasčiausiai įkrisdavo į ją.



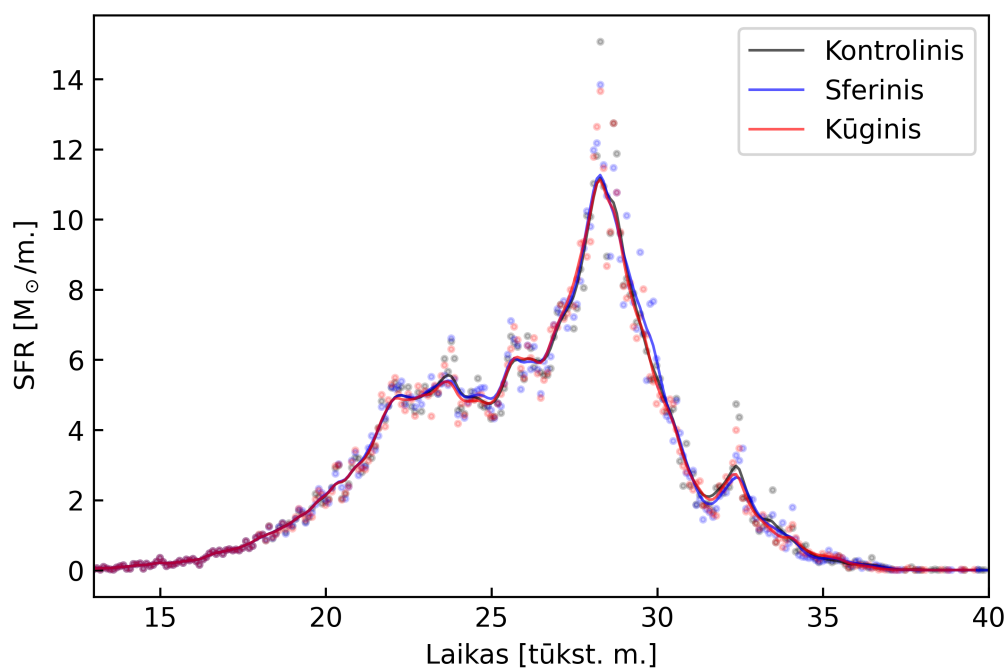
9 pav. Modeliuose esančių žvaigždžių skaičiaus priklausomybė nuo laiko.



10 pav. Modeliuose esančių žvaigždžių bendros masės priklausomybė nuo laiko.



11 pav. Modeliuose esančių žvaigždžių vidutinė masė.



12 pav. Modeliuose esanti žvaigždėdaros sparta (angl. SFR – star formation rate).

## 5 Diskusija

Padarius trijų sukurtų skaitmeninių modelių analizę, galima teigti, kad pavyko pasiekti norimą tikslą – išsiaiškinti aktyvaus branduolio grįžtamojo ryšio poveikį juodosios skylės maitinimui ir žvaigždžių susidarymui. Iš rezultatų galima matyti, kad grįžtamasis ryšys sulėtina dujų akreciją. Tačiau neturi arba turi tik labai menką įtaką žvaigždėdarai. Dujos bekrisdamos į SMBH, turi su savimi kampinį judesio kiekio momentą, dėl kurio susiformavo elipsinės formos akrecinis diskas. Pačios pirmosios dujos, kurios įkrenta ar išlaiko savo formą apie SMBH, yra tankiausios, todėl esant grįžtamajam ryšiui, tik retesnės dujos yra išpučiamos lauk.

Buvo bandoma išsiaiškinti, kokios yra tikslios susidariusių žvaigždžių orbitos, tačiau šitame darbe to įgyvendinti nepavyko. Galbūt būtų galima siūlyti įvesti sekimo sistemą, kuri parodytų tos žvaigždės trajektoriją, net jei ji jau buvo praryta kitos.

Modeliai buvo išvystyti iki  $\sim 40$  tūkst. m., ir juose likusių dujų kiekis: **Kontroliniame** - 9,63 %, **Sferiniame** - 15,4 %, **Kūginiame** - 9,73 %. Pratęsus iki 100 tūkst. m. ar net dar ilgiau būtų galima patikrinti, ar sukuriamas šviesis neturi jokios įtakos ilgalaikiai dujų disko morfologijai (jei nėra išardomas) ir žvaigždėdarai. Tačiau padidinus modelio skyrą ar pradinį dalelių skaičių ir to gali neužtekti. Ateities darbuose laikotarpis būtų pratęstas dar toliau, jei tai leis prieinami resursai.



