

Stope stapanja galaksija: veza s udjelom bliskih parova i vremenskom skalom stapanja

Filip Huško

*Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet,
Sveučilište u Zagrebu
21. siječnja 2020.*

Predstavljamo rezultate proučavanja stapanja galaksija do crvenih pomaka $z = 10$, za koja je korišten GALFORM model nastanka galaksija postavljen u simulaciji Planck Millennium. Naše stope stapanja se slažu dobro s opažanjima. Predviđamo blagi rast kao funkcija zvjezdane mase, a potom nagli pad na velikim masama ($M_* > 10^{11.3} M_\odot$ na $z = 0$). Ovaj pad se pomiče prema nižim masama na većim crvenim pomacima ($M_* > 10^{10.5} M_\odot$ na $z = 4$), a rezultat je eksponencijalnog prigušenja brojeva galaksija. Sličan pad se vidi u stopama stapanja kao funkcije crvenog pomaka. Radi bolje usporedbe smo u GALFORM-u računali i udjele bliskih parova. Pronalazimo dobro slaganje s opažanjima, osim na niskim masama ($M_* < 10^{9.5} M_\odot$). Kao funkcija crvenog pomaka vidimo dobro slaganje sa svim dostupnim mjerenjima. Na niskim masama GALFORM predviđa prevelik broj bliskih parova, no moguće je da su opažanja nepotpuna zbog problema u razlučivanju bliskih galaksija malenih masa. Uz pomoć stope stapanja i udjela bliskih parova smo izračunali i vremensku skalu stapanja te smo pronalazili aproksimativnu funkciju koja dobro opisuje njeno ponašanje. Dobivamo strmiju ovisnost o zvjezdanoj masi nego očekivano ($T_{\text{mg}} \propto M_*^{-0.5}$), no slabu ovisnost o crvenom pomaku (u slaganju s prijašnjim rezultatima). Kao funkcija maksimalne projekirane separacije također pronalazimo strmiju ovisnost nego u prijašnjim studijama ($T_{\text{mg}} \propto r_{\text{max}}^{1.5}$). Pronalazimo da je $v_{\text{max}} = 1000 \text{ kms}^{-1}$ dobar opažački kriterij za maksimalnu brzinu separacije s obzirom da vremenska skala stapanja, kao i udio bliskih parova, saturira do te vrijednosti.

I. UVOD

Opazanjem i teorijskim razmatranjima tijekom 20. i 21. stoljeća ustanovljeno je da galaksije povećavaju svoju masu kroz dva mehanizma: pretvaranjem plina u zvijezde te međudusobnim stapanjima. Uz dodavanje zvjezdane mase, veća galaksija koje doživi stapanje također proživi i znatno povećanu razinu nastanka zvijezda. Osim promjene njenog zvijezdanog sastava, galaksija koja doživi stapanje s manjom galaksijom može biti i morfološki promijenjena, no to ovisi o međusobnoj veličini dviju galaksija.

Uobičajen način kvantificiranja statistike stapanja galaksija je pomoću stope stapanja dN/dt . Ova veličina je dobra za usporedbe (između različitih modela i/ili opažanja) jer sadrži minimalne utjecaje ostalih veličina koje mogu znatno varirati od modela do modela. Stopa stapanja se može računati kroz simulacije (npr. Guo & White 2008, Kitzbichler & White 2008, Rodriguez-Gomez et al. 2015), poluempirijske modele (npr. Stewart et al. 2009, Hopkins et al. 2010a), ili pomoću opažanja (npr. Xu et al. 2012, Mundy et al. 2017).

Najlakši način određivanja stope stapanja je pomoću poluanalitičkih modela nastanka galaksija koji se koriste simulacijama. To je moguće napraviti direktno s obzirom da takvi modeli konstruiraju drva stapanja oblaka tamne tvari i galaksija. Drva stapanja sadrže sve oblake i galaksije, njihove mase u raznim trenucima te mnoga ostala svojstva. Osim toga, ona sadrže informacije o tome koji oblak (ili galaksija) se stapao s kojim drugima te kada se to dogodilo. Iz toga je onda lako izračunati stopu stapanja.

