

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno–matematički fakultet

Antonija Oklopčić

**Radio galaksije sa široko savinutim repovima
detektirane u COSMOS pregledu neba**

Zagreb, 2010.

Ovaj rad izrađen je u Fizičkom zavodu Prirodoslovno–matematičkog fakulteta pod vodstvom prof. dr. sc. Krešimira Pavlovskog i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2009./2010.

Popis korištenih kratica

kratica *značenje*

\square° kvadratni stupanj

c brzina svjetlosti u vakuumu, $\sim 3 \times 10^8$ m/s

Mpc megaparsek, mjera za udaljenost, $\sim 3 \times 10^{22}$ m

K kelvin, jedinica za temperaturu

U ovom radu su korištene sljedeće vrijednosti kozmoloških parametara:

$H_0 = 70$, $\Omega_M = 0.3$ i $\Omega_\Lambda = 0.7$.

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Radio galaksije	1
1.2. Grupe i jata galaksija; struktura na velikoj skali	3
1.3. Radio galaksije sa široko savinutim repovima	4
2. Ciljevi rada	6
3. Podaci i metode	7
3.1. COSMOS pregled neba	7
3.2. Struktura na velikoj skali u polju COSMOS pregleda neba	8
3.3. Uzorak WAT galaksija u COSMOS polju	8
3.4. Utvrđivanje grupiranja galaksija metodom baziranom na Voronoi teselaciji	9
4. Rezultati	10
5. Rasprava	23
5.1. Pokazatelji grupiranja galaksija i dinamičke nerelaksiranosti sustava oko WAT galaksija	25
5.2. Odnos WAT galaksija i strukture na velikoj skali	27
6. Zaključci	28
Zahvale	29
Literatura	30
Sažetak	32
Summary	33

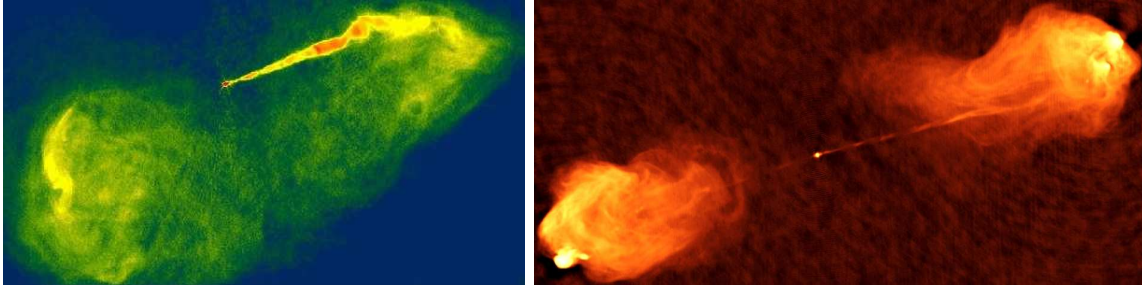
1 Uvod

1.1 Radio galaksije

Aktivne galaksije su galaksije vrlo velikog i promjenjivog luminoziteta¹. Razlog tomu može biti intenzivno stvaranje zvijezda unutar galaksije ili snažan, točkasti izvor zračenja u samom središtu galaksije, koji se naziva aktivnom galaktičkom jezgrom (engl. *active galactic nucleus*, AGN), a za kojeg se pretpostavlja da je riječ o supermasivnoj crnoj rupi. Radio galaksije čine podvrstu galaksija s aktivnom galaktičkom jezgrom koje su posebno sjajne u radiovalnom području elektromagnetskog spektra. Uglavnom su to vrlo masivne eliptične galaksije, sa supermasivnom crnom rupom u središtu. Morfologija ovih galaksija karakterizirana je s nekoliko strukturnih elemenata:

- središnja jezgra (engl. *core*) – vrlo je sjajna i malih dimenzija. Pretpostavlja se da je riječ o području neposredno oko crne rupe. Radio zračenje dolazi od akrecijskog materijala koji kruži oko crne rupe i biva uvučen u nju, ali i od rotacije same crne rupe oko svoje osi.
- mlazovi (engl. *jets*) – uske i dugačke strukture koje se najčešće šire radijalno iz središnje jezgre prema vanjskim proširenim područjima radio zračenja. Mogu biti opažena dva simetrično postavljena mlaza, kao u desnom okviru slike 1, no često je zbog relativističkih efekata sjaj jednog mlaza znatno smanjen, a sjaj drugog povećan, tako da se u konačnici vidi samo jedan mlaz (slika 1, lijevi okvir). Fizikalno, mlaz čini plazma (pretežno mješavina elektrona, pozitrona i protona) koja se u vrlo uskom i usmjerenom snopu giba iz aktivne galaktičke jezgre prema van, brzinom usporedivom s brzinom svjetlosti, te pritom sinkrotronski zrači u radiovalnom dijelu spektra.
- proširena područja radio zračenja (engl. *lobes*) – područja difuzne radio emisije, gotovo elipsoidalnog oblika koja se prostiru s obje strane aktivne galaktičke jezgre (slika 1). U njima završavaju mlazovi, ponekad u kompaktnom, vrlo svijetlom obliku, što se naziva vrućom točkom (engl. *hotspot*). Vruće točke su manifestacije udara koji

¹Luminozitet je veličina koja opisuje brzinu kojom svijetleći objekt gubi energiju kroz elektromagnetsko zračenje koje emitira. Jedinica za luminozitet je W .



Slika 1: Lijevi okvir: radio slika galaksije M87 snimljena radio-interferometrijskom mrežom VLA. Na slici se vide središnja jezgra, dobro kolimirani mlaz i proširena područja difuzne radio emisije. Slika je preuzeta s web stranice www.spacetelescope.org/images/html/opo9943b.html; zasluga National Radio Astronomy Observatory/National Science Foundation. Desni okvir: Radio galaksija Cygnus A, također snimljena VLA-om (Carilli & Barthel 1996; preuzeto s www.aoc.nrao.edu/ccarilli/cyga.shtml). Ovo je klasični FR II izvor na kojem se dobro vide oba mlaza i vruće točke u proširenom području radio zračenja.

nastaju kada vrlo brzi, nadzvučni ² mlaz naglo završava kada dođe do granice dvaju medija.

Radio galaksije obično se dijele u dvije kategorije, Fanaroff - Riley tip I (FR I) i Fanaroff - Riley tip II (FR II). Kategorije su dobile ime po znanstvenicima koji su 1974. godine predložili podjelu radio galaksija temeljenu na razlikama u morfologiji (Fanaroff & Riley 1974): FR I izvori su najsjajniji u svom središnjem dijelu (centralnoj jezgri i unutarnjem području mlazova), dok najveći dio sjaja FR II izvora dolazi iz vanjskih dijelova radio galaksije (iz proširenih područja difuznog zračenja i vrućih točaka). Smatra se da ta razlika potječe od različitih efikasnosti prijenosa energije kroz mlazove. FR II izvori su vrlo učinkoviti u tome i velika količina energije dopiše do ruba mlazova, odnosno do proširenih područja radio zračenja, dok se kod FR I izvora znatan dio energije gubi zračenjem prije nego dostigne kraj mlaza. Osim po morfologiji, FR I i FR II tipovi radio galaksija razlikuju se i po luminozitetu; FR I galaksije općenito imaju manji luminozitet od FR II galaksija.

Radio galaksije imaju veliku važnost u astrofizičkim i kozmološkim istraživanjima jer su vrlo pogodne za opažanje. Snažni radio izvori mogu se detektirati relativno kratkim vremenom ekspozicije i to na vrlo velikim udaljenostima, za koje su promatranja u optičkom ili rendgenskom području gotovo nemoguća jer se to zračenje raspršuje prolaskom kroz

²Brzina zvuka u relativističkoj plazmi iznosi $c/\sqrt{3}$.

područja ispunjena prašinom i plinom na putu do nas.

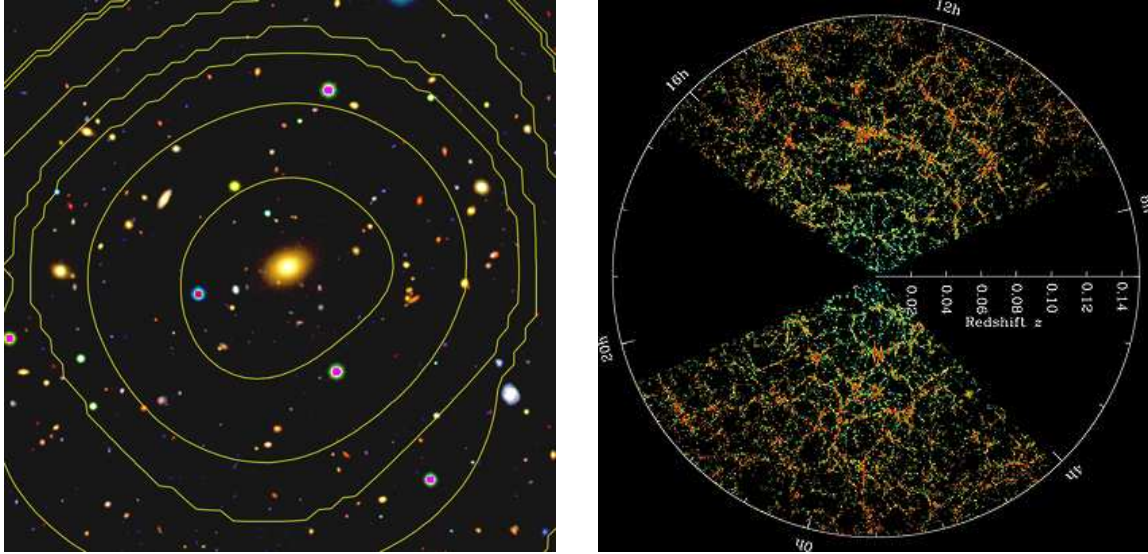
1.2 Grupe i jata galaksija; struktura na velikoj skali

Veliki pregledi neba pokazuju da samo malen udio galaksija u svemiru čine izolirane galaksije, dok je većina gravitacijski povezana s drugim galaksijama, tvoreći pritom grupe ili jata galaksija. Oni se pak povezuju u još veće strukture poput superjata. Zajednički naziv za strukture materije na skalama superjata (ili još većim) je struktura na velikoj skali (engl. *large-scale structure*, LSS). Riječ je o linearnim dimenzijama $\gtrsim 10$ Mpc, na kojima je primjećeno da su galaksije povezane u filamente materije koji okružuju velika područja u kojima je gustoća vidljive tvari mala (slika 2, desni okvir).

Grupe galaksija su najmanje asocijacije većeg broja galaksija. Obično se protežu u veličini do $\sim 1 - 2$ Mpc, sadrže manje od 50 galaksija i mase su im $\sim 10^{13} M_{\odot}$. I naša galaksija Mliječna staza nalazi se u grupi galaksija nazvanoj Lokalna grupa, koja sadrži tridesetak galaksija. Jata galaksija su veća od grupa, iako ne postoji jasna granica između njih. Tipične veličine jata kreću se između 2 i 10 Mpc, sadrže od 50 do čak 1000 galaksija, a ukupna masa im je $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$.

Grupe i jata galaksija prepoznaju se u optičkom dijelu spektra kao kompaktna područja s većom koncentracijom galaksija od okoline. No, skupine galaksija vidljive su i u rendgenskom području elektromagnetskog spektra, ali ne kao skup individualnih izvora, već se čitava grupa ili jato opaža kao prošireno područje difuznog rendgenskog zračenja (slika 2, lijevi okvir). Ono potječe od vrućeg ioniziranog plina (pretežno vodika i helija) na temperaturi od $10^7 - 10^8$ K, koji se naziva ICM (engl. *intracluster medium*). ICM čini između 10 i 30% mase jata galaksija, dok na same galaksije otpada tek 10%. Preostali dio mase, pretpostavlja se, čini tamna materija o kojoj se danas ne zna mnogo.

Postoje dva krajnje suprotna modela dinamičkog ponašanja tamne materije i, sukladno tome, dva različita modela kozmološkog razvoja svemira. U jednoj varijanti tamnu tvar čine masivne čestice koje se gibaju brzinama mnogo manjima od brzine svjetlosti - model hladne tamne materije (eng. *cold dark matter*, CDM). Kompjuterske simulacije predviđaju da, u svemiru u kojem dominira takva vrsta tamne materije, prvo nastaju grav-



Slika 2: Lijevi okvir prikazuje grupu galaksija u COSMOS polju snimljenu Subaru teleskopom. Žute konture su rendgenske izofote, tj. linije jednakog intenziteta zračenja, dobivene iz opažanja XMM-Newton teleskopa. Slika je preuzeta s web stranice sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=46325. U desnom okviru je prikazana struktura na velikoj skali sjevernog dijela SDSS pregleda neba (www.sdss.org/legacy/index.html).

itacijski vezane strukture mnogo manje mase od prosječnih galaksija. One se pak sudarima vežu u sve veće i veće sustave, te tako nastaju velike strukture koje danas opažamo. Ovakav kozmološki model nastanka struktura u svemiru naziva se hijerarhijski ili "bottom-up" scenarij. Suprotna opcija je ona koja pretpostavlja vrlo brze čestice tamne materije, koja se stoga naziva vrućom tamnom materijom (engl. *hot dark matter*, HDM). Predviđanja ovakvog modela su posve suprotna od onog s CDM-om. Mase prvotno stvorenih entiteta su mnogo veće od masa pojedinačnih galaksija, koje pak nastaju fragmentacijom tih velikih struktura. Stoga se ovakvi modeli nazivaju "top-down" scenarijima. Opažanja strukture na velikoj skali, ali i sudaranja kako samih galaksija, tako i njihovih jata i grupa, idu u prilog "bottom-up" scenariju, koji počiva na sudarima i spajanjima manjih entiteta kao osnovnim procesima u nastanku svemira kakvog danas opažamo (Jones & Lambourne 2003).

