VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
TEORINĖS FIZIKOS IR ASTRONOMIJOS INSTITUTAS

Monika Kazlauskaitė

AKTYVIŲ BRANDUOLIŲ KURIAMŲ TĖKMIŲ IR GALAKTIKŲ SAVYBIŲ SĄRYŠIŲ PAIEŠKA NAUDOJANT NEURONINIŲ TINKLŲ MODELIUS

BAKALAURO STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Kompiuterinė fizika ir modeliavimas

Studentas: Monika Kazlauskaitė

Darbo vadovas: dr. Kastytis Zubovas

Konsultantas: Jonas Bialopetravičius

Instituto atstovas: prof. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2020

Turinys

1 Įvadas 2
2 Tėkmės ir jų savybės 4
2.1 Tėkmių formavimasis 4
2.2 Vėjo energija varomos tėkmės 5
2.3 Tėkmių stebėjimai 7
2.3.1 Tėkmių aptikimas ir pagrindiniai bruožai 7
2.3.2 Tėkmių savybių ir galaktikos savybių koreliacijos 8
2.4 AGN šviesio evoliucija laike 9
3 Dirbtiniai neuroniniai tinklai 11
3.1 Neuroninių tinklų apibrėžimas 11
3.2 Hiper-parametrai ir jų parinkimas 13
4 Modelių aprašymas 14
4.1 Tėkmių evoliucijos modelis 14
4.1.1 Modeliuojamų parametrų erdvė 15
4.2 Neuroninio tinklo modelio aprašymas 17
4.2.1 Eksperimentai: neuronų ir sluoksnių skaičiaus nustatymas, mokymosi spartos bei epochų skaičių daromos įtakos tyrinėjimas 18
4.2.2 Eksperimentai: tikslo funkcijos ir optimizavimo metodo daromos įtakos nagrinėjimas 19
4.2.3 Neuroninio tinklo patikimumo įvertinimas 21
5 Rezultatai ir aptarimas 24
5.1 Sugeneruotų tėkmių savybės 24
5.2 Neuroninio tinklo rezultatai 29
5.3 Reikalingi patobulinimai 36
6 Išvados 37
Literatūros sąrašas 38
Santrauka 42
Priedas Nr. 1. 44

1 Įvadas

1964-aisiais buvo pristatyta teorija, kad beveik visų galaktikų centruose turėtų būti po supermasyvią juodąją skylę (SMBH) [1]. Ši teorija buvo sukurta tam, kad paaiškintų stebėjimuose užfiksuotus galaktikų centruose esančius labai galingos spinduliuotės šaltinius, kurie nuo tada, dar anksčiau nei prieš dešimtmetį, buvo pavadinti aktyviais galaktikos branduoliais (AGN) [1]. Nuo tada iki šių laikų minėtos hipotezės patvirtintos vis gausėjančiais ir tikslėjančiais stebėjimais. Dabar jau žinoma, kad AGN susidaro dėl to, kad aplink SMBH esančios dujos, kurios, per akrecinį diską krisdamos į juodąją skylę, praranda energiją, didžiąją jos dalį išspinduliuojant [2], o AGN spinduliuotės intensyvumas palyginamas arba galingesnis nei pačios galaktikos, kuriame jis yra. Išlaisvinta energija kuria grįžtamąjį procesą: galingos spinduliuotės slėgio paveiktos arti AGN esančios dujos įšyla, susispaudžia ir dėl to keliauja iš centrinės galaktikos dalies visomis kryptimis [3]. Dėl šio proceso susidarę dujų tėkmės dažniausiai stebimos iki ~ 1 kpc atstumu nuo galaktikos centro, bet kol kas toliausiai užfiksuota tėkmės dalis buvo išplitusi net ~ 15 kpc [4].

Akivaizdu, jog toks galingas dujų judėjimas turi daryti įtaką visai galaktikos evoliucijai. Tėkmių pernašos spartos neretai viršija žvaigždėdaros spartą, todėl jos gali paveikti žvaigždėdarą didelėje galaktikos dalyje [5]. SMBH didelio masto įtaka matoma iš stebėjimų: SMBH masė $M_{\rm BH}$ koreliuoja su žvaigždžių greičių dispersija σ galaktikos sferoide (halas ir balždas), baldžo mase $M_{\rm bulge}$ [6] ir net visos galaktikos virialine mase $M_{\rm tot}$ [7]. Gravitacija šio sąryšio paaiškinti neįmanoma, nes toliau, kaip kelios dešimtys pc baigiasi SMBH įtakos sfera $R_{\rm inf}$, regionas aplink juodąją skylę, kuriame jos gravitacinis potencialas stipresnis už galaktikos potencialą [8]. $R_{\rm inf}$ nebūna daugiau nei $R_{\rm inf} \sim 100$ pc, o galaktikų baldžų spinduliai paprastai svyruoja nuo vieno iki kelių kpc. Akivaizdu, kad didžioji dalis galaktikos lieka ne SMBH gravitacijos įtakos srityje, o tai yra svarus pagrindas tyrinėti tėkmes, kaip galimą ryšio tarp SMBH ir galaktikos metodą. Be to, AGN per visą savo gyvavimo laikotarpį išspinduliuoja tiek energijos, kiek užtektų suardyti baldžui [3]. Taigi, svarbu suprasti, kaip AGN geba paveikti galaktiką sukurdamas stebimus sąryšius su greičių dispersija, baldžo bei virialinėmis masėmis ir taip darydamas nesunaikina baldžo.

Iš stebėjimų rezultatų yra rasta nemažai koreliacijų tarp tėkmių savybių (tokių kaip, energijos pernašos spartos bei masės pernašos spartos) ir AGN šviesio $L_{\rm AGN}$ [9], kurios neblogai atitinka teorinių modelių prognozuojamus sąryšius: tėkmės energijos pernašos sparta $\dot{E}$ paprastai būna keli procentai $L_{\rm AGN}$, judesio kiekio pokytis $\dot{p} \simeq 20 L_{\rm AGN}/c$, o $\dot{M}$ nuo $L_{\rm AGN}$ priklauso laipsnine funkcija [9], [5]. Tačiau stebėjimų rezultatuose matyti ir nemaža sklaida aplink šiuos sąryšius [9], [5]. Pavyzdžiui, aplink $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ sąryšį stebėjimų duomenyse egzistuoja 0.3 dex sklaida [9]. Toks stebėjimų duomenų pasisiskirstymas galėtų pasireikšti dėl kelių dalykų, vienas iš jų - galaktikos parametrų įvairovė, mat tokio pat šviesio AGN gali egzistuoti skirtingų parametrų galaktikose. Kitas galimas sklaidos paaiškinimas galėtų būti $L_{\rm AGN}$ kitimas laike, nes gali būti, kad ankstesniais aktyvumo epizodais tėkmės buvo, pavyzdžiui, ženkliai galingesnės, o tai atsispindėtų kaip silpna tėkmės parametrų priklausomybė nuo dabartinio stebimo šviesio. Šių veiksnių įtaka gali būti didelė, todėl natūralu, kad stebimas rezulta-

tas turėtų būti bandomas pilnai paaiškinti įskaitant abiejų minėtų veiksnių įtaką. Tačiau toks tyrimas yra sudėtingas, nes reikalauja nustatyti sąryšius tarp daug skirtingų galaktikos ir AGN šviesio kitimą nusakančių parametrų. Šiame darbe pristatomas skaitmeninis modelis, kurio sugeneruotų duomenų ir neuroninio tinklo pagalba yra siekiama nustatyti ar galima galaktikos ir AGN parametrų įvairovės kuriama įtaka paaiškinti tėkmių ir AGN šviesio sąryšio sklaidą. Šiame darbe naudojamas perrašytas ir praplėstas [10] straipsnyje pristatytas idealizuotas vienmatis tėkmių modelis. Juo yra sugeneruojama norimo dydžio duomenų bazė (šiame darbe buvo analizuojama $\sim$ 38000 tėkmių variantų). Tiek daug tėkmių yra sukuriama atsitiktinai padengiant visų galimų galaktikos ir AGN parametrų kombinacijas tam, kad šiais duomenimis apmokius neuroninį tinklą, jis galėtų nustatyti kiekvieno tiriamo parametro įtaką tėkmių evoliucijai. Tuomet su dirbtinėmis tėkmėmis apmokytu neuroniniu tinklu galima apdoroti ir realius stebėjimų duomenis. Stebėjimų duomenims neuroninis tinklas atspėja tėkmių evoliucijai reikšmingus galaktikos parametrus, tokius kaip AGN šviesio kitimo funkcija, tarpą tarp aktyvumo epizodų ir t.t. Šie parametrai leidžia sugeneruoti dirbtines tėkmes, paremtas stebėjimais ir palyginti gautus rezultatus tarpusavyje. Toks metodas yra puikus įrankis patikrinti žinomos teorijos tinkamumą bei paaiškinti stebėjimų rezultatams.

Šio darbo tikslas yra: sukurti neuroniniais tinklais paremtą galaktikos aktyvumo istorijos atkūrimo metodą ir ištirti jo galimybes. Uždaviniai:

1. Parašyti neuroninį tinklą, skirtą atkurti galaktikos aktyvumo istoriją pagal jos tėkmių savybes.
2. Sukurti tėkmių modelių duomenų bazę tinklo apmokymui ir išbandymui.
3. Ištirti kaip tėkmių savybės priklauso nuo galaktikos bei AGN aktyvumą nusakančių parametrų.
4. Įvertinti tinklo patikimumą bei naudingumą remiantis modeliniais ir realiais tėkmių duomenimis.

2 Tėkmės ir jų savybės

Aktyvaus galaktikos branduolio spinduliuotė $L_{\rm AGN}$ yra labai galinga: apytiksliai tarp $10^{40} - 10^{47}$ erg s^{-1} [11]. Ji sukelia energingus vėjus [12], kurie, pasiekę tarpžvaigždinę medžiagą (ISM), stumia ISM dujas iš galaktikos centrinės dalies - susidaro tėkmė, kuri gali plisti net per visą galaktiką [9], [13], [5]. Tėkmės savybės yra aiškinamos teoriniais modeliais [12], [14], [15], [10]. Paprastai vieno epizodo trukmė turėtų būti tik apie 0.1 mln. m. [16], o tėkmių amžius, nustatomas iš tėkmių spindulių ir greičių, gali siekti ir milijonus metų [3]. Taigi, panašu, kad laikui bėgant tėkmę stumia ne vienas aktyvumo epizodas.

Daugiausiai yra aptinkamos tėkmės, sudarytos iš šaltų molekulinių dujų, išplitusios maždaug 1 kpc atstumu nuo AGN. Tačiau yra aptinkama ir daug toliau išplitusių tėkmių, toliausiai iki ~ 7 kpc [4], nors yra ir aptikta iki ~ 15 kpc išplitusios tėkmės dalis [4]. Taip pat ir kiti tėkmių parametrai stebimi labai įvairūs, mažiausi tėkmių greičiai gali būti vos kelių dešimčių km/s [9], patys didžiausi gali siekti ir ~ 1700 km/s [9], [17], o masės pernašos spartos kinta maždaug nuo 100 iki 1800 $M_\odot$/yr ($M_\odot = 1.989 \times 10^{30}$ kg - Saulės masė) [17], [9]. Yra pastebėta, kad apskritai tėkmių savybės priklauso nuo AGN šviesio, pavyzdžiui, molekulinių tėkmių masės pernašos sparta $\dot{M}_{\rm outf}(H_2) \sim L_{\rm AGN}^{0.76}$ [13], arba $\dot{M}_{\rm outf}(H_2) \sim L_{\rm AGN}^{0.72}$ [9], jonizuotų tėkmių masės pernašos sparta $\dot{M}_{\rm outf}(ion) \sim L_{\rm AGN}^{1.29}$ [13]. Be to, matomas aiškus sąryšis tarp AGN šviesio ir tėkmės energijos pernašos spartos $\dot{E} \simeq 0.05 L_{\rm AGN}$ [9], [5]. Taip pat pastebimas daugmaž vienodas santykis tarp tėkmės judesio kiekio pokyčio $\dot{p}$ ir $L_{\rm AGN}$: $\dot{p} \simeq 20 L_{\rm AGN}/c$ [9], [5]. Tokie tėkmių savybių ir $L_{\rm AGN}$ sąryšiai leidžia įtarti, kad egzistuoja fizikiniai mechanizmai, nulemiantys tokias koreliacijas, kurie galbūt galėtų būti paaiškinti pagal tai, kaip formuojasi tėkmės.

2.1 Tėkmių formavimasis

Akreciniame diske išlaisvinta energija paveikia aplink juodąją skylę esančias dujas, taip kurdama grįžtamuosius procesus. Vienas iš jų - vėjas, kuris susidaro kuomet AGN akrecinio disko ir vainiko spinduliuotė išstumia dalį disko dujų tolyn nuo centro, kurios plinta beveik sferiškai [12]. Taip yra perduodama dalis AGN energijos vėjui. Teoriškai nustatyta, kad vėjo kinetinės energijos sparta $\dot{E}_w$ yra lygi [12]:

$$\dot{E}_w = \frac{1}{2}\dot{M}_{\rm out} v^2 \simeq 0.05 L_{\rm Edd}, \tag{1}$$

kur $\dot{M}_{\rm out}$ - vėjo masės pernašos sparta, $L_{\rm Edd}$ - Edingtono šviesis - teorinė maksimali šviesio riba konkrečios masės kūnui:

$$L_{\rm Edd} = \frac{4\pi G M_{\rm BH} c}{\kappa}, \tag{2}$$

kur $M_{\rm BH}$ - SMBH masė, c - šviesos greitis, G - gravitacijos konstanta, κ - neskaidrumas dėl laisvųjų elektronų sklaidos. Vėjo greitis $v_{\rm w}$ gali būti maždaug nuo 0.1c iki 0.3c ir yra maždaug lygus dujų pabėgimo greičiui iš akrecinio disko $v_{\rm w} \simeq \varepsilon c$, c - šviesos greitis, o $\varepsilon \simeq 0.1$ - akrecijos spinduliuotės

našumas [14]. Kai vėjas pasiekia ISM, susiformuoja smūginė banga, kuri sukuria tėkmę [12]. Vėjo greitis yra ženkliai didesnis už sferoido greičių dispersiją $\sigma \sim 200$ km/s, todėl astrisanda staigus ISM pasipriešinimas ir taip susidaro stipri smūginė banga. Jos frontas iš vidinės pusės yra spaudžiamas karšto vėjo, dėl kurio įtakos įkaitusių ir susispaudusių ISM dujų išorinėje pusėje taip pat susidaro smūginė banga, kuri kaitina ISM. Šiuos du regionus atskiria sąlyčio netolydumas [14]. Beveik visa vėjo kinetinė energija virsta šilumine, tad tėkmės energija priklauso nuo vėjo kinetinės galios ir nebūna už ją didesnė. Taip AGN vėjas centrinėje galaktikos dalyje sukuria labai karštą mažą burbulą, kurio tolimesnė evoliucija priklauso nuo ISM struktūros ir nuo atstumo tarp AGN ir smūginės bangos [15].

Dėl nevienodai tankios ISM struktūros pati tėkmė lengviausiai plinta tomis kryptimis, kur sutinka mažiausiai pasipriešinimo [18]. Dėl to net ir keliaujant masyviai tėkmei iš galaktikos centrinės dalies, tankūs dujų regionai pasilieka ir gali toliau maitinti aplink SMBH esantį akrecinį diską. Šis AGN gyvavimo procesas sustoja tik tada, kai beveik visa tanki medžiaga pakliūva į AGN akrecinį diską arba kai AGN varomas vėjas pasidaro toks galingas, kad nupučia ir tankius regionus [12]. Kita vertus, nuo atstumo tarp AGN ir smūginės bangos priklauso, kaip efektyviai tėkmė vėsta. Čia atstumas nuo AGN daro įtaką smūginės bangos vėsimui dėl to, kad vėjo, temperatūra (apie 10^{10}-10^{11} K) yra ženkliai didesnė nei temperatūra netoli SMBH akrecinio disko (apie 10^7 K). Todėl, kai tėkmė yra pakankamai nedideliu atstumu $R_{\rm cool}$ vyksta efektyvus vėsinamas atvirkštiniu Komptono procesu, kurio metu didelė dalis smūginės bangos energijos yra išspinduliuojama, o tėkmės dujos pasidaro dvitemperatūre plazma [19]. Toks efektyvus vėsinimas vyksta kol tėkmės spindulys neviršija ~ 1 pc [15]. Didesniu atstumu tėkmės smūgiuoto vėjo burbulas vėsta neefektyviai, o tai reiškia, kad jos yra varomos tėkmėms perduodama visa vėjo energija. Tėkmės slėgis daug didesnis už ISM, tad tėkmė pradeda plėstis adiabatiškai [14]. Taigi energijos užtenka stipriai paveikti ISM dujas. Tiriant tėkmes dideliais masteliais, nėra klaidinga analizuoti tik vėjo energija varomas tėkmes, todėl toliau detaliau pristatomos tik šio tipo tėkmės.

2.2 Vėjo energija varomos tėkmės

Toli nuo AGN, kai jau tėkmė nebevėsta, arba retoms dujoms, didžioji dalis vėjo kinetinės energijos yra perduodama tėkmę sudarančioms dujoms [3]. Sferiškai simetriškoms dujoms galima aprašyti judėjimo lygtį, kurios išvedimas yra pateikiamas [10] straipsnyje, o čia parodomos tik pagrindinės išraiškos. Judėjimo lygtis aprašoma pagal antrą Niutono dėsnį:

$$\frac{d}{dt}\left[M\dot{R}\right] = 4\pi R^2 P - \frac{GM\left[M_p + M/2\right]}{R^2}, \tag{3}$$

čia R - tėkmės spindulys, kuris skaičiuojamas iki sąlyčio netolydumo, M - tėkmės masė esanti iki R, P - besiplečiančių dujų slėgis, $M_{\rm p}$ - žvaigždžių bei tamsiosios materijos, nejudančių kartu su tėkme, masė esanti iki R. Kairė lygybės pusė aprašo tėkmės judesio kiekio pokytį, dešinėje lygybės pusėje

pirmas dėmuo nurodo varančią jėgą, o antrasis - tėkmę veikiančią gravitacijos jėgą. Vėjo energija apskaičiuojama pagal lygtį:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{3}{2}PV\right] = \frac{\varepsilon}{2}L_{AGN} - P\frac{dV}{dt} - \frac{dE_g}{dt}, \tag{4}$$

čia V - tėkmės užimamos erdvės tūris, $E_{\rm g}$ - dujų gravitacinė ryšio energija, $L_{\rm AGN}$ - aktyvaus galaktikos branduolio šviesis. Kairė lygybės pusė nusako vėjo vidinės energijos pokytį. Dešinės pusės pirmasis dėmuo nurodo energiją, gaunamą iš AGN, antrasis dėmuo nurodo energiją, išeikvojamą dėl adiabatinio plėtimosi, o trečiasis dėmuo nurodo energiją, išeikvojamą įveikiant dujų gravitacinę ryšio energiją. Iš (3) lygties galima išreikšti P ir įstatyti į (4). Tuomet išskleidus diferencialus ir atlikus kintamųjų perstatymus gaunama judėjimo lygtis:

$$\dddot{R} = \frac{\varepsilon L_{AGN}}{MR} - \frac{2\dot{M}\ddot{R}}{M} - \frac{3\dot{M}\dot{R}^2}{MR} - \frac{3\dot{R}\ddot{R}}{R} - \frac{\ddot{M}\dot{R}}{M} + \frac{G}{R^2}\left[M + \dot{M}_p + \dot{M}\frac{M_p}{M} - \frac{3}{2}\left(2M_p + M\right)\frac{\dot{R}}{R}\right]. \tag{5}$$

(5) lygtyje $\dot{M} \equiv \dot{R}\partial M/\partial R$ ir $\ddot{M} \equiv \ddot{R}\partial M/\partial R + \dot{R}\left(d/dt\right)\left(\partial M/\partial R\right)$.

Padarius kelias prielaidas galima (5) lygtį panagrinėti paprasčiau. Jeigu medžiagos pasiskirstymas ir gravitacinis potencialas yra izoterminiai (izoterminiu atveju $\rho \propto R^{-2}$), lygtis labai supaprastėja ir galima gauti analitinį sprendinį [20]. Taip galima įvertinti tėkmės greitį, kuris tipiniu atveju gerokai didesnis už greitį, reikalingą ištrūkti iš galaktikos gravitacinio potencialo. Izoterminiu atveju analitinis greičio sprendinys, tinkantis tik pastoviam $L_{\rm AGN}$, yra [21]:

$$\dot{R} \simeq \left(\frac{2\varepsilon l f_{\rm c}}{3 f_{\rm g}}\sigma^2 c\right)^{1/3}, \tag{6}$$

kur σ - greičių dispersija, l - Edingtono santykis (AGN šviesio ir Edingtono šviesio santykis, $L_{\rm AGN} = lL_{\rm Edd}$) , $f_{\rm c} = 0.16$ - vidutinis barioninės ir visos materijos tankių santykis Visatoje, $f_{\rm g}$ yra dujų kiekis galaktikoje, išreiškiamas kaip $M_{\rm gas}/M_{\rm tot}$ [21].

Tėkmės masės pernašos spartos $\dot{M}$ analitinis sprendinys, taip pat tinkantis tik izoterminiam tankio pasiskirstymui, išreiškiamas pagal formulę: [21]:

$$\dot{M} \simeq \frac{\left(\gamma+1\right) f_g \sigma^2}{G}\dot{R}, \tag{7}$$

kur G - gravitacijos konstanta, γ - izochorinės ir izobarinės savitųjų šilumų santykis, dažnai skaičiuojamas su 5/3 verte, nes ja yra aprašomos vienatomės dujos, kurios turėtų būti smūginėje bangoje, sudarytoje iš jonizuotų dujų. 2.1 skyriaus pradžioje buvo minėta, kad iš stebėjimų gauti tėkmių parametrai koreliuoja su $L_{\rm AGN}$, o (6) ir (7) formulės teoriškai puikiai iliustruoja šią koreliaciją kaip tėkmės susidarymo mechanizmo pasekmę. Tačiau šie analitiniai sprendiniai atskleidžia ir kitus svarbius parametrus: σ ir $f_{\rm g}$, kurie taip pat daro įtaką tėkmių plitimui galaktikoje ir stebimoms jų savybėms.

2.3 Tėkmių stebėjimai

2.3.1 Tėkmių aptikimas ir pagrindiniai bruožai

Tėkmės dažniausiai aptinkamos analizuojant galaktikų spektrus arba, rečiau, iš erdviškai išskirtų galaktikų nuotraukų analizės. Spektruose yra ieškoma galimų tėkmių indikatorių - įvairių atomų ar molekulių spektrinių linijų su pakankamai dideliais „sparnais“, iš kurių galima įtarti didelius judančios medžiagos greičius. Šiuo atveju dėl dujų judėjimo stebimas AGN spektras yra paveiktas Doplerio efekto, kuris nulemia, kad kuo dujos juda greičiau, tuo labiau prasiplečia spektro linija. Vieną Gauso kreivę priderinus prie spektro linijos profilio, lieka reikšmingas ekscesas - „sparnai“ - ties dideliais greičiais, atitinkantys tėkmę. Jie yra priderinami kita Gauso kreive, kuri leidžia nustatyti tėkmės greitį ir įvertinti dujų masę joje. Kitu būdu tėkmės aptinkamos kvazarų nuotraukose pagal taško išplitimo funkciją (PSF) atskiriant AGN nuo galaktikos, kurioje jis yra, tuomet galaktikai atitaikant foninių žvaigždžių spektrą, dujų emisiją ir tarpžvaigždinę absorbciją iš kurių galima identifikuoti ir tėkmių savybes [22].

Yra stebimos trijų fazių tėkmės: molekulinės, jonizuotos ir neutralios. Molekulinės tėkmės aptinkamos per OH ir CO spektrines linijas. Per OH linijas aptinkamos tėkmės tolimųjų infraraudonųjų spindulių spektroskopijos dėka, pavyzdžiui, su *Herschel Space Observatory* Photoconductor Array Camera and Spectrometer (PACS) [23]. Kitas naudojamas prietaisas - *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA) interferometras, juo aptikta molekulinių tėkmių, identifikuotų per J lygmens šuolio emisijos linijas CO molekulėse [5]. Jonizuotos tėkmės dažniausiai aptinkamos iš [OIII] emisijos linijų [17], šias linijas užfiksuoti gali *Gemini* (South) *Multi-Object Spectrograph* (GMOS). Šiuo prietaisu taip pat stebimos ir Hβ emisijos linijos [17] iš kurių taip pat galima nustatyti jonizuotas tėkmes. Neutralios tėkmės aptinkamos iš Na ID absorbcijos linijų su *Visible Multi Object Spectrograph* (VIMOS) esančiu *the Very Large Telescope* (VLT). Taip pat neutralios tėkmės aptinkamos iš C II smulkiosios struktūros šuolių [5] su PACS ir ALMA. Yra ir daug kitų spektrinių linijų, kurios gali leisti aptikti tėkmes, tačiau pastarosios kol kas yra pačios naudingiausios.

OH linijos naudingos tuo, kad atitinka P-Cygni profilį, kuris aiškiai parodo, kad yra iš galaktikos iškeliaujančios dujos [23], [24]. CO linijose matomi platūs sparnai [24], padedantys nesunkiai nustatyti tėkmės egzistavimą. Iš OH linijų nustatomi greičiai ir iš CO linijų nustatomos masės pernašos spartos geriausiai koreliuoja su AGN šviesiu [24]. [OIII] emisijos linijos turi asimetrinius, didelių greičių profilius ir gali nusakyti jonizuotų dujų kinematiką [17], be to, būtent šios linijos negali matytis AGN plačiųjų linijų regione, o pasimato tik siaurųjų linijų regione, todėl yra puikus rodiklis tėkmėms esančioms kelių pc arba kpc atstumu nuo AGN [17]. Jau žinant greitį ir šviesį galima susiskaičiuoti tėkmių mases [5], o tėkmių spinduliai gaunami pasinaudojus linijų poslinkiais kontinuume ir spektrinių linijų pločiu pusaukštyje (FWHM), jeigu tėkmės nėra erdviškai išskiriamos [5], [24].

Iš įvairių spektrinių linijų modeliavimo yra nustatomos tėkmių savybės: spindulys, greitis, masė bei masės pernašos sparta. Molekulinės tėkmės toliausiai nustatytos iki $\sim$7 kpc [4], [5], nors daugiausia tokių tėkmių aptinkama iki $\sim$1 kpc. Yra užuominų, kad molekulinės tėkmės gali išplisti ir žymiai

didesniais atstumais: CO emisijos linijomis ir fotometrija nustatyta, kad kelių tėkmių tolimiausios dalys gali būti išplitusios net iki ∼15 kpc [4]. Iki ∼1 kpc išplitusių molekulinių tėkmių vidutiniai greičiai svyruoja maždaug nuo 50 iki 1200 km/s [9], [23], o maksimalios vertės gali siekti iki ∼ 1600 km/s [24] arba net ∼ 1700 km/s [9], [17]. Kitų fazių tėkmėms spinduliai ir greičiai yra taip pat labai panašiuose rėžiuose, tačiau jų masės pernašos spartos skiriasi: molekulinėse tėkmėse, aptinkamose iki ∼1 kpc, vidutinė masės pernašos sparta gali būti iki ∼ 1500 $M_\odot$/m. [5], [23], o maksimali gali siekti ∼ 1800 $M_\odot$/m. [9]. Jonizuotų dujų tėkmėms masės pernašos sparta ∼ $100-1000$ $M_\odot$/m. [17]. Taip pat yra pastebėta, kad kai kurios tėkmės yra sudarytos iš molekulių ir neutralių dujų, kas reiškia kelių fazių tėkmes [25], bet joms būnant kelių fazių žymių parametrų skirtumų nėra stebima. Visų masių tėkmėms energijos pernašos sparta aptinkama apytiksliai nuo 10^{38} iki 10^{45} erg/s [24], [5], nors rečiau pasitaiko ir daug šviesesnių, AGN iki 10^{48} erg/s [11], [26].

