

PROTO-JATE IN NASTANEK JATE GALAKSIJ

NINA BAVDAŽ

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Velike skupine galaksij, ki jim pravimo jate galaksij, nastanejo iz zametkov in kolapsa prvih struktur v vesolju. Iz podatkov v izbrani simulaciji se lahko oceni, kolikšna je velikost območja znotraj katerega se na visokih rdečih premikih ($z \sim 2.5$) nahaja snov in iz katerega bo potem pri nizkih rdečih premikih nastala jata galaksij. Velikost območij je preverjena na štirih jatah galaksij z različnimi masami, ki se jim v simulaciji lahko sledi na območju $0 \leq z \leq 2.73$. V članku je tudi prikazano, kako se spreminjajo radij, temperatura ter deleža plina in zvezd v evoluciji jate galaksij ter do katerih sprememb v teh količinah pride, ko se zgodijo trki med jatami ali med jato in manjšo skupino galaksij.

PROTOCLUSTERS AND FORMATION OF GALAXY CLUSTERS

Large groups of galaxies, called galaxy clusters, are formed from the collapse of the first structures in the universe. From the data in the selected simulation, it is possible to estimate the size of the region within which the matter is located at high redshifts ($z \sim 2.5$) and from which galaxy clusters form at low redshifts. The size of the regions is checked on four galaxy clusters with different masses, followed in the range of $0 \leq z \leq 2.73$. The article also shows how the radius, temperature, and proportion of gas and stars in the evolution of a galaxy cluster change, and what changes in these quantities when there are collisions between galaxy clusters or between a galaxy cluster and a small group of galaxies.

1. Uvod

V vesolju hladne temne snovi s kozmološko konstanto, se strukture, ki jih vidimo danes, izoblikujejo iz protojat s hierarhično rastjo, kjer se manjše strukture združujejo v večje. Protojate so gost sistem več deset galaksij v zgodnjem vesolju, ki se skozi čas izoblikujejo v jato. V območjih prvotnih zgoščin snovi temna snov tvori haloje. V središču teh halojev se barioni ohladijo in tvorijo zvezde. Gravitacija povzroči zbiranje teh zvezd, ki kasneje ustvarijo galaksije. Haloji temne snovi se združijo in tvorijo večje haloje. Galaksije v teh halojih se lahko združijo ali pa postanejo sateliti, ki krožijo okoli najmasivnejših galaksij znotraj haloja. Danes najbolj množični haloji v vesolju vsebujejo od nekaj sto do nekaj tisoč satelitskih galaksij, in jih poznamo kot jate galaksij. Jate galaksij so največje gravitacijsko vezane strukture v vesolju z značilnimi masami od $10^{14}M_{\odot}$ do $10^{15}M_{\odot}$, ki vsebujejo temno snov, vroči rentgenski plin in galaksije. Jate galaksij, ki jih vidimo danes, nastanejo iz območij v velikosti med 10 do 50 Mpc [1], [13].

Jate galaksij igrajo pomembno vlogo v številnih vidikih ekstragalaktične astrofizike in kozmologije. Zaradi njihove ekstremne narave omogočajo merjenje lastnosti samega vesolja. So fascinantni kozmološki laboratoriji za razumevanje interakcij galaksij, gravitacije, plazme, aktivnih galaktičnih jeder, supermasivnih črnih lukenj in tvorbe zvezd. V ekstragalaktični astrofiziki so jate ključne za sledenje nastanku najbolj masivnih halojev temne snovi, galaksij in supermasivnih črnih lukenj [1]. Struktura članka je naslednja: lastnosti jat in protojat, vključno s hlajenjem plina, temperaturo, nastankom zvezd ter trki med jatami galaksij so opisane v poglavju 2. Simulacije in metode dela so opisane v poglavju 3. Rezultati simulacij so predstavljeni v poglavju 4. Diskusija dobljenih rezultatov v povezavi s teorijo je predstavljena v poglavju 5.

2. Jate galaksij

2.1 Lastnosti jat in protojat

Jate galaksij so pri nizkih rdečih premikih virializirane¹ strukture s skupno maso $M \geq 10^{14} M_{\odot}$. Sisteme z masami med $\sim 10^{13} M_{\odot}$ in $\sim 10^{14} M_{\odot}$ pa imenujemo skupine galaksij. Masna funkcija halojev² je pri velikih masah zelo strma, zato razlikovanje med skupinami in jatami pomaga lažje slediti njihovem razvoju v primerjavi s teoretičnimi modeli ali kozmološkimi simulacijami [1].

Protojata je struktura, ki je prav tako sestavljena iz galaksij in je v primerjavi z okolico zelo gosta. Na neki točki bo kolapsirala v jato galaksij. Za vsako opaženo protojato je običajno veliko drugih, ki še niso razvile občutnega kontrasta gostote³, prav tako je treba upoštevati, da je veliko virializiranih jat še vedno obkroženih z drugim materialom, ki mora še vedno postati del jate. V teh primerih bi lahko protojato obravnavali kot veliko večjo regijo, ki vključuje celotno strukturo. Kaj natančno tvori protojato je zato možno natančno opredeliti le v teoriji in simulacijah in ne v opazovanjih. Podatki iz opazovanj pogosto ne zadostujejo za popolno gotovost ali imamo opravka s predhodnikom jate. Da bi lahko strukturo uvrstili v protojato, ne potrebujemo le podrobnega znanja o samem oddaljenem objektu, temveč tudi o njegovem potomcu v današnjem času. Še posebej slednje predstavlja resen izziv, ki ga je običajno mogoče reševati le na statističen način, ne pa na podlagi posameznega objekta. Za manjše rdeče premike galaksij to ni težava, saj prisotnost rdeče sekvence jate, hitrostna razpršitev galaksij, rentgenski učinek ali gravitacijsko lečenje običajno zagotavljajo dovolj natančne omejitve glede mase sistema in njegovega dinamičnega in evolucijskega stanja [1, 15].

Protojate ležijo na presečišču gostih, s plinom bogatih filamentov⁴. Galaksije se v območjih z večjo gostoto ponavadi tvorijo prej kot galaksije, ki imajo isto maso, v manj gostih območjih. Pričakujejo se lahko tudi razlike med galaksijami v in zunaj jat galaksij, kar je odvisno od vplivov iz okolja, ki se pojavljajo v predelih z visoko gostoto snovi. Galaksije v jatah so imele bolj zanimivo zgodovino kot galaksije zunaj jat, saj je pri galaksijah znotraj jat pogosteje prihajalo do trkov [1, 13].

2.2 Temperatura, plin in nastanek zvezd

Rentgenska opazovanja so pokazala prisotnost velikih količin intergalaktičnega plina, znanega kot jatni plin, ki predstavlja 9% celotne mase jate galaksij. Jatni plin je sestavljen iz barionske snovi, v kateri prevladujeta ioniziran vodik in helij, obogaten pa je tudi s težjimi elementi, vključno z železom. Preučevanje kemične sestave jatnega plina kot funkcije polmera je pokazalo, da so jedra jat galaksij bolj kovinsko bogata kot pa območja pri večjih polmerih. Zaradi gravitacijskega polja jat galaksij plin, obogaten s kovinami, ki se izločijo iz supernov in aktivnih galaktičnih jeder, ostane gravitacijsko vezan na jato kot del jatnega plina. Ta plin je zelo vroč (med 10^7 K in 10^8 K), zato oddaja rentgenske žarke v obliki zavornega sevanja in atomskih emisijskih črt. Vroča plazma oddaja rentgenske žarke, ki jih lahko zaznajo rentgenski teleskopi. Plin jate se lahko preučuje z uporabo rentgenskega slikanja in rentgenske spektroskopije. V jatah galaksij je plin v približno hidrostatskem ravnovesju s celotnim gravitacijskim poljem jate, zato je možno določiti skupno porazdelitev mase.