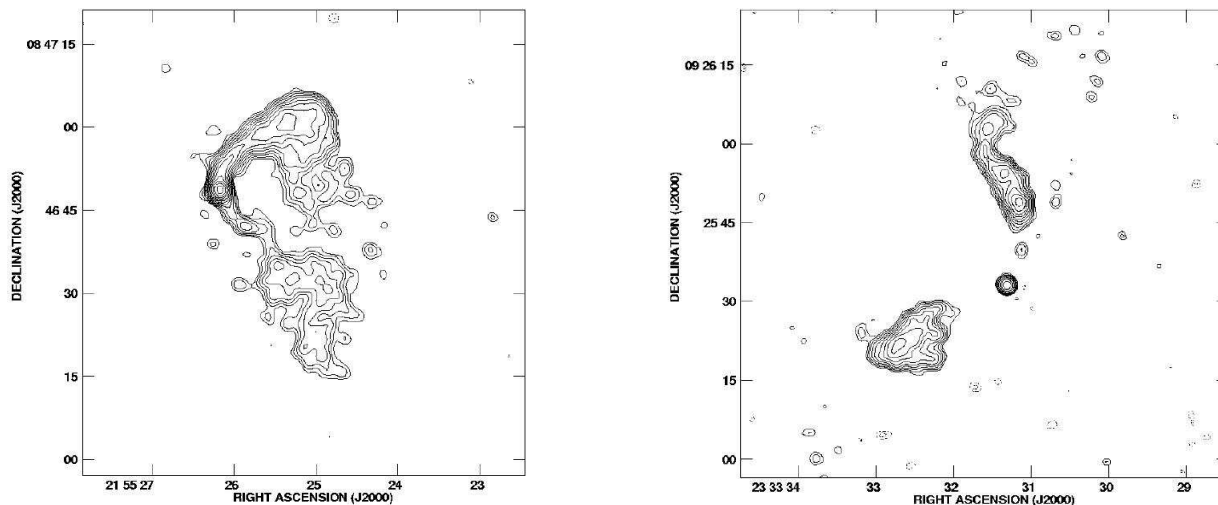
1.3 Radio galaksije sa široko savinutim repovima

Galaksije sa široko savinutim repovima (engl. *wide-angle tail*, WAT; u daljnjem tekstu WAT galaksije) su radio galaksije čiji su mlazovi savijeni tako da oblikom nalikuju slovu

”C” (slika 3 pokazuje dvije takve galaksije). Obično se nalaze u grupama ili jatima galaksija i najčešće su to najmasivnije galaksije u svojim skupinama. Smatra se da je ovakva karakteristična morfologija WAT galaksija rezultat tlaka koji se stvara na mlazovima dok se galaksija giba velikom brzinom kroz ICM (Begelman et al. 1979). Pretpostavlja se da dodatni doprinos zakrivljenju mlazova dolazi od sile uzgona koja potječe od razlike u gustoći između mlazova i ICM-a (ovaj model su prvi predložili Gull & Northover 1973).

U sustavima galaksija koji su virijalizirani, odnosno dinamički relaksirani, očekuje se da dominantna, najmasivnija galaksija leži na dnu potencijalne jame sustava, dakle blizu njegovog središta (Merritt 1984). Također, takve dominantne galaksije u jatu pokazuju mala vlastita gibanja prema ostatku sistema, odnosno ICM-u. Oegerle & Hill (2001) pokazali su da su vlastite brzine galaksija, u smjeru doglednice, za najsjajnije galaksije u relaksiranim sustavima $\lesssim 150$ km/s. Tako niske brzine galaksija prema ICM-u nisu dovoljne da uzrokuju opaženo savijanje mlazova. Osim toga, primjećeno je da WAT galaksije, iako su najmasivnije, često nisu u središtu svog sustava, već su odmaknute od njega za ~ 100 kpc (Sakellou & Merrifield 2000). Stoga je predložen model u kojem je velika relativna brzina WAT galaksija prema ICM-u i njihov odmak od centra jata rezultat nereleksiranosti sustava, odnosno procesa sudara grupa ili jata galaksija u kojem se sistem nalazi (npr. Pinkeney et al. 1994). Kao potvrda ovom modelu, u sustavima s WAT galaksijama primjećeni su i neki drugi pokazatelji sudara kao što su izduženost područja emisije rendgenskog zračenja i njegova podstruktura (Burns et al. 1994). Znakovito je da se smjer izduženosti emisije rendgenskog zračenja često podudara sa smjerom u kojem se pružaju repovi WAT galaksija (Gomez et al. 1997), za kojeg se pretpostavlja da se podudara sa smjerom brzine galaksije prema ICM-u. Prema predloženom modelu, taj smjer predstavlja liniju sudara jata galaksija.

WAT galaksije smatraju se graničnim slučajem između FR I i FR II galaksija. Karakterizirane su vrlo dobro usmjerenim mlazovima koji se naglo proširuju u područja difuznog zračenja. Tipična veličina mlazova je nekoliko desetaka, pa i do stotinjak kiloparseka i često, ali ne uvijek, završavaju u vrućim točkama, što je dobra indikacija da su brzine plazme u mlazovima relativističke. Jetha et al. (2006) su na temelju uzorka od 30 WAT galaksija došli do zaključka da se tipične brzine čestica plazme u mlazovima takvih galaksija kreću između $0.3c$ i $0.7c$.



Slika 3: Dvije WAT galaksije iz Jetha et al. 2006. Galaksija u lijevom okviru ima savinute i mlazove i proširena područja radio emisije. Kod desne galaksije mlazovi se ne vide, no uočava se savinutost proširenih područja zračenja.

2 Ciljevi rada

U ovom radu predstavljen je uzorak WAT galaksija opaženih u COSMOS pregledu neba. Koristeći optičke, radio i rendgenske COSMOS podatke, provedena je analiza tih galaksija i njihovog okruženja s ciljem da se ispita mogu li se WAT galaksije koristiti kao dobri pokazatelji dinamički nerelaksiranih sustava, odnosno sustava u procesu sudara. U slučaju da je tako, dobili bismo vrijedan alat za ispitivanja grupiranja sustava galaksija na visokim crvenim pomacima zbog svojstva snažnih radio galaksija (kao što su WAT galaksije) da se relativno lako mogu detektirati, jer im se sjaj ne gubi prolaskom kroz područja puna prašine i plina, kao što je slučaj kod objekata koji su vidljivi u nekim drugim područjima spektra (npr. optičko ili infracrveno). Procesi sudara jata galaksija su od velike važnosti u opažačkoj kozmologiji jer potvrđuju kozmološke modele koji počivaju na "bottom-up" scenariju. Ispitana je i moguća povezanost između pojave WAT galaksija i snažnih koncentracija materije na velikoj skali.

U sljedećem poglavlju dan je opis COSMOS pregleda neba, čiji su podaci korišteni u ovom radu. Zatim je predstavljena analiza strukture na velikoj skali u COSMOS polju (Scoville et al. 2007) koja je korištena za ispitivanje odnosa WAT galaksija i LSS-a. U potpoglavlju 3.3 predstavljen je COSMOS uzorak WAT galaksija, a u 3.4 je opisana metoda

korištena za analizu grupiranja galaksija. Poglavlje 4 donosi rezultate koji su u poglavlju 5 diskutirani. Zaključci doneseni na temelju ovog rada iznijeti su u poglavlju 6.

3 Podaci i metode

3.1 COSMOS pregled neba

Cosmic Evolution Survey (COSMOS; Scoville et al. 2007a) je pankromatski pregled neba čiji je cilj ispitati evoluciju galaksija i aktivnih galaktičkih jezgri kroz kozmičko vrijeme, s posebnim naglaskom na ispitivanje njihovog kozmičkog okruženja. COSMOS polje čini područje neba veličine oko 2 kvadratna stupnja ($1.4^\circ \times 1.4^\circ$). Promatrano je u širokom rasponu frekvencija, od radio valova do rendgenskog zračenja. COSMOS pregled neba je specifičan i posebno važan zato što je istovremeno dubok (ima veliku osjetljivost na tamne i daleke objekte) i velik (obuhvaća relativno veliko polje na nebu). Te karakteristike vode na detektiranje velikog broja objekata i to u različitim epohama starosti svemira, što omogućava provedbu valjane statističke analize. U COSMOS pregledu neba sudjeluju neki od najpoznatijih teleskopa današnjice, kao što su svemirski teleskopi Hubble, Spitzer, XMM-Newton, Chandra i GALEX, te zemaljski teleskopi Subaru, NOAO, CFHT, UKRIT, Magellan i radio-interferometrijska mreža VLA. COSMOS pregled neba je do danas najveći mozaik snimljen pomoću ACS kamere na Hubbleovom svemirskom teleskopu (Koekemoer et al. 2007). Od ultraljubičastog do infracrvenog područja elektromagnetskog spektra, COSMOS polje je snimljeno u čak 34 fotometrijske vrpce, što omogućuje vrlo precizno određivanje fotometrijskih crvenih pomaka promatranih objekata (Ilbert et al. 2007; Salvato et al. 2009). Uz astrometrijske i fotometrijske podatke, COSMOS baze podataka uključuju i izmjerene spektre za $\sim 10\%$ detektiranih objekata, te pomoću njih određene vrlo kvalitetne spektroskopske crvene pomake (Lilly et al. 2007, 2009). Podaci sakupljeni ovom kolaboracijom su djelomično dostupni javnosti.

COSMOS polje je promatrano u radiovalnom području, na frekvenciji 1.4 GHz, u sklopu projekta nazvanog VLA-COSMOS (Schinnerer et al. 2007; Smolčić 2007). Cjelokupno 2° polje snimljeno je radio-interferometrijskom mrežom Very Large Array (VLA) u A i C konfiguracijama. Katalog detektiranih izvora sadrži oko 3600 izvora, od toga je ~ 60

više-komponentnih izvora (tj. izvora kojima se može razlučiti struktura - jezgra, mlazovi, proširena područja i sl.). VLA-COSMOS je najveći radio pregled neba koji se odlikuje vrlo velikom osjetljivošću ($rms \sim 10 - 15 \mu\text{Jy/snop}$) i visokom razlučivosti ($1.5'' \times 1.4''$). Dodatna promatranja središnjeg $1''$, rezultirala su još kvalitetnijim snimkama tog dijela, s osjetljivošću od $\sim 7 \mu\text{Jy/snop}$.

Za snimanje COSMOS polja u rendgenskom dijelu spektra korišteni su svemirski teleskopi XMM-Newton (Hasinger et al. 2007) i Chandra (Elvis et al. 2009). U ovom radu koristi se rendgenski katalog jata galaksija, opisan u Finoguenov et al. 2007, koji sadrži ~ 200 jata i grupa galaksija.

3.2 Struktura na velikoj skali u polju COSMOS pregleda neba

Identifikacija i analiza struktura na velikoj skali (LSS) provedena je u području čitavog COSMOS pregleda neba. Djelomično je opisana u Scoville et al. (2007b), a uskoro se očekuje objava i ostatka analize COSMOS LSS-a. Složenom tehnikom prilagodljivog izgladenja (engl. *adaptive smoothing*), analizirani su optički podaci i načinjena je trodimenzionalna mapa LSS-a, koja je korištena u ovom radu. Prikaz LSS-a u cijelom polju COSMOS pregleda neba je diskretan u z koordinati (crvenom pomaku). Proučavano područje podijeljeno je, prema crvenom pomaku, u 91 odjeljak, u rasponu od $z \approx 0.15$ do $z \approx 2.44$. Razmak između susjednih crvenih pomaka povećava se proporcionalno s $(1+z)$, čime se nastoji slijediti smanjenje preciznosti fotometrijski određenih crvenih pomaka na većim vrijednostima z .

3.3 Uzorak WAT galaksija u COSMOS polju

Analizom morfologije svih radio galaksija detektiranih u COSMOS polju izdvojeno je osam galaksija sa savinutim mlazovima koje čine uzorak WAT galaksija. U tablici 1 navedena su neka njihova svojstva. Tih osam galaksija i njihove okoline predmet su analize u ostatku ovog rada.