Stope stapanja iz poluempirijskih modela se međusobno slažu relativno dobro, no moguće ih je uskladiti s opažanjima samo ako se uzimaju kratke vremenske skale stapanja. Iz opažanja je nemoguće izračunati stope stapanja direktno s obzirom da je dinamika galaksija puno sporija od vremenske skale provođenja opažanja. S ovime na umu, stope stapanja galaksija se iz opažanja obično računaju mjerenjem udjela bliskih parova galaksija i uz pomoć vremenske skale stapanja galaksija. U potonjoj veličini i dalje postoji velik raspon nepouzdanosti (faktor 2-3) (Lotz et al. 2008, Kitzbichler & White 2008, Conselice 2006, Conselice 2009, Lotz et al. 2010a, Lotz et al. 2010b). Uz to, one se obično računaju kroz usporedbe udjela bliskih parova i stopa stapanja u poluanalitičkim modelima (u simulacijama). To znači da će bilo koja primjena ovih vremenskih skala stapanja na opažački izmjerene udjele bliskih parova proizvesti opservacijsku stopu stapanja koja je pristrana tom modelu.

Uz ovaj problem, opažačke studije stopa stapanja su također označene mnogim razlikama u selekcijskim kriterijima. Naime, postoji neslaganje oko definicije velikih i malenih stapanja. Velika stapanja se definiraju kao ona između galaksija sličnih masa, no granični omjer masa $M_{\text{sat}}/M_{\text{pri}} = \mu$ (iznad kojeg se stapanja smatraju velikima, a ispod kojeg se smatraju malenima) varira od studije do studije. Česti izbori za μ su 1/2.5, 1/3, 1/4 te 1/6. Malena stapanja su ona kod kojih je omjer masa dviju galaksija manji od graničnog, no obično se donja granica uzima kao 1/10. Razlog je taj što još manja stapanja nemaju veliki utjecaj na veću galaksiju, a njihov broj je sve veći i veći (do te mjere da stopa stapanja divergira ako se uzmu sva stapanja).

Nakon što se parovi biraju po njihovom omjeru masa, neke studije također primjenjuju i selekcijske kriterije čija svrha je eliminacija parova koji se vjerojatno neće stopiti (npr. Lotz et al. 2011, Casteels et al. 2014). Način na koji se ovo provodi je taj da se promatra morfologija parova te se izbace oni parovi čiji članovi nisu dovoljno asimetrični.

Kako bi se računali udjeli bliskih parova, u opažaćkim studijama potrebno je primijeniti i određene dinamičke selekcijske kriterije. Naime, potrebno je oko dane galaksije uzeti prsten određene veličine (npr. radijusa 20 kpc) unutar kojeg se gleda ima li ta galaksija bliskog para. Također se uzimaju samo parovi čija relativna brzina (radijalna, odnosno okomita na nebesku sferu) je unutar neke vrijednosti (npr. 200 km/s). Ova dva kriterija znatno povećavaju vjerojatnost da se radi o dinamički povezanim galaksijama, no potrebno je naglasiti da to nije moguće osigurati. Razlog je taj što je moguće da su galaksije bliske samo na nebeskoj sferi, a ne u stvarnosti. Također je moguće da su im nasumične relativne brzine dovoljno bliske da se čini da su dinamički povezane, dok se u stvari nalaze na dva različita crvena pomaka (odnosno starosti svemira, tj. udaljenosti). Od studije do studije također postoje velika neslaganja oko izbora ovih dviju veličina (maksimalna separacijska udaljenost i separacijska brzina), što dodatno komplicira usporedbu između raznih rezultata.

U ovom radu predstavljamo rezultate detaljnog proučavanja stapanja galaksija u GALFORM-u, poluanalitičkom modelu nastanka galaksija (predstavljenog detaljnije u npr. Gonzalez-Perez et al. 2014, Lacey et al. 2016, Baugh et al. 2019), postavljenog u simulaciji Planck Millennium. Među rezultatima predstavljamo stope stapanja te udjele bliskih parova galaksija s najvećom preciznošću do sada, te njihove ovisnosti o zvjezdanoj masi galaksija. Također predstavljamo i ovisnosti tih veličina o crvenom pomaku do velikih crvenih pomaka ($z = 8$), čime dajemo direktna predviđanja za buduće opservatorije na visokim crvenim pomacima (npr. JWST).