¹Sistem gravitacijsko interagirajočih delcev je stabilen, kar se zgodi v primeru, ko je potencialna energija enaka dvakratniku kinetične energije (virialni teorem).

²Masna funkcija halojev v danem obdobju predstavlja skupno številčno gostoto halojev temne snovi kot funkcijo mase halojev in igra pomembno vlogo v kozmologiji zaradi občutljivosti na številne pomembne parametre, vključno z gostoto snovi vesolja Ω_m , Hubblovim parametrom h , spektralnim indeksom prvotnega spektra moči n_s in enačbo stanja temne energije.

³Kontrast gostote je parameter, ki označuje lokalno povečanje gostote v primerjavi s povprečno gostoto vesolja. Definiramo ga kot $\Delta = \delta\rho/\rho$, kjer $\delta\rho$ predstavlja lokalno povečanje gostote, ρ pa povprečno gostoto vesolja.

⁴Filamenti so masivne nitaste strukture barionske in temne snovi z značilno dolžino od 50 do 80 Mpc, ki tvorijo meje med velikimi prazninami v vesolju. Sestavljeni so iz gravitacijsko vezanih galaksij, redkega medgalaktičnega plina in temne snovi.

Izkaže se, da je skupna masa približno šestkrat večja od mase galaksij ali vročega plina. Manjkajoča komponenta je znana kot temna snov [5].

Temna snov je glavna sestavina jat galaksij in predstavlja 90% celotne mase v jati galaksij. Dokazuje za temno snov v jatah galaksij je prvi odkril Zwicky pred več kot 90 leti. Od takrat so se jate galaksij izkazale kot ključni laboratorij za preučevanje lastnosti in narave te neznane snovi [5].

Zvezde nastanejo iz hladnega plina, zato se mora jatni plin ohladiti. S sevalnim hlajenjem, ki zmanjšuje termalno energijo v oblaku plina, se bo temperatura plina zmanjšala iz virialne temperature haloja jate na temperaturo, kjer se bo lahko začela formacija zvezd, to je do temperature molekularnega oblaka vodika H_2 ($\leq 10^2\text{K}$). Emisije rentgenskih žarkov so najmočnejše v središčih jat galaksij. V nekaterih jatah galaksij je centralna hitrost hlajenja tako hitra, da stanje hidrostatičnega ravnovesja vodi do dotoka materiala proti središču jate. Ta vpliv se imenuje hladni tok. Plin v hladnem toku si lahko predstavljamo, kot počasi se premikajočo emulzijo plinastih mehurčkov z različnimi gostotami in temperaturami. Ti mehurčki počasi zdrsnejo po gravitacijskem potencialu proti središču jate, pri čemer se najhitreje ohladijo gostejši mehurčki. Gostejši mehurčki sčasoma izgubijo vso svojo toplotno energijo in tvorijo majhne, hladne molekularne oblake. Če je jedro oblaka nad Jeansovo maso⁵, se lahko zruši in ustvari zvezde majhne mase ali rjave pritlikavke. To je usoda za večino ohlajenega plina, ki je zapustil tok pri velikih polmerih. Vendar pa je v jedru toka verjetno, da oblak trči z drugim, preden ustvari stopnjo formacije zvezd, kar vodi do močne zaznave optičnih emisijskih črt in do bolj ioniziranih, masivnejših oblakov. Če so ti oblaki nad kritično maso, lahko tvorijo masivne zvezde in kroglaste kopice⁶.

Funkcija hlajenja, Λ , je:

$$|\dot{E}_{hlajenje}| = n^2 \Lambda(T), \quad (1)$$

kjer je $|\dot{E}_{hlajenje}|$ delež hlajenja (energijska gostota deljena s časom) in n je številska gostota delcev. Energijsko gostoto lahko zapišemo kot entalpijo plina $\frac{5}{2}nkT$, kjer je k Boltzmanova konstanta. Čas hlajenja je

$$t_{hlajenje} = \frac{\frac{5}{2}nkT}{n^2 \Lambda(T)}. \quad (2)$$

V središču jat galaksij je čas hlajenja približno 5×10^8 let [5, 11].

Stopnja nastajanja novih zvezd je največja med rdečima premikoma 2 in 3, s čimer se bolj podrobno ukvarjajo v članku [12]. Predvidevajo, da je stopnja med omenjenima rdečima premikoma največja zaradi kombinacije tvorbe in rasti halojev temne snovi in porazdelitve nastajanja novih zvezd v halojih kot funkcija mase haloja in rdečega premika. Slednje je odvisno od procesov, kot so akrecija plina, izguba zvezdne mase, sevalno hlajenje, (ponovna) ionizacija in odtoki, ki jih poganjajo supernove in aktivna galaktična jedra. Prav tako naj bi med rdečima premikoma 2 in 3 populacija kvazarjev dosegla svoj vrh. Od rdečega premika 2 naprej pa delež zvezd v jati ostane približno konstanten.

2.3 Trki jat galaksij

Jate galaksij povečujejo svojo maso s pridobivanjem mase (posameznih galaksij, skupin galaksij) iz okolice in s trki, ki jih ločimo v dve skupini:

- **Glavni trki:** Ko jati galaksij s podobno maso trčita s hitrostjo nekaj milijonov kilometrov na uro, trk vročega plina iz obeh jat upočasni njuno hitrost, medtem ko temna snov preide skozi.

⁵Za oblak določenega polmera in temperature obstaja kritična masa, ki jo imenujemo Jeansova masa. Če je ta masa presežena, oblak postane nestabilen in se zruši. Jeansova masa je odvisna od polmera oblaka, njegove temperature in povprečne mase delcev v oblaku.

⁶Kroglasta kopica je gravitacijsko vezana skupina zvezd, ki kroži okrog galaktičnega središča kot satelit. Močna gravitacijska sila kopici daje sferično obliko.

Izkaže se, da temna snov zelo šibko ali pa sploh ne reagira z barionsko snovjo. Verjetnost trka med posameznimi zvezdami je praktično zanemarljiva. Velikost zvezd je majhna v primerjavi z razdaljami med njimi. To pomeni, da se dve galaksiji lahko čelno zaletita in gresta druga skozi drugo, ne da bi se pri tem zaleteli tudi dve zvezdi. Jatni plin je v jatah galaksij blizu hidrostatskega ravnovesja. Ko jate galaksij trčijo, ustvarijo udarne valove, ki večino kinetične energije, ki jo prenašajo haloji jat, pretvorijo v toploto. Količina mase, na katero vpliva tako segrevanje, je precejšnja. Do 40% mase znotraj virialnega radija spajajočih se halojev lahko konča zunaj virialnega polmera trka. Iz tega sledi, da se masa pri glavnih trkih ne poveča. Kljub temu pa jata galaksij po trku ohrani obliko profila gostote svojih predhodnikov. Pri trčenju jat galaksij se večina plina v obeh jatah naenkrat stisne, kar lahko sproži nastanek novih zvezd [5, 13].

- **Manjši trki:** Če sta masi jat galaksij zelo različni, bo večja jata galaksij absorbirala manjšo jato galaksij. Večja jata absorbira večino plina in zvezd manjše jate, druge lastnosti večje jate se pa bistveno ne spremenijo [5, 15].

3. Simulacije in metode dela

Podatki so uporabljeni iz kozmološkega portala - Magneticum [3], kjer se lahko sledi razvoju jat galaksij na rdečih premikih med $0 \leq z \leq 2.73$. V simulaciji uporabljajo kozmološke količine: celotna gostota snovi je $\Omega_0 = 0.272$, od česar je 16.8% barionske snovi, vrednost kozmološke konstante je $\Lambda_0 = 0.728$ in vrednost Hubblove konstante je $H_0 = 70.4 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ [17].