2.3.2 Tėkmių savybių ir galaktikos savybių koreliacijos

Kaip jau minėta 2 skyriaus pradžioje ir 2.2 skyrelyje, teoriškai parodyta, kad tėkmių parametrai priklauso nuo $L_{\rm AGN}$ ir stebėjimų duomenys tikrai šiuos sąryšius patvirtina. Tačiau stebėjimų duomenyse taip pat matoma ir didelė parametrų sklaida. Pavyzdžiui, duomenyse, nusakančiuose $\dot{M}-L_{\rm AGN}$ sąryšį, yra maždaug 0.3 dex parametrų sklaida aplink prognozuojamas teorines vertes [9]. Tėkmės kinetinės galios sklaida aplink teorinę vertę dar didesnė, apie 0.5 dex [9]. Kadangi iš analitinių sprendinių yra žinoma, kad $\dot{M} \propto f_{\rm g}\dot{R}$, o $\dot{R} \propto {f_{\rm g}}^{-1/3}$, tai reiškia, kad, pavyzdžiui, daug dujų turinčioje galaktikoje tėkmė juda lėčiau, bet perneša daugiau masės, nei turinčioje mažai dujų, taigi gali būti, kad dujų įtaka yra pakankamai didelė, kad tiek iškreiptų stebimą $\dot{M}-L_{\rm AGN}$ sąryšį.

Norint įvertinti galaktikos įtaką, daromą tėkmių parametrų ir $L_{\rm AGN}$ koreliacijai, svarbu suprasti ryšį tarp galaktikos parametrų ir AGN šviesio. Iš galaktikų stebėjimų duomenų matyti, kad galaktikos ir joje esančios SMBH parametrai stipriai koreliuoja. Yra nustatyti keli labai aiškūs sąryšiai, vienas iš jų tarp SMBH masės $M_{\rm BH}$ ir galaktikos sferoido greičių dispersijos σ [27], [6]:

$$\log\left(\frac{M_{\rm BH}}{M_\odot}\right) = (8.32\pm0.05) + (5.64\pm0.32)\log\left(\sigma/200\ \mathrm{km\ s^{-1}}\right). \tag{8}$$

Kitas svarbus pastebėtas sąryšis yra tarp $M_{\rm BH}$ ir baldžo masės $M_{\rm bulge}$ [6]:

$$\log\left(\frac{M_{\rm BH}}{M_\odot}\right) = (8.46\pm0.08) + (1.05\pm0.11)\log\left(\frac{M_{\rm bulge}}{10^{11}\ \mathrm{M_\odot}}\right). \tag{9}$$

Taip pat rastas sąryšis tarp $M_{\rm BH}$ ir visos galaktikos masės $M_{\rm tot}$ [7]:

$$\log\left(\frac{M_{\rm BH}}{M_\odot}\right) = (8.18\pm0.11) + (1.55\pm0.31)\log\left(\frac{M_{\rm tot}}{10^{13}\ \mathrm{M_\odot}}\right). \tag{10}$$

Iš formulių (8), (9) ir (10) matyti, kad kiekviename iš šių sąryšių yra nemažos paklaidos, jos kyla

iš natūralios duomenų sklaidos aplink priderintas vertes. Pavyzdžiui, $M_{\rm BH} = 10^7$ $\rm M_\odot$ supermasyvios juodosios skylės randamos galaktikose, kurių σ yra intervale apytiksliai nuo 30 km/s iki 180 km/s [28]. Tos pačios masės $M_{\rm BH} \sim 10^7$ $\rm M_\odot$ SMBH aptinkamos baldžuose, kurių masė yra nuo $M_{\rm bulge} = 5.6 \times 10^9$ $\rm M_\odot$ iki $M_{\rm bulge} = 1.8 \times 10^{10}$ $\rm M_\odot$ [29]. Kadangi tos pačios masės SMBH gali egzistuoti skirtinguose baldžuose, tai nestebina ir tai, kad matoma didelė sklaida ir tarp $M_{\rm BH} - M_{\rm tot}$ sąryšio, kur tos pačios masės $M_{\rm BH} \sim 10^7 \rm M_\odot$ SMBH aptinkamos galaktikose, kurių masė yra nuo $M_{\rm tot} = 2 \times 10^{12}$ $M_\odot$ iki $M_{\rm tot} = 10^{13}$ $M_\odot$ [30]. Faktas, jog tokios pačios masės supermasyvios juodosios skylės gali egzistuoti skirtingų parametrų galaktikose, leidžia numatyti, kad panašių pradinių parametrų tėkmė keliautų gana skirtingais greičiais, sudarydamos skirtingos masės tėkmes. Tuomet tėkmių parametrų ir $L_{\rm AGN}$ sąryšyje stebimą sklaidą iš dalies galima būtų paaiškinti minėtų galaktikų parametrų ir $M_{\rm BH}$ sklaida.

2.4 AGN šviesio evoliucija laike

Kitas svarbus aspektas, kuris galėtų paaiškinti, kodėl stebima didelė sklaida tarp tėkmės parametrų ir AGN šviesio, būtų $L_{\rm AGN}$ kitimas laike. Bendru atveju tėkmės plinta ilgiau nei trunka vienas AGN epizodas [3]. Pavyzdžiui, jeigu tėkmės spindulys yra 1 kpc, o $v = 10^3$ km/s, tai tėkmės sklidimo laikas $t_{\rm dyn} = R/v \simeq 10^6$ yr [31], bet tuo metu AGN ne visą laiką spinduliuoja didžiausią galią - vienas aktyvumo epizodas užtrunka maždaug $10^4 - 10^5$ metų [16], [32]. Tad keletą aktyvumo epizodų pragyvenusioje galaktikoje aptinkamos toli išplitusios tėkmės nebūtinai turėtų koreliuoti su stebėjimuose užfiksuotu šviesiu, nes ankstesniais epizodais aktyvumas galėjo būti ženkliai didesnis arba mažesnis [31] ir dėl to priversti tėkmes keliauti skirtingais atstumais bei greičiais. Tuomet suskaičiavus laike kintančio AGN šviesio vidurkį per visą tėkmės gyvavimo laikotarpį, nebūtinai būtų gaunama tokia vertė, koks yra stebimas dabartinis $L_{\rm AGN}$. Todėl siekiant teisingai įvertinti tėkmės ir šviesio sąryšį, būtina tėkmę laikyti kaip galimai kelių AGN aktyvumo epizodų rezultatą, dėl to šviesį reikia skaičiuoti pagal funkciją, priklausančią nuo laiko $L_{\rm AGN}(t)$.

Kadangi stebint aktyvias galaktikas neįmanoma tiesiogiai pamatuoti, koks anksčiau buvo AGN šviesis, tėkmės savybių ir laike kintančio šviesio koreliaciją patikrinti galima tik skaitmeniniais modeliais. Šiame darbe nagrinėjamos kelios galimos vieno epizodo šviesio kitimo $L_{\rm AGN}(t)$ funkcijos, paprasčiausia įsijungianti ir išsijungianti:

$$L_{\rm AGN}(t) = \begin{cases} lL_{\rm Edd}, & t < t_{\rm q}, \\ 0, & t > t_{\rm q}, \end{cases} \tag{11}$$

kur $t_{\rm q}$ - vieno epizodo trukmė [31], l - Edingtono santykis. Kita funkcija eksponentinė:

$$L_{\rm AGN}(t) = \begin{cases} lL_{\rm Edd}, & t < t_{\rm q}, \\ lL_{\rm Edd} \exp\left(\frac{t_{\rm q}-t}{t_{\rm d}}\right), & t > t_{\rm q}, \end{cases} \tag{12}$$

kur t_{d} - laisvasis parametras - šviesio mažėjimo laiko skalė [31]. Taip pat gali būti laipsninė funkcija:

$$L_{\mathrm{AGN}}(t) = \begin{cases} lL_{\mathrm{Edd}}, & t < t_{\mathrm{q}}, \\ lL_{\mathrm{Edd}} \left(\frac{t}{t_{\mathrm{d}}}\right)^{-\alpha_d}, & t > t_{\mathrm{q}}, \end{cases} \tag{13}$$

kur $-\alpha_d$ - nepriklausomai pasirenkamas laipsnio rodiklis [31]. Ir praplėstoji laipsninė, paremta akrecinio disko evoliucijos modeliu [33] (vėliau sutrumpintai vadinama tiesiog King šviesio funkcija):

$$L_{\mathrm{AGN}}(t) = lL_{\mathrm{Edd}} \left(1 + \frac{t}{t_{\mathrm{d}}}\right)^{-\frac{19}{16}}, \tag{14}$$

Skaitmeniškai ištyrus, kaip gerai šiais modeliais aprašoma šviesio evoliucija atitinka tėkmių savybių ir šviesio koreliaciją paaiškėjo, kad geriausią rezultatą duoda praplėstasis laipsninis modelis [31] Svarbu suprasti, kad šios funkcijos yra vieno AGN aktyvumo epizodo šviesio kitimo laike rezultatas. Norint pilnai ištirti visą tėkmės evoluciją reikia modeliuoti kelis aktyvumo epizodus, o modeliuose kiekvienas aktyvumo epizodas yra identiškas, tai yra reikšminga prielaida, kuri nebūtinai teisinga.

Turimi rezultatai, kuriuose išnagrinėtas tik šviesio kitimas laike neparodo, kad stebima tėkmių parametrų ir L_{AGN} sąryšio sklaida galėtų būti paaiškinta vien tik šiuo kintamuoju. Pilnesnį vaizdą susidaryti padėtų modelis, kuriame nagrinėjama ir galaktikos savybių, ir šviesio istorijų įtaka. Toks modelis privalėtų įvertinti labai daug parametrų ir nustatyti jų tarpusavio sąryšius, tad paprastais metodais atlikti tokį tyrimą būtų labai sudėtinga užduotis. Taigi, šiai problemai spręsti buvo panaudotas dirbtinis neuroninis tinklas. Neuroniniai tinklai gerai žinomi ir vis plačiau naudojami dėl gebėjimo efektyviai atkurti parametrų tarpusavio sąryšius, todėl yra puikus įrankis šiaip problemai spręsti. Šiame darbe pristatomas sukurtas dirbtinio neuroninio tinklo modelis, gebantis atspėti galaktikos ir kintančio laike AGN aktyvumo parametrus, kuriuos jau galima panaudoti standartiniame skaitmeniniame tėkmes generuojančiame modelyje ir taip atkurti realių, stebėjimais aptiktų, tėkmių evoliuciją.

3 Dirbtiniai neuroniniai tinklai

Išaugus kompiuterių galimybėmis šiais laikais neuroniniai tinklai tapo labai plačiai naudojami įvairioms problemoms spręsti. Pagrindinis jų privalumas yra tas, kad neuroninis tinklas, mažindamas klaidas tarp trokštamo rezultato ir neuroninio tinklo gauto rezultato, sugeba pakankamai gerai atkurti realius, labai sudėtingus, sąryšius tarp parametrų, kurių žmogus ar kiti algoritmai gali net nepastebėti. Be to, labai didelis privalumas yra tas, kad sąryšių atkūrimuo procesui nereikia didelio žmogaus įsikišimo. Šiame darbe tiriamas tėkmių teorinis modelis turi labai daug laisvųjų parametrų ir jį vieną panaudoti iškeltai problemai išspręsti būtų labai sunku, nes reikėtų išanalizuoti tūkstančius rezultatų, gautų tiriant kiekvieno parametro įtaką. Neuroninis tinklas tokiam uždaviniui yra tinkamas įrankis, nes galima sukurti tokią sistemą, kuri ne tik padėtų išanalizuoti parametrų įtaką, bet ir sujungti stebėjimų duomenis su dirbtinai sukurtomis tėkmėmis viename skaitmeniniame modelyje. Toliau šiame darbe pristatomi bendri dirbtinių neuroninių tinklų koncepcijos pagrindai, kurie paaiškina 4.2 skyriuje pristatytą modelį, o išsamiai teorija pristatoma [34].

3.1 Neuroninių tinklų apibrėžimas

Neuroniniai tinklai yra įkvėpti pagrindinių principų, pagal kuriuos fiziškai yra perdavinėjama informacija žmogaus smegenyse, įgalinančių gyvų organizmų gebėjimą mokytis. Tai yra įgyvendinama suformuluojant sistemą, kurioje svarbius procesus atlieka labai stipriai supaprastinta matematinė neuronų analogija. Dirbtiniai neuronai atlieka kelias pagrindines funkcijas, analogiškas gyvuose organizmuose egzistuojančių neuronų funkcijoms, kurių svarba paskirstoma pagal sinapsių svorius. Tiksliau neuroninį tinklą galima būtų apibrėžti kaip labai išlygiagretintą procesorių, kuriame yra kaupiamos išmoktos žinios, kuriomis bet kada galima pasinaudoti. Neuroninis tinklas yra mokomas algoritmu, kuris koreguoja neuronų svorius. Priklausomai nuo neuronų aktyvacijų, neuroniniai tinklai gali būti tiesiniai arba netiesiniai. Ši savybė leidžia atkurti netiesinius sąryšius tarp įvesties ir išvesties parametrų. Mokymo metu neuronų svoriai yra parenkami taip, kad būtų sukurtas kuo tikslesnis sąryšis tarp duotų įvesties ir jiems priskirtų išvesties parametrų. Tai reiškia, kad neuronų svoriai yra modifikuojami, kad kaip įmanoma labiau sumažintų skirtumą tarp siekiamo išvesties rezultato ir neuronų atsako, gauto iš įvesties parametrų statistinio apdorojimo. Neuronų svoriai yra modifikuojami juos padauginant iš mokymo spartos. Toks svorių atnaujinimo procesas kartojamas daug kartų, tuo pačiu po truputį mažinant mokymo spartą. Paprastai mokymo sparta mažinama didėjant epochos numeriui, o viena epocha yra viena iteracija per visus mokymo duomenis.

Neuroniniuose tinkluose neuronai apibrėžiami kaip informaciją apdorojantys vienetai. Jų veikimą galima apibūdinti keliais punktais:

1. Neuronai j ir k tarpusavyje yra sujungti sinapse, kuri turi svarbą apibrėžiantį svorį w_{kj}.

2. Prieš įeinant į neuroną visos sinapsės yra sudedamos, sudauginamos arba kitaip sujungiamos į vieną skaičių u_k, priklausomai nuo tinklo architechtūros, paprasčiausias pavyzdys konkrečiam

įvesties-išvesties rinkinių skaičiui m:

$$u_k = \sum_{j=1}^{m} w_{kj} x_j, \tag{15}$$

kur x_j - įvesties signalas.

3. Galutinis neurono atsakas y_k gaunamas į jį patekusią vertę apdorojus aktyvacijos funkcija φ:

$$y_k = \varphi\left(u_k + b_k\right), \tag{16}$$

kur b_k - papildomas poslinkio parametras, kuris padeda transformuoti $x_k \to y_k$. Taigi, iš formulės matyti, kad aktyvacijos funkcija modifikuoja gautą vertę u_k taip, kad rezultatas būtų norimuose rėžiuose, t.y. įgalinamas parametrų netiesiškumas.

Neuronai paprastai yra paskirstyti po neuronų sluoksnius. Tinkle mažiausiai gali būti du neuronų sluoksniai, tačiau tokie modeliai vadinami vienasluoksniais, nes tokie neuroniai tinklai turi po vieną įvesčių sluoksnį ir vieną išvesčių sluoksnį, tačiau įvesties sluoksnyje nėra taikoma aktyvacijos funkcija. Architektūros, kuriose yra daugiau nei du neuronų sluoksniai turi vidinių, kurie vadinami paslėptais, sluoksnių. Yra atlikta nemažai tyrimų, kuriais nustatyta, kad daugiau nei porą paslėptųjų sluoksnių turintys neuroniniai tinklai gali geriau išmokti parametrų sąryšius ir išgauti geresnį atpažinimo tikslumą [34], [35]. Netiesinis tinklas gali geriau atitaikyti sudėtingais sąryšiais aprašomus įvesties ir išvesties parametrus. Tačiau yra taip pat įrodyta universali aproksimacijos teorema, kuri sako, kad su keliomis prielaidomis, gali aproksimuoti bet kokias tolydžias funkcijas [36].

Kaip jau minėta, svoriai yra koreguojami pagal tai, kaip gerai tinklo rezultatas atitinka reikiamą rezultatą. Tiksliau tai galima būtų apibūdinti kaip svorių koregavimą atsižvelgiant į mokymo vektorių ir klaidos signalą $\mathscr{E}$, kur $\mathscr{E}$ būtent ir yra skirtumas tarp teisingo rezultato $F(x)$ (x - įvesties parametrai) ir mokymo iteracijos metu gauto rezultato $f(x)$:

$$\mathscr{E} = F(x) - f(x). \tag{17}$$

Mokymo metu yra siekiama kaip įmanoma labiau sumažinti $\mathscr{E}$, todėl $\mathscr{E}(x)$ paprastai vadinama tikslo funkcija. Pati paprasčiausia naudojama tikslo funkcija yra vidutinė kvadratinė klaida (MSE) funkcija $\mathscr{E}(w)$, ji priklauso nuo laisvųjų parametrų, tokių kaip neuronų svorių w. Šią funkciją galima būtų įsivaizduoti kaip klaidų paviršiaus funkciją, kur koordinatės yra neuroninio tinklo laisvieji parametrai, o pati funkcija išreiškiama per visus įvesties-išvesties parametrų rinkinių m pavyzdžius:

$$\mathscr{E} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \left(y_i - \hat{y}_i\right)^2, \tag{18}$$

kur $\hat{y}$ - mokymo iteracijos metu gautas rezultatas. Siekiant gauti mažiausią klaidą, reikia rasti tikslo

funkcijos minimumą, todėl yra apskaičiuojamas funkcijos gradientas:

$$g = \nabla \mathscr{E}(w). \tag{19}$$

Pasinaudojant gradientų optimizavimo metodu surandama, kuria kryptimi klaida turėtų būti mažiausia ir taip mizimizuojama, keičiant svorius. Vieno svorio atnaujinimas išreiškiamas:

$$w(n+1) = w(n) - \eta g(n), \tag{20}$$

kur $g(n)$ - gradiento vektorius iteracijos taške $w(n)$, η - mokymo sparta. Šis optimizavimo algoritmas vadinamas gradiento nusileidimo metodu. Taigi, su tinkama tikslo funkcija ir tinkamu gradiento optimizatoriumi bei gerai atitaikyta mokymo sparta, kartojant šį procesą pakankamai daug iteracijų, neuroninis tinklas turėtų išmokti atkurti įvesties ir išvesties parametrų sąryšius.

3.2 Hiper-parametrai ir jų parinkimas

Neuroniniam tinklui sukurti paprastai reikia parinkti daug laisvų hiper-parametrų: neuronų skaičių, sluoksnių skaičių, mokymosi spartą, aktyvacijos funkciją, epochų skaičių ir t.t., šie parametrai yra vadinami hiper-parametrais arba tiesiog neuroninio tinklo parametrais [37]. Nuo to, kaip gerai atitaikyti hiper-parametrai priklauso kaip gerai tinklas sugebės atkurti įvesties ir išvesties parametrų tarpusavio sąryšius. Daugiau mažiau hiper-parametrų vertės priklauso būtent nuo įvesties ir išvesties parametrų. Kai kurie iš jų jau eksperimentiškai yra nustatyti kaip tinkantys bet kokiems neuroniniams tinklams, nepriklausomai nuo duomenų, bet didžiąją dalį hiper-parametrų vis dar reikia nustatyti eksperimentiniu būdu konkrečiai duomenims, su kuriais yra dirbama.

Hiper-parametrus reikia pasirinkti atsižvelgiant į kitus duomenis, negu su kuriais yra mokoma, nes matematiškai įmanoma surasti tokius sąryšius, kuriais galima būtų aprašyti kiekvieną turimą tašką. Tačiau nebūtinai toks sąryšis išspręs problemą ir ant platesnio duomenų rinkinio, todėl duomenys, su kuriais dirbama mokant neuroninį tinklą yra išskirstomi į tris kategorijas: mokymo duomenis, validacinius duomenis ir testavimo duomenis [38] Mokymo ir validaciniai duomenys turi žinomus tiek įvesties tiek išvesties parametrus, duomenų rinkiniai skiriasi tik tuo, kad su mokymo duomenimis yra mokomas neuroninis tinklas, o su validaciniais duomenimis yra atliekami išvesties parametrų spėjimai ir palyginami su tikraisiais išvesties parametrais, bet pagal tai neuronų svoriai nėra keičiami. Testavimo duomenims nebūtinai turi būti žinomi išvesties parametrai.

4 Modelių aprašymas

4.1 Tėkmių evoliucijos modelis

Šiame darbe aprašomas modelis yra perrašytas Python programavimo kalba ir papildytas [10] straipsnyje pristatytas tėkmių evoliucijos modelis. Šis skaitmeninis modelis yra vienmatis, todėl juo generuojamos sferiškai simetriškos tėkmės, plintančios sferiškai simetriškoje galaktikoje. Galaktika yra sudaryta iš baldžo ir halo, kiekvieno iš jų medžiaga padalinta į dujas, kurios juda kartu su tėkme, ir kitą medžiagą, kurios padėtis tėkmei plintant nekinta. Taip pat modeliuojamoje galaktikoje yra supermasyvi juodoji skylė, kuri pasirinktą laiką veikia kaip aktyvus galaktikos branduolys pagal užduodamą šviesio funkciją $L(t)$ ir sukuria tėkmę. Tėkmės visą laiką plinta adiabatiškai ir išstumia absoliučiai visas dujas, kurias pasiekia.

Turint analitiškai aprašomus tankio profilius galima apskaičiuoti masę, sutelktą bet kokiu atstumu nuo centro. Tuo pasinaudojama skaičiuojant baldžo ir halo mases. Baldže esanti masė apskaičiuojama imant, kad medžiaga yra pasiskirsčiusi izotermiškai (reiškia, kad $\rho \propto R^{-2}$) [20]. Halo masės profilis apskaičuojamas pagal NFW funkciją [39]. Tuomet sugeneruotos tėkmės masė M yra lygi dujų masei nuo modelio centro iki tėkmės spindulio R, o masės pernašos sparta $\dot{M}$ tėkmės judėjimo lygčiai skaičiuoti gaunama kaip tėkmės masės pokytis per laiko vienetą. Tačiau, kad patogiau būtų palyginti gautus rezultatus su stebėjimais, analizei ir vėliau neuroniniam tinklui mokyti $\dot{M}$ skaičiuojama pagal formulę, skirtą analizuoti stebėjimų rezultatams [23]:

$$\dot{M} = M\frac{\dot{R}}{R}, \tag{21}$$

Modeliuojama tėkmė keliauja labai didelius atstumus, todėl jos plitimas skaičiuojamas pasinaudojant vėjo energija varomos tėkmės judesio lygtimi (5), jos detalus paaiškinimas aprašytas 2.1 ir 2.2 skyriuose. Ši lygtis aprašo trečios eilės išvestinę, tad lygtį integruojant skaitmeniškai naudojant Eulerio integratorių yra gaunamas pagreitis, greitis ir spindulys. Šis integratorius pasirinktas todėl, kad įgyvendinamas paprasčiausiai, o naudojantis kitais integratoriais rezultatai skiriasi nedaug (daugiau žiūrėti [10]). Integravimui parenkamas laiko žingsnis pagal sąlygą:

$$dt = f_{\mathrm{CFL}}\min\left\{\frac{R}{\dot{R}}, \frac{\dot{R}}{\ddot{R}}, \frac{\ddot{R}}{\dddot{R}}\right\}, \tag{22}$$

kur $f_{\mathrm{CFL}} = 0.1$ - Courant'o faktorius. Tačiau laiko žingsniui priskiriami ir apribojimai, jis negali būti mažesnis nei 1 metai ir didesnis nei 100000 metų. Be to, kai nustatoma, kad laiko koordinatė jau turėtų pereiti į kitą aktyvumo epizodą, žingsnis yra sumažinamas tiek, kad perstumtų laiko koordinatę iki naujo epizodo pradžios, tad po to sekanti integravimo iteracija fiksuoja visą aktyvumo epizodo pradžios energiją.

AGN šviesis skaičiuojamas pagal $L_{\mathrm{AGN}} = lL_{\mathrm{Edd}}$, čia l - Eddingtono santykis, gaunamas viena iš 2.4 skyrelyje paminėtų šviesio funkcijų; L_{Edd} - Edingtono šviesis (žr. 2 formulę), teorinė maksimali

šviesio riba konkrečios masės kūnui. Šiame modelyje SMBH masei leidžiama augti dėl galimai į ją krentančių dujų, todėl didėja ir L_{Edd}:

$$M_{\mathrm{BH,new}} = M_{\mathrm{BH}} \exp\left(\frac{l\mathrm{d}t}{t_{\mathrm{Sal}}}\right), \tag{23}$$

čia $M_{\mathrm{BH,new}}$ - būsimai iteracijai apskaičiuojama nauja SMBH masė, $t_{\mathrm{Sal}} = 4.5 \times 10^7 \eta_{0.1}$ m. - Salpeter laiko skalė, o $\eta_{0.1}$ - energijos perdavimo našumas sumasteliuotas į 0.1 [40].

Pagrindiniai šiuo modeliu gaunami parametrai yra tėkmės greitis, spindulys, masė ir AGN šviesis, kurie yra priklausomi nuo laiko. Toliau iš jų yra suskaičiuojami kiti išvestiniai parametrai.

4.1.1 Modeliuojamų parametrų erdvė

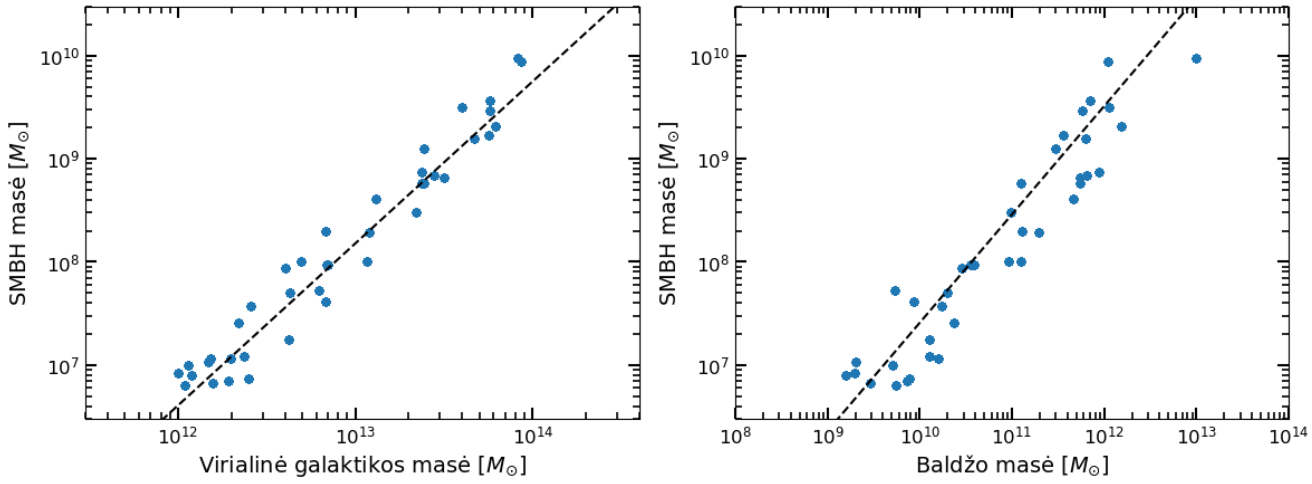
Norint atkurti stebėtų tėkmių parametrus ir jų evoliucijos istoriją, būtina žinoti, kokios tėkmės galėtų egzistuoti įvairių savybių galaktikose pagal žinomus sąryšius. Šiuo tikslu yra siekiama padengti galimų tėkmių parametrų erdvę keičiant galaktikos bei AGN parametrus: galaktikos virialinę masę M_{tot}, pradinę SMBH masę M_{BH}, baldžo masę M_{bulge}, dujų kiekį baldže f_{g}, šviesio kitimo funkcijas $l(t)$, aktyvumo epizodo trukmę t_{q}, aktyvioje fazėje praleidžiamą laiko dalį δ_{AGN} bei tėkmės užimamą pilno erdvinio kampo dalį f_α. Kadangi yra stebima daug ne sferiškai simetriškų tėkmių, f_α įvesta sumažinti tėkmės masei, siekiant idealizuotą tėkmės plitimą priartinti prie realesnių rezultatų neuroninio tinklo mokymui. Tiriamų parametrų galimi intervalai yra labai platūs, todėl vertės yra parenkamos naudojant pseudo-atsitiktinius skaičius. Galaktikos, SMBH ir baldžo masės parenkamos pagal 2.3.2 skyriuje minėtus $M_{\mathrm{BH}} - M_{\mathrm{tot}}$ bei $M_{\mathrm{BH}} - M_{\mathrm{bulge}}$ sąryšius ir stebimas verčių sklaidas aplink numatomas teorines vertes. Likusieji parametrai yra pasirenkami naudojant iš stebėjimų nustatytas mažiausias ir didžiausias galimas tų parametrų verčių ribas. Visų parametrų galimų verčių rėžiai ir konkretus kiekvieno parametro variantų rinkinio dydis nurodyti lentelėje 1.