Da bi se ispitala okolina svake WAT galaksije, potrebno je izdvojiti sve galaksije koje se

Tablica 1: Uzorak WAT galaksija u COSMOS polju. Uz oznaku svake galaksije navedene su njezine koordinate na nebeskoj sferi (rektascenzija - RA i deklinacija - DEC), te izmjereni crveni pomak (z). Zvezdica uz iznos crvenog pomaka označava da je on određen spektroskopski u zCOSMOS mjerenju (Lilly et al. 2007, 2009), dvije zvezdice označavaju spektroskopski crveni pomak iz SDSS pregleda neba (Abazajian et al. 2009), a bez oznake su navedeni fotometrijski izmjereni crveni pomaci (Ilbert et al. 2009). Zadnji stupac sadrži zvjezdanu masu WAT galaksije izraženu u jedinicama mase Sunca (M_{\odot}).

oznaka	RA	DEC	z	masa/ M_{\odot}
CWAT-01	150.1143	2.3565	0.220*	5.56×10^{11}
CWAT-02	150.2066	1.8233	0.530**	4.27×10^{11}
CWAT-03	149.6194	1.7355	0.597	5.78×10^{11}
CWAT-04	149.6979	2.5695	0.964	4.60×10^{11}
CWAT-05	150.0771	2.5489	0.890*	3.10×10^{11}
CWAT-06	150.3502	2.8269	0.826*	6.47×10^{11}
CWAT-07	150.4478	1.8505	0.894*	2.59×10^{11}
CWAT-08	150.6611	2.3646	0.827	3.33×10^{11}

nalaze dovoljno blizu da bi mogle pripadati istom jatu galaksija kojem eventualno pripada WAT. Kao što je već spomenuto u uvodnom dijelu ovog rada, linearne dimenzije jata rijetko prelaze ~ 10 Mpc. Stoga sam promatranje okoline svake pojedine WAT galaksije ograničila na područje udaljeno do ~ 5 Mpc od njezine središnje jezgre. Time je prostor omeđen u dvije dimenzije (rektascenziji - RA i deklinaciji - DEC). Treba još uzeti u obzir i činjenicu da su nekoj galaksiji fizički bliske samo one galaksije koje se nalaze na (približno) istom crvenom pomaku (z). Zato u analizu uključujem samo one galaksije koje se nalaze unutar intervala $\Delta z = 3\sigma_{\delta z/(1+z)} \times (1 + z_{wat})$, centriranom na crvenom pomaku WAT galaksije, pri čemu je $\sigma_{\delta z/(1+z)}$ pogreška fotometrijskog crvenog pomaka, koja prema Ilbert et al. (2009) iznosi 0.7% za objekte s AB-magnitudom manjom od 22.5 ($i_{AB}^+ < 22.5$), te 3.34% za objekte slabijeg sjaja ($i_{AB}^+ > 22.5$).

3.4 Utvrđivanje grupiranja galaksija metodom baziranom na Voronoi teselaciji

Za analizu područja oko WAT galaksija napisala sam kompjuterske programe, korištenjem programskog jezika IDL, koji mi je bio dostupan zahvaljujući susretljivosti sveučilišta Cal-

ifornia Institute of Technology. Napisani kodovi su vrlo općeniti i primjenjivi na bilo koji radio izvor (ne samo WAT galaksiju), što omogućuje njihovu moguću primjenu i u budućnosti, u kontekstu ispitivanja nekih drugih problema vezanih uz grupiranje galaksija.

Za određivanje grupiranja galaksija i identificiranje područja njihove povećane gustoće korištena je metoda koja se temelji na postupku Voronoi teselacije. Riječ je o podjeli (u ovom slučaju dvodimenzionalne) plohe, koja sadrži proizvoljno razmještene točke, u mnogokute tako da svaki mnogokut (Voronoi ćelija) sadrži isključivo jednu točku. Pritom je svaka stranica mnogokuta jednako udaljena od dviju točaka koje razdvaja, a svaki čvor Voronoi mreže jednako je udaljen od tri najbliže točke. U ovom slučaju točke predstavljaju položaje galaksija na nebeskoj sferi, određene dvjema koordinatama, rektascenzijom (RA) i deklinacijom (DEC). Time je svakoj galaksiji pridružena Voronoi ćelija određene površine, čiji se inverz naziva lokalnom gustoćom galaksije. Gustoću galaksija uzimamo kao mjeru grupiranosti sistema. Jasno je da će u grupama ili jatima galaksija prosječna gustoća biti veća nego u zonama individualnih galaksija. Za očekivati je i da će se gustoća povećavati od rubova prema središtu skupine galaksija.

Da bi se isključila ili barem smanjila mogućnost da je povećana gustoća rezultat slučajnog razmještaja galaksija, a ne stvarne grupiranosti u jata, provedene su Monte Carlo simulacije za svaki od osam uzoraka. Jednak broj galaksija kao u stvarnom uzorku nasumično je razmješten po jednakoj površini, zatim je provedena Voronoi teselacija (Botzler 2004) na simuliranim galaksijama, te je zabilježena njihova prosječna gustoća. Isti postupak je ponovljen 10 puta za svaki od stvarnih WAT uzoraka, te je tako određena prosječna gustoća ($\bar{\rho}$) i standardna devijacija gustoće (σ_{ρ}) svakog od devet uzorka. Kao granicu povećane gustoće u svakom uzorku uzima se vrijednost ($\bar{\rho} + 5\sigma_{\rho}$). Sve galaksije čija lokalna gustoća prelazi ovu vrijednost, smatraju se "zgušnjutim" galaksijama i one su u Voronoi dijagramima (slike 4 - 11) označene punim kružićima kako bi se očitala i lakše prepoznala područja veće gustoće.

4 Rezultati

Na slikama 4 - 11 prikazane su radio slike, globalni prikaz LSS-a na pripadajućem crvenom pomaku, te Voronoi dijagrami za svaku od osam WAT galaksija iz COSMOS polja.

Radio slike (gornji okvir na slikama 4 - 11) prikazuju izofote radio zračenja na frekvenciji od 1.4 GHz, čiji su nivoi određeni s $2^n \cdot \sigma$, $n = 3, 4, 5, \dots$, pri čemu je $\sigma = 10.5 \mu\text{ Jy/snop}$ osjetljivost VLA-COSMOS opažanja.

U srednjem okviru na slikama 4 - 11 prikazana je struktura na velikoj skali, na danom crvenom pomaku, za svaku WAT galaksiju. Položaj WAT galaksije je označen na svakoj slici kako bi se ispitala moguća pravilnost u pojavi WAT galaksija u odnosu na LSS.

U donjem lijevom okviru na slikama 4 - 11 prikazano je područje koje je od pripadne WAT galaksije udaljeno manje od 5 Mpc u rektascenziji i deklinaciji. Svaka galaksija nalazi se unutar svoje Voronoi ćelije i označena je točkom. "Zgusnute" galaksije su posebno istaknute punim kružićem. Položaj WAT galaksije označen je zvjezdicom crvene boje. Crvenim kvadratom omeđeno je manje područje oko WAT galaksije, čiji je uvećani prikaz dan u donjem desnom okviru, kako bi se bolje uočili detalji neposredne okoline WAT galaksije. Uz Voronoi mrežu prikazane su i konture intenziteta radio (zelene linije) i rendgenskog (crvene linije) zračenja, maskirana područja³ (crne točkaste linije), a posebno su označene galaksije u sustavu čija je masa veća od mase pripadne WAT galaksije.

Procijenjeni smjer brzine svake potencijalne WAT galaksije, u ravnini neba, leži na simetrali kuta kojeg zatvaraju mlazovi, a usmjeren je na suprotnu stranu od smjera širenja mlazova.

CWAT-01

Ova radio galaksija nalazi se u vrlo gusto naseljenom području (slika 4, donji okviri) u kojem je prisutna i vrlo razgranata emisija rendgenskog zračenja. Postoji više maksimuma rendgenske emisije, a u jednom od njih se nalazi i WAT. Upravo u tom području je najveća koncentracija "zgusnutih" galaksija. Druga, veća skupina galaksija nalazi se ~ 400 kpc sjeverozapadno od WAT galaksije. Prema radio konturama prikazanim na slici 4 (gornji okvir), mlazovi se protežu do ~ 150 kpc (istočni mlaz), odnosno ~ 70 kpc (zapadni mlaz) od središnje jezgre. No, s obzirom na to da se s obje strane mogu vidjeti područja proširene difuzne emisije, otprilike 200 kpc zapadno od jezgre i ~ 150 kpc istočno

³Maskirana područja su dijelovi promatranog polja za koja nemamo pouzdane podatke. Najčešći uzrok tomu je neki sjajni objekt koji se nalazi u vidnom polju, a nije nam od interesa (štoviše blokira nam pogled na ono što bismo htjeli promatrati), poput npr. pojedinačne zvijezde iz naše galaksije.

od jezgre, vjerojatno se i mlazovi pružaju do tih udaljenosti.

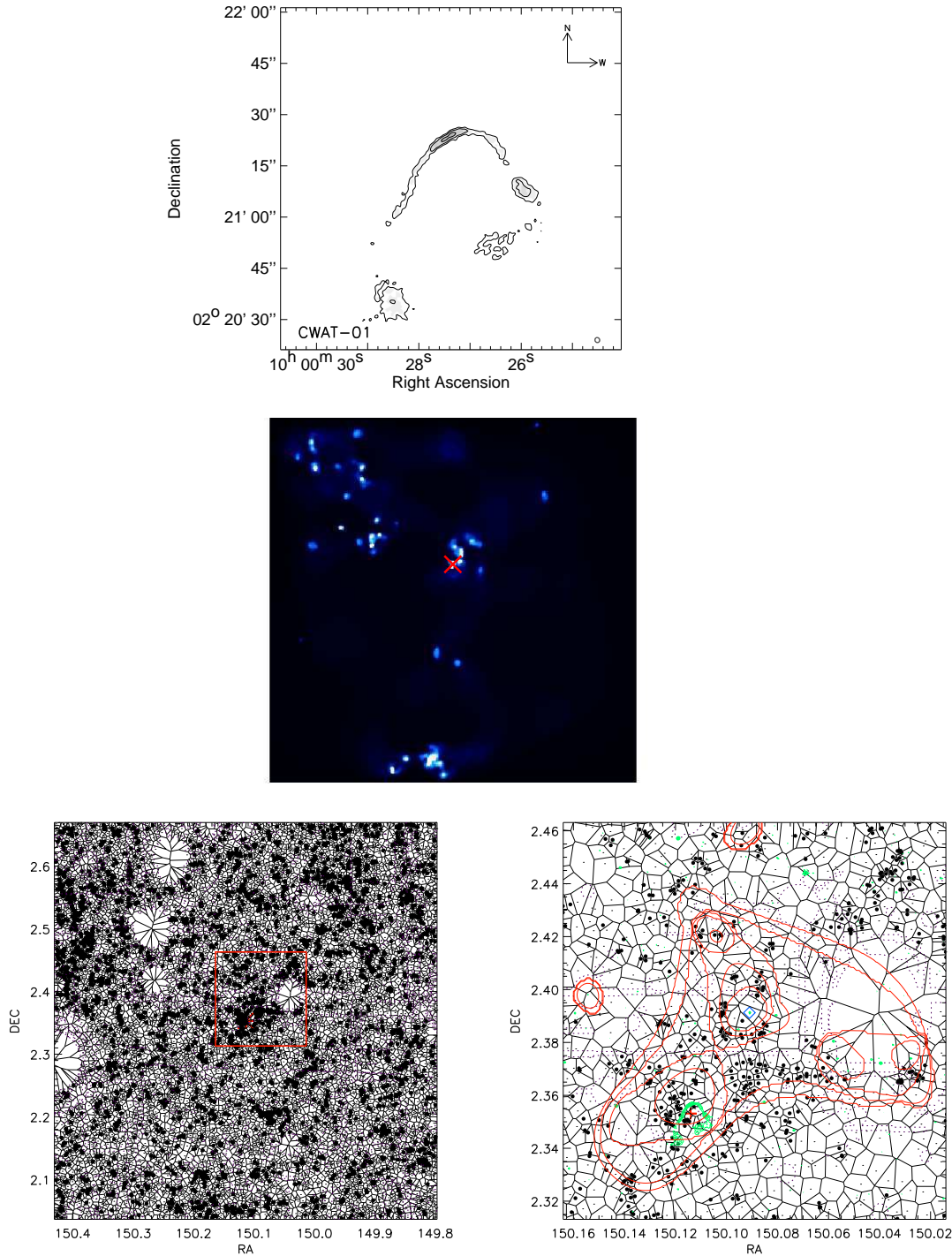
Smjer mlazova ne podudara se sasvim sa smjerom izduženosti područja rendgenske emisije, no ipak se na temelju njih može pretpostaviti da je smjer gibanja galaksije otprilike prema mjestu gdje se približavaju dva vrha u emisiji rendgenskog zračenja. Iz prikaza LSS-a na ovom crvenom pomaku, vidi se da CWAT-01 pripada području velike gustoće materije na velikoj skali, koje se pruža u istom smjeru kao i područja povećane gustoće galaksija, identificirana Voronoi dijagramima, te zona rendgenskog zračenja.