Simulacije Magneticum sledijo evoluciji 2×10^{11} delcev v seriji kozmoloških območij velikosti $(50 \text{ Mpc})^3$ do $(4 \text{ Gpc})^3$. Veliko število delcev z masami $M_{\text{plin}} = 1.4 \times 10^8 M_{\odot}/h$ in $M_{DM} = 6.9 \times 10^8 M_{\odot}/h$ zagotavlja dobro prostorsko ločljivost in resolucijo v masi v različnih simulacijah. Upoštevani so številni fizikalni procesi, da se simulacija lahko primerja z opazovalnimi podatki na različnih valovnih dolžinah. Uporabljeni so podatki simulacije srednje velikosti $Box2/hr$, ki uporablja 0.8×10^{10} delcev, ki pokrivajo volumen $(500 \text{ Mpc})^3$. Število struktur v simulaciji se veča s časom. Pri rdečem premiku 2.73 simulacija zazna 195 struktur in pri rdečem premiku 0 pa simulacija zazna 195 jat galaksij ter 10234 skupin galaksij ter manjših struktur. Spodnja meja za zaznavo gravitacijsko vezane strukture je $3.137 \times 10^{12} M_{\odot}/h$. Simulacija za vsako jato, ki se nahaja v simuliranem volumnu, pokaže nabor predhodno izračunanih količin. Vsaka jata galaksij ima svojo razpredelnico metapodatkov, to je seznam lastnosti, ki so z njimi povezane, kot naprimer masa znotraj določenega radija. Metapodatki, povezani z vsako jato galaksij, vsebujejo tabelo, ki opisuje njene članice. Za določitev halojev in njihovih podhalojev jat galaksij se uporablja program Subfind. Program indentificira podstrukture kot lokalno gostejše, gravitacijsko vezane skupine delcev. Seznam halojev se določi z algoritmom Friends-of-Friends (FoF), ki je običajno orodje za identifikacijo skupin delcev v simulaciji. Te strukture se lahko nato povežejo z jatami galaksij, skupinami galaksij in galaksijami. Na koncu se lahko izračunajo lastnosti struktur v seznamu, kot so masa plina, masa zvezd ali hitrost nastajanja zvezd. V članku so uporabljeni podatki za rdeči premik, maso, virialni radij, temperaturo ter delež plina in zvezd, ki so določeni glede na radij znotraj katerega je gostota delcev 500 krat večja od kritične gostote vesolja ($\rho_c = 3H^2/(8\pi G)$) ob dotičnem rdečem premiku [3, 6, 4].

Virtualni observatorij ponuja naslednje simulacije: ClusterInspect [4] vizualizira lastnosti galaksij, ki pripadajo določeni jati galaksij. SimCut [4] vrne neobdelane podatke okoli izbrane strukture, ki vsebuje vse izvirne, hidrodinamične količine. Smac [4] ustvari idealizirane 2D karte različnih fizikalnih količin in observable izbrane strukture. Phox [7] generira virtualna rentgenska opazovanja s specifikacijo različnih trenutnih in prihajajočih instrumentov. S pomočjo programa ClusterFind [4] lahko poiščemo željene jate galaksij s pomočjo poizvedbe po zbirki podatkov za iskanje po jatah iz kozmološke hidrodinamične simulacije, glede na njihove globalne lastnosti [4].

Najprej je bilo potrebno poiskati primerne jate galaksij z različnimi masami pri rdečem premiku 0. Izbrane so bile tiste jate, kjer je prišlo do opaznih združevanj in trkov med jatami galaksij, skupinami galaksij ter posameznimi masivnimi strukturami, ki po definiciji ne spadajo v skupine in jate galaksij. Izbrani jati se je sledilo v aplikaciji SimCut [4] od rdečega premika 0 do rdečega premika 2.73. Za vsak rdeči premik je bilo nato potrebno v aplikaciji ClusterInspect [4] izpisati podatke za maso, radij, temperaturo, delež plina, delež zvezd in število galaksij v jati. Sproti je bilo prav tako potrebno v aplikaciji ClusterInspect [4] preverjati koordinate jate, saj je bilo pri kakšni jati pri velikih rdečih premikih težko določiti točno lokacijo protojate.

Pri določanju območja, iz katerega je nastala jata galaksij, si lahko pomagamo z aplikacijo SimCut [4], saj lahko s pomočjo le-te izrišeš do štirikratnik želenega območja in potem lažje določiš velikost protojate.

Čas trajanja trka se lahko izračuna s pomočjo kozmološkega kalkulatorja, v katerega se vstavi Ω_o in H_o ter rdeče premike [9].

4. Rezultati

4.1 Podatki posameznih jat

Podatki za posamezne jate pri rdečem premiku $z = 0$ so prikazani v tabeli 1. Iz podatkov v tabeli je videti, da so vse količine, razen delež zvezd f_z , sorazmerne z maso. Se pravi, večja kot je masa, večji bodo radij, temperatura in delež plina f_p . Pri deležu zvezd pa je ravno obratno in sicer jata galaksij J1 z največjo maso ima najmanjši delež zvezd, jata galaksij J4 pa ima največji delež zvezd. Vendar če seštejemo delež plina z deležem zvezd dobimo rezultat okoli 16% za vse jate galaksij, kar se lepo ujema z omenjenim deležem barionov, ki so ga upoštevali v simulaciji.

Ime	M [M_\odot/h]	R[kpc/h]	T[keV]	f_p [%]	f_z [%]
J1	1.0112e+15	1259	9.1225	12.5776	2.8659
J2	5.4124e+14	1021	5.9596	11.2946	3.0866
J3	4.5993e+14	968	5.7275	9.78201	3.0959
J4	2.2978e+14	768	4.8955	9.5331	3.1179

Tabela 1. Podatki za izbrane jate galaksij pri rdečem premiku $z = 0$.

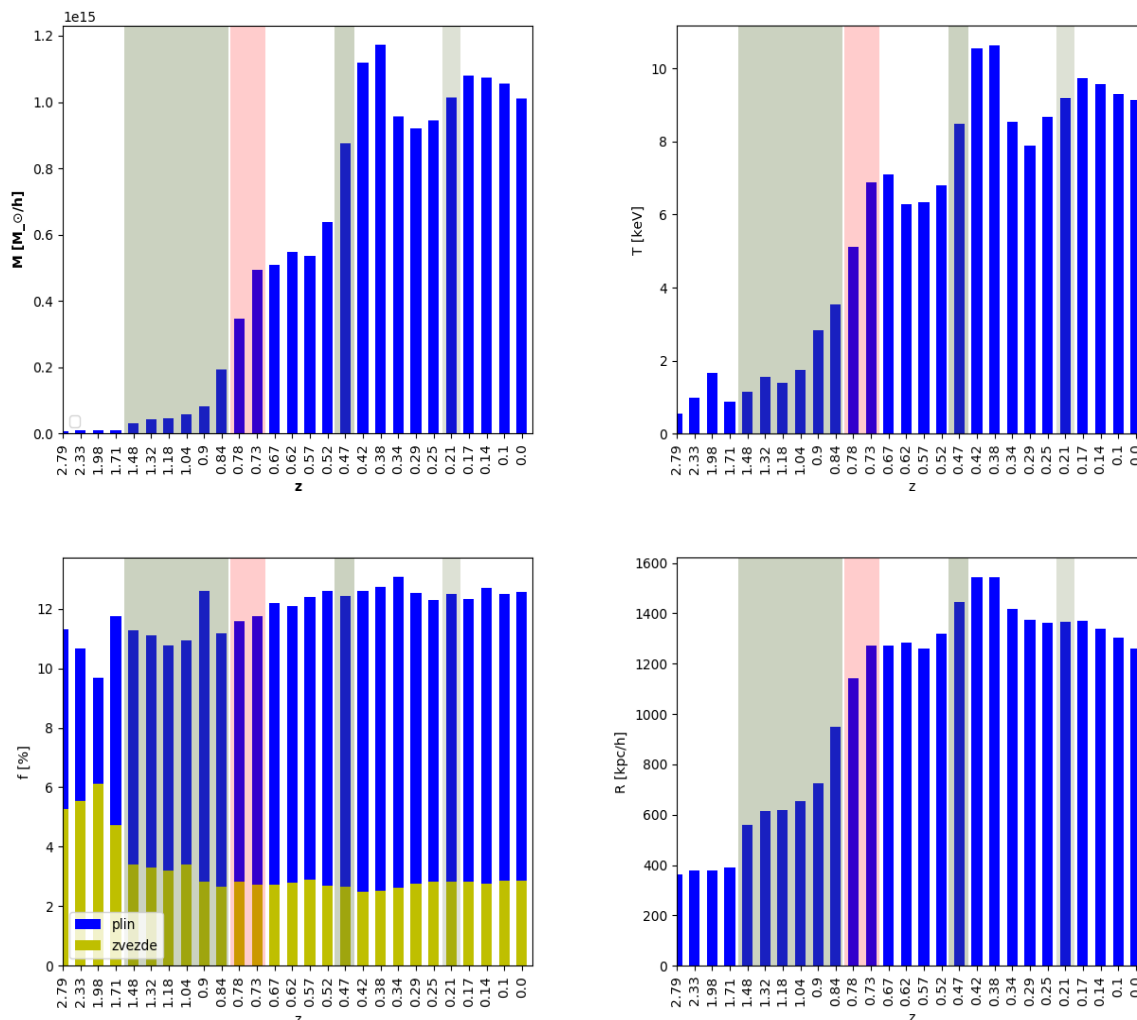
4.2 Sprememba lastnosti jat z rdečim premikom