## 6 Išvados

Šiame darbe buvo analizuojami modeliai, kur masyvus dujų debesis sąveikauja su juodąja skylė. Tyrinėta sistemos morfologinė evoliucija esant įgyvendintam grįžtamajam ryšiui (Tartėnas ir Zubovas, in preparation) su dviem skirtingomis geometrijomis (sferiniu ir kūginiu). Tada įvertinama, kaip tai paveikia žvaigždėdarą ir SMBH masės augimą. Pagrindinės darbo išvados:

1. Krintant molekuliniam dujų debesiui į juodąją skylę, formuojasi elipsiškos formos dujų diskai. Per visą evoliucijos laikotarpį elipsiškumas yra išlaikomas. Tankus dujų žiedas trukdo susidariusioms žvaigždėms atrūkti nuo SMBH įtakos zonos ir sudaro galimybę joms akretuoti į juodąją skylę.
2. SMBH grįžtamasis ryšys paveikia jos masės augimą. Esant generuojamam šviesiui, dujos, priartėjusios prie SMBH, yra įkaitinamos ir išstumiamos atgal į sistemą. To užtenka, kad per visą evoliucijos laikotarpį SMBH masės augimas taptų mažesnis nei tuo atveju, kai nėra jokio grįžtamojo ryšio.
3. SMBH grįžtamasis ryšys beveik nepaveikia susidariusių žvaigždžių skaičiaus ir masės. Esminis skirtumas matomas modelyje su kūginiu grįžtamuoju ryšiu, kai AGN yra pačioje šviesiausioje būsenoje. Išstumtos dujos, grįžusios į sistemą turėjo galimybę būti įsisavintos į žvaigždes, ir taip pakeliant vidutinę žvaigždžių masę.

## Literatūros sąrašas

- Abuter R., Aimar N., Amaro Seoane P., ir kt., 2023, *Astronomy & Astrophysics*, 677, L10
- Armijo M. A. M., de Freitas Pacheco J. A., 2011, *Astronomy & Astrophysics*, 526, A146
- Bland-Hawthorn J., Maloney P. R., Sutherland R., ir kt., 2019, *The Astrophysical Journal*, 886, 1, 45
- Bonnell I. A., Rice W. K. M., 2008, *Science*, 321, 5892, 1060
- Dale J. E., 2015, *New Astronomy Reviews*, 68, 1
- Dittmann A. J., Miller M. C., 2020, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493, 3, 3732
- Gammie C. F., 2001, *The Astrophysical Journal*, 553, 1, 174
- Genzel R., Eckart A., Ott T., Eisenhauer F., 1997, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 291, 1, 219
- Gezari S., Strubbe L., Bloom J. S., ir kt., 2009
- Ghez A. M., Salim S., Hornstein S. D., ir kt., 2005, *The Astrophysical Journal*, 620, 2, 744
- Gurkan M. A., Rasio F. A., 2005, *The Astrophysical Journal*, 628, 1, 236
- Ivanov P. B., Igumenshchev I. V., Novikov I. D., 1998, *ApJ*, 507, 1, 131
- Kawaguchi T., Yutani N., Wada K., 2020, *The Astrophysical Journal*, 890, 2, 125
- Levin Y., Beloborodov A. M., 2003, *The Astrophysical Journal*, 590, 1, L33
- Liu B. F., Qiao E., 2022
- McKee C. F., Ostriker E. C., 2007, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 45, 1, 565
- Meiksin A., Bolton J. S., Tittley E. R., 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445, 3, 2462–2475
- Morganti R., 2017, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 4
- Nayakshin S., Cuadra J., 2005, *Astronomy & Astrophysics*, 437, 2, 437
- Nayakshin S., Cuadra J., Springel V., 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 379, 1, 21
- Nayakshin S., Sunyaev R., 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 364, 1, L23

Nayakshin S., Wilkinson M. I., King A., 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 398, 1, L54