Nakon izračuna stope stapanja i udjela bliskih parova moguće je izračunati vremensku skalu stapanja u ovisnosti o zvjezdanoj masi i crvenom pomaku. Ako biramo udjele bliskih parova uz pomoć raznih dinamičkih selekcijskih kriterija, također možemo odrediti i ovisnost vremenske skale stapanja o maksimalnoj separacijskoj udaljenosti i brzini. Predstavljamo rezultate za ovu veličinu, a ona je korisna za računanje stope stapanja galaksija iz opservacijskih mjerenja.

U Odjeljku II predstavljamo simulaciju N-tijela i model u kojem promatramo stapanja galaksija. Također diskutiramo kako GALFORM model tretira stapanja galaksija. Odjeljak III predstavlja našu metodu računanja stope stapanja, udjela bliskih parova te vremenske skale stapanja. Također diskutiramo neke od opažaćkih studija, njihove razlike te metode konverzije njihovih rezultata iz jedne u drugu. U Odjeljku IV predstavljamo naše rezultate za stopu stapanja kao funkciju zvijezdane

mase, crvenog pomaka te omjera masa galaksija. Također uspoređujemo rezultate s opažanjima. Odjeljak V sadrži rezultate o udjelu bliskih parova te njegovoj ovisnosti o zvjezdanoj masi te crvenom pomaku, kao i usporedbu s opažanjima. U Odjeljku VI predstavljamo vremensku skalu stapanja te ovisnost o zvjezdanoj masi i crvenom pomaku, kao i o dinamičkim selekcijskim veličinama (maksimalna separacijska udaljenost i brzina). Predstavljamo jednostavnu formulu za ove četiri ovisnosti. U Odjeljku VII rezimiramo i zaključujemo.

II. SIMULACIJA N-TIJELO I GALFORM

A. Model

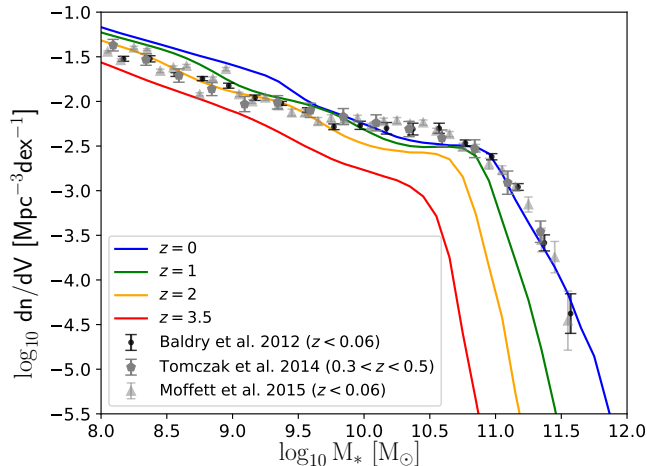
Koristimo se kozmološkom simulacijom N-tijela Planck Millennium, koja ima volumen $(800 \text{ Mpc})^3$ te 5040^3 čestica. Ova simulacija zapisuje oblake tamne tvari te njihove mase i ostala svojstva u svakom trenutku. Minimalna masa oblaka tamne tvari se uzima kao masa 20 čestica, što odgovara masi od $2.12 \times 10^9 h^{-1} M_{\odot}$. Drva stapanja oblaka tamne tvari, a time i sve informacije o oblacima tamne tvari i galaksijama, zapisuju se u 269 vremenska trenutka. Kozmološki parametri su odabrani kao: $\Omega_M = 0.307$, $\Omega_{\Lambda} = 0.693$, $\Omega_b = 0.0483$ te $h = 0.677$.