CWAT-01 je druga najmasivnija galaksija u području prikazanom na slici 4. Jedina galaksija s većom masom nalazi se u središtu sjevernog maksimuma rendgenskog zračenja (označena na slici plavim romбом), dakle u smjeru gibanja CWAT-01. Ova WAT galaksija i sustav u kojem se nalazi detaljno su opisani i analizirani u Smolčić et al. 2007.

CWAT-02

S Voronoi dijagrama na slici 5 (dolje lijevo), ali i s prikaza LSS-a (srednji okvir) vidi se da se ova radio galaksija nalazi u filamentu (tj. na njegovom rubu) povećane gustoće materije, koji se proteže na velikoj skali u smjeru sjeverozapad - jugoistok. Na manjoj skali, galaksija se nalazi u području difuzne rendgenske emisije koje je izduženo u istom smjeru (SZ - JI). Unutar područja emisije rendgenskog zračenja mogu se razlučiti dvije podgrupe "zgnusnutih" galaksija. Jedna je vrlo gusta i kompaktna, te se nalazi blizu samog maksimuma zračenja, dok je druga od nje odmaknuta prema sjeverozapadu, ima manji broj galaksija i one nisu tako kompaktno grupirane kao galaksije u prvoj podgrupi. U toj drugoj skupini nalazi se i promatrana radio galaksija. Prema položaju i zakrivljenosti mlaza, može se pretpostaviti da je njezino gibanje usmjereno prema središtu cijelog sustava, a na većoj skali u smjeru filameta velike gustoće.

Morfologija ove radio galaksije je vrlo zanimljiva jer je opažen samo jedan mlaz i dva proširena područja emisije zračenja, svako s pripadajućom vrućom točkom. Najvjerojatnije objašnjenje ovakve morfologije nalazi se u relativističkom efektu nazvanom Dopplerova usmjerenost zračenja (engl. *Doppler beaming*) - u slučaju malog kuta između smjera relativističkih mlazova i doglednice, sjaj mlaza koji se giba prema promatraču bit će pojačan u odnosu na stvarni, dok će sjaj suprotnog mlaza biti smanjen. Vjerojatno je u slučaju promatrane galaksije ovaj efekt izražen do te mjere da je jednom od mlazova (onom koji je



Slika 4: Gornji okvir prikazuje radio sliku WAT galaksije snimljenu na frekvenciji od 1.4 GHz. Razine izofota su $2^n \cdot \sigma$, gdje je $n = 3, 4, \dots$, a $\sigma = 10.5 \mu\text{Jy/snop}$ je osjetljivost mjerenja. Razlučivost ($1.5'' \times 1.4''$) je prikazana kao elipsa u donjem desnom kutu okvira. Srednji okvir: struktura na velikoj skali u čitavom COSMOS polju centrirana na crvenom pomaku $z = 0.2237$, s poluširinom odjeljka $\Delta z = 0.030$. Označen je položaj WAT galaksije. Svjetlije boje označavaju zone veće gustoće. Donji okviri prikazuju Voronoi dijagrame područja oko CWAT-01, s posebno istaknutim "zgusnutim" galaksijama. Lijevo je prikazano područje udaljeno od WAT galaksije, označene zvjezdicom, za ~ 5 Mpc u rekstascenziji i deklinaciji. Linijama je ocrtano područje koje je uvećano u desnom okviru. U njemu su prikazane konture radio i rendgenskog zračenja, te maskirana područja. Plavim romбом je označena jedina galaksija veće mase od CWAT-01.

usmjeren od nas) sjaj toliko umanjen da ga se ne može detektirati u granicama osjetljivosti COSMOS mjerenja.

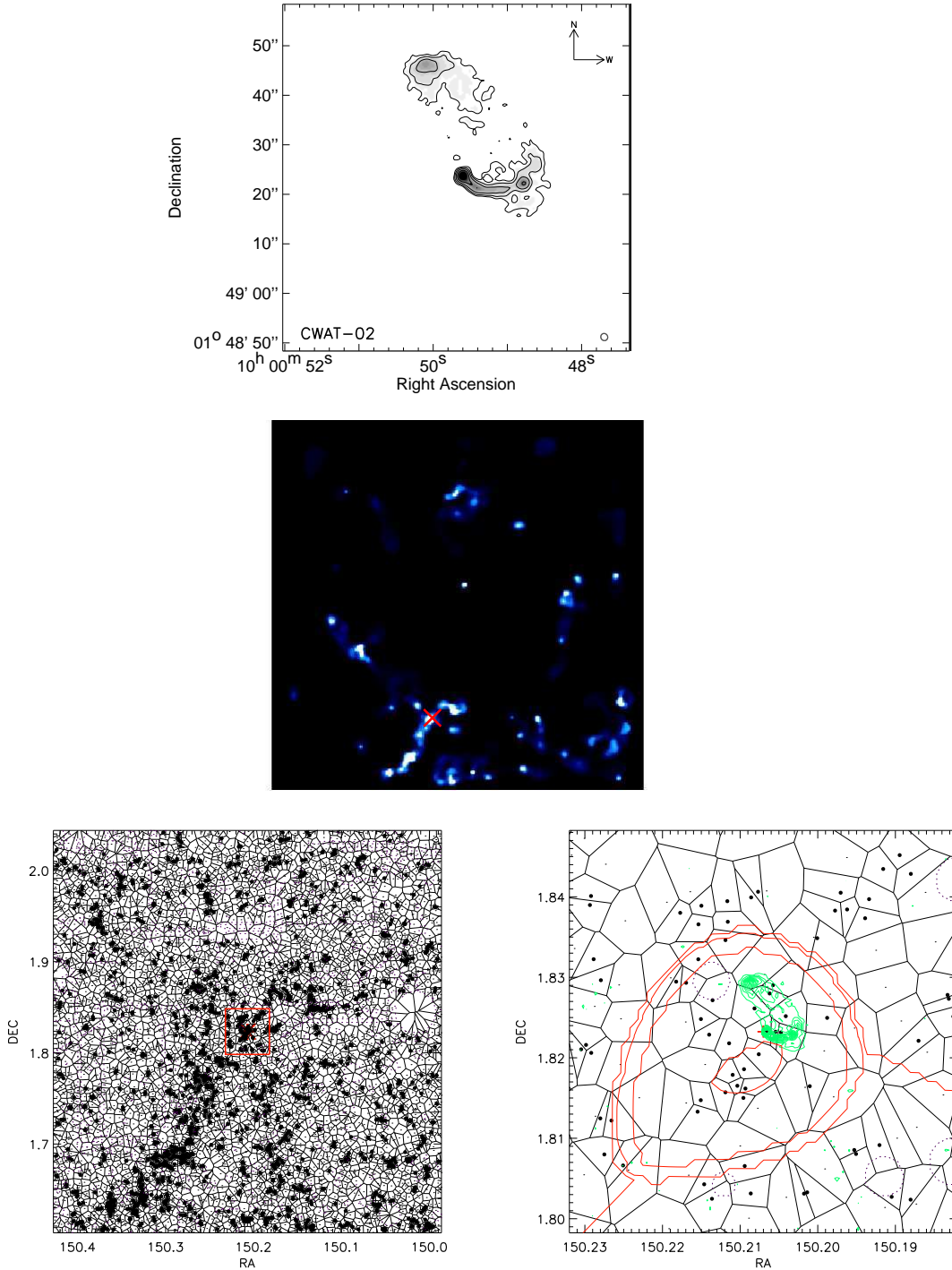
CWAT-02 je najmasivnija galaksija u čitavoj grupi galaksija kojoj pripada. Sljedeća najmasivnija galaksija nalazi se u središnjoj podskupini galaksija prema kojoj je usmjerena brzina CWAT-02. Detaljan opis ove radio galaksije i sustava u kojem se nalazi dan je u Oklopčić et al. 2010.

CWAT-03

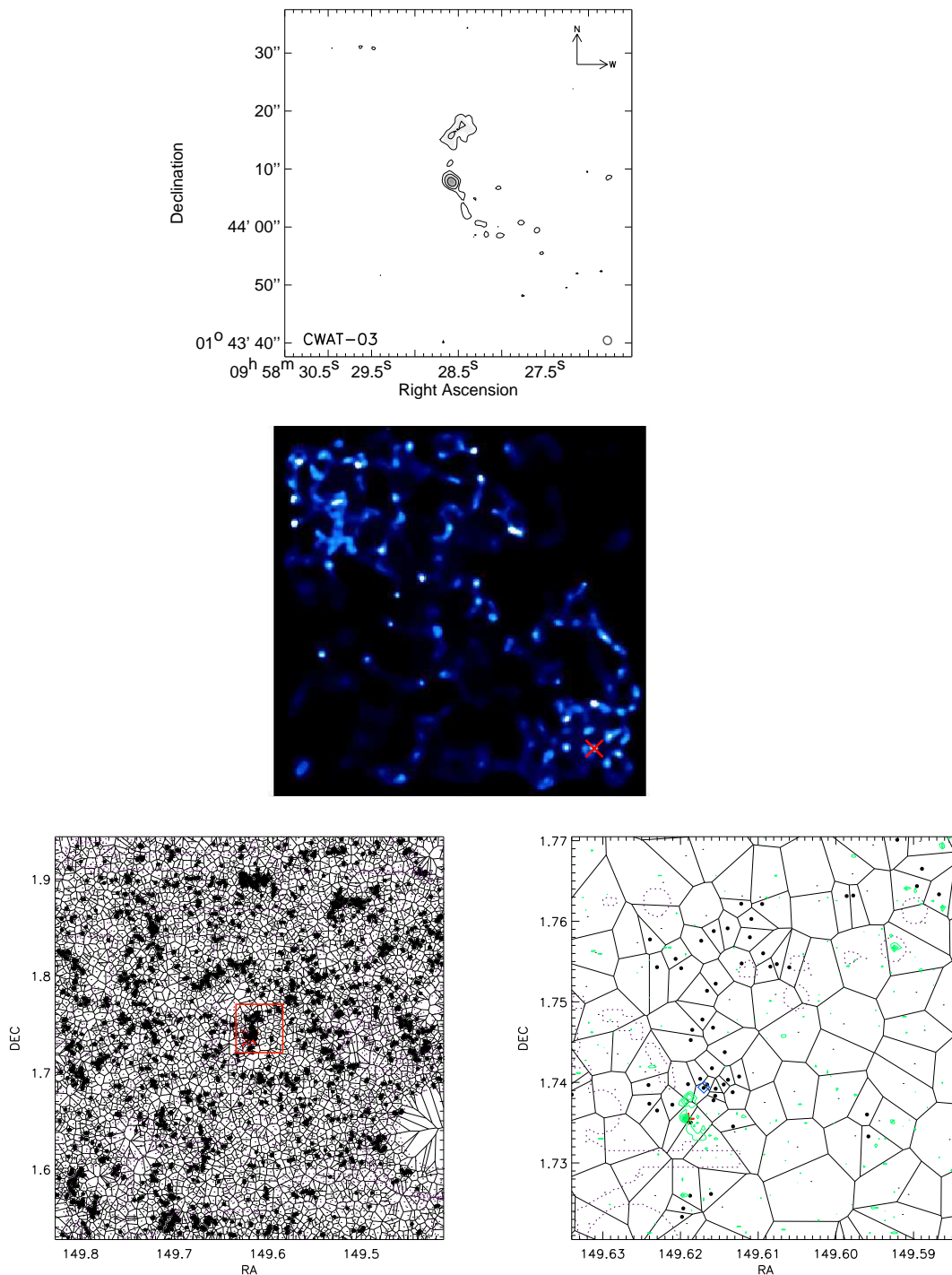
Kao što se vidi u donjem lijevom okviru slike 6, u širem području oko ove radio galaksije ističe se nekoliko manjih zgušnjena. U jednom od njih (prikazanom u donjem desnom okviru slike 6), i to na samom rubu, nalazi se WAT galaksija. Skupina "zgušnjutih" galaksija izduljena je u smjeru sjever-jug. Javno se mogu razlučiti dvije podgrupe, međusobno udaljene ~ 500 kpc, koje broje približno jednak broj galaksija, a povezane su nešto siromašnijim "mostom" od svega nekoliko galaksija. Sjeverna podgrupa je rjeđe naseljena, dok je južna dominirana gotovo sferičnom koncentracijom vrlo bliskih galaksija. Iz nje se, prema istoku, proteže "rep" galaksija kojima se postepeno smanjuje gustoća kako se udaljavaju od centra podgrupe. Upravo u tom "repu" nalazi se i WAT galaksija. Njezini mlazovi se protežu na udaljenost od $\sim 70 - 80$ kpc od središnje jezgre i okrenuti su prema gustoj asoocijaciji galaksija, što upućuje na to da se WAT od nje udaljava. U toj skupini galaksija, od koje se CWAT-03 odmiče, nalazi se jedina galaksija u prikazanom području čija je masa veća od mase CWAT-03. Sa srednjeg okvira na slici 6 vidi se da se položaj CWAT-03 podudara s područjem povećane gustoće materije na velikoj skali.