4.2.1 Jata J1

Jata J1 je pri rdečem premiku 0 nastala z združevanjem skupin galaksij in posameznih galaksij na območju z radijem 8.5Mpc/h. Od rdečega premika 1.48 naprej se na tem območju v jato z maso $10^{14}M_\odot$ začne združevati več skupin galaksij z maso $10^{13}M_\odot$. Pri rdečem premiku 0.78 se začneta jati galaksij z masama $5 \times 10^{14}M_\odot$ in $2 \times 10^{14}M_\odot$ združevati v eno jato, ki se nato združita pri rdečem premiku 0.73 (prikazano z rdeče obarvanim območjem na histogramih, slika 1). Čas trajanja trka je 266.714 milijonov let. Temperatura narašča, ko se skupine galaksij združujejo. Opazen je padec temperature po tem, ko sta dve jati galaksij trčili pri rdečem premiku 0.62 (desno od rdečega območja na sliki 1). Med rdečima premikoma 0.47 in 0.42 je na histogramih vidno povečanje mase in temperature in iz tega bi lahko predvidevali, da je prišlo do manjšega trka strukture in jate galaksij (označeno s sivim območjem na histogramih, slika 1). V simulaciji pa opazimo, da dejansko ni prišlo do trka, ampak se manjša struktura nahaja znotraj območja večje strukture. Možno je, da je simulacija zaznala posebej jato galaksij in manjšo strukturo, hkrati pa je maso manjše strukture upoštevala k masi večje strukture. Na koncu opazimo, da je prišlo do trka jate galaksij in skupine

galaksij od rdečega premika 0.21 (označeno s sivim območjem na histogramih, slika 1) pa vse do danes, saj sta se tako masa kot temperatura povečali in ko sta se jata galaksij ter skupina začeli oddaljevati sta se zmanjšali tako masa kot temperatura.

Jata galaksij, kot jo vidimo danes, je pridobila veliko mase z združevanjem jat in skupin galaksij, ni pa bilo veliko glavnih trkov, kar je opazno na sliki 1.

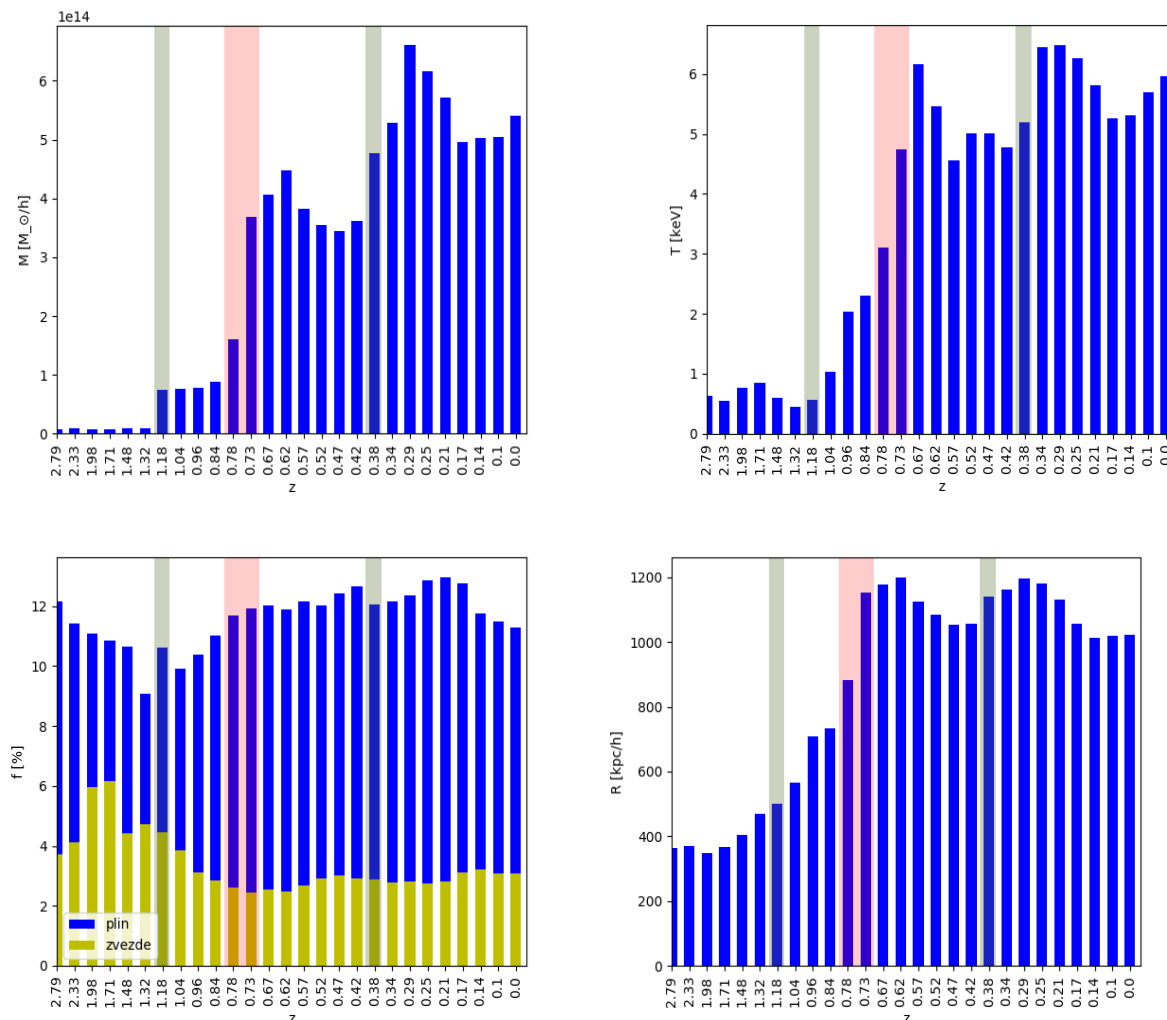


Slika 1. Slike prikazujejo spreminjanje lastnosti jate galaksij v odvisnosti od rdečega premika za območje, iz katerega nastane jata galaksij J1. Na sliki so označeni rdeči premiki, kjer je prišlo do manjših trkov (sivo) in glavnih trkov (rdeče). Desna slika zgoraj prikazuje maso v odvisnosti od rdečega premika, leva slika zgoraj prikazuje temperaturo v odvisnosti od rdečega premika, desna slika spodaj prikazuje delež plina in zvezd v odvisnosti od rdečega premika in slika levo spodaj prikazuje radij v odvisnosti od rdečega premika.