Veličina simulacije, kao i broj vremenskih trenutaka (269 umjesto 60 u prvoj verziji Millennium simulacije) odgovara veličini uzorka i rezoluciji koje dopuštavaju detaljno proučavanje stopa stapanja galaksija, bez obzira što se radi o vrlo rijetkim događajima. Konkretno, preciznost koju možemo postići (u veličinama vezanim uz stapanja galaksija) odgovara 40 intervala u masi između $10^8 M_{\odot}$ and $10^{12} M_{\odot}$, kao i 40 intervala u crvenom pomaku između $z = 0$ and $z = 8$, iako potonje znatno ovisi o tome kakve galaksije promatramo (odnosno koliko su masivne).

Model nastanka galaksija kojim se koristimo za ovu analizu je poluanalitički model GALFORM. Ovak model je predstavljen detaljno u Lacey et al. (2016), te su nadodane modifikacije u Baugh et al. (2019). GALFORM uključuje mnoge procese, od kojih su glavni: sastavljanje oblaka tamne tvari, stresno zagrijavanje i radijativno hlađenje plina, kolaps plina u oblacima tamne tvari te nastanak diskova galaksija, izbacivanje plina zbog aktivnih galaktičkih jezgri i supernova, stapanja galaksija, nestabilnosti galaktičkih prečaka te utjecaj potonja dva efekta na morfologiju galaksija. Osim toga, GALFORM modelira mnoge efekte koji su povezani uz direktno opservabilne veličine, poput kemijske evolucije galaksija, emisije/apsorpcije prašine te zvjezdane luminozitet galaksija. Kao što je pokazano u Lacey et al. (2016), GALFORM uspješno reproducira opservabilne veličine.

Funkcija zvjezdane mase galaksija (od sada FZMG)—ekvivalentna brojevnoj te prostornoj gustoći galaksija—koju predviđa GALFORM je prikazana na Slici 1, uz neka opažaćka mjerenja na niskim crvenim pomacima (Baldry et al. 2012, Tomczak et al. 2014,

Moffett et al. (2015). Predviđena FZMG se općenito dobro slaže s opažanjima, ali predviđa malo previše brojeva galaksija niskih masa, a ne predviđa dovoljno galaksija umjerenih masa.



Slika 1: Funkcija zvjezdane mase galaksija u našem uzorku na različitim crvenim pomacima, prema legendi. Ova funkcija je ekvivalentna kombiniranoj brojevnoj gustoći galaksija u domeni realnog prostora i zvjezdane mase. Linije predstavljaju rezultate iz GALFORM-a, dok točke predstavljaju opažачke rezultate.

B. Stapanja galaksija

Jedna od modifikacija GALFORM-u napravljena u Baugh et al. (2019) se tiče toga kako GALFORM tretira stapanja galaksija. U Lacey et al. (2016) svi oblaci tamne tvari se prate dok ne uđu u još veći oblak tamne tvari. U tom trenutku se izračuna vrijeme stapanja koje odgovara formuli dinamičkog trenja (gravitacijski efekt koji usporava satelitske galaksije i uzrokuje njihov pad na primarnu) izvedenoj na temelju teorije iz Chandrasekher (1943). Problem je što je ova formula prikladna samo za kružne orbite, i to uz pretpostavku da nema gubitke mase zbog plimnih sila. Bolja formula, koju GALFORM koristi, je temeljena na rezultatima iz Jiang et al. (2008). Ima sličan oblik onoj za kružne orbite te je dana s:

$$T_{\text{mg}} = \frac{f(\epsilon) M_{\text{pri}}}{0.86 M_{\text{sat}} \ln(1 + M_{\text{pri}}/M_{\text{sat}})} \sqrt{\frac{r_c}{r_{\text{vir}}}} T_{\text{dyn}}, \quad (1)$$

gdje su M_{pri} i M_{sat} mase oblaka tamne tvari primarne (središnje) te satelitske (padajuće) galaksije, r_{vir} i $T_{\text{dyn}} = r_{\text{vir}}/v_{\text{vir}}$ virijalni radijus i dinamička vremenska skala primarnog oblaka tamne tvari. Veličina ϵ je tzv. kružnost, koja je definirana kao omjer prave kutne količine gibanja satelita te kutne količine gibanja kružne orbite istog satelita s istom energijom. r_c je radijus takve kružne orbite. Ovisnost vremena stapanja o kružnosti je uklopljena u $f(\epsilon) = 0.9\epsilon^{0.47} + 0.6$. Kružnost se zadaje nasumično

iz gustoće vjerojatnosti dane u Benson (2005), gdje su proučavane gustoće vjerojatnosti parametara upada u kozmološkim simulacijama N -tijela.