CWAT-04

Već samim pogledom na donji lijevi okvir slike 7 može se uočiti da je prostor oko ove radio galaksije poprilično homogeno ispunjen (pritom isključujemo maskirana područja za koja nemamo podataka), izuzev nekoliko manjih asocijacija "zgušnjutih" galaksija. Tako je i WAT galaksija okružena sa svega desetak bliskih "zgušnjutih" galaksija. No, zbog velikog udjela maskiranih područja moguće je da je ovaj prostor u stvarnosti mnogo bogatiji galaksijama nego što se to vidi iz slika. WAT galaksija je najmasivnija galaksija u ovom području i smještena je gotovo u samom središtu manje skupine, izdužene u smjeru sjever-jug. U blizini se nalazi vrlo kompaktno područje difuzne emisije rendgenskog zračenja.



Slika 5: Gornji okvir prikazuje radio sliku WAT galaksije snimljenu na frekvenciji od 1.4 GHz. Razine izofota su $2^n \cdot \sigma$, gdje je $n = 3, 4, \dots$, a $\sigma = 10.5 \mu\text{Jy/snop}$ je osjetljivost mjerenja. Razlučivost ($1.5'' \times 1.4''$) je prikazana kao elipsa u donjem desnom kutu okvira. Srednji okvir: struktura na velikoj skali u čitavom COSMOS polju centrirana na crvenom pomaku $z = 0.5303$, s poluširinom odjeljka $\Delta z = 0.0378$. Označen je položaj WAT galaksije. Svjetlije boje označavaju zone veće gustoće. Donji okviri prikazuju Voronoi dijagrame područja oko CWAT-02, s posebno istaknutim "zgusnutim" galaksijama. Lijevo je prikazano područje udaljeno od WAT galaksije, označene zvjezdicom, za ~ 5 Mpc u rekstascenziji i deklinaciji. Linijama je ocrtano područje koje je uvećano u desnom okviru. U njemu su prikazane konture radio i rendgenskog zračenja, te maskirana područja.



Slika 6: Gornji okvir prikazuje radio sliku WAT galaksije snimljenu na frekvenciji od 1.4 GHz. Razine izofota su $2^n \cdot \sigma$, gdje je $n = 3, 4, \dots$, a $\sigma = 10.5 \mu\text{Jy/snop}$ je osjetljivost mjerenja. Razlučivost ($1.5'' \times 1.4''$) je prikazana kao elipsa u donjem desnom kutu okvira. Srednji okvir: struktura na velikoj skali u čitavom COSMOS polju centrirana na crvenom pomaku $z = 0.6083$, s poluširinom odjeljka $\Delta z = 0.0397$. Označen je položaj WAT galaksije. Svjetlije boje označavaju zone veće gustoće. Donji okviri prikazuju Voronoi dijagrame područja oko CWAT-03, s posebno istaknutim "zgusnutim" galaksijama. Lijevo je prikazano područje udaljeno od WAT galaksije, označene zvjezdicom, za ~ 5 Mpc u rekstascenziji i deklinaciji. Linijama je ocrtano područje koje je uvećano u desnom okviru. U njemu su prikazane konture radio zračenja, te maskirana područja. Plavim romбом je označena jedina galaksija veće mase od CWAT-03.

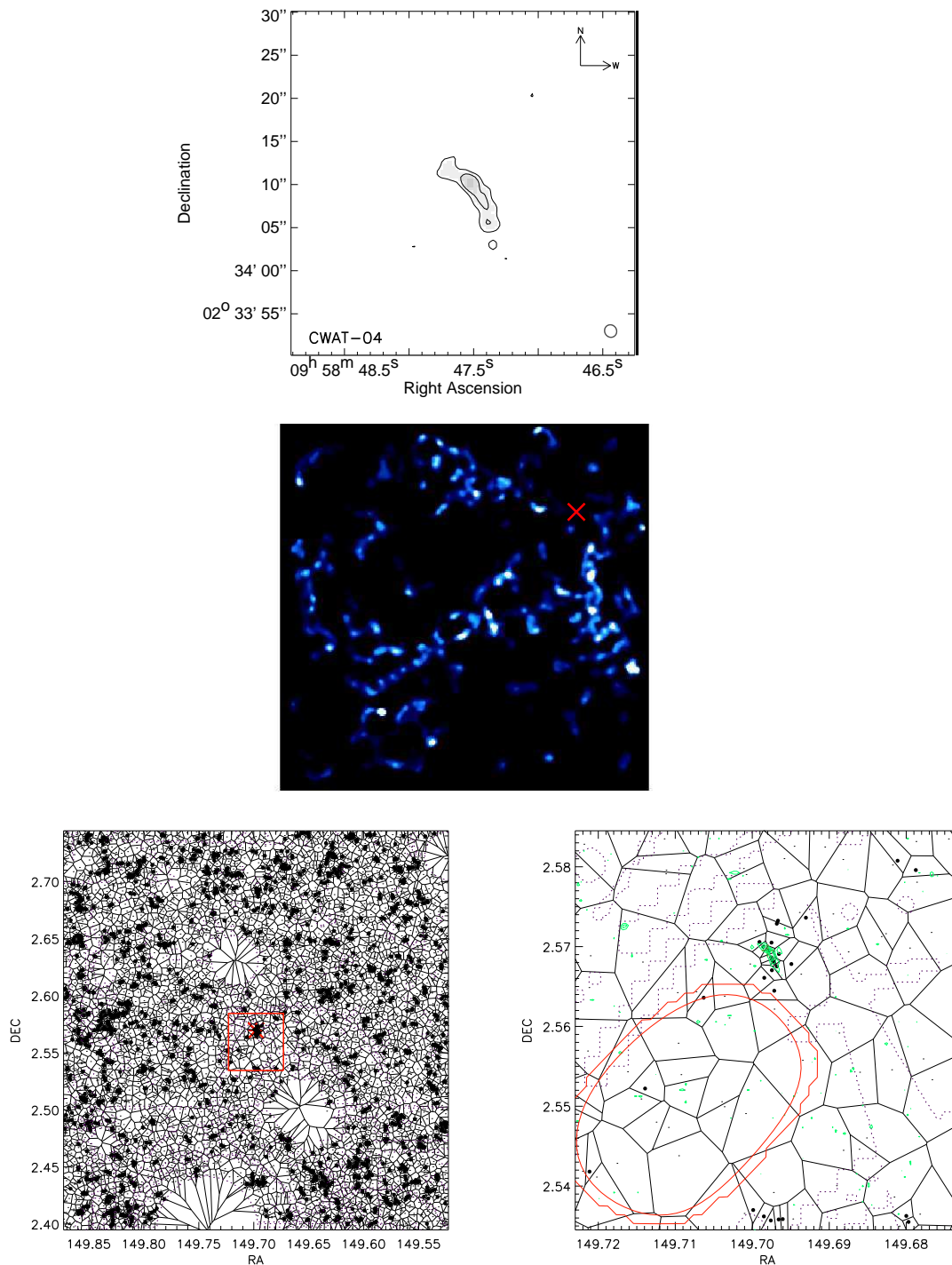
Ono je blago izduženo u smjeru sjeverozapad - jugoistok. Iako su mlazovi radio galaksije relativno kratki (južni mlaz se proteže do ~ 40 kpc od središnje jezgre, a sjeverni do ~ 30 kpc), na temelju njih se ipak može pretpostaviti da je smjer gibanja radio galaksije prema sjeverozapadu, što se otprilike podudara sa smjerom izduženosti rendgenskog zračenja (SZ - JI). Ova WAT galaksija se ne nalazi u području koje se na velikoj skali odlikuje velikom gustoćom materije.

CWAT-05

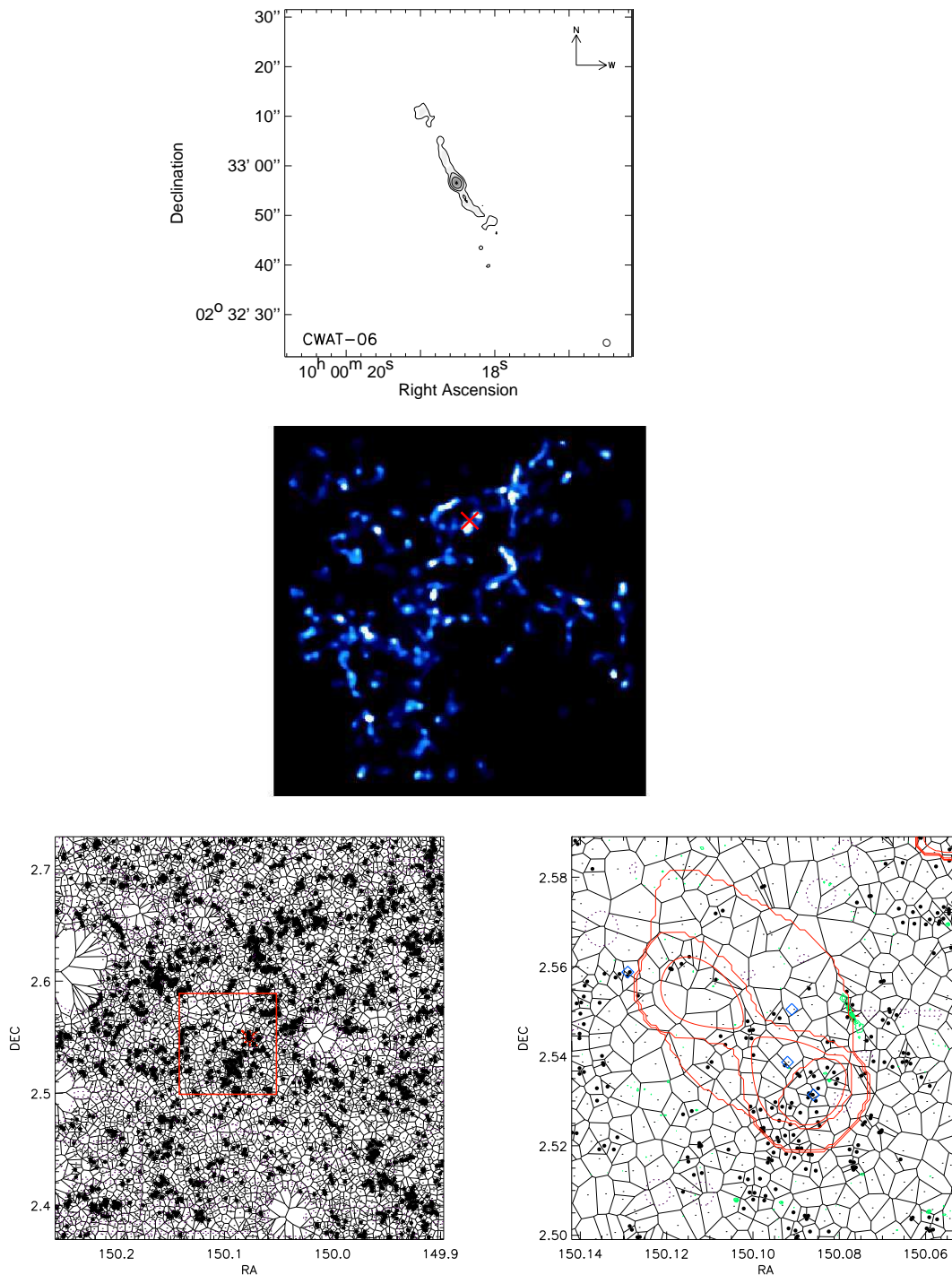
Voronoi dijagrami (slika 8, donji okviri) otkrivaju da se ova WAT galaksija nalazi u području povećane gustoće galaksija. Konture difuznog rendgenskog zračenja pokazuju zanimljivu podstrukturu. Postoje dva područja intenzivnog rendgenskog zračenja. Jedno se podudara s najvećom koncentracijom galaksija u analiziranom polju, dok je drugo slabije naseljeno. Na granici između dva maksimuma zračenja proteže se tanka vrpca "zgnusnutih" Voronoi ćelija. WAT galaksija nalazi se na rubu rendgenske emisije, sjeverozapadno od velike skupine galaksija. Iako su joj mlazovi slabo zakrivljeni, oblik im ukazuje na to da je brzina galaksije usmjerena prema rendgenskom središtu, tj. prema granici dva vršna područja zračenja. Na slici 8, u donjem desnom okviru, plavim romбом su označene galaksije koje su masivnije od CWAT-05. Njihov razmještaj dobro slijedi izduženje rendgenske emisije. Dvije takve galaksije nalaze se u južnom maksimumu zračenja (jedna od njih se nalazi u samom njegovom središtu). Preostale dvije pripadaju filamentima "zgnusnutih" galaksija koji se protežu tako da svojim oblikom slijede obrise područja rendgenskog zračenja.

U radio prikazu ove galaksije (gornji okvir slike 8) dominira sjajna središnja jezgra iz koje se pružaju dobro kolimirani mlazovi. Sjeverni mlaz se prostire do ~ 80 kpc od jezgre i tek se pri samom kraju savija. Nešto dalje od njega, ~ 125 kpc sjeveroistočno od središnje jezgre, pruža se prošireno područje difuznog zračenja u kojem se ističe posebno sjajni središnji dio, vjerojatno vruća točka. Drugi mlaz se pruža od jezgre prema jugozapadu i dugačak je ~ 65 kpc, savijeniji je od sjevernog mlaza i također završava u proširenom području zračenja.