4.2.2 Jata J2

Jata J2 je pri rdečem premiku 0 nastala z združevanjem skupin galaksij in posameznih galaksij na območju z radijem $\sim 5.5 \text{ Mpc/h}$. Pri visokih rdečih premikih se je masa samo zgoščevala na neki točki, pri rdečem premiku 1.18 (označeno s sivim območjem na histogramih, slika 2) opazimo združevanje treh skupin galaksij z masami $\sim 10^{13} M_{\odot}$. Naslednji vidnejši skok v masi in temperaturi (ter v izračunanem radiju za območje v katerem je $\rho > 500 \rho_{\text{povprečna}}$) je pri rdečem premiku 0.84 (označeno z rdečim območjem na histogramih, slika 2), kjer je prišlo do združevanja manjših skupin galaksij s skupino galaksij z maso $\sim 10^{13} M_{\odot}$. Pri tem rdečem premiku se je zgodil tudi trk, saj sta kasneje padli tako masa kot temperatura. Čas trka je trajal 266.714 milijonov let. Do

naslednjega združevanja jat galaksij je prišlo med rdečimi premiki 0.38 in 0.21 (desno od sivega območja, slika 2), saj sta se tudi na tem območju masa in temperatura najprej povečali in nato zmanjšali. Do današnjega časa je potem prišlo do pritoka snovi v jato galaksij, saj sta se tako masa kot temperatura povečali, v okolici pa ni opaziti nobene večje strukture, da bi lahko predvidevali, da gre za trk. Celoten potek pridobivanja mase se vidi na sliki 2.



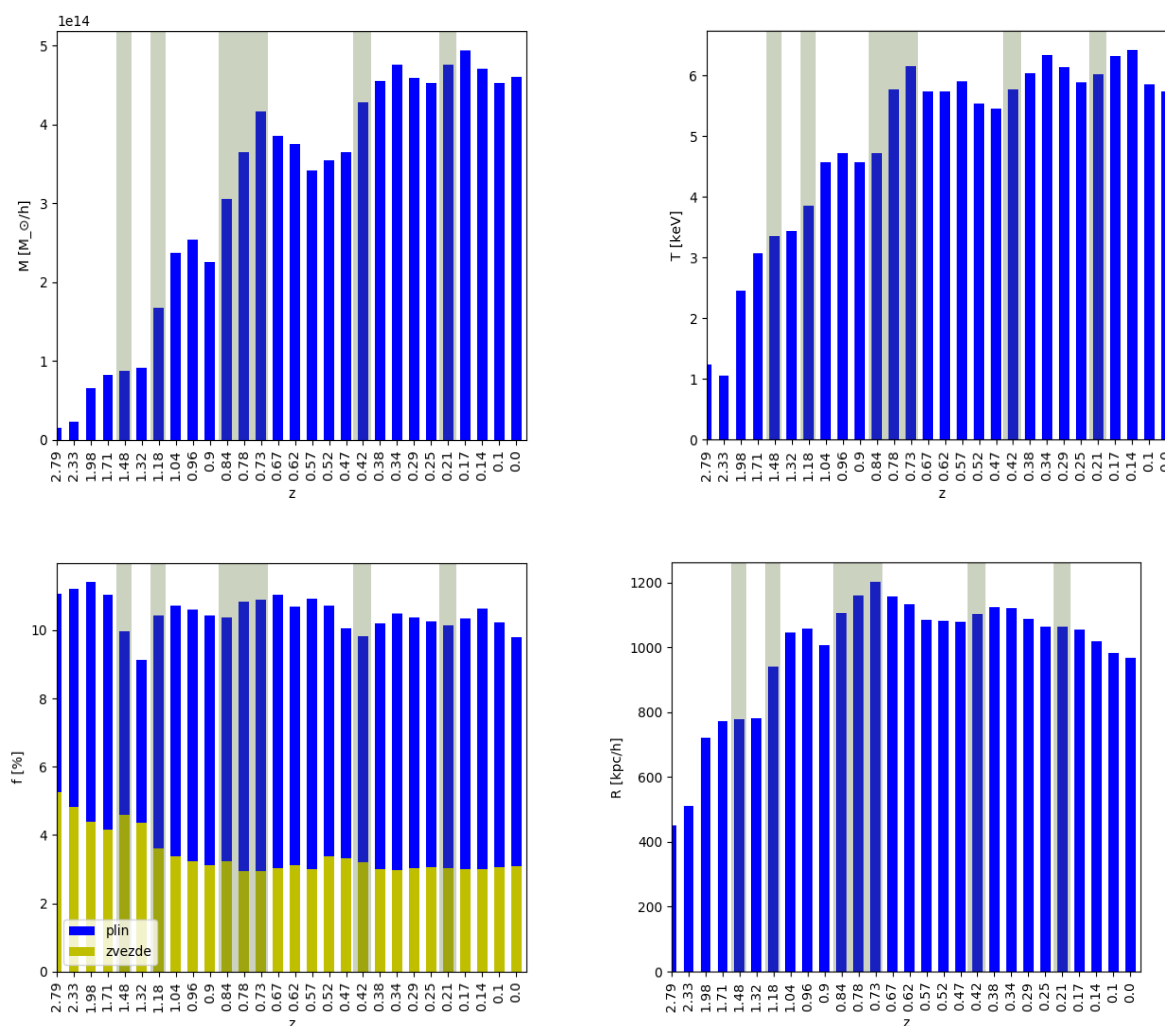
Slika 2. Spreminjanje mase jate galaksij v odvisnosti od rdečega premika za območje, iz katerega nastane jata galaksij J2. Na sliki so označeni rdeči premiki, kjer je prišlo do manjših trkov (sivo) in glavnih trkov (rdeče). Desna slika zgoraj prikazuje maso v odvisnosti od rdečega premika, leva slika zgoraj prikazuje temperaturo v odvisnost od rdečega premika, desna slika spodaj prikazuje delež plina in zvezd v odvisnosti od rdečega premika in slika levo spodaj prikazuje radij v odvisnosti od rdečega premika.

4.2.3 Jata J3

Jata J3 je pri rdečem premiku 0 nastala z združevanjem skupin galaksij in posameznih galaksij na območju z radijem $\sim 4.5\text{Mpc}/h$. Na tem območju so pri rdečem premiku 2.33 vidne tri skupine galaksij z maso $9 \times 10^{12}M_{\odot}$ in 2 skupini galaksij z maso $2 \times 10^{13}M_{\odot}$. Vidne so tudi posamezne galaksije. Pri rdečem premiku 1.48 (označeno s sivim območjem na histogramih, slika 3) vidimo prvo združitev dveh skupin galaksij z maso $3 \times 10^{13}M_{\odot}$, ki se bosta kasneje združili z opazovano skupino galaksij z maso $9 \times 10^{13}M_{\odot}$. Skupine galaksij se počasi približujejo druga drugi in se pri rdečem premiku 1.18 (označeno s sivim območjem na histogramih, slika 3) začnejo združevati. Tukaj lahko že govorimo o jati galaksij, saj je skupna masa večja od $\sim 10^{14}M_{\odot}$. Na tej točki opazimo

tudi večji skok v temperaturi. Od rdečega premika 0.84 do 0.73 (označeno s sivim območjem na histogramih, slika 3) vidimo, da prihaja do povečanega pritoka snovi v jato galaksij, saj se povečata tako masa kot temperatura jate. V jato se združujejo predvsem skupine galaksij z masami $\sim 10^{12}M_{\odot}$ in $\sim 10^{13}M_{\odot}$. Nato masa in temperatura malo padeta, kar lahko pripišemo temu, da je najverjetneje skupina galaksij, samo oplazila jato in v najbližji točki prispevala maso k jati galaksij ali pa sta jata galaksij in skupina trčili in je po trku skupino odneslo stran. Pri rdečih premikih 0.42 in 0.21 (označeno s sivim območjem na histogramih, slika 3) ponovno pride do trkov jate galaksij z manjšimi skupinami, saj se masa in temperatura ponovno povečata ter čez nekaj časa masa in temperatura padeta.