Paczynski B., Wiita P. J., 1980, *A&A*, 88, 23

Padovani P., Alexander D. M., Assef R. J., ir kt., 2017, *The Astronomy and Astrophysics Review*, 25, 1

Paumard T., Genzel R., Martins F., ir kt., 2006, *The Astrophysical Journal*, 643, 2, 1011

Rice W. K. M., Armitage P. J., Bate M. R., Bonnell I. A., 2003, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 339, 4, 1025

Ruszkowski M., Nagai D., Zhuravleva I., ir kt., 2019

Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, *A&A*, 24, 337

Shin J., Woo J.-H., Chung A., ir kt., 2019, *The Astrophysical Journal*, 881, 2, 147

Springel V., 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 364, 4, 1105

Springel V., Pakmor R., Zier O., Reinecke M., 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 506

Tarténas M., Zubovas K., 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 516, 2, 2522

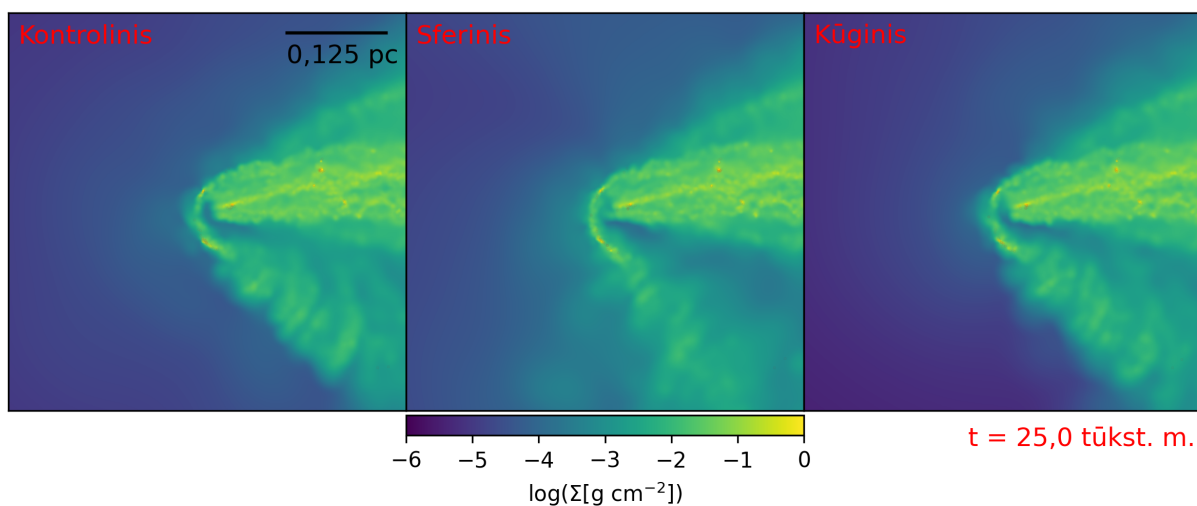
The GRAVITY Collaboration, Abuter, R., Amorim, A., ir kt., 2019, *A&A*, 625, L10

Tulasi K., 2022, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 43, 2, 69

Wald R. M., 1984, *General Relativity*, Chicago Univ. Pr., Chicago, USA

Zhang F., Lu Y., 2020, *The Astrophysical Journal*, 902, 1, 52

## Priedai



13 pav. Modelių evoliucijos tankio žemėlapiai ties 25 tūkst. m. laiko žingsniu. Kiekvieno žemėlapijo kraštinės ilgis yra 0,5 pc. Raudonais taškais pažymėtos žvaigždės susidariusios modeliuose.