Modifikacija GALFORM-u predstavljena u Baugh et al. (2019) je ta da se vrijeme stapanja zbog dinamičkog trenja više ne zadaje čim manji oblak tamne tvari (sa satelitskom galaksijom) uđe u veći oblak tamne tvari (s primarnom galaksijom u središtu). Umjesto toga, manji oblak tamne tvari se prati unutar većeg sve dok njegova masa ne padne (zbog plimnih sila) ispod granične mase rezolucije (20 čestica). Vrijeme stapanja se zadaje satelitskoj galaksiji tek u tom trenutku, te se pretpostavlja da se ona stopila sa središnjom galaksijom nakon tog vremena.

III. METODA

A. Stopa stapanja

Kako bismo izračunali stope stapanja galaksija koristimo se drvom stapanja koju konstruira GALFORM. Svakoj galaksiji je pridodjeljen jedinstveni broj (ID) u svakom vremenskom trenutku. Za dani vremenski trenutak uzimamo sve galaksije i poredamo ih po ID-ovima njihovih potomaka. Liste koje sadrže više od jedne galaksije identificiramo kao one koje odgovaraju stapanjima galaksija. Pretpostavljamo da se sve galaksije u listi stapaju sa najmasivnijom galaksijom te liste, te kažemo da je galaksija te mase doživjela N sudara, gdje je N broj parova u toj listi. Stopu stapanja galaksija na temelju ove procedure možemo računati preko

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\Delta N_{\text{merg}}}{\Delta N \Delta t}, \quad (2)$$

gdje je ΔN_{merg} ukupan broj parova (u danom intervalu mase) koji zadovoljava neki uvjet omjera mase ($\mu \in [0.1, 0.25]$ za malena stapanja te $\mu \in [0.25, 1]$ za velika stapanja). ΔN je ukupan broj galaksija u istom intervalu mase, a Δt je vremenski interval između dva izlazna trenutka koja odgovaraju tom stapanju. Također možemo definirati i gustoću stapanja galaksija kao

$$\frac{dn}{dt dV} = \frac{\Delta N_{\text{merg}}}{\Delta m \Delta t \Delta V}, \quad (3)$$

gdje je Δm širina intervala mase u pitanju, dok je ΔV volumen unutar kojeg brojimo stapanja galaksija.

Pretpostavka da se sve galaksije stapaju sa najmasivnijim pretkom, a ne neke od njih međusobno (u listi onih koje rezultiraju u jednom potomku), je relativno slaba. Stapanja galaksija koja uključuju više od dviju galaksija su rijetka. Uz to, simulacija kojom se koristimo ima relativno veliku vremensku rezoluciju zbog velikog broja vremenskih trenutaka (269).

Za provjeru smo izračunali stope stapanja u GALFORM izračunu koji ima goru vremensku rezoluciju (računata su svojstva za svaki četvrti vremenski trenutak) i usporedili s izračunom koji uključuje sve trenutke.

Rezultati su prikazani na Slici 2. Vidljivo je da su rezultati dobro konvergirani ako povećamo broj vremenskih trenutaka. Na niskim crvenim pomacima, gdje imamo velik broj trenutaka (≈ 40 unutar $z \in [0, 0.2]$), vidimo da nema skoro nikakve razlike. Na većim crvenim pomacima uključivanje svih trenutaka slabo smanjuje stopu stapanja preko svih masa. Naglašavamo da je ova usporedba napravljena pomoću 64 podvolumena simulacije (od ukupnih 1024). Puni rezultati, koji su bolje reprezentativni za GALFORM, su predstavljeni u Odjeljku IV.