Zaključimo lahko, da je pri izbrani jati prišlo večino časa do trkov z drugimi skupinami galaksij, saj sta se masa in temperatura skozi celoten čas povečevali in zmanjševali, kar se vidi na sliki 3.

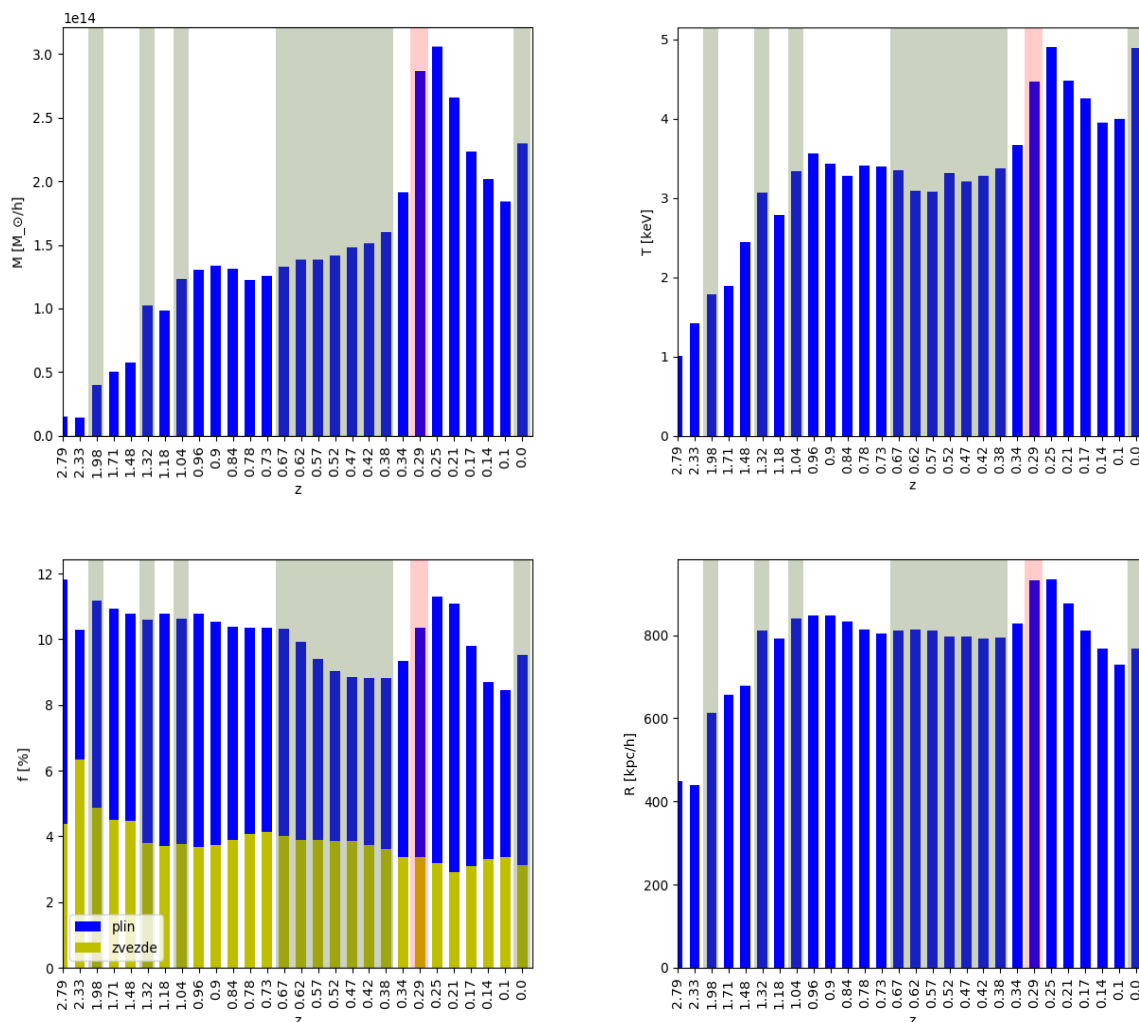


Slika 3. Spreminjanje mase jate galaksij v odvisnosti od rdečega premika za območje, iz katerega nastane jata galaksij J3. Na sliki so označeni rdeči premiki, kjer je prišlo do manjših trkov (sivo). Desna slika zgoraj prikazuje maso v odvisnosti od rdečega premika, leva slika zgoraj prikazuje temperaturo v odvisnosti od rdečega premika, desna slika spodaj prikazuje delež plina in zvezd v odvisnosti od rdečega premika in slika levo spodaj prikazuje radij v odvisnosti od rdečega premika.

4.2.4 Jata J4

Jata J4 je pri rdečem premiku 0 nastala z združevanjem skupin galaksij in posameznih galaksij na območju z radijem 7Mpc/h. Skozi celotno oblikovanje jate galaksij, ki jo vidimo danes so se v jato

skupin združevale skupine galaksij z maso $\sim 10^{13} M_{\odot}$, kar je lepo vidno iz slike 4. Do večjih skokov v masi in temperaturi je prišlo ob združitvi dveh skupin z jato, kar je označeno s sivim območjem na histogramih, slika 4. Večja združitve se je zgodila pri rdečem premiku 0.29 (označeno z rdečim območjem na histogramih, slika 4), kjer je prišlo do združitve dveh jat galaksij z masama $2 \times 10^{14} M_{\odot}$ in $3 \times 10^{14} M_{\odot}$. Čas trajanja večjega trka je 385.617 milijonov let.



Slika 4. Spreminjanje mase jate galaksij v odvisnosti od rdečega premika za območje, iz katerega nastane jata galaksij J4. Na sliki so označeni rdeči premiki, kjer je prišlo do manjših trkov (sivo) in glavnih trkov (rdeče). Desna slika zgoraj prikazuje maso v odvisnosti od rdečega premika, leva slika zgoraj prikazuje temperaturo v odvisnosti od rdečega premika, desna slika spodaj prikazuje delež plina in zvezd v odvisnosti od rdečega premika in slika levo spodaj prikazuje radij v odvisnosti od rdečega premika.

5. Diskusija

5.1 Izbira podatkov

Pri izbiri ustreznih jat galaksij je bilo potrebno paziti, da so bile izbrane dovolj masivne jate pri katerih je bila evolucija lepo vidna, ter da je bilo v evoluciji jate veliko trkov. V simulaciji se je jatam sledilo v času nazaj, saj je bilo tako najlažje slediti opazovanim strukturam. Pri izbiri ustreznih jat je bilo nekaj težav, in sicer se je pri visokih rdečih premikih zgodilo, da simulacija jate/skupine ni več zaznala. V simulaciji je bilo videti, da se je jata/skupina razdrobila v manjše skupine, katerih kontrast gostote ni bil več dovolj velik, da bi jo program lahko zaznal. Iz tega lahko sklepamo,

da se je jata galaksij začela formirati kasneje. Sledenje takim strukturam je težje, saj simulacija ne zagotovi podatkov. Ena izmed možnosti za sledenje bi bil izris območja v SimCutu in vizualna primerjava z simulacijo.