1 lentelė. Lentelėje pavaizduotos nepriklausomų parametrų rėžių vertės. Kai kurie rėžiai šiek tiek praplėsti yginant su nurodytais šaltiniuose, su tikslu, kad neuroninis tinklas galėtų tiksliai atpažinti ir galimas kraštines parametrų ribas.

Parametras	Rėžiai	Unikalių verčių rinkinio dydis	Šaltiniai
M_{tot}	$10^{12} - 10^{14}\ M_\odot$	40	[7]
f_{g}	$0.01 - 0.4$	5	[41], [42]
f_α	$0.3 - 1$	4	[23], [5]
t_{q}	$9.7\times10^3 - 1.1\times10^5$ m.	3	[16], [32]
δ_{AGN}	0.04-0.4	4	[31]
$l(t)$	pagal (11) - (14) formules	4	[31]

Pirmiausia iš stebėjimų yra parenkamos galimos mažiausios ir didžiausios virialinės galaktikos

masės ir pasirinktuose rėžiuose atsitiktiniais skaičiais sugeneruojamas norimo dydžio skirtingų M_{tot} variantų rinkinys. Tuomet pagal $M_{\text{BH}} - M_{\text{tot}}$ sąryšį yra apskaičiuojama teorinė M_{BH} vertė, kurios pakrypimo kampas yra atsitiktinai parenkamas iš (10) formulėje nurodyto paklaidų intervalo.



1 pav. Kairėje: SMBH ir virialinės masės sąryšis. Dešinėje: SMBH ir baldžo masės sąryšis. Abiejuose grafikuose juoda brūkšniuota linija pavaizduoti iš stebėjimų gauti parametrų sąryšiai aprašomi formulėmis (9) ir (10), o mėlyni taškai vaizduoja pseudo atsitiktinai sugeneruotas mases, kurios imituoja realiuose stebėjimuose matomą pasiskirstymą.

Tuomet tokia pati procedūra pritaikoma M_{bulge} skaičiavimui, M_{bulge} išsireiškus iš (9) formulės. Iš parinktų parametrų $M_{\text{BH}} - M_{\text{tot}}$ bei $M_{\text{BH}} - M_{\text{bulge}}$ sąryšiai pavaizduoti 1 pav. Baldžo spindulys R_{bulge} kiekvienam baldžui apskaičiuojamas pagal išvestinę formulę [27]:

$$R_{\text{bulge}} = 2.4 \left(\frac{M_{\text{bulge}}}{10^{11}} \right)^{0.88}. \tag{24}$$

Tokiu būdu yra atsitiktinai užpildoma galimų tarpusavyje priklausomų galaktikos parametrų erdvė. Kadangi norima ištirti kiekvieno parametro įtaką tėkmių evoliucijai, tai kiekvienai parinktai galaktikos masei yra suskaičiuojama tėkmė su visomis kitų parametrų parinktomis galimomis vertėmis, todėl galutiniame rezultate, priklausomai nuo pradinių keičiamų parametrų rinkinių dydžio yra gaunama nuo kelių šimtų iki kelių dešimčių tūkstančių tėkmių. Naudojamos vienmatės programos privalumas yra tas, kad, priklausomai nuo pasirinkto laiko žingsnio, vienos tėkmės generavimas ir jos duomenų paruošimas perduoti į neuroninio tinklo programą užtrunka vos daugiau nei vieną sekundę. Ši programos savybė leidžia greitai gauti norimus rezultatus ir sutaupo nepalyginamai daugiau laiko nei dažnai naudojami trimačiai modeliai. Taigi, su šiuo modeliu efektyviai sukurta 38396 tėkmių modelių duomenų bazė, iš kurios gautais duomenimis galima mokyti neuroninį tinklą ir analizuoti tėkmių evoliucijos ypatybes.

4.2 Neuroninio tinklo modelio aprašymas

Neuroninio tinklo modelis paprastai yra sukuriamas atsižvelgiant į tiriamus duomenis ir eksperimentiškai nustatomais hiper-parametrais. Neuroniniam tinklui paduodami įvesties ir išvesties parametrai yra surašyti 2 ir 3 lentelėse. Įvesties parametrai leidžia nusakyti visas *stebėjimais* gaunamas tėkmės savybes, todėl taip pat juos galima pavadinti tėkmės parametrais, o išvesties parametrai leidžia nusakyti galaktikos savybes, todėl juos galima vadinti galaktikos parametrais.

2 lentelė. Neuroninio tinklo įvesties parametrai

Tėkmės spindulys R	Tėkmės greitis $\dot{R}$	Tėkmės masės pernašos sparta $\dot{M}$	Tėkmės masė M	AGN šviesis L_{AGN}	SMBH masė M_{BH}

3 lentelė. Neuronio tinklo išvesties parametrai

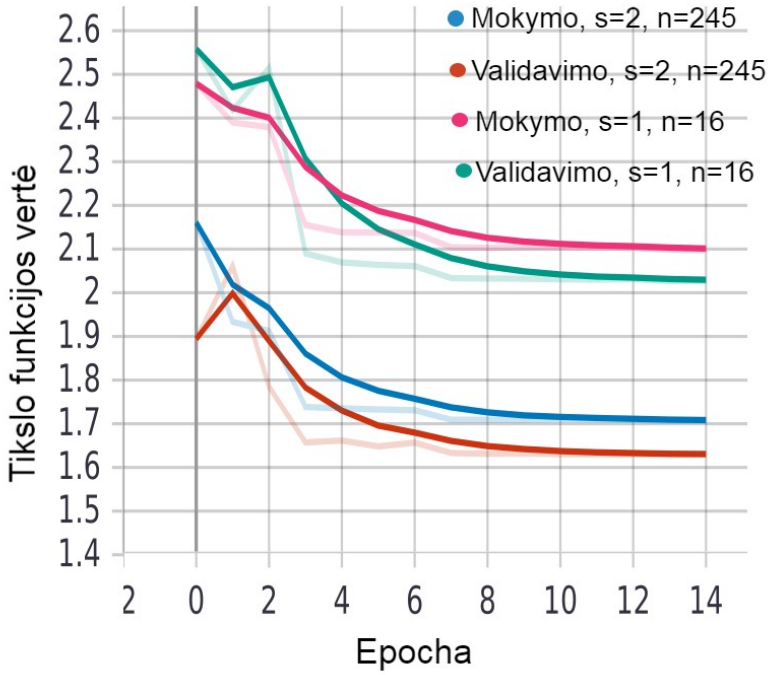
Galaktikos masė M_{tot}	Baldžo masė M_{bulge}	Baldžo dujų kiekis f_g	Laiko dalis aktyvioje fazėje δ_{AGN}	AGN aktyvumo trukmė t_{q}	Tėkmės erdvinio kampo dalis f_α	Šviesio kitimo funkcijos pavadinimas

Mokymui buvo naudojama nuo kelių šimtų tūkstančių iki kelių dešimčių milijonų skirtingų tėkmių parametrų rinkinių. Neuroninio tinklo modelio kontekste viena tėkme yra laikomas duomenų rinkinys, analogiškas iš stebėjimų gautiems rezultatams - tai reiškia, kad yra panaikinta generuotų duomenų priklausomybė nuo modelio laiko. Tokių pačių parametrų galaktikoje teoriškai galėtume stebėti tėkmes tiek pačio aktyvumo pradžioje, tiek pabaigoje ir dėl to stebimi tėkmės parametrai būtų labai skirtingi skirtingais laiko momentais, bet galaktikos parametrai ir AGN aktyvumą lemiantys parametrai nepasikeistų. Todėl vieną sugeneruotą tėkmę atitinkantys parametrai buvo priskirti kiekvienam „stebimam“ tėkmės taškui, pagal šiuos taškus-tėkmes mokomas neuroninis tinklas. Taigi tokiu būdu mokymo duomenų rinkinių skaičius ženkliai išaugo, nes viename generuotų tėkmių rinkinyje, priklausomai nuo laiko žingsnio, gali būti tarp kelių šimtų ir poros tūkstančių taškų.

Paprastas neuroninis tinklas būtinai privalo turėti šiuos apibrėžtus hiper-parametrus: neuronų skaičių n, sluoksnių skaičių s, aktyvacijos funkciją φ, tikslo funkciją $\mathscr{E}$, optimizavimo metodą θ, mokymosi spartą η, epochų skaičių i. Kai kuriuos hiper-parametrus lengviau parinkti nei kitus, nes kai kurie iš jų eksperimentais buvo nustatyti daugiau mažiau geriausiai tinkantys beveik visoms problemoms spręsti. Mokymo sparta dažniausiai neblogai veikia, kai yra rėžiuose tarp 0.1 ir 0.01 [37], o plačiausiais intervalas, kiek rekomenduojama keisti yra tarp 1 ir 10^{-6} [37]. Kaip didžiąjai daugumai problemų geriausiai veikiančiu optimizavimo metodu buvo pristatytas Adam algoritmas [43]. Aktyvacijos funkcijų yra labai įvairių, išvesties sluoksniuose jos daugiau priklauso nuo duomenų, kurie yra naudojami, tačiau labiausiai naudojamos yra ReLu aktyvacijos funkcijos, nes ji yra beveik tiesinė, bet neigiamas vertes transformuoja į nulius. Dažniausiai naudojama tikslo funkcija - MSE. Paprastiems,

pilno skleidimo neuroniniams tinklams užtenka iki dviejų paslėptų sluoksnių pakankamai geriems rezultatams gauti, tačiau neuronų kiekis bei epochų skaičius visiškai priklauso nuo parametrų tarpusavio sąryšio, tik paprastai viename sluoksnyje nėra naudojama daugiau nei kelių šimtų neuronų, taigi nuo šių parametrų parinkimo ir buvo pradėti eksperimentai.

4.2.1 Eksperimentai: neuronų ir sluoksnių skaičiaus nustatymas, mokymosi spartos bei epochų skaičių daromos įtakos tyrinėjimas



2 pav. Visų išvesties parametrų tikslo funkcijų sumos vertės ir mokymosi epochos priklausomybė validavimo ir mokymo duomenims skirtingiems modeliams. Neuroninis tinklas kiekvienam išvesties parametrui skaičiavo tikslo funkcijas, čia pavaizduota visų jų suma. s žymi neuronų sluoksnių skaičių, o n, po kiek neuronų yra kiekviename s sluoksnyje.

Kadangi neuroninis tinklas priklauso nuo daugybės hiper-parametrų, neįmanoma iš karto nustatyti visų tinkamų verčių, todėl šio eksperimento esmė, surasti neuronų ir sluoksnių sklaičių, su kuriais iš nagrinėjamų yra gaunamas geriausias rezultatas, bet nėra siekiama apskritai gauti geriausią įmanomą tikslo funkcijos vertę.

Iš pradžių neuroninis tinklas buvo mokomas su šiek tiek mažiau nei milijonu tėkmių. Pradiniai hiper-parametrai, kuriais nebuvo varijuojama, pavaizduoti 4 lentelėje. Keičiami buvo neuronų bei paslėptųjų sluoksnių skaičiai. Jeigu $s = 2$, tai n abiejuose sluoksniuose vienodas. Patys prasčiausi - didžiausios klaidos, bei patys geriausi - mažiausios klaidos, rezultatai pavaizduoti 2 pav., iš šių grafikų iš karto aišku, kad mokymosi epochoms didėjant, geriausias modelis turėtų būti tas, kurio mokymo ir validavimo klaidos proporcingai mažėja. Taip pat validavimo duomenų klaida, žymiai didesnė už mokymo duomenų klaidą, arba epochų skaičiui didėjant auganti klaida reikštų, jog modelis nėra

geras. Taip pat, eksperimentais buvo nustatyta, kad neuroninis tinklas su $s = 16$ ir $l = 2$ padaro žymiai mažesnę klaidą, nei viename sluoksnyje esantys 256 neuronai. Tai atitinka teoriją, minėtą 3.1 skyrelyje. Taip pat svarbu paminėti, kad modelis su 352 neuronais gavo šiek tiek prastesnius rezultatus nei modelis su 256 neuronais, todėl tinkamiausias neuronų skaičius greičiausiai turėtų būti tarp 256 ir 352.

4 lentelė. Pirmąjame eksperimente parenkami hiper-parametrai

n	s	φ	$\mathscr{E}$	θ	η	i
16, 32, 48, 64, 96, 160, 256, 352	1, 2	ReLu	Vidurkio kvadrato klaida (MSE)	Adam	0.01	15

Toliau buvo siekiama nustatyti, kaip tikslo funkcijos vertė sumažėja priklausomai nuo mokymosi spartos η ir epochų skaičiaus i. Iš teorijos yra žinoma, kad geriausi rezultatai pasiekiami kuomet ties mažomis i yra didelė η, o epochoms didėjant η yra po truputį mažinama [34]. Todėl toliau buvo atlikta nemažai eksperimentų, kurių metu ties įvairiomis epochų vertėmis buvo skirtingais, nuo 0.1 iki 0.0001, žingsniais mažinama η, o didžiausias epochų skaičius buvo padidintas iki 80. Paprastai, kintant epochoms tikslo funkcijos vertė mažėja palaipsniui, o šio modelio atveju sumažinama η vertė padėdavo sumažinti klaidas tik porai sekančių epochų ir toliau epochoms didėjant nebekisdavo. Taigi, yra tikėtina, kad optimizavimo algoritmo metu tikslo funkcijos vertės pakliuvo į lokalius minimumus ir iš jų neištrūko.

4.2.2 Eksperimentai: tikslo funkcijos ir optimizavimo metodo daromos įtakos nagrinėjimas

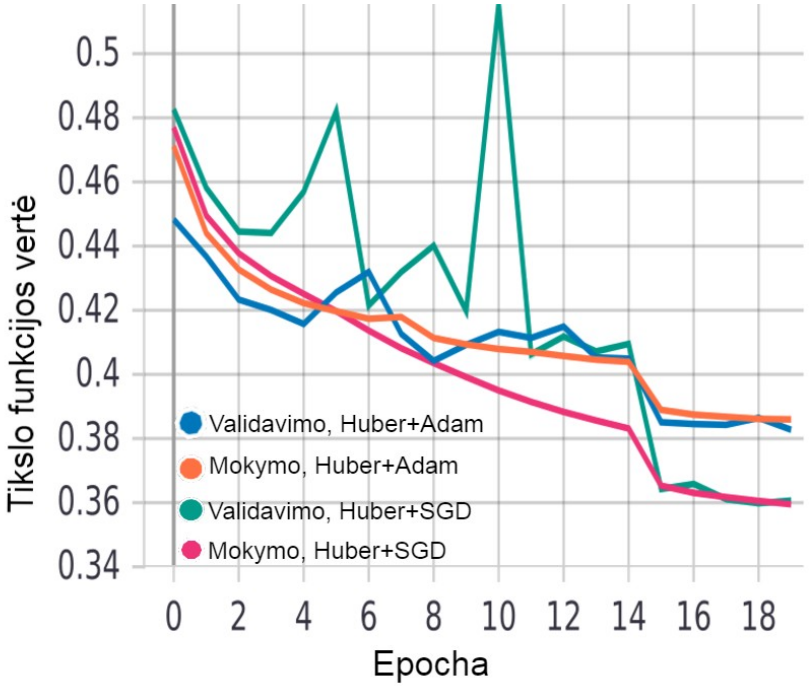
MSE tikslo funkcija gali būti ne pati efektyviausia didelę sklaidą turintiems duomenims, nes paklaidos šiame algoritme yra keliamos kvadratu, o tai labai stipriai gali padidinti tikslo funkcijos vertę. Kita populiari, bet taip pat turinti trūkumų tikslo funkcija yra vadinama vidutine absoliučia klaida (MAE), kuri vietoj klaidos kvadrato skaičiuoja absoliučią vertę. Tam tikriems duomenims tai taip pat gali būti ne pats geriausias variantas, nes gradientas visuose taškuose yra vienodai didelis, taigi gali pasitaikyti, kad optimizuojant bus prašokamas minimumo taškas. MSE ir MAE problemas iš dalies sprendžia huber bei quantile funkcijos. Generuotuose duomenyse yra didelė tėkmių parametrų sklaida, taigi tikėtina, kad MSE tikslo funkcija $\mathscr{E}$ netinkama šiems duomenims.

Sekančiame eksperimente buvo keičiamos tikslo funkcijos $\mathscr{E}$ bei optimizavimo algoritmai θ, didėjančiam epochų skaičiui i mažinant mokymo spartą η. Konkrečios tyrinėtos vertės surašytos 5 lentelėje. Tirta MAE tikslo funkcija taip pat davė nepakankamai gerus rezultatus - klaida ir toliau nusistovėdavo ties tam tikra verte epochoms didėjant. Tuomet ištirtos Huber ir Quantile tikslo funkcijos davė žymiai geresnius rezultatus - epochoms didėjant modelis pradėjo efektyviai mokytis ir $\mathscr{E}$ vertė stipriai sumažėjo, galiausiai Huber funkcija davė šiek tiek geresnius rezultatus nei Quantile funkcija ir žymiai geresnius nei MSE ir MAE, nes Huber ir Quantile sugebėjo efektyviai mokytis ir jų tikslo funkcijų vertės taip greitai nenusistovėjo, kaip su MSE ir MAE funkcijomis.

5 lentelė. Trečiajame eksperimente parinkti hiper-parametrai

n	s	φ	$\mathscr{E}$	θ	η	i
256	2	ReLu	MAE, Huber, Quantile	Adam, SGD	0.1, 0.01	20

Nors Adam optimizavimo algoritmas pristatytas kaip geriausias, bet SGD su Nesterov momentu nedaug atsiliko ir yra taip pat rekomenduojamas kaip vienas iš geriausių optimizavimo algoritmų [43]. SGD iš esmės nedaug skiriasi nuo stačiausio gradiento nusileidimo algoritmo, pagrindiniai skirtumai yra tokie: vienos iteracijos metu SGD aproksimuoja gradiento nusileidimo algoritmą; SGD su Nesterov momentu yra pritaikytas taip, kad išvengtų lokalių tikslo funkcijos minimumų, juos „prabėgdamas“ dėl įvedamo momento, kuris sukuria pagreičio efektą. Adam algoritmas taip pat turi implementuotą momentą šiai problemai spręsti, tik dar papildomai Adam algoritmas turi kintamą momento dydį, bei po truputį mažinamą mokymo spartą, yra ir daugiau skirtumų, bet šie yra esminiai. Eksperimento metu skirtingos tikslo funkcijos buvo tiriamos naudojant tiek SGD su Nesterov momentu, tiek tiek Adam optimizavimo algoritmą. 3 pav. pavaizduota $\mathscr{E}$ ir θ priklausomybė nuo epochos, kuriuose parodyti du geriausi modelio variantai. Galutiniame rezultate SGD su Nesterov momentu davė šiek tiek geresnius rezultatus, nei Adam.



3 pav. Ta pati priklausomybė kaip 2 pav., bet skiriasi varijuojami hiper-parametrai: abiejuose modeliuose tikslo funkcijos Huber, bet skirtingi optimizavimo metodai - SGD su Nesterov momentu ir Adam. Ties 15 epocha matomas staigus nuostolio sumažėjimas yra dėl mokymo spartos sumažinimo iš 0.1 į 0.01.

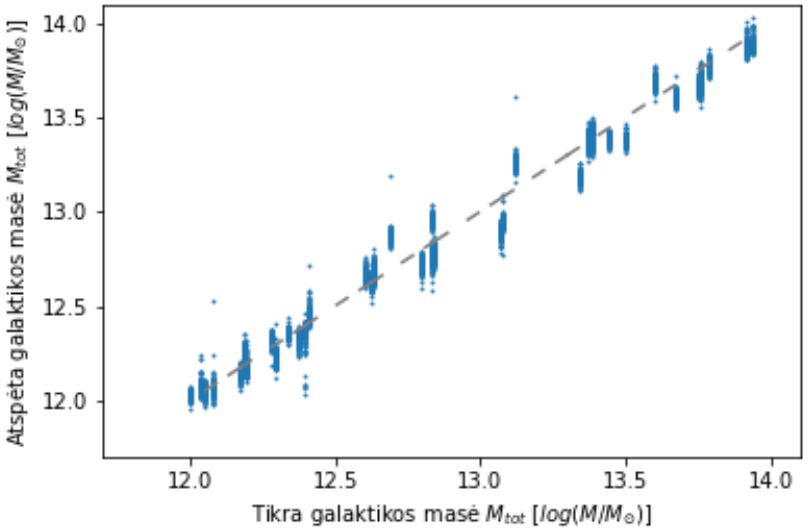
Paskutinis padarytas eksperimentas buvo neuronų skaičiaus patikslinimas, keičiant neuronų skaičių

tarp 256 ir 352. Geriausias rezultatas gaunamas su $n = 288$. Kadangi mokomų duomenų kiekis yra labai didelis, pirmasis eksperimentas buvo atliktas pakaitaliojant mokymo duomenis nuo kelių šimtų tūkstančių iki poros milijonų tėkmių. Antro ir trečio eksperimentų metu duomenų kiekis buvo dar šiek tiek padidintas, prieš tai patikrinus ar žymiai keičiasi rezultatai dėl duomenų rinkinio. Kadangi galutinis duomenų rinkinys turi 8.6 milijonus tėkmių, tai mokymo procesas buvo labai ilgas, todėl neuroninis tinklas buvo mokomas iki tol, kol pasiekė daugmaž tenkinančius rezultatus, iki $i = 75$, pradinę mokymo spartą $\eta = 0.1$ sumažinant ties $i = [25, 40, 70]$. Galutinio modelio, su kuriuo gauti analizuojami realių tėkmių parametrai, hiper-parametrai pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. Galutiniai neuroninio tinklo modelio hiper-parametrai

n	s	φ	$\mathscr{E}$	θ	η	i
288	2	ReLu	Huber	SGD	0.1, 0.01, 0.01	75

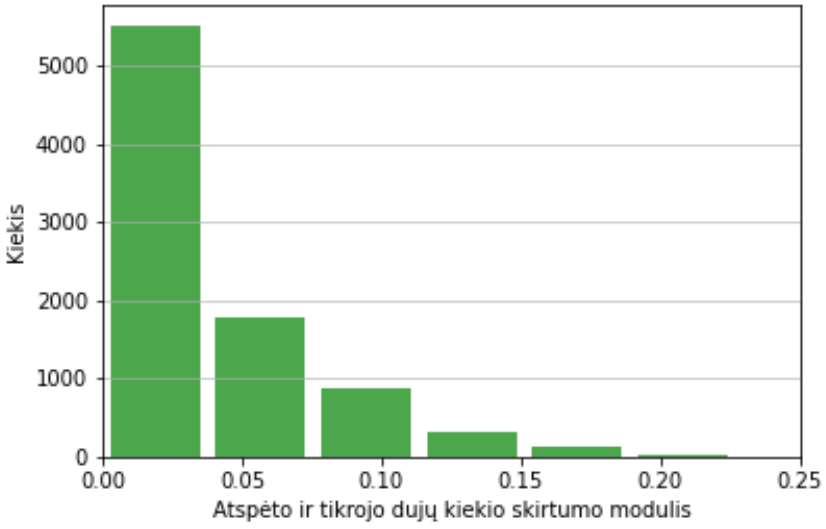
4.2.3 Neuroninio tinklo patikimumo įvertinimas



4 pav. Atsitiktinai išskirtų generuotų validavimo duomenų atpažinimo palyginimas su tikraisiais duomenimis. X ašyje pavaizduota tikroji galaktikos masė, o y - atspėta galaktikos masė. Duomenų rinkinio dydis: 8644.

Siekiant išsiaiškinti, kaip gerai neuroninis tinklas išmoko atkurti kiekvieną sąryšį, prasminga palyginti validavimo duomenų atspėtas ir tikrąsias vertes. 4 pav. pavaizduotas virialinės galaktikos masės atspėtų verčių įvertinimas iš atsitiktinai parinktų validavimo duomenų. Iš grafiko matyti, kad neuroninis tinklas galaktikų mases geba atkurti tikrai gerai. Šiam neuroninio tinklo modeliui didesnio

tikslumo nereikėtų siekti, nes duomenys yra labai išsibarstę aplink žinomus sąryšius, tad per daug atitaikius konkrečias vertes galima permokyti neuroninį tinklą gerai atspėti konkrečius dydžius, bet tuomet tinklas labiau stengtųsi atitaikyti tokius pačius išmoktus parametrus ir kitiems, nematytiems pavyzdžiams. Atkuriamos baldžo masės tikslumas atrodo labai panašiai kaip ir virialinės galaktikos masės. Su kitais parametrais, kurių skirtingų verčių rinkinių buvo žymiai mažiau, rezultatai yra šiek tiek prastesni, bet vis tiek neblogi. 5 pav. atvaizduoja tų pačių atstitiktinai parinktų validavimo duomenų dujų kiekio atspėtų ir tikrų verčių skirtumo modulį. Iš šios histogramos matyti, kad atspėti duomenys sutampa arba yra pasiskirstę aplink tikrąsias vertes. Iš šios histogramos nematyti, bet kadangi galima mažiausia dujų vertė $f_{\mathrm{g}} = 0.01$ - keletą parametrų verčių neuroninis tinklas įvertina kaip $f_{\mathrm{g}} < 0$, tai yra pagrindinis šio modelio trūkumas, nes, nors vertė ir nenutolus toli nuo tikrosios ir galėtų būti pakankamai gera aproksimacija, tačiau tai nėra fiziškai prasminga vertė. Bet šis atvejis labai retas ir didelės įtakos spėjimų kokybei neturi. t_{q} ir f_{α} parametrus neuroninis tinklas atpažįsta panašiai gerai. Šiek tiek prastesnius rezultatus duoda δ_{AGN} patikimumo analizė, bet tai nestebina, nes šis dydis stipriai paveikia tėkmės savybes ir sukelia didelią parametrų sklaidą, todėl siekiant geresnių rezultatų, reikėtų neuroninį tinklą mokyti įtraukiant daugiau skirtingų šio parametro verčių.



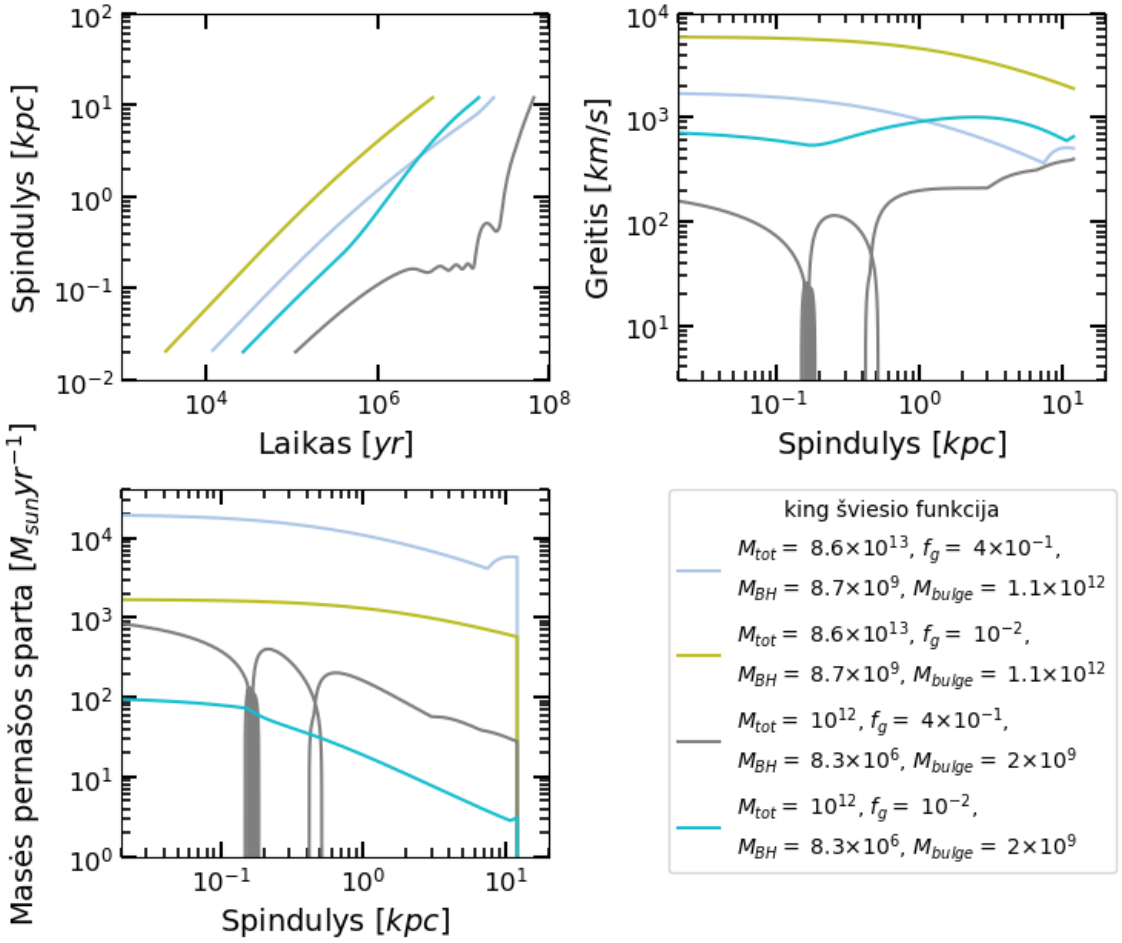
5 pav. Atsitiktinai išskirtų generuotų validavimo duomenų atpažinimo palyginimas su tikraisiais duomenimis. X ašyje baldžo dujų kiekio f_{g} tikrų ir atspėtų duomenų skirtumo modulis. Duomenų rinkinio dydis: 8644.