B. Udio bliskih parova

U opažачkim studijama postoje dvije široke metode selekcije kandidata galaksija za bliske parove. Jedna od njih (npr. Xu 2012, Robotham et al. 2014, Mundy et al. 2017) uključuje primjenu određenih selekcijskih kriterija (obično maksimalna projicirana udaljenost parova, maksimalna separacijska brzina te minimalni omjer mase). Druga popularna metoda (npr. Lotz et al. 2011, Casteels et al. 2014) također koristi te selekcije, no još uključuje i dodatne kriterije čija svrha je filtrirati galaksije koji nisu vjerojatni kandidati za stapanja. Kao primjer, jedan kriterij je da galaksije u paru budu dovoljno asimetrične.

U našoj analizi se bavimo izračunom udjela bliskih parova na bazi prve metode. To znači da će udio bliskih parova uključivati i parove koji nisu fizički bliski i koji se vjerojatno neće stopiti, no to se može uzeti u obzir kad se iz udjela bliskih parova računa stopa stapanja (Kitzbichler & White 2008, naši Odjeljci III C te VI).

Kako bismo računali udio bliskih parova, koristimo se aproksimativnom metodom koja ima prednost da dopušta uključivanje svih mogućih parova u simulaciji. Biramo fiksnu os (npr. z -os) kao liniju doglednice, a druge dvije osi (x i y) se koriste za računanje projiciranih separacija. U ovom slučaju, x i y osi predstavljaju površinu neba.

Kao primjer ćemo opisati proceduru pronalaska udjela velikih bliskih parova ($\mu \in [0.25, 1]$) galaksija s nekim fiksnim selekcijskim kriterijima, npr. projicirana separacije $0 < r_{\text{proj}} < 20 \text{ h}^{-1}\text{kpc}$ te separacijske brzine $-500 < v_{\text{sep},z} < 500 \text{ kms}^{-1}$. Veličine potrebne za ovaj izračun su x i y komponente položaja te z komponenta brzine, uz masu svake od galaksija.

Prvo sortiramo sve galaksije (u cijeloj simulaciji) na danom vremenskom trenutku po njihovim x -komponentama položaja. Za danu galaksiju i s položajem x_i pronalazimo skup galaksija J_i čije x -komponente zadovoljavaju uvjet da su dovoljno bliske i -toj galaksiji: $|x_i - x_j| < 20 \text{ h}^{-1}\text{kpc}$. Ovakav prvi korak drastično smanjuje broj izračuna; umjesto da provjeravamo sve moguće parove galaksija u simulaciji dovoljno je vršiti usporedbe svake galaksije i s galaksijama u skupu J_i .

Primjenjujemo konačne selekcijske kriterije tako da zahtjevamo da galaksija j iz skupa J_i zadovoljava sve sljedeće uvjete: $r_{\text{proj}} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} < 20$

h^{-1}kpc (galaksije j i i unutar neke projicirane udaljenosti), $v_{\text{sep}} = |v_{z,i} - v_{z,j}| < 500 \text{ kms}^{-1}$ (separacijska brzina galaksija j i i unutar neke vrijednosti), $\mu_{j,i} = M_{*,j}/M_{*,i} \in [0.25, 1]$ (galaksije j i i čine veliki par). Ako za galaksiju i pronađemo barem jednu galaksiju j iz skupa J_i koja zadovoljava sve ove kriterije, onda kažemo da galaksija i ima bliskog para. Ovu proceduru ponavljamo za sve galaksije i u simulaciji. Ukupan broj galaksija s bliskim parom raspodjelujemo po intervalima mase. Udio bliskih parova onda slijedi kao:

$$f_{\text{maj}} = \frac{\Delta N_{\text{maj}}}{\Delta N}, \quad (4)$$

gdje je ΔN_{maj} broj galaksija s velikim bliskim parom unutar nekog intervala mase, a ΔN je ukupan broj galaksija u tom intervalu mase.