V simulaciji se sledi halojem, ki jih je algoritem SUBFIND uspešno zaznal. Radij pritoka mase v jato pa se nato določi s pomočjo SimCuta ter samega vizualnega prikaza v simulaciji, kar pomeni, da območje ni natančno določeno. Ena izmed možnosti za bolj natančno določitev radija bi bil program, ki bi iz podatkov iz simulacije (hitrosti, koordinate) sam izračunal do kam se je razpotegnila masa. Težava tukaj je, da ne bi bilo podatkov za območja, znotraj katerih je gostota manjša od kontrasta gostote, ki jo simulacija zazna. Ti podatki bi se izgubili na večjih rdečih premikih.

5.2 Območje protojat

Obravnavane jate galaksij pri rdečem premiku 0 so nastale iz različno velikih protojat z radijem od 4.5 Mpc/h do 8.5 Mpc/h. Jate galaksij pa tipično nastanejo iz območij v velikosti med 10 Mpc/h do 50 Mpc/h. Predvidevamo lahko, da so se jate začele izoblikovati pri višjih rdečih premikih, simulacija pa nam omogoča vpogled v razvoj jate galaksij le do rdečega premika 2.73.

Izbrane so bile predvsem jate galaksij, kjer je bila tudi pri rdečem premiku 2.73 vidna večja koncentracija filamentov. Galaksiji z masama J1 in J4 sta nastali iz protojat z največjim radijem, ostali dve jati s podobnima masama pa sta nastali iz primerljivega območja. Kot pričakovano je radij jat pri rdečem premiku 0 primerljiv z maso, saj ima jata z največjo maso največji radij, jata z najmanjšo maso pa najmanjši radij, kar lahko vidimo v tabeli 1.

Skozi evolucijo vidimo, da se radij jate povečuje, kjer pride do absorbcije manjših skupin galaksij, pri trkih pa se radij najprej poveča nato pa zmanjša, kar lahko pripišemo virializaciji. Simulacije omenjene v članku [13] prikazujejo, da je radij jat galaksij v poznejših časih razvoja jate galaksij približno konstanten, vendar se večja v zgodnejših časih, ko halo hitro poveča maso preko dotoka snovi in trkov. Če primerjamo slike za radij v odvisnosti od rdečega premika opazimo, da se evolucija radija sklada s teoretičnimi napovedmi.

5.3 Masa

Mase jat galaksij so se v vseh primerih znatno povečale, saj so skozi evolucijo jate pridobivale na masi predvsem z dotokom mase. Manjši delež mase pa so pridobile pri trkih skupin galaksij ter majših struktur, kar je na slikah 1, 2, 3 in 4 lepo vidno. Vse jate so imele v svoji evoluciji vsaj en večji trk dveh jat oziroma jate in skupine galaksij, kar se opazi v povečanem zvišanju in nato padcu mase. Izbrane jate seveda ne predstavljajo nepristranskega vzorca in ima vsaka različno zgodovino nastajanja.

5.4 Temperatura

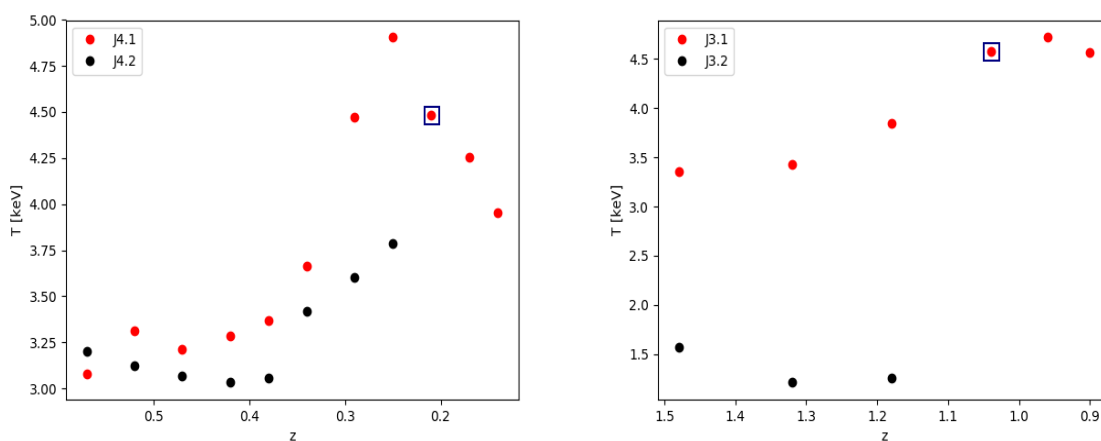
Temperatura jat galaksij se pri vseh jatah galaksij skozi celoten razvoj na splošno povečevala, ko je snov pritekala v jato galaksij, kar je vidno iz slik 1, 2, 3 in 4. Velike skoke v temperaturi opazimo v zgodnejših časih do rdečega premika okoli 2, saj je bila v tem obdobju povečana formacija zvezd, tako da v povprečju plin ni smel biti prevroč. Večje skoke v temperaturi opazimo tudi ob trkih in kolapsu dveh ali več struktur. Pri trkih jat galaksij opazimo povišanje in nato znižanje temperature, kar pripišemo virializaciji. Temperatura se pri absorbciji in trkih zviša in nato zniža z zamikom glede na maso jat galaksij.

Temperatura jat galaksij na slikah je $\sim 10^7\text{K}$, posledično je delež zvezd približno konstanten pri nižjih rdečih premikih, kar se lepo ujema s teoretičnim delom, ki opisuje, da zvezde nastanejo iz hladnega plina.

Na sliki 5 desno se vidi potek temperature v odvisnosti od rdečega premika za jati galaksij na

območju nastanka jate J4 (zaradi preglednosti ju označujemo z J4.1 in J4.2, do trka pride med $z=0.55$ in $z=0.2$). Obe jati z masama $3.05 \times 10^{14} M_{\odot}$ in $2.22 \times 10^{14} M_{\odot}$ sta imeli približno konstantno temperaturo pred trkom ($T_{J4.1}=4.90$ in $T_{J4.2}=3.79$), ki se je začela zviševati v času, ko sta se jati začeli združevati. Z modrim kvadratom je označena temperatura po trku jat. Temperatura po trku je približno povprečje temperatur obeh jat pri $z=0.25$ in je 4.48K, nato pa začne padati, saj traja nekaj časa, da se ustali.

Na sliki 5 levo se vidi potek temperature v odvisnosti od rdečega premika za jato galaksij in skupino galaksij na območju nastanka jate J3 (zaradi preglednosti ju označujemo z J3.1 in J3.2, do trka pride med $z=1.32$ in $z=1.04$). Jata galaksij z maso 1.67×10^{14} je absorbirala skupino galaksij z maso 3.08×10^{13} . Jata galaksij in skupina galaksij sta imeli pred trkom približno konstantno temperaturo ($T_{J3.1}=3.85$ in $T_{J3.2}=1.25$). Z modrim kvadratom je označena temperatura takoj po trku jat. V tem primeru je temperatura po trku približno seštevek temperatur pred trkom pri $z=1.18$ in je $T=4.5$ K. V tem primeru se vidi, da temperatura sprva še malo narase, potem pa pade.



Slika 5. Desna slika prikazuje spremembo temperature v odvisnosti od rdečega premika pred in po trku za jato galaksij J4.1 z jato J4.2. Jati sta imeli pred trkom primerljivo maso ($\sim 2 \times 10^{14} M_{\odot}$). Temperatura po trku je označena z modrim kvadratom. Leva slika prikazuje temperaturo v odvisnosti od rdečega premika pred in po trku za jato J3 z maso 1.67×10^{14} in skupino galaksij z maso 3.08×10^{13} . Temperatura po trku je označena z modrim kvadratom.

5.5 Trk jat galaksij

Vse štiri jate galaksij so skoraj skozi celotno evolucijo absorbirale skupine galaksij in manjše strukture. Temperatura, masa in radij jat galaksij so se v teh primerih povečali.