7 lentelė. Stebėjimais gautų tėkmių parametrai, iš kurių neuroninis tinklas atrinko galaktikos ir AGN-kintamumą laike nusakančius parametrus.

Tėkmės pavadinimas	Spindulys R, kpc	Greitis $\dot{R}$, km/s	Masės pernašos sparta $\dot{M}$, $M_\odot$/m.	Masė log $M/M_\odot$	AGN šviesis log L_{AGN}, erg/s	SMBH masė log $M_{\mathrm{BH}}/M_\odot$	Šaltinis
IRASF10565	1.1	450	95.45	8.34	44.85	7.6	[9]
IRASF10565_1	0.48	250	91.13	8.23	44.85	7.6	[23]
IRASF10565_2	0.4	420	173.65	8.2	44.85	7.6	[23]
IRASF14348SW	1.64	415	141.15	8.73	45.15	8.4	[44]
IRASF14348NE	0.935	370	42.63	8.02	45.15	8.4	[44]
IRASF14348_1	0.24	100	1070.71	9.4	45.15	8.4	[23]
IRASF14348_2	0.37	600	114.73	7.83	45.15	8.4	[23]
IRASF14348_3	0.34	300	316	8.54	45.15	8.4	[23]
Mrk273	0.55	620	190.40	8.21	45.48	9.12	[9]
Mrk273_1	0.13	300	122.93	7.71	45.48	9.12	[23]
Mrk273_2	0.34	700	234.25	8.04	45.48	9.12	[23]
4C1250	0.27	640	128.73	7.72	45.65	8.41	[45]
IRAS05189_2	0.34	550	151.24	7.95	45.65	8.86	[23]
IRAS17208	0.38	1115	112.12	7.57	45.02	8.98	[24]
IRAS12112NE	1.605	470	181.83	8.77	44.84	7.98	[44]
Arp220_b	0.115	490	35.45	6.9	44.99	8.11	[46]
Mrk231	0.6	700	330.88	8.43	45.96	8.24	[47]
Mrk231_1	0.16	100	478.27	8.86	45.96	8.24	[23]
Mrk231_2	0.6	550	245.29	8.41	45.96	8.24	[23]
Mrk231_3	0.17	700	388.75	7.96	45.96	8.24	[23]
IRASF11119	7.0	1000	81.22	8.75	46.03	7.98	[4]
NGC6240	0.6	400	262.83	8.58	44.9	8.95	[48]
IRAS23365	1.23	450	51.25	8.12	44.57	8.6	[9]
IRAS23365_1	0.1	100	346.48	8.53	44.57	8.6	[23]
IRAS23365_2	0.19	350	85.05	7.65	44.57	8.6	[23]
IRAS23365_3	0.45	470	208.77	8.28	44.57	8.6	[23]
IRASF14378_1	0.6	270	107.07	7.67	43.99	7.99	[23]
IRASF14378_2	0.24	250	77.57	7.85	43.99	7.99	[23]
IRASF20551	0.23	490	67.56	7.48	45.06	7.81	[24]
IRASF20551_1	0.16	300	162.06	7.92	45.06	7.81	[23]
IRASF09111	0.61	330	64.52	8.07	43.53	7.39	[24]
IRASF23060	4.05	550	362.80	9.42	45.93	8.85	[24]

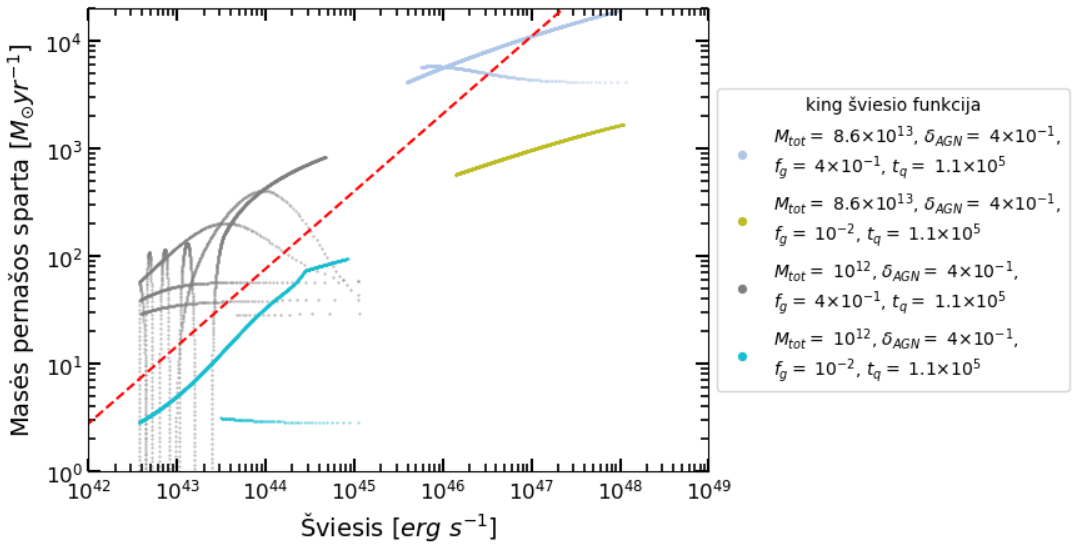
5 Rezultatai ir aptarimas

5.1 Sugeneruotų tėkmių savybės



6 pav. Keturių tėkmių spindulio, greičio ir masės pernašos spartos evoliucija. Šių tėkmių AGN šviesio funkcija kinta pagal (14) formulėje parašytą išraišką (King šviesio funkcija). Parametrai, kurie nėra nurodyti legendoje, visoms tėkmėms yra tokie patys: laiko dalis aktyvioje fazėje $\delta_{\mathrm{AGN}} = 0.4$; aktyvaus epizodo trukmė $t_{\mathrm{q}} = 1.1 \times 10^5$ metų; erdvinio kampo dalis $f_\alpha = 1$. Pavaizduotų tėkmių galaktikų virialinė, baldžo ir SMBH masės yra išreikštos $M_\odot$.

4.1 skyrelyje aprašytas modelis generuoja tėkmes, kurių pagrindinius evoliucijos principus galima būtų paaiškinti taip: tam tikrą laiką tėkmė plinta per dujų pripildytą baldžą pastoviu greičiu iki tol, kol arba pasiekia galaktikos halą ir ten dėl mažesnio dujų kiekio sulaukusi mažiau pasipriešinimo pagreitėja, arba AGN šviesiui pradėjus mažėti vėjas nebegauna pakankamai energijos, kad galėtų toliau varyti tėkmę, tad ji pradeda po truputį lėtėti. Jeigu nepasibaigė modeliuojamas tėkmės laikas $t = 10^8$ m. arba tėkmė neišplito toliau, nei modeliuojami 12 kpc, o AGN aktyvumas atsinaujino ir vėl sukūrė galingą vėją, tuomet tėkmė vėl pradeda greitėti iki tol, kol pasiekia modeliuojamas ribas arba pasibaigia aktyvumo epizodas - tokiu principu procesas kartojasi, kol sukuriama visų modeliuojamų



7 pav. Žymėjimai tokie patys kaip ir 6. Pavaizduota masės pernašos spartos evoliucija nuo tėkmės šviesio, kintančio per visą tėkmės plitimo, pilka brūknšiuota linija atitinka $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ [9] straipsnyje nustatytą sąryšį.

tėkmių evoliucija iki 12 kpc. Toliau pristatoma, kaip konkrečiai tėkmių evoliucija priklauso nuo galaktikos ir AGN aktyvumą nusakančių parametrų. Kadangi iš viso šiuo modeliu yra sugeneruoti maždaug 38 tūkstančiai tėmių, siekiant aiškumo, analizėje naudojamos tik kraštinės parametrų ribos. Toliau vaizduojamos kiekvienos galaktikos SMBH ir baldžo masę nulemia tik parinkta $M_{\rm tot}$ vertė, todėl visur, kur yra vaizduojamas galaktikos virialinės masės pokytis, reiškia, kad pasikeičia ir kitos atitinkamos masės. Be to, šis tėkmių evoliucijos modelis sukonstruotas taip, kad tėkmės erdvinio kampo dalis f_α turėtų įtakos tik tėkmės masei M ir masės pernašos spartai $\dot{M}$, tarpusavyje lyginant generuotas tėkmes šis dydis nėra labai svarbus visos evoliucijos supratimui, todėl šioje analizės dalyje visos vaizduojamos tėkmės yra parinktos tos, kurių $f_\alpha = 1$.

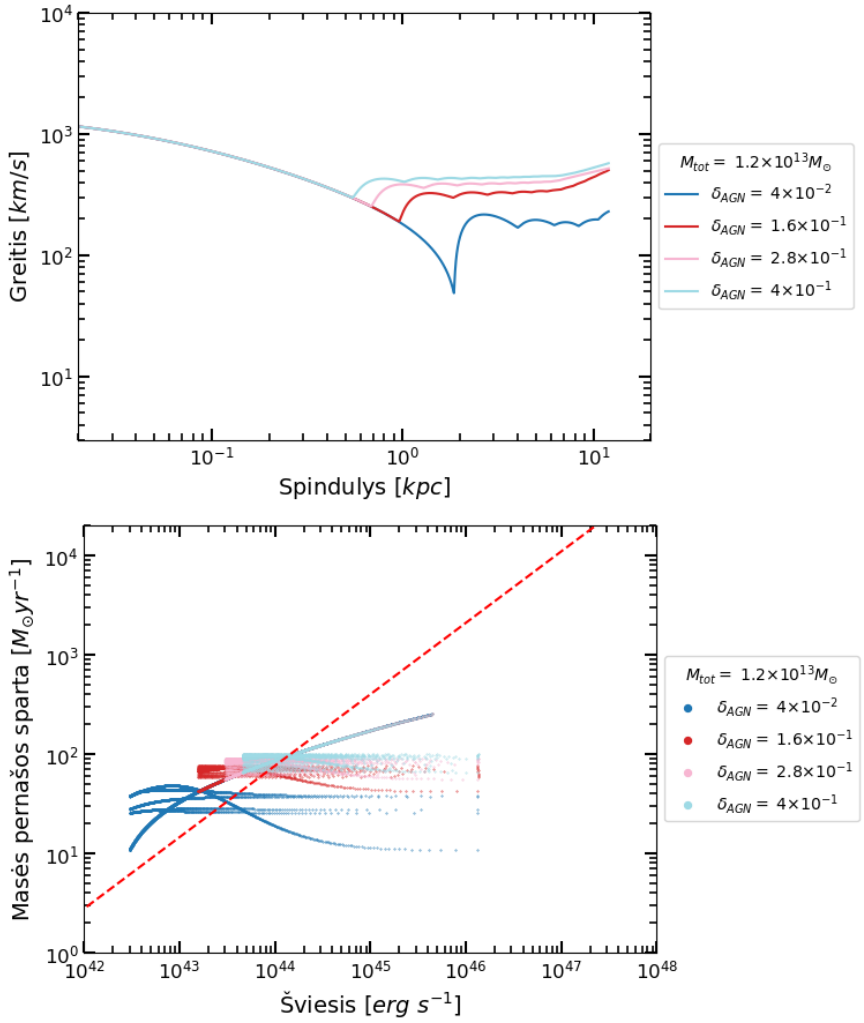
Tėkmės savybių priklausomybė nuo dujų dalies baldže $f_{\rm g}$ ir nuo baldžo masės $M_{\rm bulge}$ pavaizdota 6 ir 7 pav. Šiuose grafikuose yra vaizduojamos pačios mažiausios ($M_{\rm tot} = 10^{12}$ M$_\odot$) ir didžiausios ($M_{\rm tot} = 8.6 \times 10^{13}$ M$_\odot$) virialinių masių galaktikos su mažiausio ($f_{\rm g} = 0.01$) ir didžiausio ($f_{\rm g} = 0.4$) dujų kiekio baldžais. Laiko dalis aktyvioje fazėje $\delta_{\rm AGN} = 0.4$, o vieno aktyvaus epizodo trukmė $t_{\rm q} = 1.1 \times 10^5$ metų. 6 pav. padeda suprasti skirtingų tėkmių plitimą laike ir erdvėje: tarpusavyje lyginant tos pačios masės, bet skirtingų dujų kiekių baldžus, matosi, kad mažiausiai dujų, $f_{\rm g} = 0.01$, turinčiuose baldžuose tėkmės plinta sparčiausiai. Taip yra todėl, kad daug dujų turinčiame baldže plintanti tėkmė turi pasipriešinti didesnei masei dujų, todėl praranda daugiau energijos nei tokių pačių parametrų tėkmė, keliaujanti per retesnių dujų baldžą. Lyginant skirtingų masių, bet tokių pačių dujų kiekių galaktikas tėkmės turėtų plėstis sparčiau mažesnės masės galaktikose, tačiau grafike matosi priešingas variantas. Taip yra todėl, kad tose galaktikose gerokai mažesnė ir SMBH masė, o ji yra svarbesnis tėkmės evoliuciją nulemiantis faktorius, nei baldžo ar virialinė masės.

7 pav. yra pavaizduota masės pernašos spartos priklausomybė nuo AGN šviesio aptartoms didžiausių

ir mažiausių masių galaktikoms. Raudona brūkšniuota linija yra pavaizduotas iš stebėjimų duomenų nustatytas empirinis $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ sąryšis. Iš grafiko matyti, kaip stipriai skiriasi didelės ir mažos masės galaktikose esančių skirtingų masių AGN šviesiai, kitę per visą tėkmės gyvavimo laikotarpį. Kadangi 7 pav. yra pavaizduotos visų modeliuotų galaktikų mažiausios ir didžiausios virialinės masės vertės, tai šis grafikas puikiai iliustruoja 2 skyriuje aptartą $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ didžiausią sklaidą ir leidžia kiekybiškai įvertinti, kaip šio sąryšio sklaida priklauso nuo galaktikos parametrų. Pavaizduotų virialinių masių galaktikose yra atitinkamai skirtingų masių SMBH, kurios apibrėžia galimas stebimų $L_{\rm AGN}$ šviesių ribas. Taip pat iš grafiko matyti, kad nuo dujų kiekio baldže priklauso masės pernašos spartos amplitudė. Mažos masės galaktikose, daugiau dujų turinčiuose baldžuose, $f_{\rm g} = 0.4$, $\dot{M}$ kinta intervale nuo 0 iki $\sim 10^3$ $\mathrm{M}_\odot$/yr, o didelės masės galaktikose $\dot{M}$ kinta nuo $\sim 3 \times 10^3$ iki $\sim 2 \times 10^4$ $\mathrm{M}_\odot$/yr. Palyginus šių tėkmių masės pernašos spartą su $f_{\rm g} = 0.01$ dujų turinčiu baldžu, masės pernašos sparta yra mažesnė maždaug 12 kartų; tą galima suprasti pažiūrėjus į teorinę $\dot{M}$ priklausomybę nuo dujų tankio: $\dot{M} \propto f_{\rm g}^{2/3}$, tad dujų tankiui sumažėjus 40 kartų, $\dot{M}$ sumažėja $40^{2/3} \simeq 12$ kartų. Taigi, iš 6 pav. matomų pokyčių įvertinimo, galima suprasti, kiek daug $\dot{M}$ priklauso nuo dujų dalies baldže ir kokiame intervale galima aptikti $L_{\rm AGN}$, priklausomai nuo galaktikos ir SMBH masių.

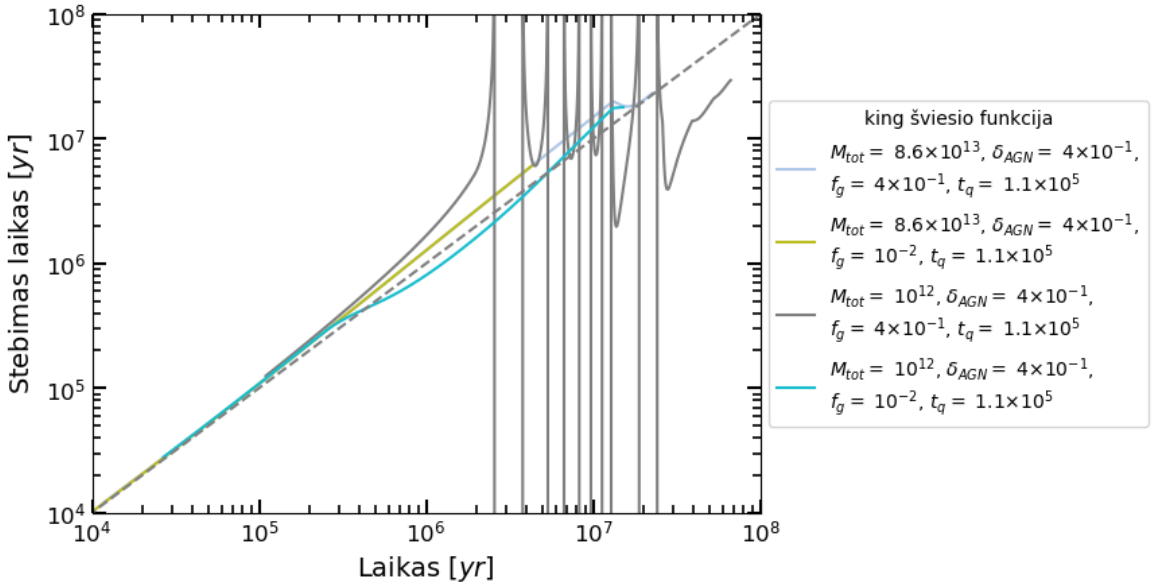
Dar svarbu atkreipti dėmesį, kad 7 pav. grafike atidėtos tėkmių padėtys labai panašiais laiko intervalais, todėl ten, kur taškai retesni, tėkmės užsibūna trumpiau. Tai leidžia pastebėti, kad vidutiniškai, mažos virialinės masės ir mažos SMBH masės galaktikose esančios tėkmės turės santykinai tokį patį $\dot{M}$ amplitudės pokytį per visą evoliucijos laiką, kuris visiškai atitinka ir iš empiriškai nusatyto sąryšio santykinį $\dot{M}$ amplitudės pokytį tokio šviesio aktyviems galaktikos branduoliams. Tačiau, didelių masių galaktikoms ir SMBH , santykinis $\dot{M}$ amplitudės pokytis yra ženkliai mažesnis ir neatitinka empirinio $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ sąryšio numanomos vertės. Egzistuoja tam tikra galaktikos masė, ties kuria susidaro pakankamai didelis $L_{\rm AGN}$, bet neišstumia tiek daug masės, kad atitiktų tokią pačią sklaidos tendenciją, kokia yra matoma mažoms $M_{\rm tot} - M_{\rm BH}$. Riba, ties kuria didėjant AGN šviesiui $\dot{M}$ nustoja augti, turi priklausyti nuo $f_{\rm g}$. Tokiu atveju, vienodų masių galaktikose, tėkmės turėtų greičiau „įsisotinti“ mažiau dujų turinčiuose baldžuose. Šis galimas maksimalios masės pernašos spartos aspektas nebuvo įtraukas į $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ empirinį sąryšį [9] su kuriuo yra lyginami rezultatai, nes anksčiau nebuvo pakankamai daug patikimų rezultatų su didelio šviesio AGN, tad pati priklausomybė negalėjo būti pastebėta. Tačiau visai neseniai [49] straipsnyje pristatytas ir ties $L_{\rm AGN} \simeq 10^{48}$ erg/s puikiai šias išvadas atitinkantis empirinis $\dot{M} - L$ sąryšis.

7 pav. pavaizduotos tėkmės, kurios $M_{\rm tot} = 10^{12}$ $\mathrm{M}_\odot$ ir $f_{\rm g} = 0.04$, išskirtinį masės pernašos kitimą gali geriau padėti suprasti 6 pav. pavaizduota masės pernašos spartos ir spindulio priklausomybė. Iš jos matyti, kad $\dot{M}$ mažėja ir vėl išauga tėkmei plečiantis dėl dažnai atsinaujinančių AGN epizodų, kurių dažnumą kartu su vieno aktyvumo trukme nusako didelis $\delta_{\rm AGN} = 0.4$. Konkrečiai šiai tėkmei labai didelę įtaką $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ sąryšiui padaro keli AGN aktyvumo epizodai, nes dėl mažo šviesio, tėkmės energija nepajėgia pasipriešinti dideliam kiekiui dujų ir netgi pradeda trauktis. Aktyvumo epizodų įtaką detaliau paaiškina 8 pav. Šiame grafike pavaizduotos tėkmės skiriasi tik dėl laiko dalies, kurią AGN praleidžia aktyvumo fazėje, $\delta_{\rm AGN}$. Šiame grafike, kitaip nei anksčiau analizuotuo-



8 pav. Grafikų žymėjimas toks pats kaip 7 ir 8 pav. Grafikuose pavaizduotas kintantis laikas, kurį galaktika praleidžia aktyvumo fazėje $\delta_{\rm AGN}$. Legendoje nepažymėti parametrai yra visoms tėkmėms tokie patys: $M_{\rm tot} = 1.2 \times 10^{13}\ M_\odot$, $M_{\rm BH} = 10^8\ M_\odot$, $M_{\rm bulge} = 1.3 \times 10^{11}\ M_\odot$, $f_{\rm g} = 0.01$, $t_{\rm d} = 9.7 \times 10^3$, $f_\alpha = 1$, $l(t)$ - King.

se, galaktikos, baldžo ir SMBH masės yra tokios pačios: $M_{\rm tot} = 1.2 \times 10^{13}\ M_\odot$, $M_{\rm BH} = 10^8\ M_\odot$, $M_{\rm bulge} = 1.3 \times 10^{11}\ M_\odot$. Apatiniame 8 pav. pavaizduotas $\dot{M}$ ir $L_{\rm AGN}$ sąryšis leidžia pastebėti, kad $\delta_{\rm AGN}$ daro didelę įtaką tiek šviesio, tiek masės pernašos spartos amplitudėms. Iš $\dot{R}$ ir t priklausomybės matyti, kad ilgą laiką tėkmės evoliucionuoja daugmaž vienodai, bet po kelių epizodų palaipsniui pradeda ryškėti skirtumai. Ryškiausiai išsiskiria mažiausio $\delta_{\rm AGN} = 0.04$ tėkmė, kurios masės pernašos sparta yra mažiausia, o šviesio kitimo amplitudė didžiausia: nuo $L_{\rm AGN} \simeq 3 \times 10^{42}$ erg/s iki $L_{\rm AGN} \simeq 10^{46}$. Ši tėkmė masės pernašos spartos kintatmumo principu yra labai panaši į išsamiai aptartą mažiausios masės - didžiausių dujų tėkmę pavaizduotą 7. Svarbus skirtumas tarp jų yra tas, kad ši tėkmė neturi tokių mažų $\dot{M}$ verčių - jos greičiausiai yra galaktikos parametrų poveikio pasėkmė. Bendrai lyginant skirtingų $\delta_{\rm AGN}$ įtaką, pastebima, kad daugiausiai ji keičia tik ribas, kiek daug AGN šviesis gali sumažėti, o masės pernašos spartos amplitudės - ne, ji natūraliai būna didelė pirmaisiais keliais

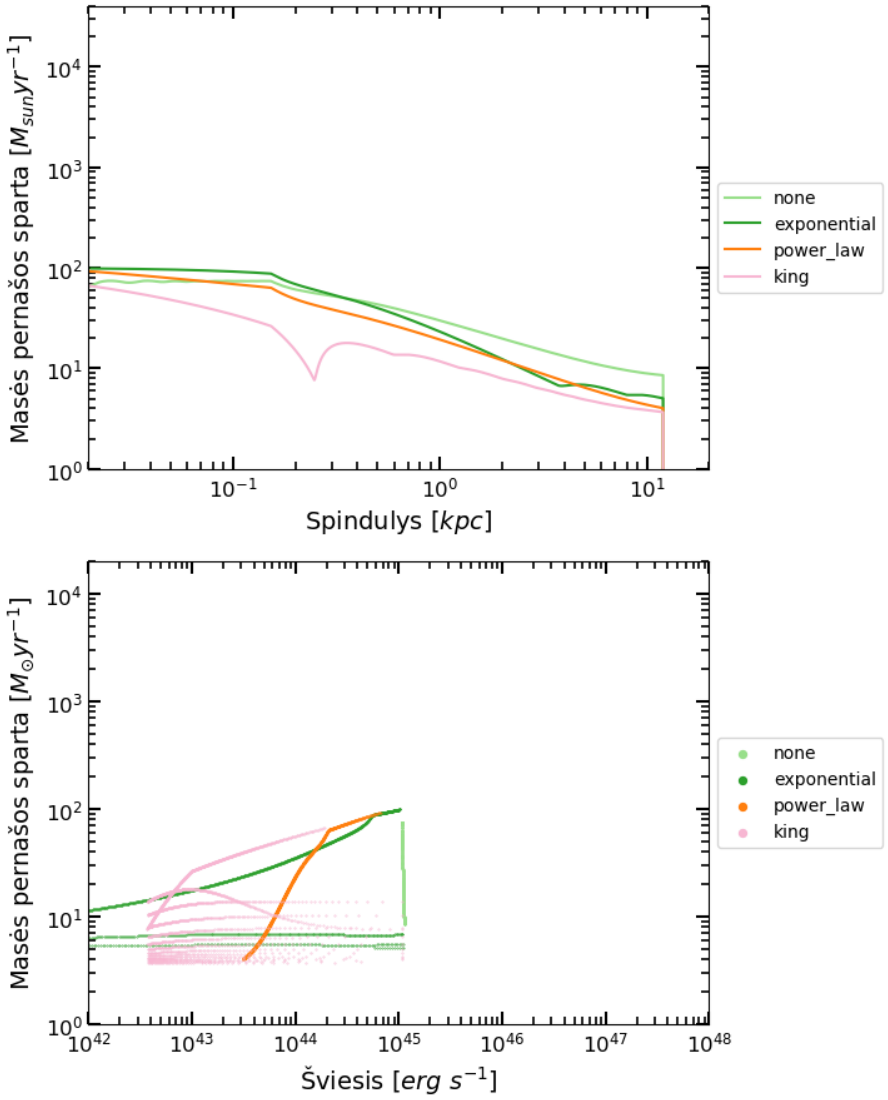


9 pav. Priklausomybė tarp stebimo tėkmės amžiaus $t_{\rm dyn}$, kuris apibrėžiamas kaip $R/\dot{R}$, ir realaus tėkmės plitimo laiko t, brūkšniuota pilka linija žymi taškus, kur abiejų ašių skaitinės vertės sutampa. Dvi tėkmės, kurių vienos $M_{\rm tot} = 8.6 \times 10^{13}$ M$_\odot$ ir $f_{\rm g} = 0.4$, o kitos $M_{\rm tot} = 8.6 \times 10^{13}$ M$_\odot$ ir $f_{\rm g} = 0.01$, persikloja, tad matosi tik trys tėkmės.

epizodais, o vėliau jau nebekinta. Tokį reiškinį paaiškina tarpų tarp aktyvumo epizodų kitimas dėl $\delta_{\rm AGN}$, nes aktyvumo trukmė $t_{\rm q}$ visais atvejais vienoda, tai su mažomis $\delta_{\rm AGN}$ tarpai tarp epizodų yra dideli, o su didelėmis $\delta_{\rm AGN}$ vertėmis - atvirkščiai. Taigi, dėl $\delta_{\rm AGN}$ įtakos $L_{\rm AGN}$ stebima amplitudė gali išsiplėsti, taip padidinama stebimą $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ sąryšio sklaidą.