C. Vremenska skala stapanja i usporedba s opažanjima

Obzirom da je udio bliskih parova opažачki mjerljiva veličina (za razliku od stope stapanja), dodatna veličina je potrebna za izračun stope stapanja iz opažanja. Obično se pretpostavlja relacija između udjela bliskih parova i stope stapanja koja ima oblik

$$\frac{dN}{dt} = \frac{f}{T_{\text{mg}}}, \quad (5)$$

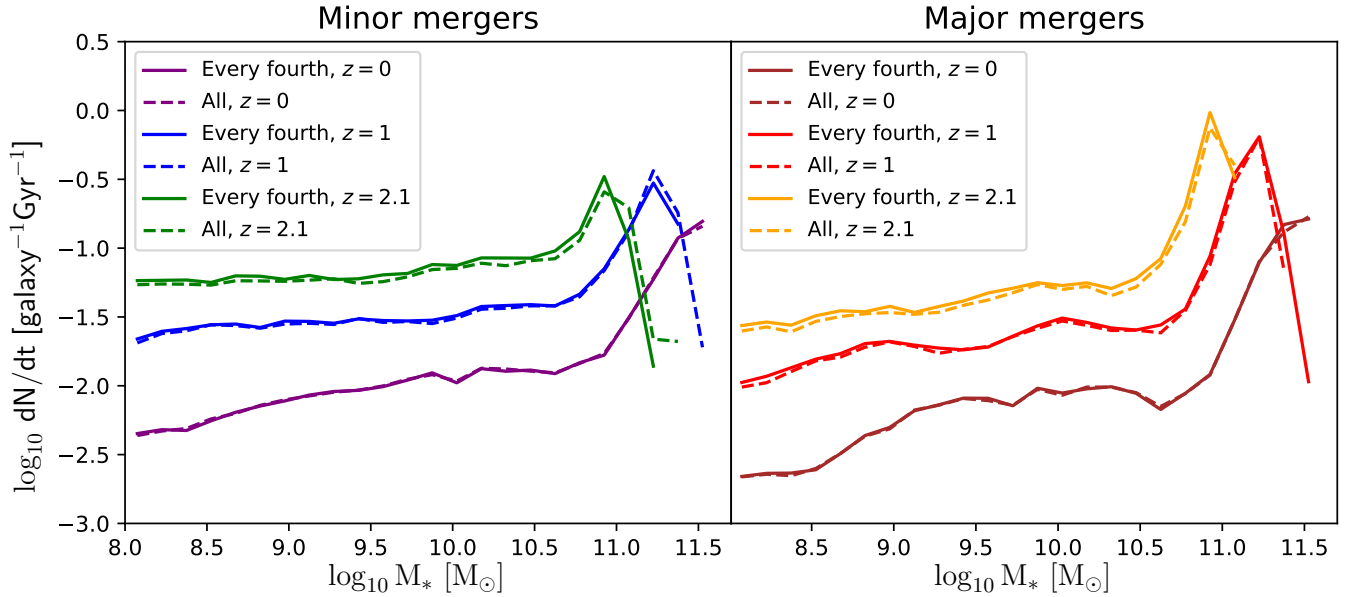
gdje je T_{mg} vremenska skala stapanja. Naglašavamo da je ova veličina različita od vremena stapanja dinamičkog trenja (jednadžba 1). Vremenska skala dinamičkog trenja daje točnu vrijednost (do na preciznost teorije) vremena potrebnog da se stope dvije galaksije. S druge strane, vremenska skala stapanja T_{mg} je samo skala vremena, odnosno matematička veličina koja se koristi za povezivanje stope stapanja i udjela bliskih parova (prema gornjoj jednadžbi). Ona nema nužno duboko fizičko značenje.

Njena ovisnost o masi i crvenom pomaku se obično određuje iz simulacija tako da se odrede intrinzične stope stapanja i udjeli bliskih parova u toj simulaciji (npr. Kitzbichler & White 2008, Lotz et al. 2010a). No, problem je što postoje velike razlike rezultata među raznim simulacijama, do te mjere da je vremenska skala stapanja i dalje neodređena do faktora 2-3, te je ona najveći izvor nepouzdanosti kod opažачkih stopa stapanja.