## AKTYVAUS BRANDUOLIO TĖKMĖS ĮTAKA JUODOSIOS SKYLĖS MAITINIMUI

### Santrauka

Mūsų Galaktikos centre yra aptikta  $\sim 4,3 \times 10^6 M_{\odot}$  supermasyvi juodoji skylė (angl. supermassive black hole – SMBH) pavadinta Šaulio A\* (angl. - Sagittarius A\*). Daugelyje galaktikų žinoma, kad SMBH yra jų centrų dalis, ir jų gravitacinė trauka gali paveikti aplinkinę medžiagą, galbūt prisidedant prie naujų žvaigždžių susidarymo. Pagal įvairių astronomų komandų stebėjimus, pačiuose artimiausiuose keleto parsekų dydžio regionuose šalia SMBH, Galaktikos centre, yra aptinkama jaunų žvaigždžių, skriejančių ekscentrinių žiedų elipsinėmis orbitomis. Šis darbas siekia išsiaiškinti, koks mechanizmas yra atsakingas už jų prigimtį ir kaip tai paveikia pačią SMBH. Labiausiai tikėtinas atsakymas – aktyvaus galaktikos branduolio grįžtamasis ryšys (angl. active galactic nucleus – AGN). Šio darbo uždaviniai: Ištirti į juodąją skylę krentančio debesies morfologijos evoliuciją ir grįžtamojo ryšio poveikį jai; ištirti juodosios skylės maitinimo spartos ir žvaigždžių formavimosi krentančiame debesyje priklausomybes nuo grįžtamojo ryšio stiprumo bei geometrijos. Toliau padarytos išvados:

1. Krintant molekuliniam dujų debesiui į juodąją skylę, formuojasi elipsiškos formos dujų diskai. Per visą evoliucijos laikotarpį, elipsiškumas yra išlaikomas. Tankus dujų žiedas trukdo susidariusiems žvaigždėms atitrūkti nuo SMBH įtakos zonos ir turi galimybę akretuoti į ją.
2. SMBH grįžtamasis ryšys paveikia jos masės augimą. Esant generuojamam šviesiui, dujos, priartėjusios prie SMBH, yra įkaitinamos ir išstumiamos atgal į sistemą. To užtenka, kad per visą evoliucijos laikotarpį, SMBH masės augimas tampa mažesnis nei tuo atveju kai nėra jokio grįžtamojo ryšio.
3. SMBH grįžtamasis ryšys beveik nepaveikia susidariusių žvaigždžių skaičių ir masę. Esminis skirtumas matosi modelyje su kūginiu grįžtamuoju ryšiu, kai AGN yra pačioje šviesiausiose būsenoje. Išstumtos dujos atgal į sistemą turėjo galimybę būti įsisavintos į žvaigždes ir taip pakeliant vidutinę žvaigždžių masę.

**Pagrindinės sąvokos:** SMBH, AGN, akrecinis diskas, grįžtamasis ryšys.

THE INFLUENCE OF AN ACTIVE NUCLEUS-DRIVEN OUTFLOW ON THE FEEDING OF  
THE BLACK HOLE

**Summary**

In the center of our Galaxy, a  $\sim 4.3 \times 10^6 M_{\odot}$  supermassive black hole (SMBH) named Sagittarius A\* has been discovered. In many galaxies, SMBHs are known to be part of their centers, and their gravitational pull can affect the surrounding material, potentially contributing to the formation of new stars. According to observations by various teams of astronomers, young stars orbiting in eccentric elliptical rings have been found in the very nearest regions, a few parsecs in size, near the SMBH at the center of the Galaxy. This study aims to determine the mechanism responsible for their nature and how it affects the SMBH itself. The most likely answer is the feedback from the active galactic nucleus (AGN). The objectives of this study are: to investigate the morphological evolution of a cloud falling into the black hole and the feedback effect on it; to examine the dependencies of the black hole feeding rate and star formation in the falling cloud based on the strength and geometry of the feedback. The following conclusions were made:

1. As a molecular gas cloud falls into the black hole, elliptical gas disks are formed. Throughout the entire evolution period, the ellipticity is maintained. The dense gas ring prevents the newly formed stars from escaping the influence zone of the SMBH and has the potential to accrete into it.
2. The feedback from the SMBH affects its mass growth. Due to the generated luminosity, gas that approaches the SMBH is heated and pushed back into the system. This is sufficient to ensure that, over the entire evolution period, the mass growth of the SMBH is less than it would be if there were no feedback.
3. The feedback from the SMBH has little effect on the number and mass of the formed stars. A significant difference is observed in the model with conical feedback when the AGN is in its brightest state. The gas pushed back into the system has the opportunity to be absorbed into stars, thereby increasing the average stellar mass.

**Keywords:** SMBH, AGN, accretion disk, feedback.