Vse opazovane jate galaksij imajo bogato zgodovino dotoka snovi in manjših trkov. Glavni trki pa so bili samo trije. Po trkih so se masa, radij in temperatura povečali in nato je sledila virializacija in padec omenjenih količin. Radij in temperatura se povečata in nato zmanjšata z zamikom glede na maso. Delež plina se je rahlo povečal pri trkih, delež zvezd se pa bistveno ni spremenil.

5.6 Delež zvezd in plina

Iz slik 1, 2, 3 in 4 se vidi, kako sta se delež plina in zvezd spreminjala v jatah galaksij skozi razvoj jat galaksij. Višek nastajanja novih zvezd v vesolju se dogaja med rdečima premikoma 2 in 3, kar se opazi tudi na vseh slikah. Na splošno se delež zvezd med rdečima premikoma 2 in 1 znatno zmanjšuje, od rdečega premika 1 najprej pa ostane približno konstanten. Seveda prihaja do manjših odstopanj pri posameznih jatah galaksij. Delež plina pa se spreminja od primera do primera, saj

iz danih slik ni razbrati nekega trenda. Prav tako se je delež plina povečal in zmanjšal ob vsakem trku jat, skupin galaksij, ter povečal ob kolapsu. Če pozorno pogledamo se vidi da, ko se je delež plina znižal, se je koncentracija zvezd posledično povečala in obratno. Glede na to, da se delež zvezd pri trku skoraj nič ne spremeni, lahko spremembo v deležu zvezd pripišemo nastajanju novih zvezd iz hladnega plina in prahu. In na ta račun se potem zmanjša delež plina. Kot je bilo omenjeno v teoretičnem delu poročila, jati galaksij pri trku izgubita delež plina, zato lahko predvideva, da se na ta račun potem plin zmeša s hladnim plinom iz okolice, se ohladi in nastane manjše število novih zvezd.

Delež barionske snovi je pri masivnejših jatah J1-J3 malo manjši kot pa pri jati J4. V članku [10] je lepo prikazano, kako se barioni v jatah lahko premaknejo na večje razdalje od jatnega središča zaradi povratnega učinka aktivnih galaktičnih jeder. Ta učinkujejo na visokih rdečih premikih in dovajajo energijo v jatni plin. Opazovani profil gostote plina je bistveno plitvejši od profila gostote mase, kar pomeni, da je sega dlje od mase in da se plinski delež poveča s polmerom. Če povprečimo delež plina in zvezd na histogramih, dobimo skupno vrednost barionskega deleža, ki je $\sim 16\%$, kar se lepo ujema s podatki, ki so jih uporabili za začetne pogoje v simulaciji (tudi simulacija, ki je uporabljena, vsebuje povratni učinek aktivnih galaktičnih jeder in so zato učinki v jatah primerljivi).

6. Zaključki

Jate galaksij nastanejo iz zametkov in kolapsa prvih struktur v vesolju. Iz podatkov v izbrani simulaciji se lahko oceni kolikšna je velikost območja znotraj katerega se na rdečem premiku $z \sim 2.73$ nahaja snov, iz katerega bo potem na nizkih rdečih premikih nastala jata galaksij. Velikost območij je preverjena na štirih jatah galaksij z različnimi masami, ki se jim je sledilo na območju $0 \leq z \leq 2.73$. Velikost območja na rdečih premikih, ki so večji od 1.18, je težko oceniti, saj ne moreš tako natančno slediti simulaciji, ker so razlike med rdečimi premiki velike. Tukaj si lahko pomagaš z aplikacijo SimCut, saj je lažje oceniti velikost območja. Pri manjših rdečih premikih to ni bil problem, saj so strukture bolj izrazite.

Iz slik za maso, radij, temperaturo ter deleža plina in zvezd se lepo vidijo spremembe, ki so se dogajale pri prehodu iz protojate v jato galaksij. Tudi tukaj so rezultati bolj natančni za rdeče premike pod 1.18, saj so ti bolj skupaj in se dobi bolj natančne rezultate, kot pa pri visokih rdečih premikih.

Simulacija Magneticum je zelo dobro zasnovana, saj ponuja velik izbor podatkov s katerimi je lahko razpolagati. Za bolj natančne rezultate pa bi bilo dobro povečati število delcev ter slediti tudi manjšim kontrastom gostote (torej manjšim strukturam), saj bi na ta način lažje sledili strukturam pri večjih rdečih premikih. Seveda bi bili omejeni z resolucijo same simulacije, vendar je v tem primeru resolucija dovolj dobra, da bi lahko sledili tudi nekoliko manjšim strukturam (velikosti galaksij).

Zahvale

Zahvaljujem se doc. dr. Dunji Fabjan za vse nasvete in pomoč pri pisanju članka.

LITERATURA

- [1] A. Overzier, *The realm of the galaxy protoclusters*, arXiv:1610.05201 (2016).
- [2] A. Gruppuso, P. Natoli, N. Mandolesi, A. De Rosa, F. Finelli, F. Paci, *WMAP 7 year constraints on CPT violation from large angle CMB anisotropies*, arXiv:1107.5548 (2012).
- [3] A. Ragagnin, K. Dolag, V. Biffi, M. Cadolle Bel, N. J. Hammer, A. Krukau, M. Petkova, D. Steinborn, *A web portal for hydrodynamical, cosmological simulations*, arXiv:1612.06380 (2017).

- [4] Dolag K., E. Komatsu, R. Sunyaev *SZ effects in the Magneticum Pathfinder simulation: comparison with the Planck*, arXiv:1509.05134 (2015).
- [5] Schneider P., *Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction*, Springer, 2006.
- [6] M. Hirschmann, K. Dolag, A. Saro, L. K. Bachmann, S. Borgani, A. Burkert *Cosmological simulations of black hole growth: AGN luminosities and downsizing*, arXiv:1308.0333 (2014).
- [7] V. Biffi, K. Dolag, H. Boehringer, G. Lemson *Observing simulated galaxy clusters with PHOX: a novel X-ray photon simulator*, arXiv:1112.0314 (2011).
- [8] K. Dolag, F. K. Hansen, M. Roncarelli, L. Moscardini, *The imprints of local superclusters on the Sunyaev-Zel'dovich signals and their detectability with Planck*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **1** (2005), 363.
- [9] Gnedin N., *Cosmological Calculator for the Flat Universe*, 2006.
- [10] S. Planelles, S. Borgani, K. Dolag, S. Ettori, D. Fabjan, G. Murante, L. Tornatore, *Baryon census in hydrodynamical simulations of galaxy clusters*, arXiv:1209.5058 (2012).
- [11] J. R. Peterson, A. C. Fabian, *X-ray Spectroscopy of Cooling Clusters*, arXiv:astro-ph/0512549 (2005).
- [12] F. Voort, J. Schaye, C. M. Booth, C. D. Vecchia, *The drop in the cosmic star formation rate below redshift 2 is caused by a change in the mode of gas accretion and by active galactic nucleus feedback*, arXiv:1102.3912 (2011).
- [13] S. I. Muldrew, N. A. Hatch, E. A. Cooke, *Galaxy evolution in protoclusters*, arXiv:1709.07009 (2017).
- [14] A. Kravtsov, S. Borgani, *Formation of Galaxy Clusters*, arXiv:1205.5556 (2012).
- [15] E. Rasia, P. Mazzotta, A. Evrard, M. Markevitch, K. Dolag, M. Meneghetti, *Scaling Relation in Two Situations of Extreme Mergers*, arXiv:1012.4027 (2010).
- [16] Schneider P., *Galaxy Formation*, Springer, 2007.
- [17] E. Komatsu, K. M. Smith, J. Dunkley, C. L. Bennett, B. Gold, G. Hinshaw, N. Jarosik, D. Larson, M. R. Nolte, L. Page, D. N. Spergel, M. Halpern, R. S. Hill, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, N. Odegard, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack, E. L. Wright, *Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation*, arXiv:1001.4538 (2010).