U srednjem okviru slike 8 vidi se da se ova WAT galaksija nalazi u području najveće gustoće LSS-a, na svom crvenom pomaku.



Slika 7: Gornji okvir prikazuje radio sliku WAT galaksije snimljenu na frekvenciji od 1.4 GHz. Razine izofota su $2^n \cdot \sigma$, gdje je $n = 3, 4, \dots$, a $\sigma = 10.5 \mu\text{Jy/snop}$ je osjetljivost mjerenja. Razlučivost ($1.5'' \times 1.4''$) je prikazana kao elipsa u donjem desnom kutu okvira. Srednji okvir: struktura na velikoj skali u čitavom COSMOS polju centrirana na crvenom pomaku $z = 0.9619$, s poluširinom odjeljka $\Delta z = 0.0484$. Označen je položaj WAT galaksije. Svjetlije boje označavaju zone veće gustoće. Donji okviri prikazuju Voronoi dijagrame područja oko CWAT-04, s posebno istaknutim "zgusnutim" galaksijama. Lijevo je prikazano područje udaljeno od WAT galaksije, označene zvjezdicom, za ~ 5 Mpc u rekstascenziji i deklinaciji. Linijama je ocrtano područje koje je uvećano u desnom okviru. U njemu su prikazane konture radio i rendgenskog zračenja, te maskirana područja.



Slika 8: Gornji okvir prikazuje radio sliku WAT galaksije snimljenu na frekvenciji od 1.4 GHz. Razine izofota su $2^n \cdot \sigma$, gdje je $n = 3, 4, \dots$, a $\sigma = 10.5 \mu\text{Jy/snop}$ je osjetljivost mjerenja. Razlučivost ($1.5'' \times 1.4''$) je prikazana kao elipsa u donjem desnom kutu okvira. Srednji okvir: struktura na velikoj skali u čitavom COSMOS polju centrirana na crvenom pomaku $z = 0.8902$, s poluširinom odjeljka $\Delta z = 0.0467$. Označen je položaj WAT galaksije. Svjetlije boje označavaju zone veće gustoće. Donji okviri prikazuju Voronoi dijagrame područja oko CWAT-05, s posebno istaknutim "zgusnutim" galaksijama. Lijevo je prikazano područje udaljeno od WAT galaksije, označene zvjezdicom, za ~ 5 Mpc u rekstascenziji i deklinaciji. Linijama je ocrtano područje koje je uvećano u desnom okviru. U njemu su prikazane konture radio i rendgenskog zračenja, te maskirana područja. Plavim romбом su označene galaksije veće mase od CWAT-05.

CWAT-06

Voronoi dijagram šireg područja oko ove radio galaksije (slika 9, dolje lijevo) pokazuje da se ona nalazi u predjelu povećane koncentracije "zgusnutih" galaksija. Skupina kojoj WAT pripada vrlo je razgranata. Smjer brzine radio galaksije, ocjenjen na temelju zakrivljenih mlazova, ukazuje na to da se ona giba od sebi najbližih susjeda prema poprilično razvedenoj podgrupi južno od nje. CWAT-06 je galaksija najveće mase u prikazanom području.

Radio mlazovi slabo su joj vidljivi, a njihova zakrivljenost se tek nazire. Iz radio prikaza u gornjem okviru slike 9 vidi se da je ovo područje u određenoj mjeri kontaminirano neželjenim radio šumom. Tome je uzrok to što je ovdje riječ o rubnom području COSMOS polja, gdje osjetljivost podataka nije toliko dobra kao u središnjem dijelu.

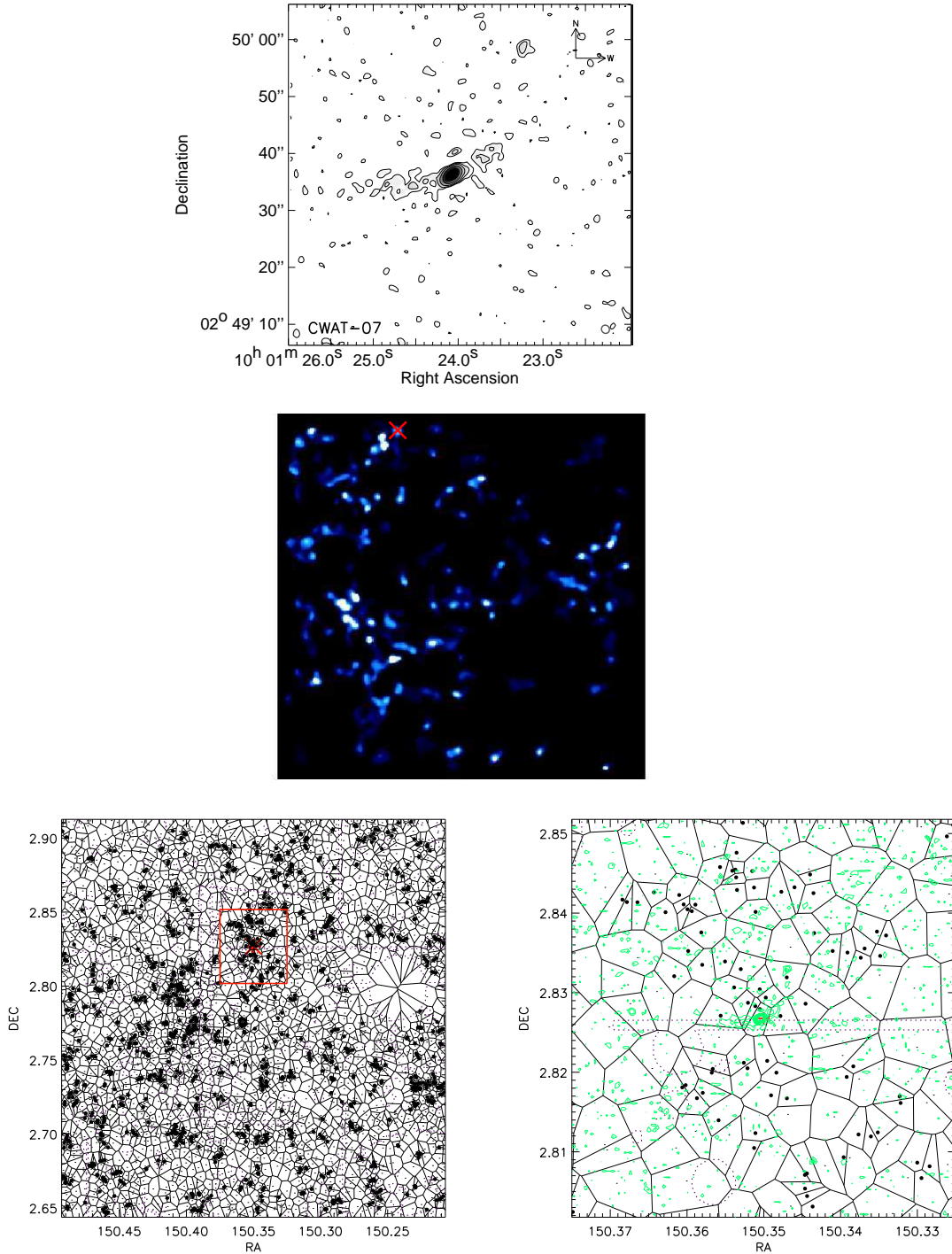
S obzirom na strukturu na velikoj skali, CWAT-06 se nalazi u umjereno gustom području, no vrlo blizu, u smjeru jugoistoka, nalazi se vrlo gusto područje.

CWAT-07

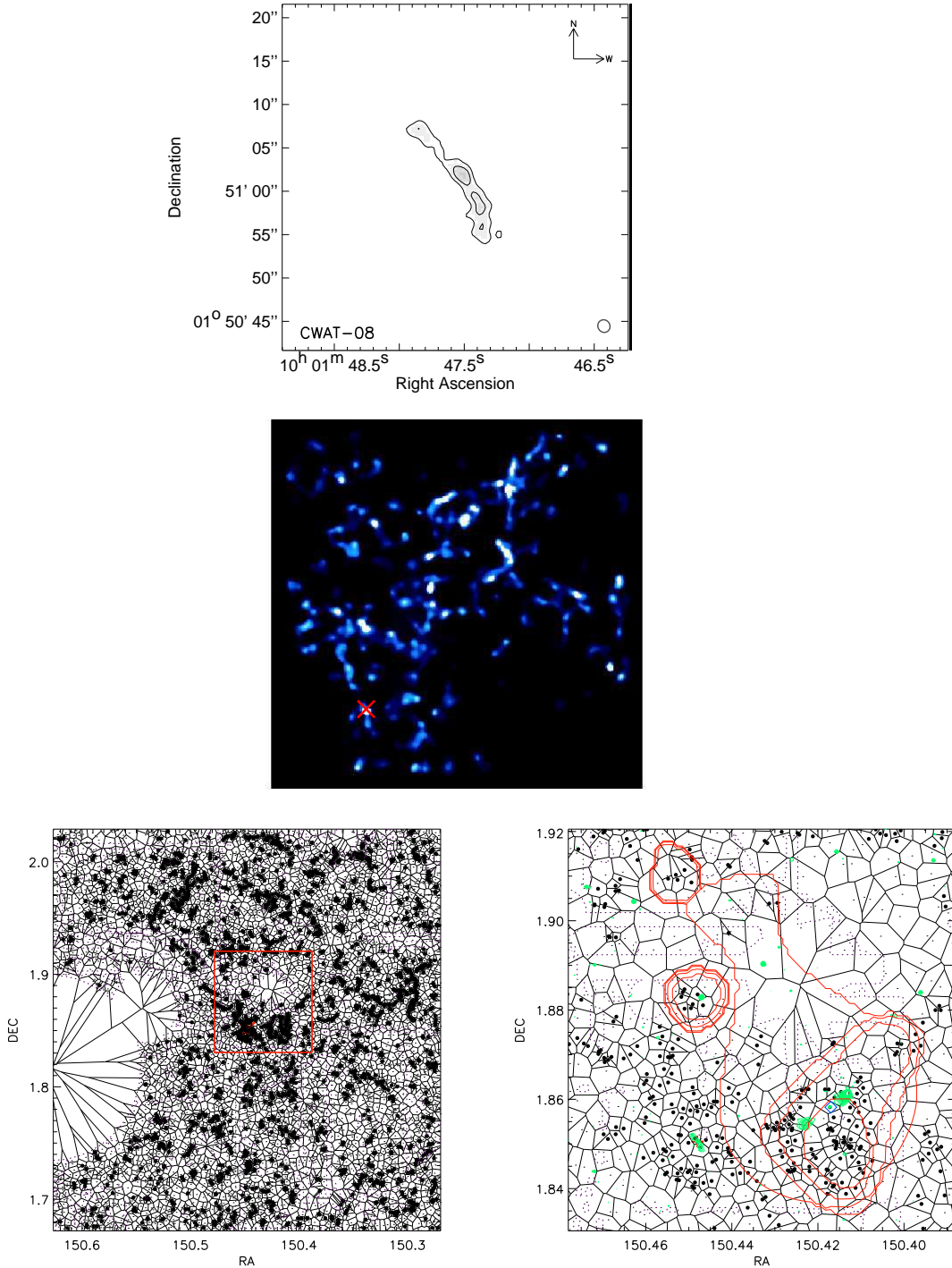
Ova radio galaksija nalazi se u najgušće naseljenom dijelu analiziranog područja (slika 10, donji lijevi okvir) u kojem se očituju dvije podgrupe "zgusnutih" galaksija. WAT galaksija nalazi se u istočnoj podgrupi, i to otprilike u njezinom središtu. Zapadno od ove skupine nalazi se druga podgrupa koja se podudara s područjem difuznog rendgenskog zračenja izduženog u smjeru sjeverozapad - jugoistok. Ova podgrupa također sadrži radio galaksiju - klasični dvostruki FR II izvor, što je ujedno i najmasivnija galaksija u ovom području, dok je sljedeća po iznosu mase upravo CWAT-07.

Mlazovi WAT radio galaksije protežu se do ~ 60 kpc od središnje jezgre. Blago su savijeni i to tako da ukazuju na to da je smjer gibanja galaksije, u ravnini neba, prema sjeverozapadu, odnosno prema drugoj podgrupi galaksija.

Na velikoj skali, ova WAT galaksija pripada istaknutom zgušnjenju materije. Iako se na pripadajućem crvenom pomaku vide i gušća područja, ona su poprilično udaljena od CWAT-07, tako da se može reći da se ova galaksija nalazi u najgušćem području u svojoj bližoj okolini.