Dažniausiai tėkmių plitimo laikai yra nustatomi iš jų spindulio ir greičio. 9 pav. vaizduoja iš stebėjimo duomenų apskaičiuojamą laiką $t_{\rm dyn} = R/\dot{R}$ ir tikrą tėkmių plitimo laiką t. Šiame grafike pavaizduotos anksčiau aptartos kraštinės virialinės, tuo pačiu ir SMBH bei baldžo masės ir dujų kiekiai baldže. Matyti, kad dėl aktyvumo netolygumų tėkmės nepradeda lėtėti arba greitėti, kol t ir $t_{\rm dyn}$ nesiskiria, bet kai greičiai pradeda didėti arba mažėti, ypač, jeigu jie kinta labai staigiai, gali būti gaunamas ir visiškai iškreiptas tėkmės amžiaus įvertinimas. Iš to galima suprasti, kad jeigu stebima tėkmė bus labai stipriai sulėtėjus, jos $t_{\rm dyn}$ bus klaidingai per didelis, o kiekvieno naujo aktyvumo epizodo pradžioje, bus klaidingai per mažas. Taigi, iš stebėjimų gauti rezultatai, nusakantys tikrąjį tėkmės amžių, tam tikrais atvejais gali būti labai netikslūs.

10 pav. pavaizduota tėkmių evoliucija, gaunama naudojant skirtingas šviesio kitimo funkcijas, aptartas 2.4 skyrelyje. Iki šiol visų aptartų modelių šviesiai kito pagal King šviesio funkciją, nes ji [31] straipsnyje buvo pristatyta kaip geriausia funkcija, išlaikanti tėkmių parametrų ir $L_{\rm AGN}$ sąryšį laikui bėgant. Iš tikrųjų, nuo kitų funkcijų King atrodo išsiskirianti labiausiai dėl sparčiausiai mažėjančios masės pernašos spartos. Tai svarbu suprasti, nes mokant neuroninį tinklą buvo naudojamos visos šios funkcijos.

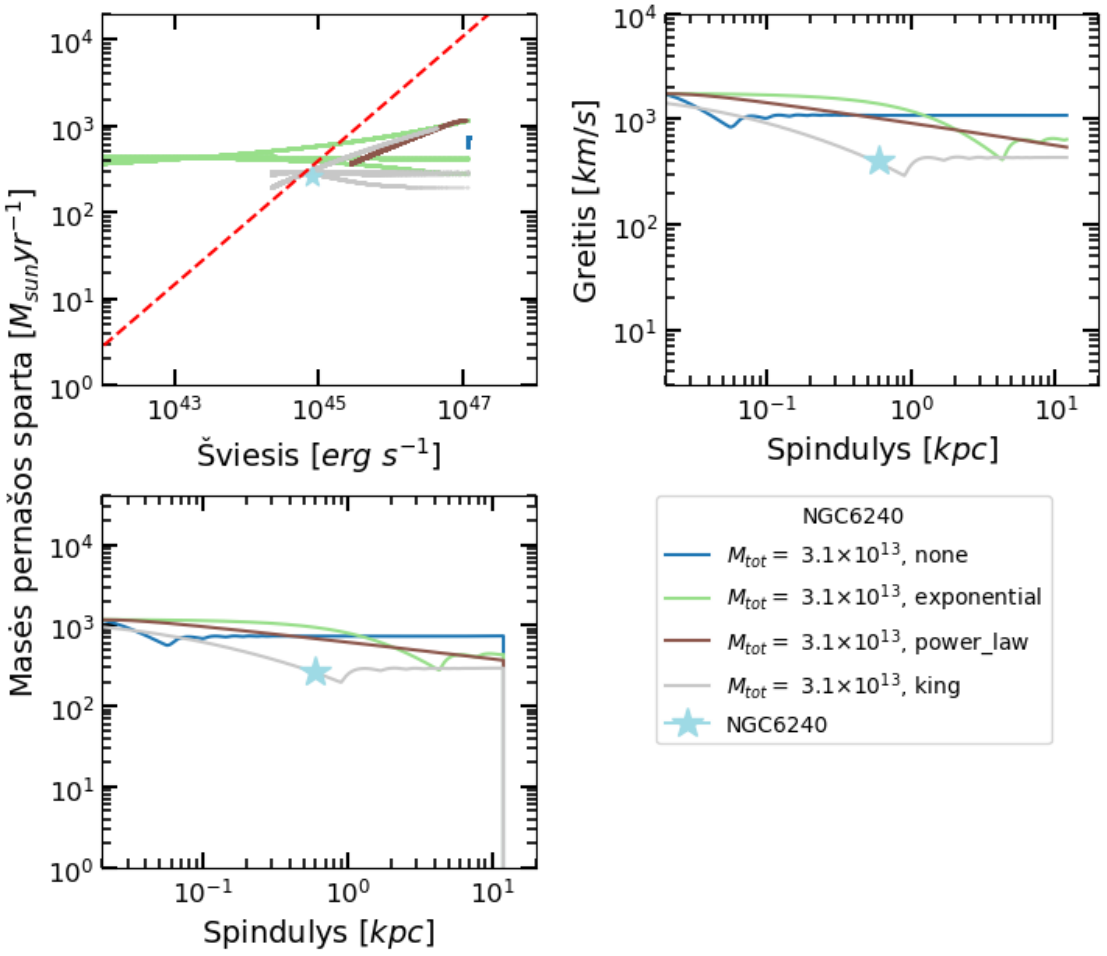


10 pav. Grafike pavaizduota, kaip kinta masės pernašos sparta tokių pačių parametrų galaktikose su skirtingomis AGN parametrų šviesio funkcijomis $l(t)$. None čia žymi (11) formulėje parodytą išraišką, exponential - atitinka (12) formulės išraišką, power-law - (13), o King - (14)

5.2 Neuroninio tinklo rezultatai

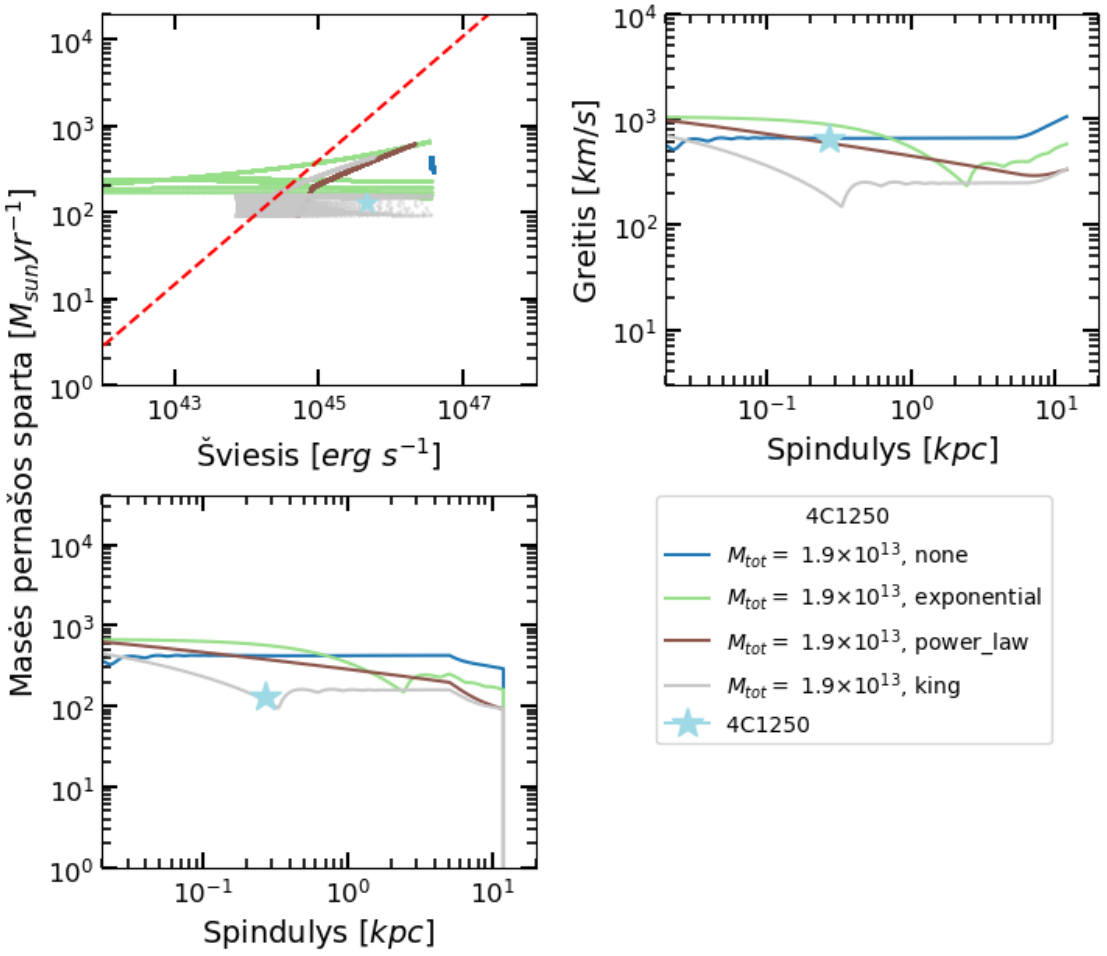
4.2 skyriuje pristatytas neuroninis tinklas leidžia iš tėkmių savybių nustatyti labiausiai tinkančius AGN bei galaktikos parametrus, kurių visuma turėtų sukurti tas tėkmes. Šiame darbe aptartas neuroninis tinklas buvo konkrečiai pritaikytas, kad galėtų atspėti minėtus parametrus ir taip leistų atkurti visą AGN aktyvumo istoriją. Neuroninis tinklas sėkmingai atkūrė 32 tėkmių parametrus, priede (pav.18-32) pavaizduoti visi atspėtų galaktikų sugeneruoti evoliucijos modeliai.

11 pav. pavaizduotos atkurtos NGC 6240 tėkmės savybės iš neuroninio tinklo atspėtų galaktikos ir AGN aktyvumo parametrų, joms geriausiai atitaikyta $l(t)$ - King. Grafike pavaizduotos vienodų parametrų tėkmės, jiems skiriasi tik $l(t)$, nes šio parametrų galimų variantų iš viso yra tik 4, todėl nesunku patikrinti, ar neuroninis tinklais gerai atspėjo šį parametrą. Ši tėkmė yra pavyzdys gerai



11 pav. Tėkmių, sugeneruotų remiantis neuroninio tinklo atspėtais galaktikos NGC 6240 parametrais. Spalvos atitinka keturias galimas AGN šviesio evoliucijas. Atspėti parametrai:. $M_{\rm tot} = 3.2 \times 10^{13}\ M_{\odot}$, $M_{\rm BH} = 8.8 \times 10^{8}\ M_{\odot}$, $M_{\rm bulge} = 4.2 \times 10^{11}\ M_{\odot}$, $f_{\rm g} = 0.05$, $t_{\rm q} = 9.8 \times 10^{3}$ m., $f_{\alpha} = 0.59$, $\delta_{\rm AGN} = 0.24$, $l(t)$ - King. Raudona brūknšiuota linija žymi teorinį $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ sąryšį iš [9] straipsnio, o žvaigždute pažymėta stebima tėkmė.

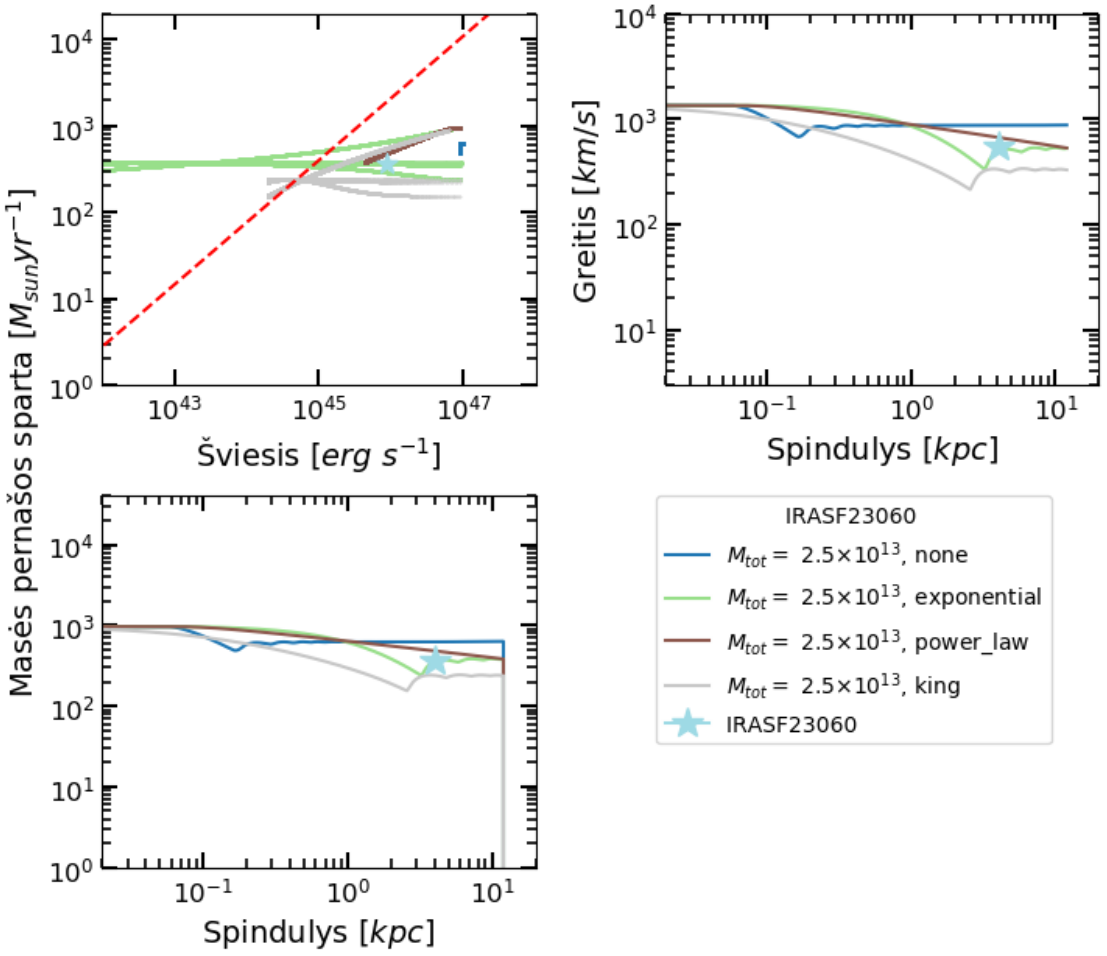
atspėtų neuroninio tinklo rezultatų. Kita vertus, 12 pav. pavaizduotos atkurtos 4C 12.50 tėkmės savybės iš neuroninio tinklo atspėtų galaktikos ir AGN aktyvumo parametrų, jam geriausiai atitaikyta $l(t)$ taip pat yra King šviesio funkcija. 12 pav. matyti, kad $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ ir $\dot{M} - R$ sąryšiai yra atspėti gerai, bet greitis, atrodo, turėtų atitikti kitą šviesio kitimo funkciją, nei atspėjo neuroninis tinklas. Bet tai nebūtinai yra blogas neuroninio tinklo rezultatas: peržiūrėjus visų atspėtų tėkmių rezultatus pasimato, kad neuroninis tinklas geriausiai atspėja $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ parametrų porą. Toks rezultatas leidžia įtarti, kad neuroninis tinklas sugebėjo gerai atitaikyti parametrus, nuo kurių iš esmės priklauso, ar apskritai tėkmė egzistuoja. Kita vertus, stebėjimų parametrų masės pernašos sparta turi labai dideles paklaidas, kurios praplečia galimą $\dot{M}$ intervalą maždaug 10 kartų, taigi, gali būti, kad šiai tėkmei atitiktų didesnę masę ir pakliūtų į rėžius, kur galėtų būti aprašoma eksponentine ir laipsnine šviesio funkcijomis, kurios daug geriau aprašo stebimą greičio vertę. Greičio paklaidos yra gerokai mažesnės, todėl toks neuroninio tinklo pasirinkimas atitaikyti parametrus pagal $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ įveda taip pat dideles paklaidas



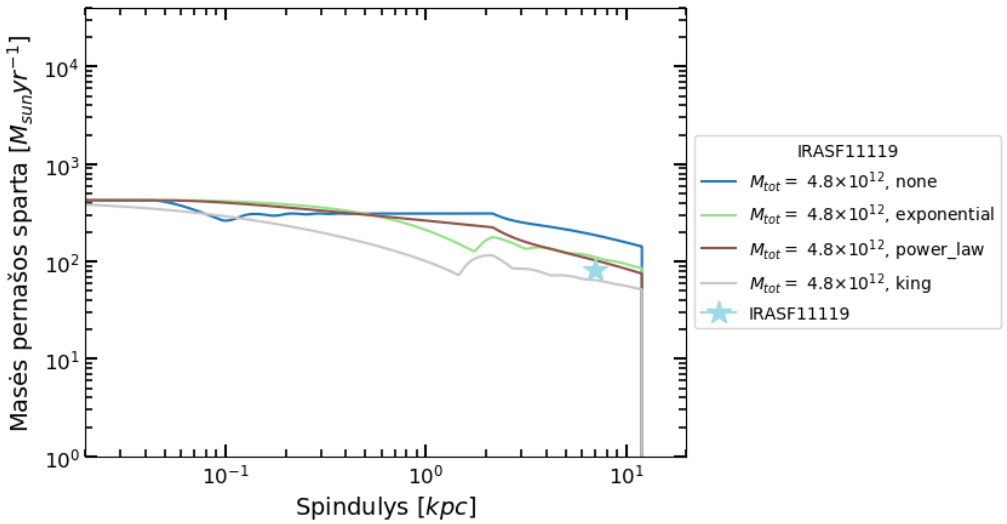
12 pav. Tėkmių, sugeneruotų remiantis neuroninio tinklo atspėtais galaktikos 4C 12.50 parametrais. Spalvos atitinka keturias galimas AGN šviesio evoliucijas. Atspėti parametrai:. $M_{\rm tot} = 1.9 \times 10^{13}\ M_{\odot}$, $M_{\rm BH} = 2.7 \times 10^{8}\ M_{\odot}$, $M_{\rm bulge} = 1.1 \times 10^{11}\ M_{\odot}$, $f_{\rm g} = 0.07$, $t_{\rm q} = 6.7 \times 10^{3}$ m., $f_{\alpha} = 0.4$, $\delta_{\rm AGN} = 0.26$, $l(t)$ - King. Raudona brūknšiuota linija žymi teorinį $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ sąryšį iš [9] straipsnio, o žvaigždute pažymėta tėkmė.

į atkuriamus sąryšius. Palyginimui, 13 pav. yra pavaizduota tėkmė galaktikoje IRAS F23060+0505, kurios $\dot{M}$ paklaidos yra mažiausios iš viso duomenų rinkinio, tačiau vis tiek pakankamai didelės, kad nebūtų galima padaryti kokių nors tvirtų išvadų, leidžiančių sakyti, kad kai kurių tėkmių parametrai yra neteisingai atspėti būtent dėl $\dot{M}$ paklaidų didumo.

Daugiausiai, 23 iš 32, tėkmių yra kintančios pagal King šviesio funkciją. Čia svarbu turėti omenyje, kad neuroninis tinklas turėjo tokį patį kiekį tokių pačių galaktikų ir AGN parametrų pavyzdžių kiekvienai šviesio funkcijai, tad toks rezultatas nėra iškreiptas - neuroninis tinklas greičiausiai surado sąryšį, pagal kurį galima nustatyti kokia funkcija mažėja $L_{\rm AGN}$. Šis rezultatas dar labiau pastiprina [31] tyrimo išvadas, teigiančias kad kitos šviesio funkcijos negali pakankamai tinkamai atkurti aktyvumo istorijos. 13 pav. pavaizduota jau minėta galaktikos IRAS F23060+0505 tėkmė, kuriai priskirta eksponentinė (exponential) šviesio kitimo funkcija. Šiai tėkmei atitaikyti parametrai leidžia sukurti tokių pačių prametrų dirbtinę tėkmę kaip ir reali stebima IRAS F23060+0505 tėkmė. Tiesa,



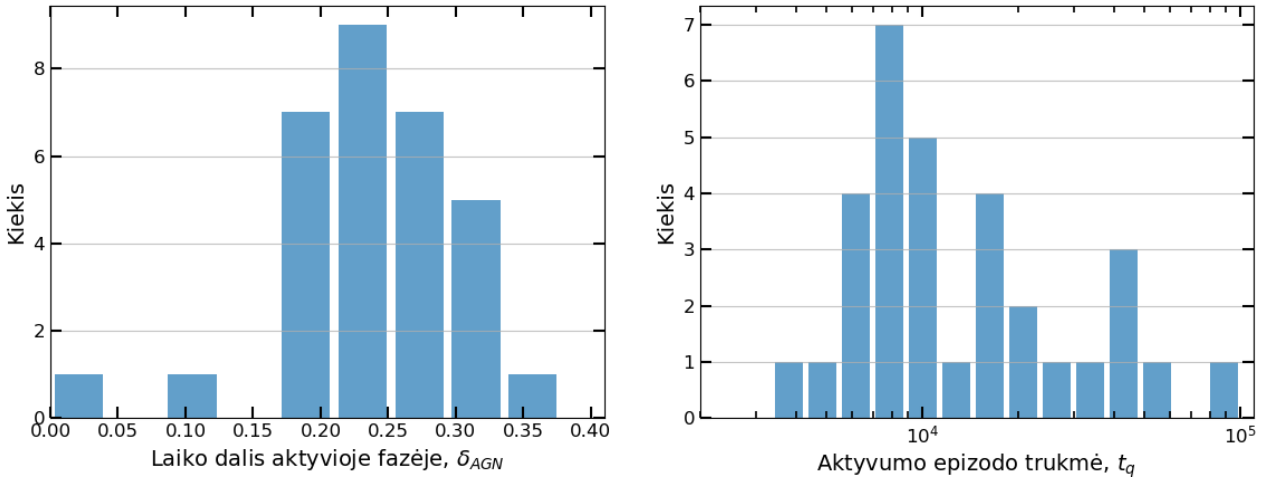
13 pav. Žymėjimas taip pat, kaip 12, tik čia pavaizduotai IRAS F23060+0505 tėkmei geriausiai atitaikyta šviesio kitimo funkcija yra eksponentinė (exponential). Atspėti galaktikos ir AGN parametrai $M_{\rm tot} = 2.5 \times 10^{13}\ M_\odot$, $M_{\rm BH} = 7 \times 10^8\ M_\odot$, $M_{\rm bulge} = 6.1 \times 10^{11}\ M_\odot$, $f_{\rm g} = 0.07$, $t_{\rm q} = 4.0 \times 10^4$ m., $f_\alpha = 0.37$, $\delta_{\rm AGN} = 0.27$.



14 pav. Žymėjimai taip pat, kaip 12 pav., tik čia pavaizduotai IRAS F11119+3257 tėkmei geriausiai atitaikyta šviesio ktimo funkcija yra eksponentinė (exponential). Atspėti galaktikos ir AGN parametrai $M_{\rm tot} = 4.8 \times 10^{12}\ M_\odot$, $M_{\rm BH} = 9.5 \times 10^7\ M_\odot$, $M_{\rm bulge} = 4 \times 10^{11}\ M_\odot$, $f_{\rm g} = 0.05$, $t_{\rm q} = 4.5 \times 10^4$ m., $f_\alpha = 0.54$, $\delta_{\rm AGN} = 0.4$.

šiuo atveju visos, išskyrus none, šviesio funkcijos sukuria labai panašias tėkmes ir laipsninė funkcija labai nedaug skiriasi nuo King. Iš 9 likusių tėkmių, kurių šviesio funkcijos nėra aprašomos King, kitos 4 aprašomos laipsnine funkcija, o dar 5 - eksponentine. Taigi, nei viena tėkmė nėra nustatyta, kad būtų plitusi galaktikoje, kurioje AGN būtų įsijunginėjęs ir išsijunginėjęs be tolydžiai blėstančio šviesio. Šis neuroninio tinklo nustatytas none šviesio funkcijos netinkamumas ne visai gali būti akivaizdus iš stebėjimų rezultatų, nes funkcija daugeliu atvejų nulemia labai panašų tėkmės plitimą erdvėje kaip ir laipsninė ar eksponentinė funkcijos, tačiau jos pagrindinis skirtumas nuo kitų funkcijų pasimato iš $\dot{M} - L_{\rm AGN}$ - jeigu AGN šviesis kistu pagal none, tuomet turėtume stebėti dar didesnę sklaidą aplink numanomą iš empirinio sąryšio gautą vertę.

Iš visų nagrinėjamų tėkmių viena, IRASF11119, yra stebima labai toli - 7 kpc atstumu nuo centro, jos $\dot{M}$ ir R priklausomybė pavaizduota 14 pav. Neuroniniu tinklu buvo nustatyta, jog šios tėkmės baldžo masė yra $M_{\rm bulge} = 4 \times 10^{10}$ M$_\odot$, o tai reiškia, jog ji turėtų būti neseniai išplitusi už galaktikos baldžo ribų, skaičiuojant pagal (24) formulę. Jeigu šios galaktikos masė iš tikrųjų nustatyta teisingai, tuomet ši tėkmė būtų geras įrodymas, kad tėkmės išplinta už galaktikos baldžo, o dėl to jos gali turėti tiesioginės įtakos dujų išstūmimui ir žvaigždėdarai ne tik artimai AGN erdvei bet ir, pavyzdžiui, galaktikos diskui. Iš žinomos $M_{\rm BH} = 9.4 \times 10^7$ M$_\odot$ galima įvertinti, kad $M_{\rm bulge}$ turėtų būti artima $M_{\rm bulge} = 3 \times 10^{10}$ M$_\odot$ pagal žinomą $M_{\rm BH} - M_{\rm bulge}$ sąryšį, tad turėtų reikšti, kad neuroninis tinklas pakankamai gerai atspėjo baldžo masę ir dėl to tėkmė turėtų būti išplitus per galaktikos baldžą. Tačiau norint padaryti tvirtas išvadas tiek šiam, tiek anksčiau minėtiems rezultatams, būtina juos palyginti su straipsniuose pristatytais galaktikų duomenimis. Deja, stebėjimų duomenys dažnai yra nepilni, išbarstyti literatūroje, todėl juos surinkti nuosekliam palyginimui yra didelis darbas, kuris netelpa į šio darbo ribas.

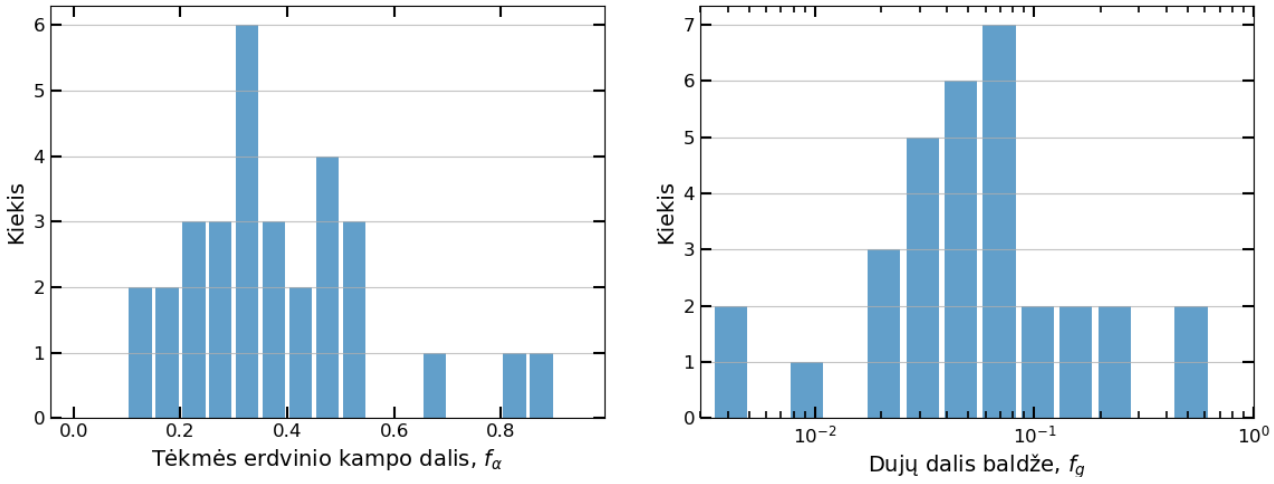


15 pav. Kairėje: atspėtas laiko dalies aktyvioje fazėje δ_{AGN} dažnumą nagrinėjamame stebėtų tėkmių rinkinyje. Dešinėje: atspėtas aktyvumo epizodo trukmės t_{q} dažnumas nagrinėjamame stebėtų tėkmių rinkinyje.