Slika 9: Gornji okvir prikazuje radio sliku WAT galaksije snimljenu na frekvenciji od 1.4 GHz. Razine izofota su $2^n \cdot \sigma$, gdje je $n = 3, 4, \dots$, a $\sigma = 10.5 \mu\text{Jy/snop}$ je osjetljivost mjerenja. Razlučivost ($1.5'' \times 1.4''$) je prikazana kao elipsa u donjem desnom kutu okvira. Srednji okvir: struktura na velikoj skali u čitavom COSMOS polju centrirana na crvenom pomaku $z = 0.8210$, s poluširinom odjeljka $\Delta z = 0.0450$. Označen je položaj WAT galaksije. Svjetlije boje označavaju zone veće gustoće. Donji okviri prikazuju Voronoi dijagrame područja oko CWAT-06, s posebno istaknutim "zgusnutim" galaksijama. Lijevo je prikazano područje udaljeno od WAT galaksije, označene zvjezdicom, za ~ 5 Mpc u rekstascenziji i deklinaciji. Linijama je ocrtano područje koje je uvećano u desnom okviru. U njemu su prikazane konture radio zračenja, te maskirana područja.



Slika 10: Gornji okvir prikazuje radio sliku WAT galaksije snimljenu na frekvenciji od 1.4 GHz. Razine izofota su $2^n \cdot \sigma$, gdje je $n = 3, 4, \dots$, a $\sigma = 10.5 \mu\text{Jy/snop}$ je osjetljivost mjerenja. Razlučivost ($1.5'' \times 1.4''$) je prikazana kao elipsa u donjem desnom kutu okvira. Srednji okvir: struktura na velikoj skali u čitavom COSMOS polju centrirana na crvenom pomaku $z = 0.8902$, s poluširinom odjeljka $\Delta z = 0.0467$. Označen je položaj WAT galaksije. Svjetlije boje označavaju zone veće gustoće. Donji okviri prikazuju Voronoi dijagrame područja oko CWAT-07, s posebno istaknutim "zgusnutim" galaksijama. Lijevo je prikazano područje udaljeno od WAT galaksije, označene zvjezdicom, za ~ 5 Mpc u rekstascenziji i deklinaciji. Linijama je ocrtano područje koje je uvećano u desnom okviru. U njemu su prikazane konture radio i rendgenskog zračenja, te maskirana područja. Plavim romбом je označena jedina galaksija veće mase od CWAT-07.

CWAT-08

Područje oko ove WAT galaksije nije gusto naseljeno (slika 11). U njezinoj okolini nalazi se tek desetak "zgusnutih" galaksija. One čine filament izdužen u smjeru sjever-jug, koji sadrži nekoliko vrlo masivnih galaksija (plavim rombom su na donjem desnom okviru slike 11 označene galaksije čija je masa veća od mase CWAT-08). U blizini tog niza "zgusnutih" Voronoi ćelija detektiran je kompaktan izvor rendgenskog zračenja, no i on je siromašan galaksijama.

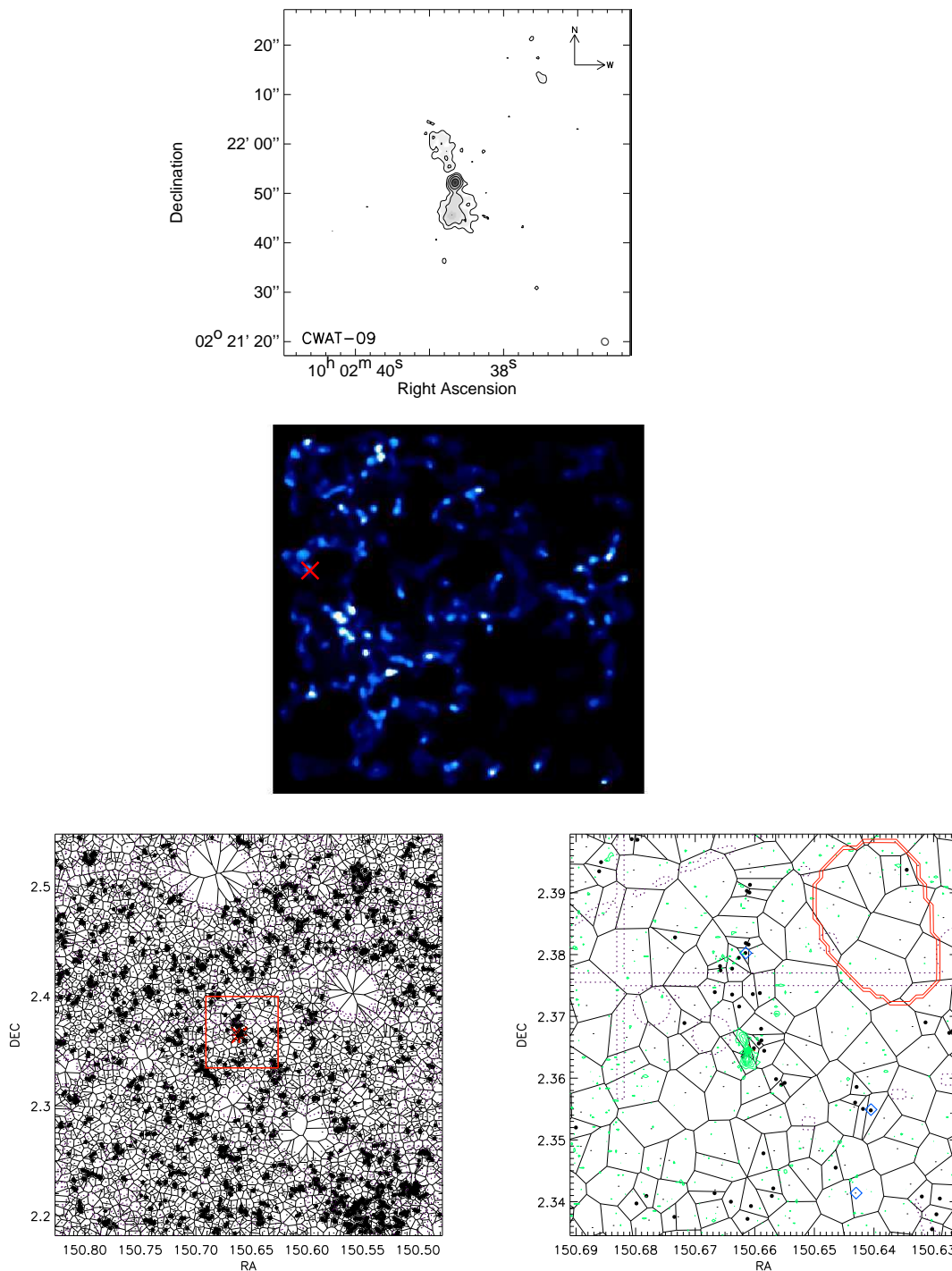
Iz središnje jezgre WAT-a šire se blago zakrivljena, difuzna područja radio emisije do na udaljenost od ~ 70 kpc. Na sjevernoj strani prošireno područje radio zračenja nije spojeno sa središnjom jezgrom, dakle nema tragova mlaza. S južne strane postoji poveznica između jezgre i difuznog zračenja, pa je moguće da je riječ o kratkom mlazu, nalik na mlazove u FR I izvorima. Južni dio radio galaksije je sjajniji od sjevernog, što je moguće objasniti efektom Dopplerove usmjerenosti zračenja.

Na velikoj skali, područje u kojem se nalazi CWAT-08 je blago povećane gustoće (srednji okvir slike 11).

5 Rasprava

WAT galaksije općenito nisu jako zastupljena podgrupa radio galaksija. U COSMOS polju detektirano ih je osam, što čini 13% od ~ 60 radio izvora koliko ih sadrži VLA-COSMOS katalog. Nalaze se u rasponu crvenog pomaka od 0.220 do 0.964, no čak pet od osam galaksija (62.5%) je u intervalu crvenog pomaka između 0.8 i 1.0, što odgovara starosti svemira od 6.6 i 5.7 milijardi godina, respektivno. Iako se ne može isključiti mogućnost da je to rezultat slučajnosti, valjalo bi daljnim istraživanjima ispitati je li možda ova epoha posebno pogodna za nastanak WAT galaksija, na što bi ovi podaci mogli ukazivati.

Iako uzorak od osam galaksija nije dovoljan za provođenje valjane i opsežne statističke analize, može poslužiti za identifikaciju nekih općenitih svojstava WAT galaksija, koje bi svakako trebalo potvrditi na mnogo većem uzorku.



Slika 11: Gornji okvir prikazuje radio sliku WAT galaksije snimljenu na frekvenciji od 1.4 GHz. Razine izofota su $2^n \cdot \sigma$, gdje je $n = 3, 4, \dots$, a $\sigma = 10.5 \mu\text{Jy/snop}$ je osjetljivost mjerenja. Razlučivost ($1.5'' \times 1.4''$) je prikazana kao elipsa u donjem desnom kutu okvira. Srednji okvir: struktura na velikoj skali u čitavom COSMOS polju centrirana na crvenom pomaku $z = 0.8210$, s poluširinom odjeljka $\Delta z = 0.0450$. Označen je položaj WAT galaksije. Svjetlije boje označavaju zone veće gustoće. Donji okviri prikazuju Voronoi dijagrame područja oko CWAT-08, s posebno istaknutim "zgusnutim" galaksijama. Lijevo je prikazano područje udaljeno od WAT galaksije, označene zvjezdicom, za ~ 5 Mpc u rekstascenziji i deklinaciji. Linijama je ocrtano područje koje je uvećano u desnom okviru. U njemu su prikazane konture radio i rendgenskog zračenja, te maskirana područja. Plavim romбом su označene galaksije veće mase od CWAT-08.

5.1 Pokazatelji grupiranja galaksija i dinamičke nerelaksiranosti sustava oko WAT galaksija

Sve promatrane WAT galaksije nalaze se u područjima značajnih zgušnjavanja galaksija (više od 5σ iznad prosječne gustoće), koja sadrži barem desetak, pa sve do stotinjak, "zgusnutih" galaksija, a i same su "zgusnute". Sve COSMOS WAT galaksije su vrlo masivne, među najmasivnijim u svojim skupinama, a često su upravo one najmasivnije. Prosjek zvjezdanih masa WAT galaksija je $\sim 4.5 \times 10^{11} M_{\odot}$, dok je prosječna zvjezdana masa svih galaksija u analiziranim područjima reda veličine $10^9 M_{\odot}$. Zbog tako velike mase, gravitacijski utjecaj WAT galaksija je dominantan u jatu ili grupi, stoga bi se u relaksiranim sustavima očekivalo da one leže na dnu potencijalne jame sustava, odnosno da zauzimaju (barem približno) središnji položaj među ostalim galaksijama tog sustava. No, one se najčešće ne nalaze u samom središtu (ili vrlo blizu središta) skupine galaksija kojoj pripadaju, već nešto odmaknute. Šest od osam WAT galaksija nalazi se na udaljenosti reda veličine stotinjak kiloparseka od centra "zgusnutih" galaksija. Na temelju kuta kojeg zatvaraju repovi tih galaksija može se procijeniti njihov smjer u ravnini neba. On uglavnom leži na pravcu koji prolazi blizu središta zgusnuća galaksija ili središta difuzne rendgenske emisije (ukoliko je ona detektirana). Četiri od tih šest galaksija giba se u smjeru središta, dok dvije (CWAT-03 i CWAT-06) imaju repove okrenute prema centru sustava, što upućuje na to da se od njega udaljavaju.

Ova opažanja se vrlo dobro slažu s rezultatima analize većeg broja WAT galaksija koju su proveli Hardcastle & Sakelliou (2000). Došli su do zaključka da se WAT galaksije najčešće gibaju po radijalnim orbitama kroz jato kojem pripadaju, dakle otprilike u smjeru prema ili od središta rendgenske emisije, iako je opažen i određeni udio WAT galaksija čije putanje nisu radijalne. Hardcastle & Sakelliou su također pronašli da se veći broj galaksija giba prema središtu, dok su one koje se kreću od njega, u prosjeku, bliže centru. To je protumačeno kao potpora modelu u kojem su savinuti repovi rezultat sudara dvaju, ili više, jata galaksija. Prema tom modelu, scenarij nastanka WAT galaksija je sljedeći:

- Masivna radio galaksija u početku leži na dnu potencijalne jame svog jata ili grupe galaksija.
- Prilikom sudara s drugim jatom ili grupom, koji je općenito posljedica gravitacijskog

privlačenja dvaju sustava, vrući plin iz oba sustava pokretljiviji je od samih galaksija, pa prije dolazi do uspostave zajedničkog plinskog oblaka dvaju spojenih sustava, nego što se uspije formirati ravnomjerna distribucija galaksija. Novoformirani oblak ICM-a zrači u rendgenskom području, i često su prisutne naznake nedavnog sudara, poput višestrukih maksimuma ili izduženosti područja zračenja u smjeru linije sudara.