15 ir 16 pav. histogramose parodytas parametrų pasiskirstymas, kuriuos iš stebėjimų duomenų konkrečioms tėkmėms yra labai sunku įvertinti. Iš histogramų matyti, kad kiekvienas parametras turi stipriai išsiskiriančias tipines dažniausiai pasitaikančias vertes: laiko dalis aktyvioje fazėje δ_{AGN} dažniausiai būna tarp maždaug $20\% - 30\%$, yra tik pora tėkmių, kurių $\delta_{\mathrm{AGN}} < 15\%$. Šis rezultatas ne visai gerai sutampa su [10] straipsnyje pristatytais rezultatais, kur pristatomas tikėtiniausias δ_{AGN} yra tarp $10 - 20\%$, tačiau šiame tame straipsnyje ir daugelyje teorinių bei stebėjimų įvertinimų pristatomi rezultatai pateikia δ_{AGN} gautą suvidurkinus aktyvumo trukmę per visą Visatos amžių. O šiame darbe gautos δ_{AGN} atitinka laiką intervale, kol galaktikoje plinta tėkmė. Tad šie rezultatai pasako, jog tėkmės plitimo laikotarpiu, reikšmingai didelę spinduliuotę AGN kūrė maždaug $20\% - 30\%$ aktyvumo laiko. Šis dydis ypatingai gerai atitinka rezultatus, gaunamus Ilustris kosmologiniuose modeliuose [50]. Ilustris modelyje pateikiama, galaktikoms, panašioms į tiriamas šiame darbe, kurios yra artimos (raudonasis poslinkis $z = 0$), jų $L_{\mathrm{AGN}} > 10^{44}$ erg/s, virialinėms masėms tarp 5×10^{12} ir $5 \times 10^{13}\ M_{\odot}$ δ_{AGN} turėtų būti tarp $10 - 30\%$. Taigi, neuroninio tinklo modelis geba gerai atkurti realų galaktikų aktyvumą.

15 pav. dešinėje esantis grafikas nusako dažniausiai pasitaikančią vieno aktyvumo epizodo trukmę atspėtoms realioms tėkmėms, kur dažniausiai pasitaikanti vertė yra $\sim 9 \times 10^3$ metų, artimai tarp standartiškai stebimų $\sim 10^4$ ir $\sim 10^5$ metų. Tačiau šiame modelyje mažiausia mokoma vertė $t_{\mathrm{q}} = 9.7 \times 10^3$ metų, o tai kelia šiek tiek nepasitikėjimo rezultatų tikslumu ties mažesnėmis vertėmis, nes paprastai neuroninių tinklų modeliai yra mokomi taip, kad tikėtiniausia vertė būtų mokomų verčių rėžių centre, taigi, gali būti, kad iš tikrųjų šie aktyvumo epizodai yra dar trumpesni, nes modelis nėra išmokytas gerai atskirti mažas t_{q} vertes.

16 pav. kairiame grafike pavaizduota erdvinio kampo dalies f_{α} dažniausiai pasitaikanti vertė realioms atspėtoms tėkmėms. Šis dydis tėkmių generavimo modelyje nusako, kokia ištekanti masės



16 pav. Kairėje: histograma vaizduojanti atspėtą tėkmės erdvinio kampo dalies f_α dažnumą nagrinėjamame stebėtų tėkmių rinkinyje. Dešinėje: atspėtos dujų dalies baldže f_g dažnumas nagrinėjamame stebėtų tėkmių rinkinyje.

dalis yra užfiksuota stebėjimuose, jis modelyje svarbus dėl to, kad sferiškai simetriškai išplitusios tėkmės nėra labai tikėtinas atvejis dėl netolygaus dujų pasiskirstymo ir tankumo galaktikoje. Be to, gali būti, kad dalis tėkmės dujų gali atšalti, susidaryti kolapsuoti į debesis ir atsilikti nuo pagrindinės tėkmės. Tad šis dydis padeda geriau įvertinti kokia yra tikroji, o ne idealizuota tėkmės masė ir taip leidžia nustatyti tikslesnę masės pernašos spartą, o dėl to galima teigti, kad yra panaikinami tankio netolygumo efektai, o be jų galima geriau suprasti $\dot{M} - L_\mathrm{AGN}$ sąryšį. Grafike gaunama, kad dažniausiai pasitaikančios vertės yra išsidėsčiusios aplink $f_\alpha = 0.3$. Tačiau šiuos rezultatus sunku vertinti dėl dviejų priežasčių:

(a) taip pat kaip ir su t_q, atspėti rezultatai yra pasiskirstę aplink mažiausią mokytą vertę $f_\alpha = 0.3$, tad mažesnės vertės gali būti atskirtos nepakankamai tiksliai, o tai reikštų, kad tikrieji f_α kai kurioms tėkmėms gali būti dar mažesni;

(b) kai kurios realios tėkmės yra nustatytos kaip dalis visos tėkmės - tik komponentas, o kai kurios tėkmės nustatytos kaip visa pilna tėkmė. Tačiau didžioji dalis tariamai pilno išplitimo kampo tėkmių neuroninio tinklo yra spėjamos kaip turinčios ženkliai mažesnius už vienetą f_α. Kita vertus, labai daug tėkmių yra aptinkamos tik iš spektrinių linijų ir tik mažai tėkmių galima išskirti nuotraukose, tad gali būti, jog tėkmės, identifikuotos kaip pilnos, irgi yra tik komponentai. Taigi, kol kas gaunami f_α yra tik prognozės, kurias bus galima patikrinti gavus detalesnes, erdviškai išskirtas tėkmių nuotraukas ir duomenis.

16 pav. dešiniame grafike pavaizduota dažniausiai pasitaikanti dujų kiekio vertė yra tarp 0.07-0.09 ir mažesnės. Tai atitinka teoriją, kad artimose galaktikose dėl žvaigždėdaros ir AGN aktyvumo procesų baldže turėtų būti likusi tik nedidelė dalis dujų. Maksimali dujų kiekio vertė yra $f_\mathrm{g} \simeq 0.52$.

Tai yra vienintelė nelabai realistiška vertė. Tačiau tai nėra blogas rezultatas: ši tėkmė yra aptikta vos 0.1 kpc nuo centro ir yra mažiausio spindulio iš viso duomenų rinkinio. Kadangi ši tėkmė dar tik pradėjo plisti, yra stebimas didesnis, nei vidutinis dujų kiekis. Taip yra todėl, nes santykinai žiūrint, artimoje AGN aplinkoje dujų kiekis baldže turi būti didesnis, nei vidutinis. Kadangi, kaip parodyta 4.1.1, generuojant dirbtines tėkmes galaktikos virialinės masės ir baldžo masės buvo sukonstruojamos pagal žinomus šių fizikinių dydžių sąryšius su SMBH mase, todėl neuroninis tinklas galaktikos bei baldžo mases pagrinde turėtų nustatinėti iš šio dydžio. Todėl net ir tokiu tėkmės plitimo scenarijumi, kur dujų kiekis neįprastai didelis, galaktikos masė vis tiek yra nustatoma gerai (tai yra pavaizduota 4.2.3 skyrelyje), o dėl to iš žinomos tėkmės masės ir dujų kiekis yra įvertinamas teisingai.

5.3 Reikalingi patobulinimai

Siekiant gauti geresnius neuroninio tinklo rezultatus ateityje reikėtų sugeneruoti duomenų bazę, kurioje būtų praplėstos kintančių parametrų vertės. Yra tikėtina, kad modelis dėl galimų parametrų verčių trūkumo nepakankamai gerai mokosi. Kaip aptarta 4.2.3 skyrelyje ir iš 15 pav. bei 16 pav. matyti, kad dažniausiai pasitaikančios aktyvumo trukmės t_{q} ir tėkmės ervdinio kampo dalies δ_{AGN} vertės yra ties mažiausia mokyta verte ir dar mažesnės, todėl gali būti, kad nėra pakankamai tiksliai atskirtos tarpusavyje. Be to, AGN aktyvumo trukmė bei laikas, kurį AGN praleidžia aktyvioje fazėje, labai plačiai paveikia $\dot{M}$ ir L_{AGN} ribas, taigi naudoti t_{q} ir δ_{AGN} rinkiniai yra per maži tiksliam sąryšiui atkurti.

Tėkmių generavimo modelį taip pat galima būtų patobulinti įtraukiant skirtingų baldžo tankių skaičiavimo funkcijas, nes dabar naudojamas izoterminis baldžo profilis gali būti nepakankamai tikslus aprašant visų galaktikų tankio pasiskirstymą, o su kitomis tankio profilio funkcijomis šis modelis kartu su neuroniniu tinklu dar nebuvo ištirtas. Be to, galaktikų baldžai ir halai nėra sferiški, todėl realybėje ir tėkmės ne visomis kryptimis plinta vienodai, pavyzdžiui, prie vieno baldžo krašto tėkmė dar bus jame, o kitą jau gali būti palikus. Dėl dujų retumo hale, pasikeistų tėkmių greičiai ir dėl to suminės tėkmės savybės būtų šiek tiek kitokios. Dėl tos pačios priežasties į modelį reikėtų įtraukti ir galaktikos disko egzistavimą. Kol kas šis modelis turėtų geriausiai tikti didesnėms elipsinėms galaktikoms. Nors ir buvo tiksliai atkurti δ_{AGN}, bet jie aprašė tik vieną galaktikos evoliucijos etapą, o galima būtų papildyti tėkmių generavimo modelį taip, kad einant laikui, po truputį mažėtų dujų kiekis bei AGN aktyvumo trukmė arba/ir didėtų tarpai tarp aktyvumo epizodų. Tokiu būdu būtų galima palyginti rezultatus su visais [50] staipsnyje pristatytais intervalais. Kadangi šiame darbe aprašomas tėkmių generavimo modelis jau sugebėjo gerai atkurti δ_{AGN}, tai jo papildymas galėtų turėti labai didelį skaičiavimų laiko pranašumą.

6 Išvados

Atlikus tėkmių modeliavimą bei neuroninio tinklo skaičiavimus, padarytos tokios išvados:

- Pristatoma 38396 tėkmių modelių duomenų bazė plačiai padengia galimus realių galaktikų parametrų intervalus, kurie atitinka stebimus tėkmių duomenis.
- Atkurtas tėkmės masės pernašos spartos ir aktyvaus galaktikos branduolio šviesio sąryšis atitinka stebėjimų duomenimis gaunamą sklaidą, kurią galima paaiškinti galaktikos parametrų ir aktyvaus galaktikos branduolio aktyvumą nusakančių parametrų įvairove.
- Pristatomas neuroninio tinklo modelis geba gerai atkurti galaktikos aktyvumo istoriją dirbtiniams tėkmių savybes aprašantiems duomenims.
- Neuroninio tinklo modelis geba gerai atkurti visus tėkmių parametrus daugumai iš stebėjimų gautų tėkmių. Norint tiksliai įvertinti neuroninio tinklo patikimumą atspėjant parametrus stebėjimų duomenims, būtini tikslesni masės pernašos spartos stebėjimai.

Literatūros sąrašas

[1] G. A. Shields, A Brief History of Active Galactic Nuclei, **111**(760), 661–678 (1999).

[2] D. Lynden-Bell, Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars, **223**(5207), 690–694 (1969).

[3] K. Zubovas, A. R. King, The M-σ relation between supermassive black holes and their host galaxies, General Relativity and Gravitation **51**(5), 65 (2019).

[4] S. Veilleux, A. Bolatto, F. Tombesi, M. Meléndez, E. Sturm, E. González-Alfonso, J. Fischer, D. S. N. Rupke, Quasar Feedback in the Ultraluminous Infrared Galaxy F11119+3257: Connecting the Accretion Disk Wind with the Large-scale Molecular Outflow, **843**(1), 18 (2017).

[5] A. Fluetsch, R. Maiolino, S. Carniani, A. Marconi, C. Cicone, M. A. Bourne, T. Costa, A. C. Fabian, W. Ishibashi, G. Venturi, Cold molecular outflows in the local Universe and their feedback effect on galaxies, **483**(4), 4586–4614 (2019).

[6] N. J. McConnell, C.-P. Ma, Revisiting the Scaling Relations of Black Hole Masses and Host Galaxy Properties, **764**(2), 184 (2013).

[7] K. Bandara, D. Crampton, L. Simard, A Relationship Between Supermassive Black Hole Mass and the Total Gravitational Mass of the Host Galaxy, **704**(2), 1135–1145 (2009).

[8] T. A. Davis, A figure of merit for black hole mass measurements with molecular gas, **443**(1), 911–918 (2014).

[9] C. Cicone, R. Maiolino, E. Sturm, J. Graciá-Carpio, C. Feruglio, R. Neri, S. Aalto, R. Davies, F. Fiore, J. Fischer, S. García-Burillo, E. González-Alfonso, S. Hailey-Dunsheath, E. Piconcelli, S. Veilleux, Massive molecular outflows and evidence for AGN feedback from CO observations, **562**, A21 (2014).

[10] K. Zubovas, A. King, The small observed scale of AGN-driven outflows, and inside-out disc quenching, **462**(4), 4055–4066 (2016).

[11] A. C. Fabian, Active Galactic Nuclei, Proceedings of the National Academy of Science **96**(9), 4749–4751 (1999).

[12] A. R. King, Black hole outflows, **402**(3), 1516–1522 (2010).

[13] F. Fiore, C. Feruglio, F. Shankar, M. Bischetti, A. Bongiorno, M. Brusa, S. Carniani, C. Cicone, F. Duras, A. Lamastra, V. Mainieri, A. Marconi, N. Menci, R. Maiolino, E. Piconcelli, G. Vietri, L. Zappacosta, AGN wind scaling relations and the co-evolution of black holes and galaxies, **601**, A143 (2017).

[14] A. King, K. Pounds, Powerful Outflows and Feedback from Active Galactic Nuclei, **53**, 115–154 (2015).

[15] K. Zubovas, A. King, Clearing Out a Galaxy, **745**(2), L34 (2012).

[16] A. King, C. Nixon, AGN flickering and chaotic accretion, **453**(1), L46–L47 (2015).

[17] C. M. Harrison, D. M. Alexander, J. R. Mullaney, A. M. Swinbank, Kiloparsec-scale outflows are prevalent among luminous AGN: outflows and feedback in the context of the overall AGN population, **441**(4), 3306–3347 (2014).

[18] K. Zubovas, S. Nayakshin, Energy- and momentum-conserving AGN feedback outflows, **440**(3), 2625–2635 (2014).

[19] C.-A. Faucher-Giguère, E. Quataert, The physics of galactic winds driven by active galactic nuclei, **425**(1), 605–622 (2012).

[20] A. R. King, K. Zubovas, C. Power, Large-scale outflows in galaxies, **415**(1), L6–L10 (2011).

[21] K. Zubovas, A. King, Clearing Out a Galaxy, **745**(2), L34 (2012).

[22] D. S. N. Rupke, K. Gültekin, S. Veilleux, Quasar-mode Feedback in Nearby Type 1 Quasars: Ubiquitous Kiloparsec-scale Outflows and Correlations with Black Hole Properties, **850**(1), 40 (2017).

[23] E. González-Alfonso, J. Fischer, H. W. W. Spoon, K. P. Stewart, M. L. N. Ashby, S. Veilleux, H. A. Smith, E. Sturm, D. Farrah, N. Falstad, M. Meléndez, J. Graciá-Carpio, A. W. Janssen, V. Lebouteiller, Molecular Outflows in Local ULIRGs: Energetics from Multitransition OH Analysis, **836**(1), 11 (2017).

[24] D. Lutz, E. Sturm, A. Janssen, S. Veilleux, S. Aalto, C. Cicone, A. Contursi, R. I. Davies, C. Feruglio, J. Fischer, A. Fluetsch, S. Garcia-Burillo, R. Genzel, E. González-Alfonso, J. Graciá-Carpio, R. Herrera-Camus, R. Maiolino, A. Schruba, T. Shimizu, A. Sternberg, L. J. Tacconi, A. Weiß, Molecular outflows in local galaxies: Method comparison and a role of intermittent AGN driving, **633**, A134 (2020).

[25] A. W. Janssen, N. Christopher, E. Sturm, S. Veilleux, A. Contursi, E. González-Alfonso, J. Fischer, R. Davies, A. Verma, J. Graciá-Carpio, R. Genzel, D. Lutz, A. Sternberg, L. Tacconi, L. Burtscher, A. Poglitsch, Broad [C II] Line Wings as Tracer of Molecular and Multi-phase Outflows in Infrared Bright Galaxies, **822**(1), 43 (2016).

[26] R. Aversa, A. Lapi, G. de Zotti, F. Shankar, L. Danese, Black Hole and Galaxy Coevolution from Continuity Equation and Abundance Matching, **810**(1), 74 (2015).

[27] E. Sani, A. Marconi, L. K. Hunt, G. Risaliti, The Spitzer/IRAC view of black hole-bulge scaling relations, **413**(2), 1479–1494 (2011).

[28] Z. Q. Zhou, F. K. Liu, S. Komossa, R. Cao, L. C. Ho, X. Chen, S. Li, Measuring black hole masses from tidal disruption events and testing the $M_{\rm BH} - \sigma_*$ relation, arXiv e-prints arXiv:2002.02267 (2020).

[29] B. L. Davis, A. W. Graham, E. Cameron, Black Hole Mass Scaling Relations for Spiral Galaxies. I. M $_{BH}$-M $_{*,sph}$, **873**(1), 85 (2019).

[30] B. L. Davis, A. W. Graham, E. Cameron, Black Hole Mass Scaling Relations for Spiral Galaxies. II. M $_{BH}$-M $_{*,tot}$ and M $_{BH}$-M $_{*,disk}$, **869**(2), 113 (2018).

[31] K. Zubovas, Massive outflow properties suggest AGN fade slowly, **473**(3), 3525–3535 (2018).

[32] K. Schawinski, M. Koss, S. Berney, L. F. Sartori, Active galactic nuclei flicker: an observational estimate of the duration of black hole growth phases of $\sim 10^5$ yr, **451**(3), 2517–2523 (2015).

[33] A. R. King, J. E. Pringle, Fuelling active galactic nuclei, **377**(1), L25–L28 (2007).

[34] S. S. Haykin, *Neural networks and learning machines* (Pearson Education, Upper Saddle River, NJ, 2009), third edition.

[35] H. Lee, C. Ekanadham, A. Y. Ng, Sparse deep belief net model for visual area v2, in J. C. Platt, D. Koller, Y. Singer, S. T. Roweis (eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems 20* (Curran Associates, Inc., 2008), 873–880.

[36] B. C. Csáji, Approximation with artificial neural networks (2001).

[37] Y. Bengio, Practical recommendations for gradient-based training of deep architectures, arXiv e-prints arXiv:1206.5533 (2012).

[38] G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani, *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R* (Springer, 2013).

[39] J. F. Navarro, C. S. Frenk, S. D. M. White, A universal density profile from hierarchical clustering, The Astrophysical Journal **490**(2), 493–508 (1997).

[40] D. Richstone, E. A. Ajhar, R. Bender, G. Bower, A. Dressler, S. M. Faber, A. V. Filippenko, K. Gebhardt, R. Green, L. C. Ho, J. Kormendy, T. R. Lauer, J. Magorrian, S. Tremaine, Supermassive black holes and the evolution of galaxies., **385**(6701), A14 (1998).

[41] P. Santini, R. Maiolino, B. Magnelli, D. Lutz, A. Lamastra, G. Li Causi, S. Eales, P. Andreani, S. Berta, V. Buat, A. Cooray, G. Cresci, E. Daddi, D. Farrah, A. Fontana, A. Franceschini,

R. Genzel, G. Granato, A. Grazian, E. Le Floc'h, G. Magdis, M. Magliocchetti, F. Mannucci, N. Menci, R. Nordon, S. Oliver, P. Popesso, F. Pozzi, L. Riguccini, G. Rodighiero, D. J. Rosario, M. Salvato, D. Scott, L. Silva, L. Tacconi, M. Viero, L. Wang, S. Wuyts, K. Xu, The evolution of the dust and gas content in galaxies, **562**, A30 (2014).

[42] B. Catinella, A. Saintonge, S. Janowiecki, L. Cortese, R. Davé, J. J. Lemonias, A. P. Cooper, D. Schiminovich, C. B. Hummels, S. Fabello, K. Geréb, V. Kilborn, J. Wang, xGASS: total cold gas scaling relations and molecular-to-atomic gas ratios of galaxies in the local Universe, **476**(1), 875–895 (2018).

[43] D. P. Kingma, J. Ba, Adam: A Method for Stochastic Optimization, arXiv e-prints arXiv:1412.6980 (2014).

[44] M. Pereira-Santaella, L. Colina, S. García-Burillo, F. Combes, B. Emonts, S. Aalto, A. Alonso-Herrero, S. Arribas, C. Henkel, A. Labiano, S. Muller, J. Piqueras López, D. Rigopoulou, P. van der Werf, Spatially resolved cold molecular outflows in ULIRGs, **616**, A171 (2018).

[45] K. M. Dasyra, F. Combes, Turbulent and fast motions of H_2 gas in active galactic nuclei, **533**, L10 (2011).

[46] L. Barcos-Muñoz, S. Aalto, T. A. Thompson, K. Sakamoto, S. Martín, A. K. Leroy, G. C. Privon, A. S. Evans, A. Kepley, Fast, Collimated Outflow in the Western Nucleus of Arp 220, **853**(2), L28 (2018).

[47] C. Cicone, C. Feruglio, R. Maiolino, F. Fiore, E. Piconcelli, N. Menci, H. Aussel, E. Sturm, The physics and the structure of the quasar-driven outflow in Mrk 231, **543**, A99 (2012).

[48] C. Feruglio, F. Fiore, R. Maiolino, E. Piconcelli, H. Aussel, D. Elbaz, E. Le Floc'h, E. Sturm, R. Davies, C. Cicone, <ASTROBJ>NGC 6240</ASTROBJ>: extended CO structures and their association with shocked gas, **549**, A51 (2013).

[49] M. Bischetti, E. Piconcelli, C. Feruglio, F. Fiore, S. Carniani, M. Brusa, C. Cicone, C. Vignali, A. Bongiorno, G. Cresci, V. Mainieri, R. Maiolino, A. Marconi, E. Nardini, L. Zappacosta, The gentle monster PDS 456. Kiloparsec-scale molecular outflow and its implications for QSO feedback, **628**, A118 (2019).

[50] C. DeGraf, D. Sijacki, Black hole clustering and duty cycles in the Illustris simulation, **466**(3), 3331–3343 (2017).

Monika Kazlauskaitė

SEARCH FOR CORRELATIONS BETWEEN ACTIVE GALACTIC NUCLEI-DRIVEN OUTFLOWS AND GALAXY PROPERTIES USING NEURAL NETWORK MODELS

Summary

Almost all galaxies host a supermassive black hole (SMBH) in their centers. If there is a huge amount of gas residing in the central area, SMBH can become active (AGN) because of an accretion disc forming around it. Energy released during accretion creates a wind that produces feedback on the host galaxy. The wind might reach up to ~ 0.05 AGN luminosity L_{AGN}, which is enough to heat the surrounding ISM and push the gas to far distances creating galactic gas outflows. In some cases outflows can drive away gas from the galactic bulge suppressing further accretion on to the SMBH and changing the evolution of the entire galaxy. To understand how galaxies evolve it is crucial to understand the processes responsible for and effects of outflows. However, in observational data we find a huge scatter around predicted empirical relations between outflow properties and AGN luminosity. There are a few analytical solutions taking into account the properties of the galaxy and the luminosity of the AGN but that alone does not explain the full variety of outflow properties. Some further investigation is needed. In the paper this problem is addressed with a one-dimensional numerical outflow simulation model and an artificial neural network. These methods together combined can help determine the evolution of observed outflows.

The goal of the paper is to present a working neural network that would help to predict the history of outflow properties. A huge database of model outflows should be prepared as well, so it could be fed to train the network which afterwards would predict correct outflow properties.

The main conclusions of this work are:

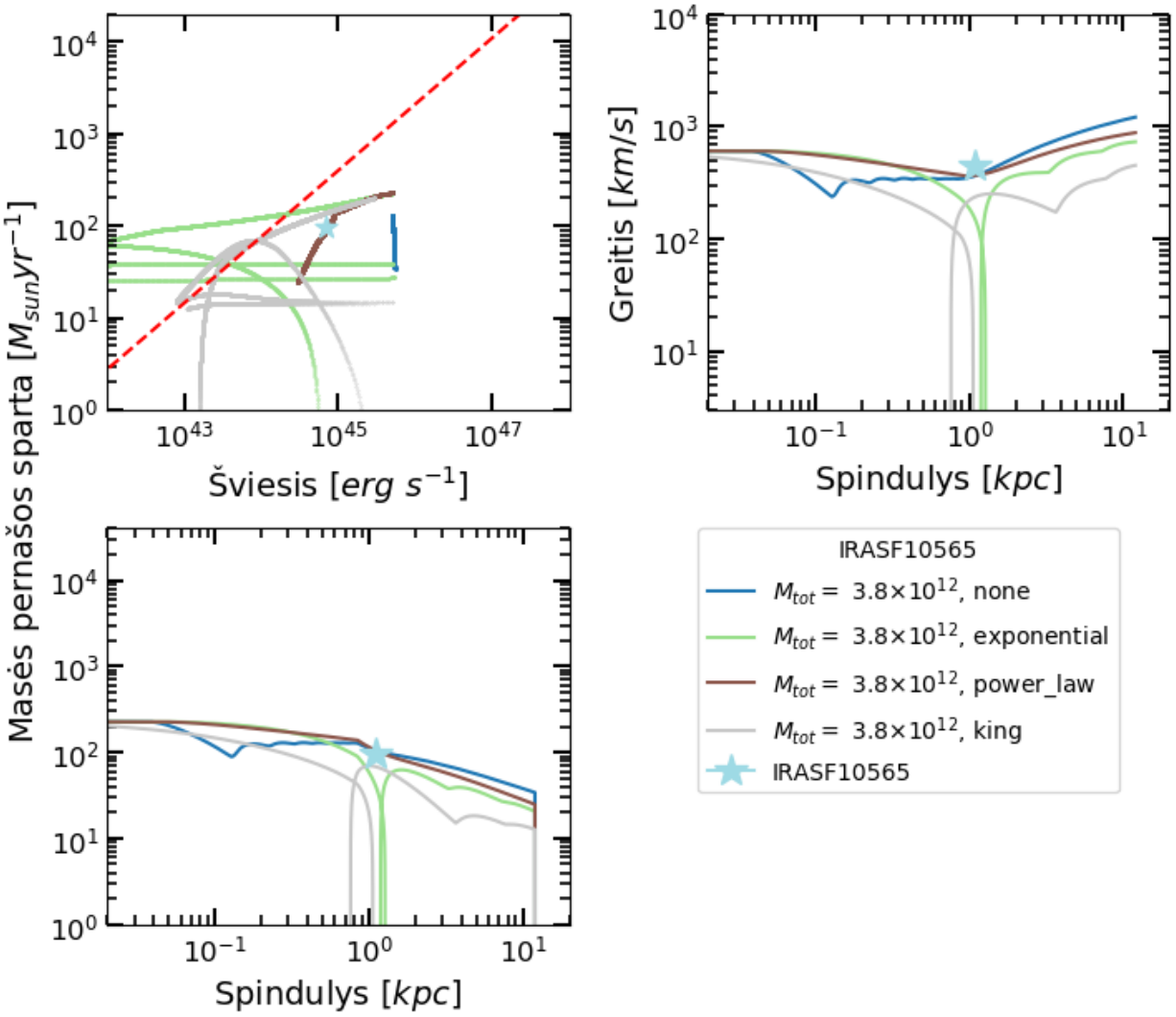
- The presented database consists of 38386 modeled outflows that covers almost all possible observed properties.
- Presented relation between mass outflow rate and luminosity of AGN show the scattering of data around predicted value and it can be explained by natural variety of galaxy and AGN activity describing parameters.
- Neural network model can derive AGN activity history well for artificially created outflow properties.
- Neural network model can derive AGN activity history well for most of the observed data. In order to evaluate the accuracy of these predictions the observed data needs to have smaller errors.

Kazlauskaitė, Monika. *Aktyvių branduolių kuriamų tėkmių ir galaktikų savybių sąryšių paieška naudojant neuroninių tinklų modelius*: Kompiuterinės fizikos ir modeliavimo bakalauro studijų programos baigiamasis darbas. Vad. Kastytis Zubovas. Vilnius: Vilniaus universitetas Fizikos fakultetas, 2020, 43p

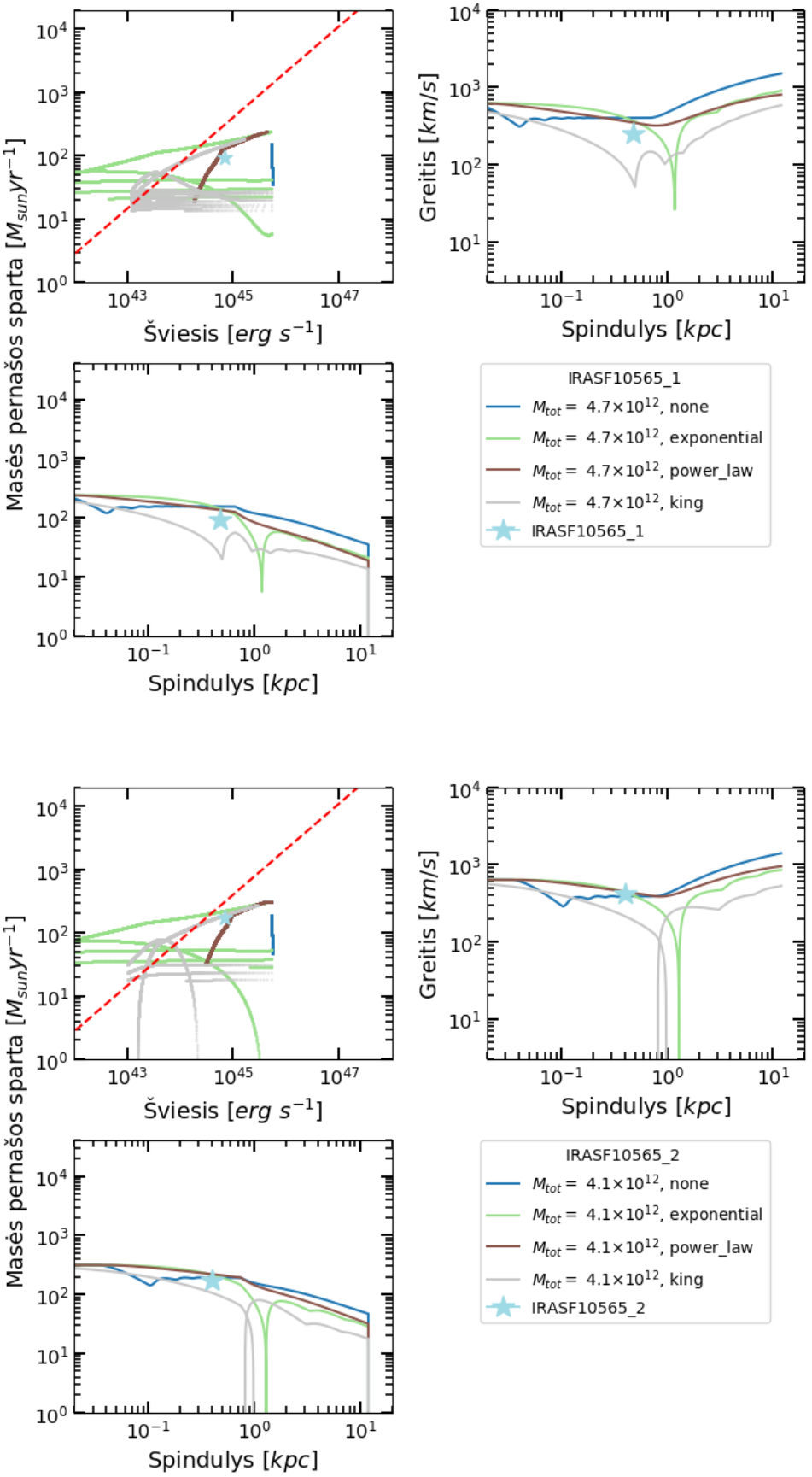
Šiame darbe skaitmeniniu vienmačiu modeliu tiriamos aktyvių galaktikos branduolių sukurtų tėkmių savybės. Pristatoma tėkmių savybių priklausomybė nuo galaktikos bei AGN aktyvumą nusakančių parametrų. Šių parametrų įvairove paaiškinama stebima tėkmių parametrų tėkmių sklaida. Neuroninio tinklo pagalba atkurta stebėjimais gautų tėkmių savybių evoliucija.

Priedas Nr. 1.

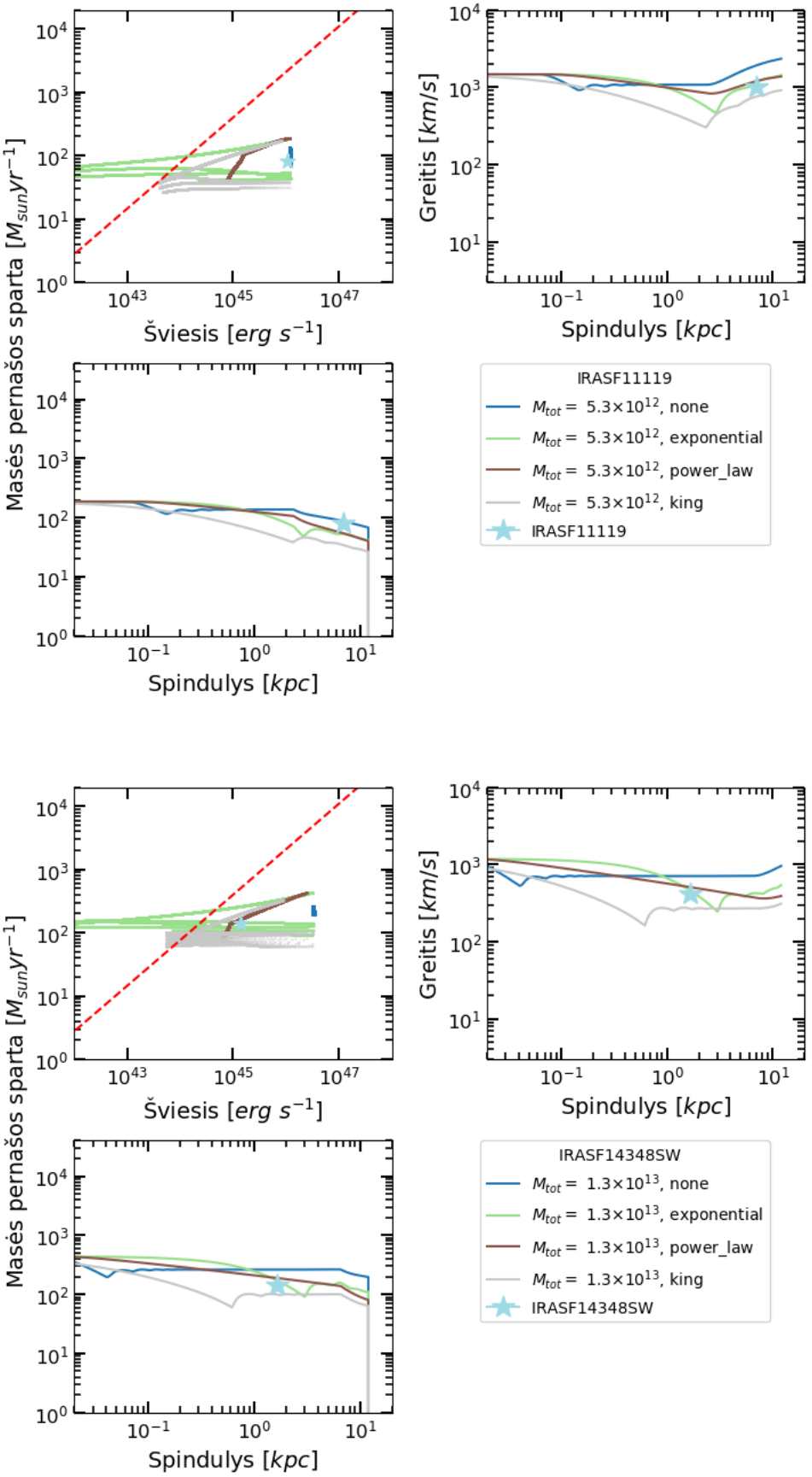
Pagalbinė medžiaga



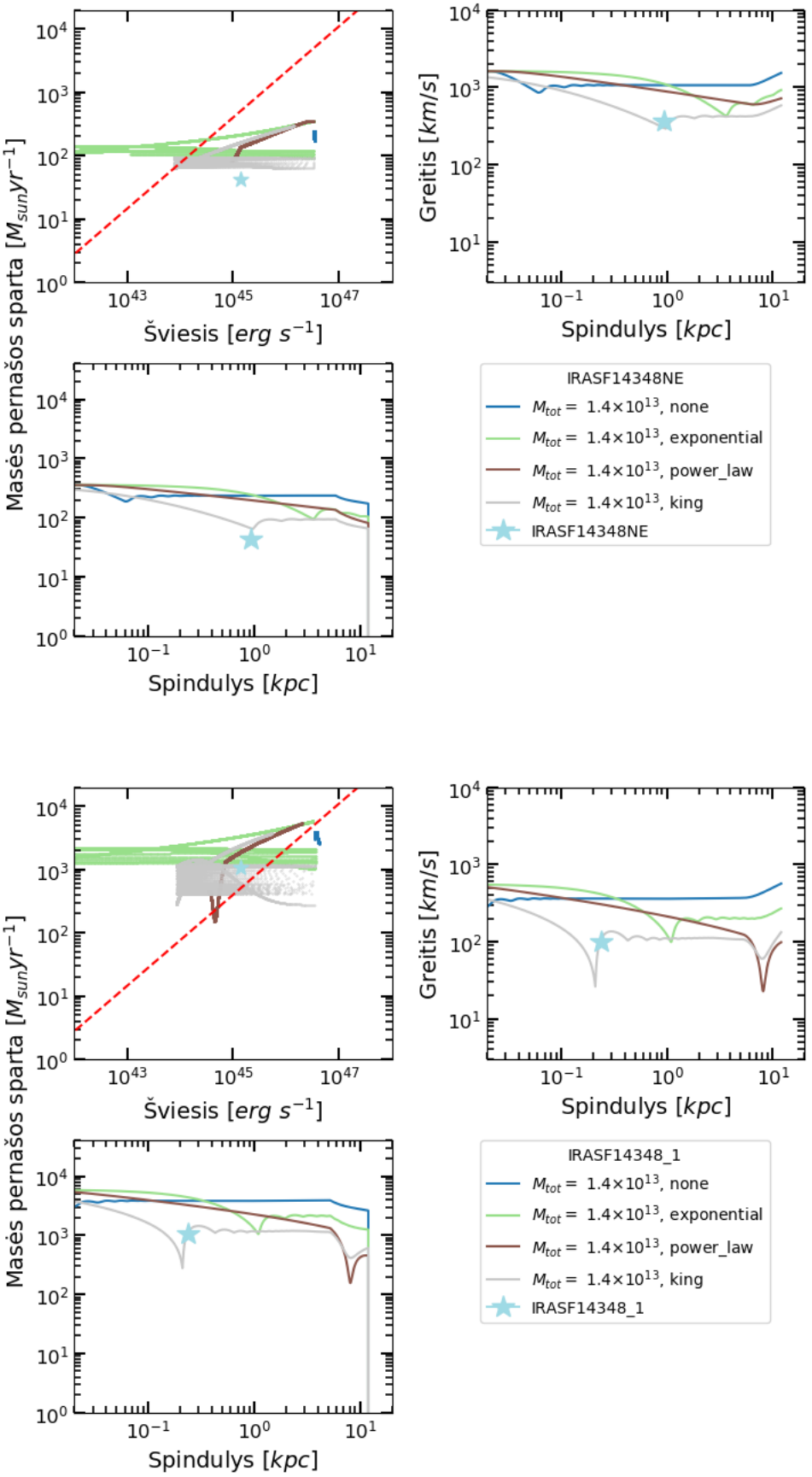
17 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautai tėkmėmei



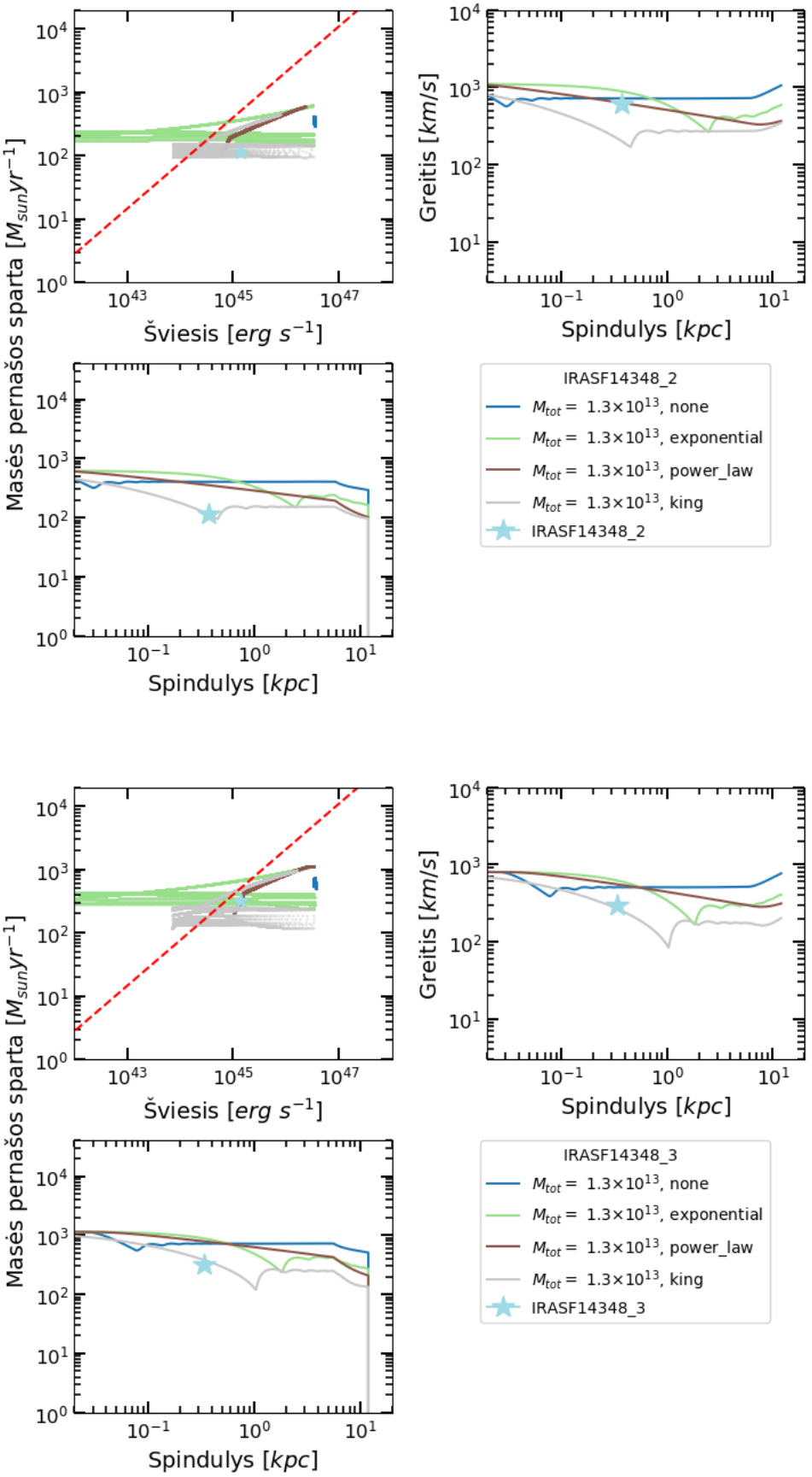
18 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



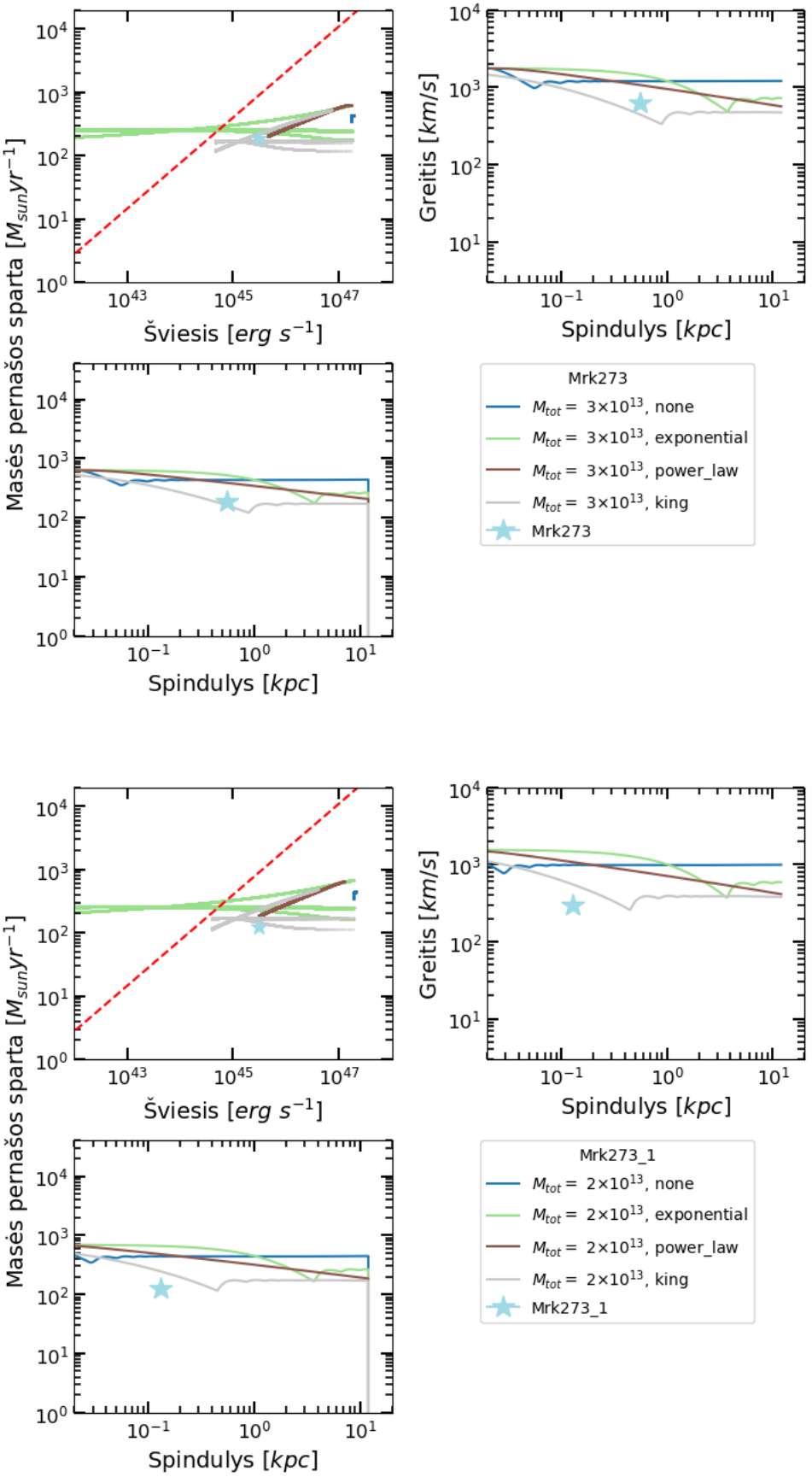
19 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



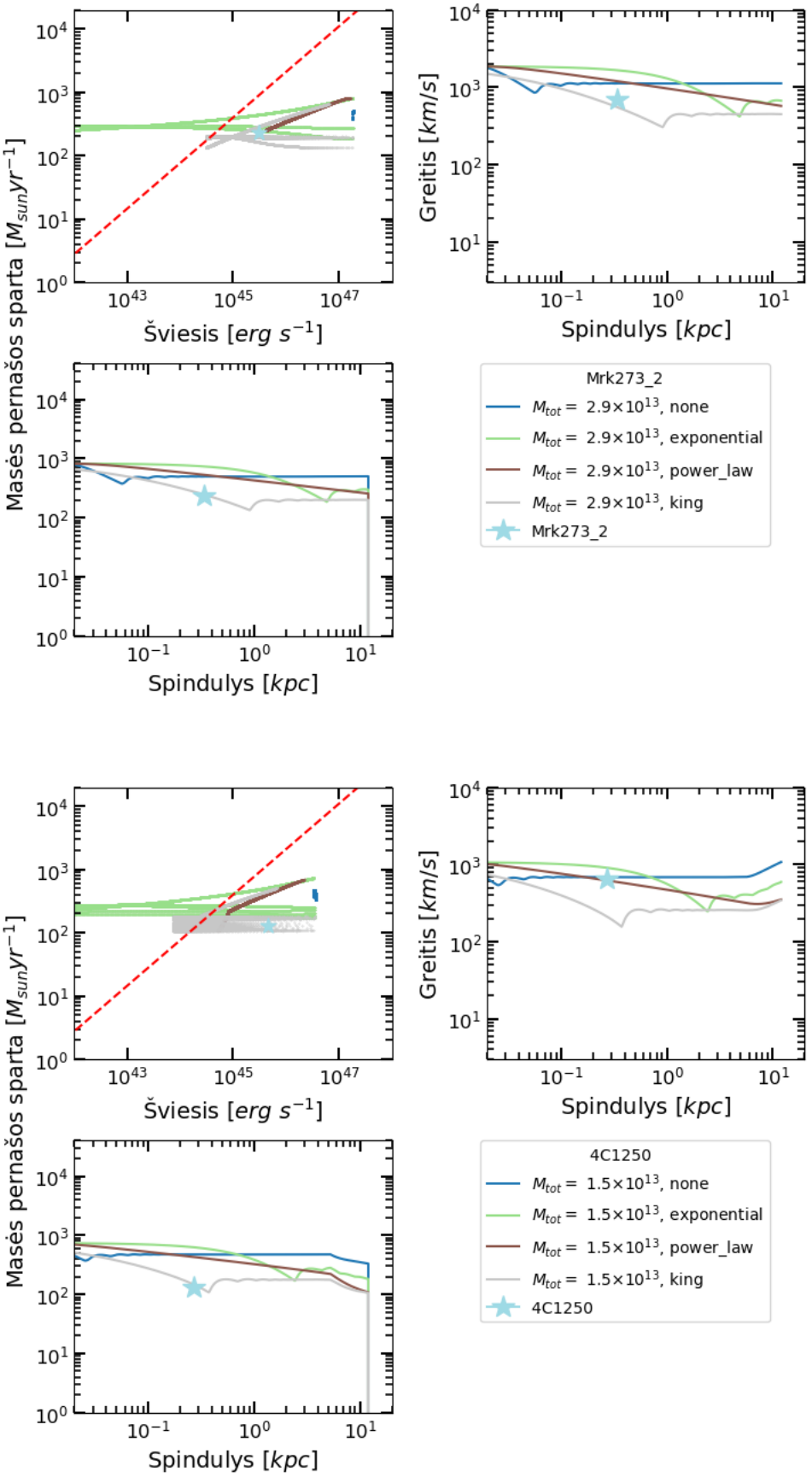
20 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



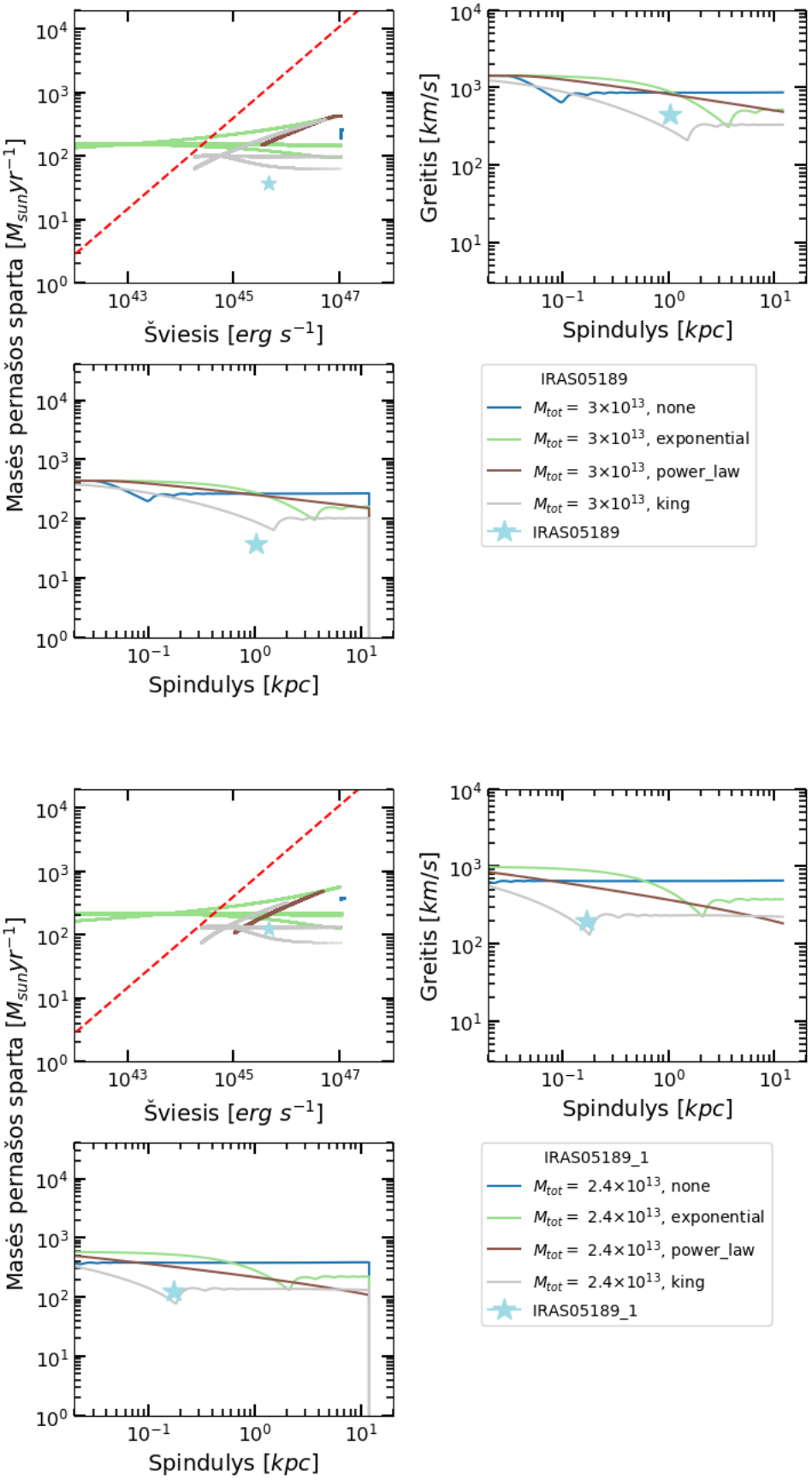
21 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