- Radio galaksija koja se nalazila u centru jednog od sudarajućih jata, sada se ne nalazi u centru mase zajedničkog sistema. Ona se nastavlja kretati u smjeru u kojem se gibala prije sudara, što je najčešće izravno prema drugom jatu, po liniji koja spaja središta sudarajućih sustava. Stoga joj je brzina, koja iznosi i po nekoliko stotina kilometara u sekundi, usmjerena radijalno prema (novoformiranom) centru rendgenskog zračenja. Zbog tako velike relativne brzine prema okolnom plinu, stvara se tlak ICM-a na mlazove i proširena područja radio zračenja galaksije, koji uzrokuje da se oni savijaju u smjeru suprotnom od smjera u kojem se galaksija kreće. Tako nastaje karakteristična WAT morfologija.
- Kada se WAT galaksija približi samom središtu, gdje vlada vrlo velika gustoća plina u kojem su još uvijek, zbog sudara, prisutni udari i turbulencije, postoji opasnost da joj u takvim uvjetima mlazovi budu uništeni ili poremećeni do te mjere da više ne nalikuju na mlazove WAT galaksija.
- Nakon prolaska kroz središte sustava, WAT galaksija se nastavlja gibati po radijalnoj putanji, ali sada u smjeru od središta sustava. Zbog dinamičkog trenja prisutnog zbog prolaska masivne galaksije kroz područje vrlo bogato plinom, brzina galaksije je znatno manja nego što je bila prije prolaska kroz centar, zbog čega takva galaksija ne uspijeva daleko odmaknuti od središta združenog sustava.

U skladu s ovim scenarijem, CWAT-03 i CWAT-06, koje su okrenute tako da se gibaju od središta sustava, zaista posjeduju kratke, fragmentirane i vrlo neujednačene mlazove. Za razliku od njih, galaksije koje se gibaju prema centru, poput CWAT-01, CWAT-02, CWAT-05 i CWAT-08 odlikuju se duljim, dobro kolimiranim i stabilnim mlazovima. Za dvije WAT galaksije (CWAT-04 i CWAT-08) može se reći da se nalaze u centru skupine kojoj pripadaju. Obje imaju relativno kratke i difuzne radio mlazove. Moguće je da su one upravo u fazi prolaska kroz centar, kada zbog velike dinamike ICM-a, koja je prisutna u centralnom prostoru sustava, mlazovi doživljavaju promjene u morfologiji. No, moguće

je i da ovakav središnji položaj tih galaksija ukazuje na to da su promatrani sustavi gotovo dinamički opušteni, a slabi, tek jedva primjetno savijeni repovi govore o burnoj prošlosti ovih skupina galaksija.

Posebno dobro se uklapaju u predloženi model nastanka WAT galaksija sustavi kod kojih je opažena difuzna emisija rendgenskog zračenja, poput CWAT-01, CWAT-02, CWAT-05 i CWAT-07. Od izduženosti područja emisije u smjeru gibanja WAT galaksije (najbolji primjer je CWAT-02) ili podudaranja podstruktura u rendgenskom zračenju s podgrupama galaksija (dobri primjeri su CWAT-01 i CWAT-05), gotovo sve glavne značajke ovih sustava ukazuju na proces sudara u kojem sudjeluju skupine galaksija. U modelu koji objašnjava savinutost mlazova putem tlaka ICM-a, koji je rezultat velike relativne brzine između galaksije i međugalaktičkog medija, za očekivati je da će mlazovi biti više savijeni ukoliko su tlak i relativna brzina veći, dakle bliže središtu sustava. Kao potvrda tome, galaksije s izrazito savinutim repovima (CWAT-01 i CWAT-02) imaju manju prosječnu udaljenost od centra rendgenskog zračenja (~ 300 i ~ 200 kpc, respektivno) nego WAT galaksije s manjom zakrivljenošću mlazova (CWAT-05 koja je udaljena od središta emisije za ~ 700 kpc i CWAT-08 koja je udaljena za ~ 800 kpc).

Pravi značaj WAT galaksija kao dobrih pokazatelja dinamički nerelaksiranih sustava nije u tome da potvrdi takvo stanje, utvrđeno već na temelju drugih indicija, nego da nam pruži novu informaciju o sustavu za kojeg nemamo drugih podataka, poput emisije rendgenskog zračenja ili utvrđene podstrukture u distribuciji galaksija. Takvi slučajevi su CWAT-04, CWAT-06 i CWAT-08 kod kojih, osim blago povećane gustoće galaksija, nije bilo drugih jasnih pokazatelja da je riječ o sudarajućim sustavima.

5.2 Odnos WAT galaksija i strukture na velikoj skali

Pet od osam (62.5%) WAT galaksija detektiranih u COSMOS polju nalazi se u područjima iznimno velike gustoće galaksija na velikoj skali. Od preostale tri, dvije su u zonama umjerene gustoće, dok samo jedna (CWAT-04) nastanjuje rijetko naseljeno područje. Zanimljivo je uočiti da upravo te tri galaksije imaju najslabije savijene mlazove, dok galaksije s vrlo izraženom WAT morfologijom, kao npr. CWAT-01 i CWAT-02, nastanjuju vrlo istaknute maksimume u LSS gustoći.

Stoga, ovi podaci ukazuju na moguću povezanost između pojave savijenih repova u radio galaksijama i vrlo gustog okoliša u kojem se te galaksije nalaze.

6 Zaključci

U ovom radu predstavljena je analiza uzorka radio galaksija sa savijenim repovima (WAT), koje se nalaze u polju COSMOS pregleda neba, provedena na temelju podataka iz čak tri područja elektromagnetskog spektra (radio, optičkog i rendgenskog). Utvrđeno je da su te galaksije vrlo masivne - zvjezdana masa im premašuje prosječnu masu galaksija koje ih okružuju za otprilike dva reda veličine. Zatim, mjerenja ukazuju na postojanje moguće povezanosti između WAT galaksija i područja velike gustoće u strukturi na velikoj skali.

Za ispitivanje grupiranosti okoline u kojoj se nalazi svaka od tih galaksija, korištena je metoda bazirana na postupku Voronoi teselacije, koja je pogodna za otkrivanje podstrukture u promatranom uzorku. Na temelju Voronoi dijagrama i radio morfologije svake WAT galaksije (koja nam otkriva smjer brzine galaksije u ravnini neba), utvrđeno je da se one obično nalaze u područjima povećane gustoće galaksija, te da su im položaj i brzina često povezani s podstrukturama unutar sustava ili izduženjima u emisiji rendgenskog zračenja, što se smatra pokazateljem dinamičke nerelaksiranosti sistema. Stoga se može zaključiti da rezultati izneseni u ovom radu podržavaju model koji objašnjava savijanje repova u WAT galaksijama putem tlaka, koji na mlazove vrši ICM, dok se galaksija velikom brzinom giba kroz njega, potaknuta procesom sudara jata ili grupa galaksija. To čini WAT galaksije važnim alatom u kozmološkim istraživanjima jer su dobar pokazatelj sudara skupina galaksija. Detekcijom WAT galaksije mogu se identificirati sudarajući sustavi čak i na vrlo velikim udaljenostima, dakle u mnogo ranijoj fazi razvoja svemira (npr. Blanton et al. 2003), što je vrlo važno za potvrdu, trenutno prevladavajućeg kozmološkog modela, hijerarhijskog ili "bottom-up" scenarija.

Zahvale

Veliko hvala dr. sc. Vernesi Smolčić na podacima dobivenim u COSMOS pregledu neba koji su korišteni u ovom radu, te na neizmjernej pomoći i brojnim savjetima koje mi je pružila tijekom izrade i pisanja ovog rada. Zahvaljujem prof. dr. sc. Krešimiru Pavlovskom na mentorstvu i pruženoj prilici da sudjelujem u natječaju za dodjelu Rektorove nagrade.

Literatura

- [1] Abazajian, K. N., et al. 2009, ApJS, 182, 543
- [2] Begelman, M.C., Rees, M.J., Blandford, R.D. 1979, Nature 279, 770
- [3] Blanton, E. L., Gregg, M.D., Helfand, D.J., Becker, R.H. & White, R.L. 2003, AJ 125, 1635
- [4] Botzler C. S., 2004, doktorska disertacija na sveučilištu Ludwig Maximilians u Münchenu, Njemačka
- [5] Burns, J.O., Rhee, G., Owen, F.N. & Pinkney, J. 1994, ApJ 423, 94
- [6] Carilli, C. L., & Barthel, P. D., 1996, A&ARv, 7, 1C
- [7] Elvis, M., Civiano, F., Vignali, C., et al. 2009, arXiv:0903.2062
- [8] Fanaroff, B. L., & Riley, J. M., 1974, MNRAS, 167P, 31F
- [9] Finoguenov, A., Guzzo, L., Hasinger, G., et al. 2007, ApJS 172, 182
- [10] Gomez, P.L., Ledlow, M.J., Burns, J.O., Pinkney, J., Hill, J.M. 1997, AJ 114, 1711
- [11] Gull, S. F., & Northover, K. J. E., 1973, Nature, 244, 80G
- [12] Hasinger, G., et al. 2007, ApJS 172, 29
- [13] Ilbert, O., et al. 2009, ApJ 690, 1236
- [14] Jetha, N.N., Hardcastle, M.J., & Sakelliou, I. 2006, MNRAS 368, 609
- [15] Jones, M. H., & Lambourne, R. J. A., 2003, *An Introduction to Galaxies and Cosmology*, Cambridge University Press
- [16] Koekemoer, A. M., et al. 2007, ApJS 172, 196
- [17] Lilly, S.J., et al. 2007, ApJS 172, 70
- [18] Lilly, S.J. et al. 2009, ApJS 184, 218
- [19] Merritt, D., 1984, ApJ, 276, 26M

- [20] Oegerle, W.R. & Hill, J.M. 2001, AJ 122, 2858
- [21] Oklopčić, A., et al. 2010, ApJ 713, 484
- [22] Pinkney, J., Burns, J.O., & Hill, J.M. 1994, AJ 108, 2031
- [23] Sakelliou, I. & Merrifield, M.R., 2000, MNRAS 311, 649
- [24] Salvato, M., et al. 2009, ApJ 690, 1250
- [25] Schinnerer, E., et al. 2007, ApJS 172, 46
- [26] Scoville, N., Aussel, H., Benson, A., et al. 2007a, ApJS 172, 1
- [27] Scoville, N., Aussel, H., Benson, A., et al. 2007b, ApJS 172, 150
- [28] Smolčić, V., et al. 2007, ApJS 172, 295
- [29] Smolčić, V., doktorska disertacija na sveučilištu Ruperto-Carola u Heidelbergu, Njemačka

Sažetak

Galaksije sa široko savinutim repovima (engl. *wide-angle tail*, WAT) su radio galaksije čiji su mlazovi savijeni u oblik slova "C". WAT galaksije se obično nalaze u gusto naseljenim okolinama, poput jata ili grupa galaksija. Smatra se da je savijanje repova WAT galaksija rezultat tlaka na mlazove koji se stvara zbog relativnog gibanja galaksije i međugalaktičkog medija, što je vjerojatno posljedica sudara sustava galaksija. S ciljem da se ispita mogu li WAT galaksije biti valjani pokazatelji sudarajućih jata ili grupa galaksija, analiziran je uzorak takvih galaksija opaženih u pankromatskom COSMOS pregledu neba. Proučavanje okoline u kojoj se nalaze COSMOS WAT galaksije otkriva da one zaista naseljavaju područja povećane gustoće naseljenosti, te da su općenito vrlo masivne, među najmasivnijim galaksijama u skupini kojoj pripadaju. Opažena je i povezanost WAT galaksija s najgušće naseljenim područjima na velikoj skali. Orijentacija savinutih mlazova, koja indicira smjer gibanja galaksije u ravnini neba, najčešće je usmjerena izravno prema ili od centra mase sustava, što upućuje na to da se galaksija giba po radijalnoj putanji kroz središnje područje. Navedena opažanja ukazuju na to da bi se WAT galaksije mogle koristiti kao vrlo učinkoviti pokazatelji dinamički nerelaksiranih sustava, pogotvo na većim udaljenostima, odnosno u ranijoj prošlosti svemira, gdje takvi sudarajući sustavi mogu poslužiti kao važna potvrda hijerarhijskom modelu razvoja svemira.

Ključne riječi: opažačka kozmologija, skupovi galaksija, radio galaksije

Summary

Wide-angle tail (WAT) galaxies are radio galaxies whose jets are bent forming a wide C shape. WATs are usually found in dense environments, like galaxy clusters or galaxy groups. The bending of the jets is a result of ram pressure being exerted on the jets, due to the relative motion of the host galaxy to the intra-cluster medium (ICM), which is probably a result of galaxy cluster or galaxy group merger. To test if WATs can be used as efficient indicators of merging systems, an analysis of a sample of WAT galaxies, detected in the panchromatic COSMOS sky survey, has been performed. A study of the environment of WAT galaxies reveals that they usually inhabit densely populated areas, and that they are generally among the most massive galaxies in their clusters or groups. The COSMOS WAT sample indicates that there could be a connection between WATs and the large-scale structure (LSS) overdensities, as most of the analyzed WATs are found to be located in, or near, LSS density peaks. It is found that the orientation of the curving jets tends to be directed toward or away from the center of mass of the system, indicating a radial orbit through the central region. All that could be good indications that the systems containing WAT galaxies are in the process of galaxy cluster/group merger. Therefore, I conclude that WAT galaxies can be used as efficient tracers of dynamically young systems, especially at larger redshifts, i.e. earlier cosmic times, where those systems can be very important in providing a support for the "bottom-up" cosmological model.

Keywords: observational cosmology, galaxy clusters, radio galaxies