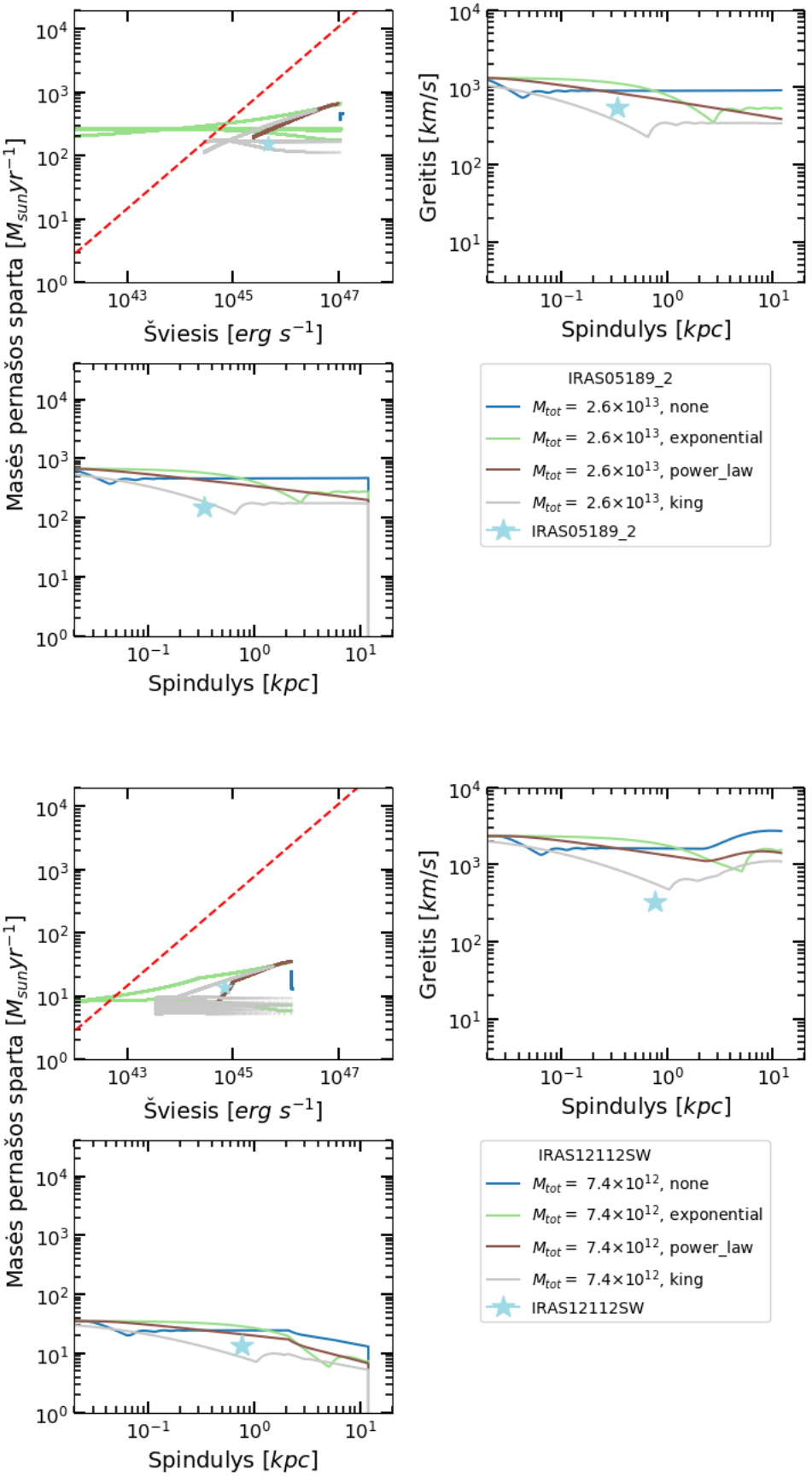
22 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



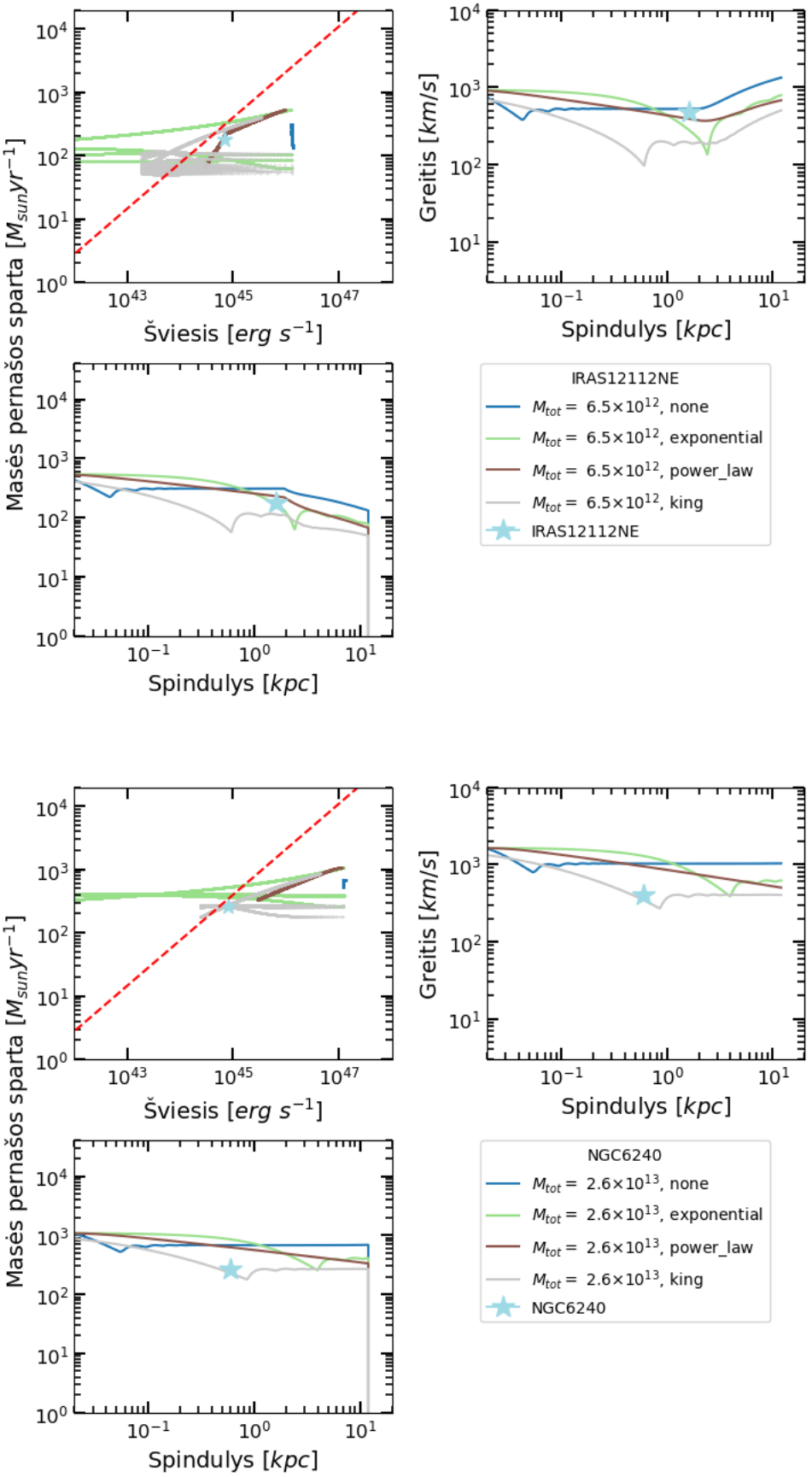
23 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



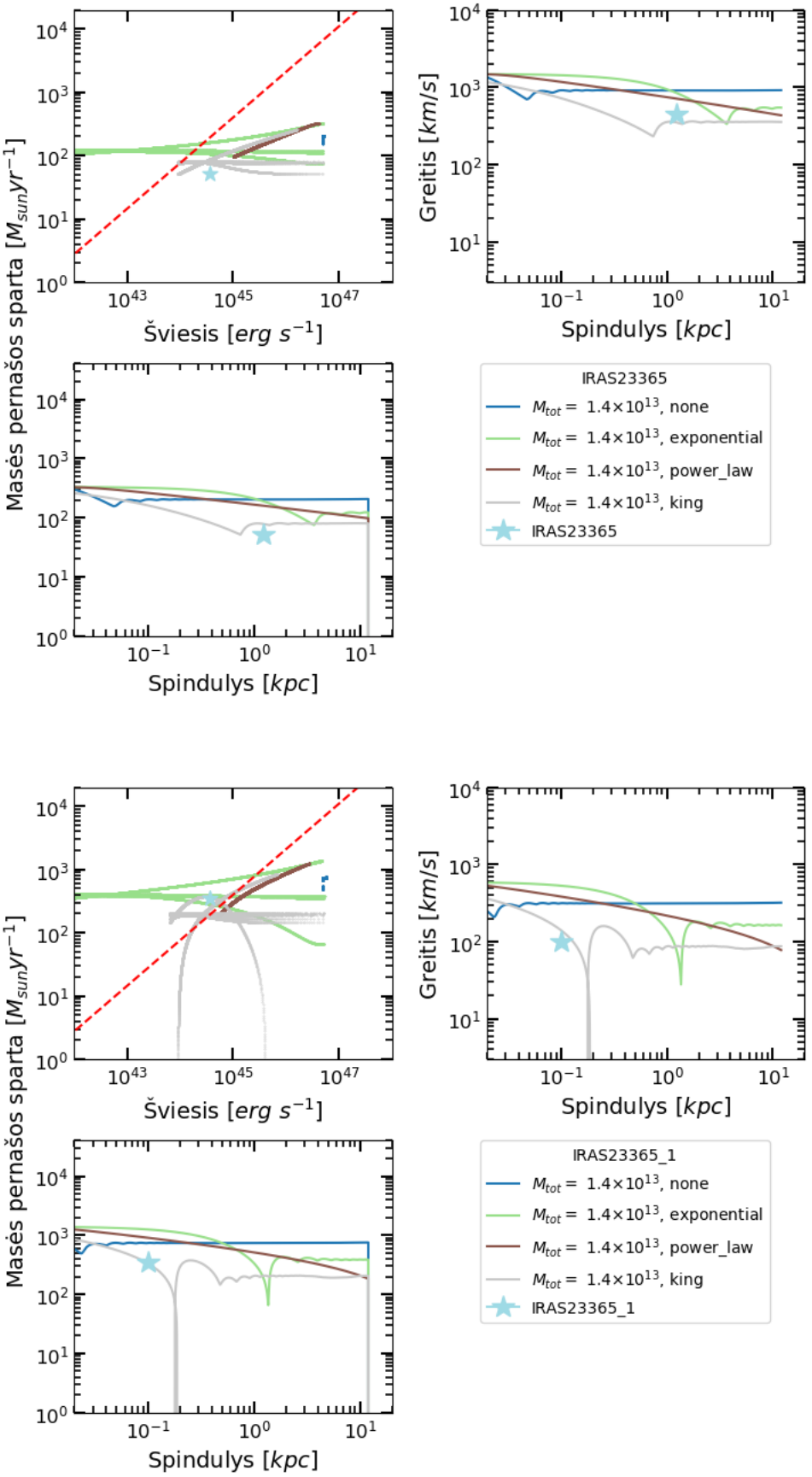
24 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



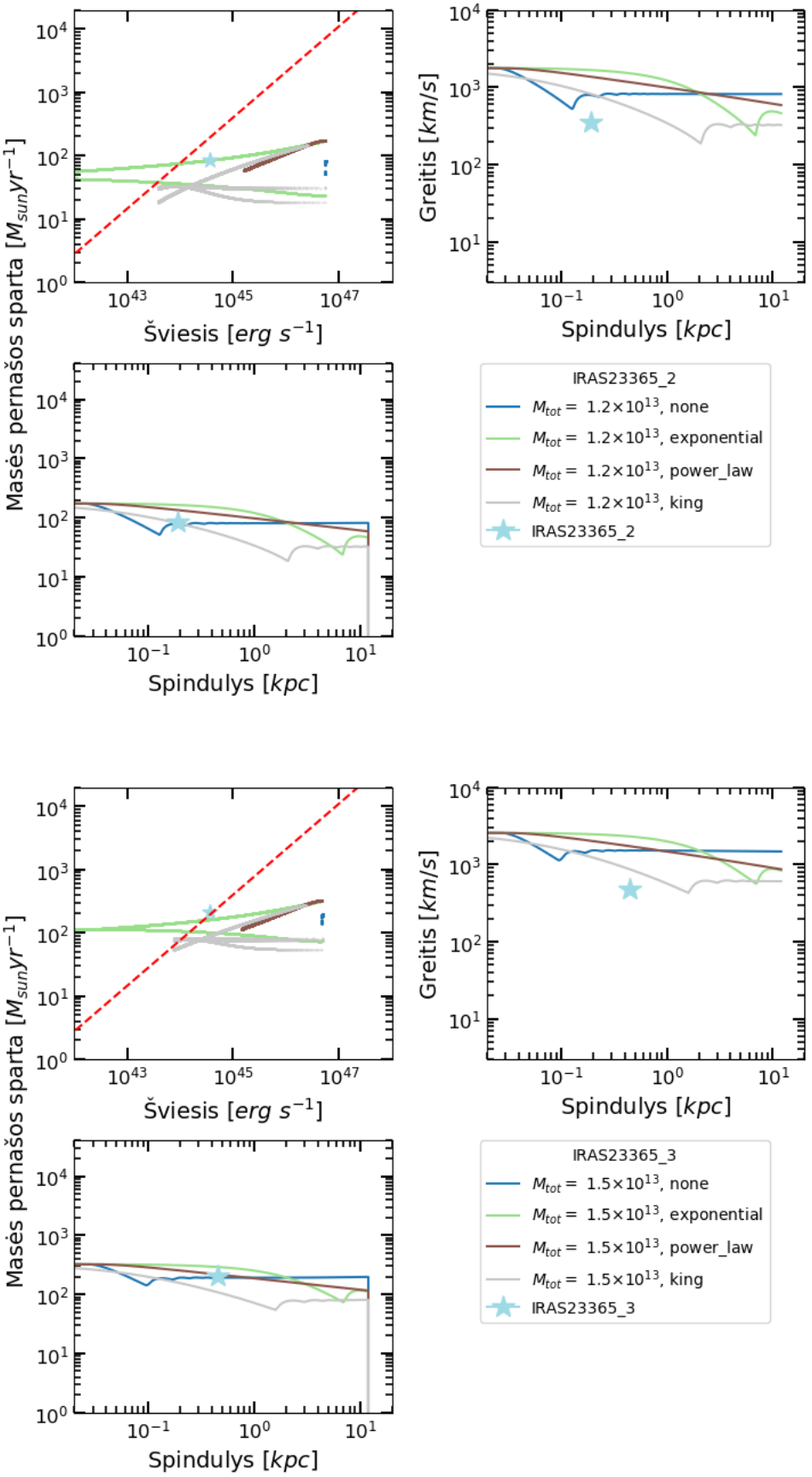
25 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



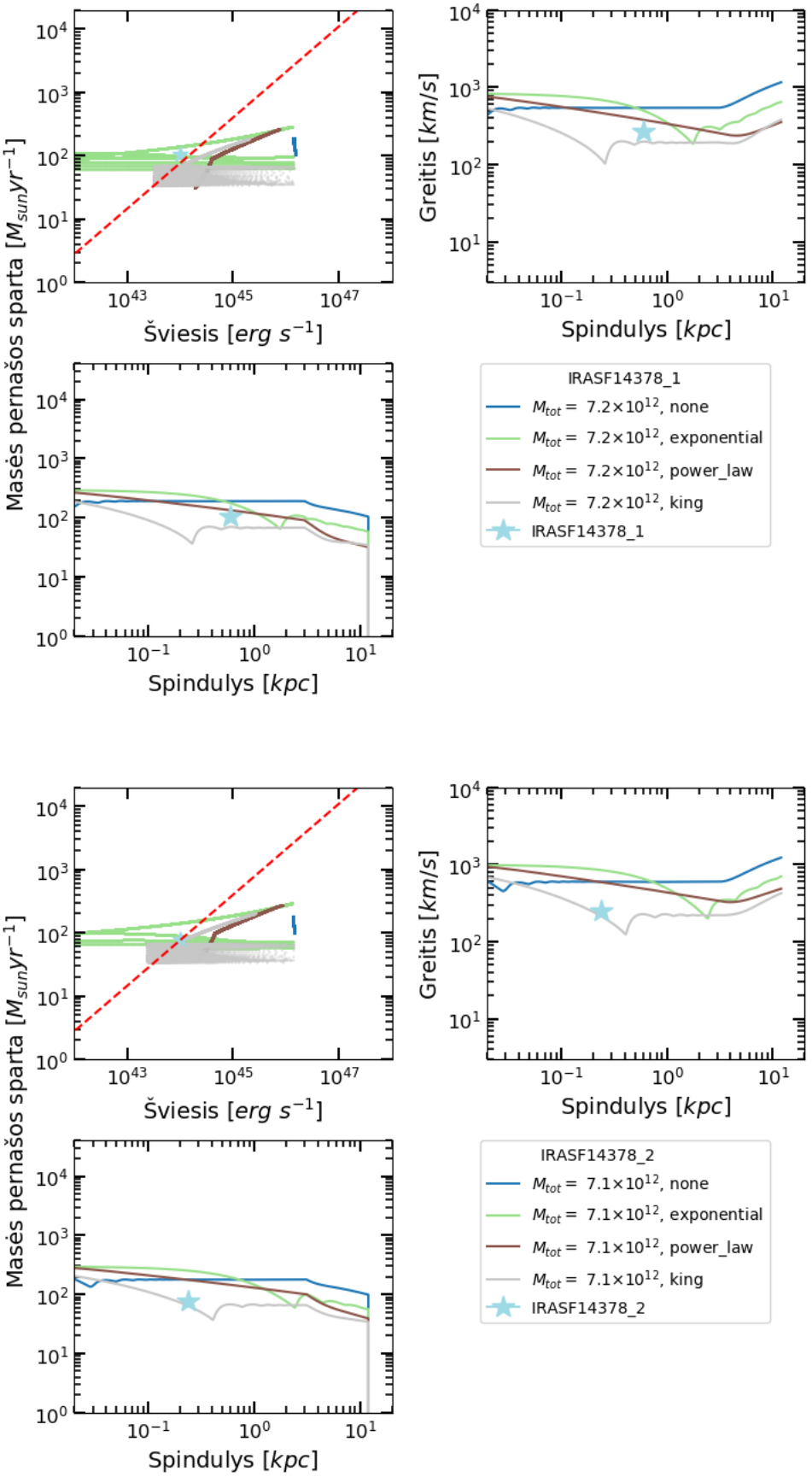
26 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



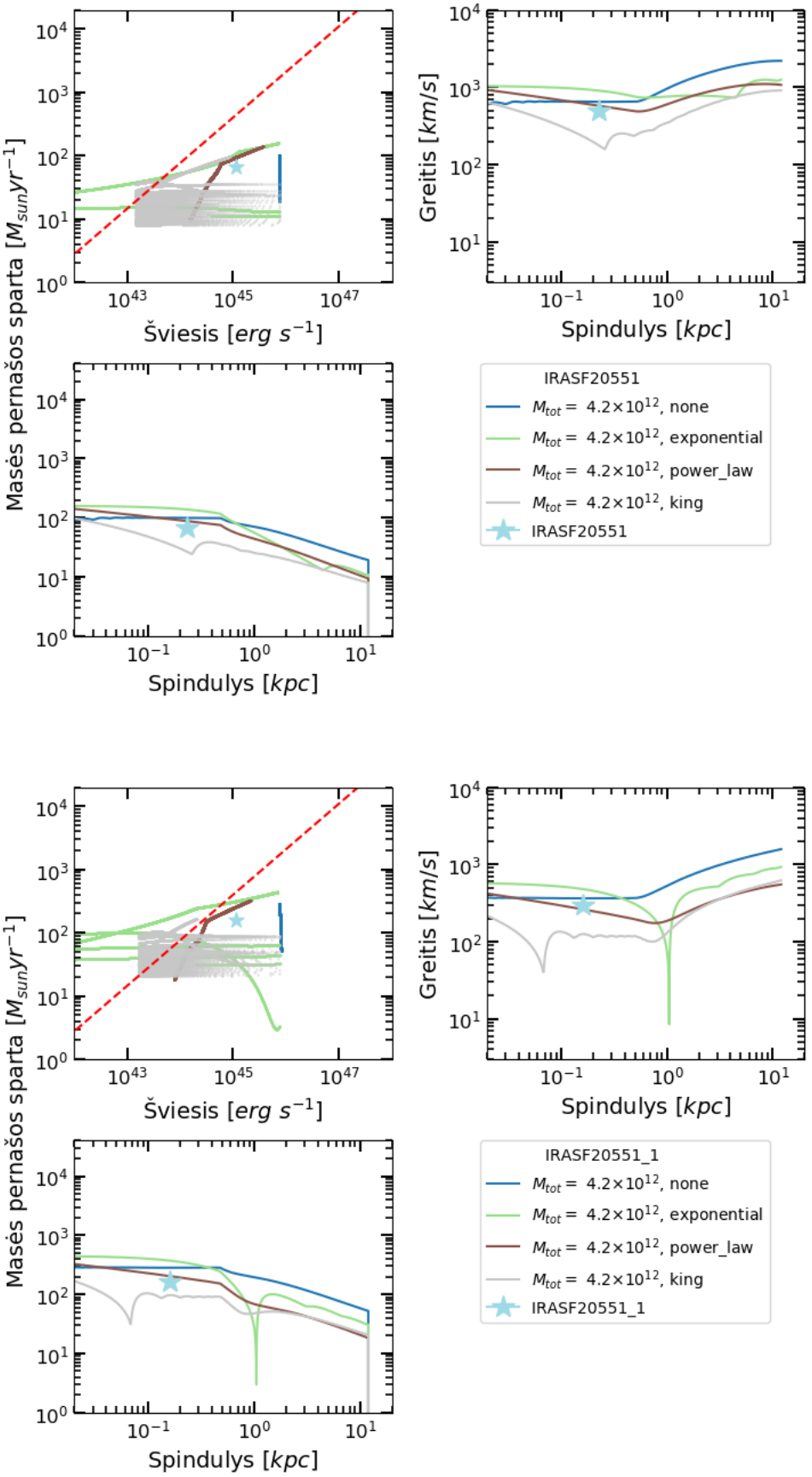
27 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



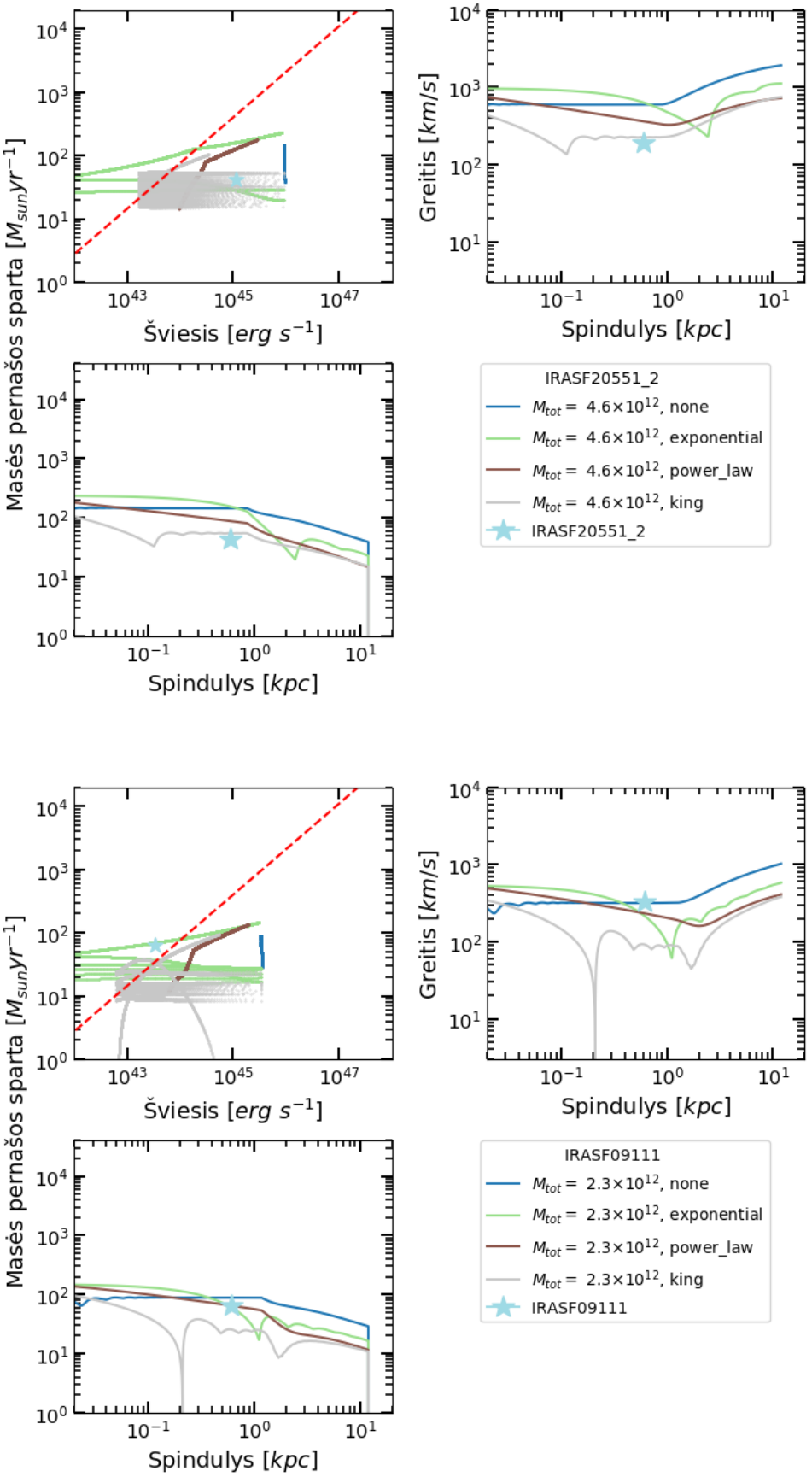
28 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



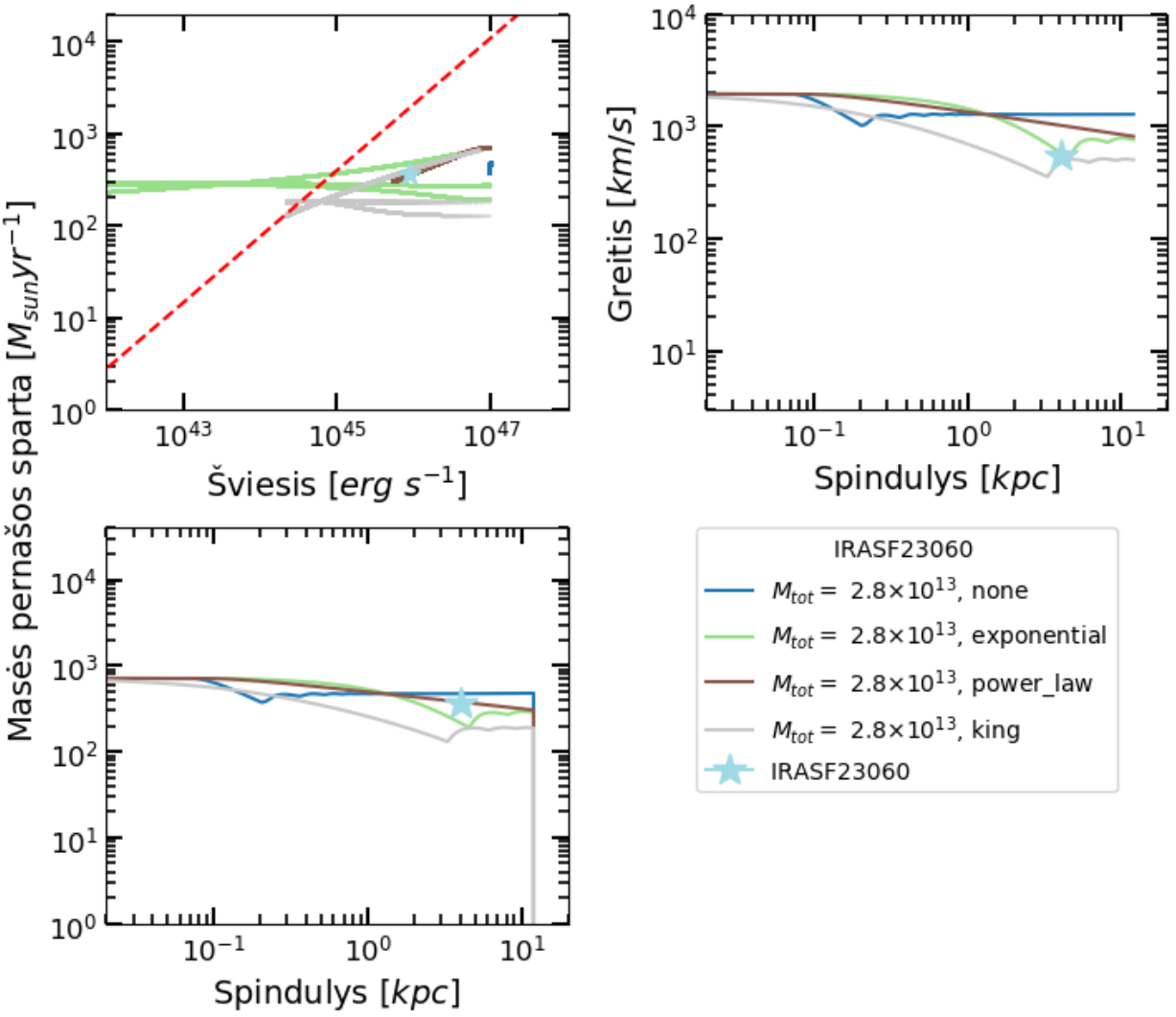
29 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



30 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



31 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautoms tėkmėms



32 pav. Sugeneruotų tėkmių savybės, remiantis neuroninio tinklo atspėtais parametrais stebjimais gautai tėkmei