U Xu et al. (2012) promatrane su galaksije u COSMOS polju te je pretpostavljena vremenska skala stapanja iz Kitzbichler & White (2008), koja je izračunata iz poluanaličkog modela u Millennium simulaciji. Dobivena formula je:

$$T_{\text{mg}} = 1.1 \text{Gyr} \times r_{25} M_*^{-0.3} \left(1 + \frac{z}{8}\right), \quad (6)$$

gdje je r_{25} projicirana separacija u jedinicama $25 \text{ h}^{-1}\text{kpc}$, a M_* zvjezdana masa para u jedinicama $4 \times 10^{10} \text{ h}^{-1} M_{\odot}$. Ova formula vrijedi za $v_{\text{sep}} < 300 \text{ kms}^{-1}$ i $z < 1$, dok je još



Slika 2: Usporedba stope stapanja galaksija dobivenih iz 64 podvolumena simulacije koristeći izračun sa svim vremenskim trenucima (pune linije) te izračun sa svakim četvrtim vremenskim trenutkom (crtkane linije). Boje predstavljaju stope stapanja na raznim crvenim pomacima, prema legendi. Lijeva slika pokazuje stopu malenih stapanja, odnosno stapanja galaksija s omjerima masa $\mu \in [0.1, 0.25]$, dok desna slika prikazuje isti rezultat za galaksije s omjerima masa $\mu \in [0.25, 1]$.

točnija formula dana u radu. Xu et al. (2012) uzimaju normalizaciju koja je ≈ 3 puta manja od one dane iznad, kombinirajući rezultate iz Kitzbichler & White (2008) i Lotz et al. (2010a), gdje je pronađeno da je vremenska skala stapanja znatno kraća nego u & White (2008).

S druge strane, Casteels et al. (2014) proučavaju stapanje galaksije u GAMA polju, s time da su bliski parovi izabrani samo ako je pronađeno da su dovoljno asimetrični. Vremenska skala stapanja kojom se bliski udio parova konvertira u stopu stapanja onda mora biti različita. U radu je argumentirano da je dovoljno gledati vremensku skalu *opservabilnosti*, koja se može aproksimirati kao suma dviju vremenskih skala.

Prva od njih je dana s

$$T_{\text{obs}} = (-0.026 \pm 0.05) + (2.28 \pm 0.23)f_{\text{gas}}, \quad (7)$$

gdje je f_{gas} maseni udio plina galaksija. Ovaj rezultat slijedi u Lotz et al. (2010b) iz simulacija, a kvantificira činjenicu da galaksije s više plina dulje ostaju asimetrične. Konverzija s ovisnosti o udjelu plina na ovisnost o zvjezdanoj masi se temelji na relaciji mase plina i zvijezdi iz Catinella et al. (2010).

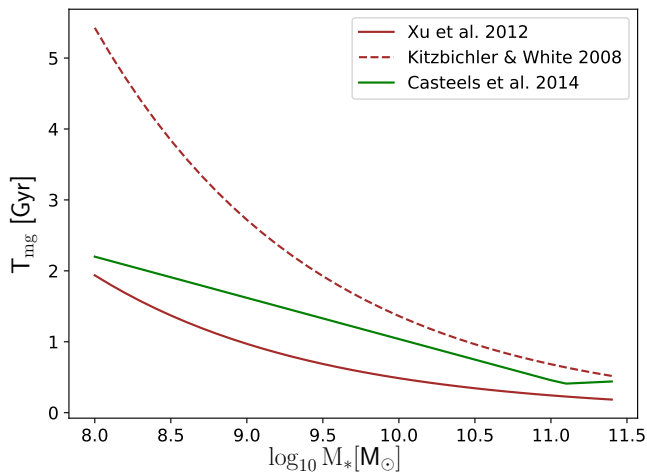
Druga relevantna vremenska skala korištena u Casteels et al. (2014) temelji se na simulacijama napravljenim u Conselice (2006), gdje je pronađeno da vremenska skala asimetrije skalira kao

$$T_{\text{obs}} = (-0.023 \pm 0.05)N_{\text{fly}} + \left(\frac{M_{\text{tot}}}{10^{11} M_{\odot}}\right)^{0.25}, \quad (8)$$

gdje je N_{fly} broj bliskih prolazaka galaksije prije sudara, a M_{tot} ukupna zvjezdana masa. Ova vremenska skala aproksimira vrijeme tijekom kojeg se očekuje da će galaksija ostati asimetrična neovisno o njenom zvjezdanom sadržaju. Ukupna vremenska skala opservabilnosti se onda računa kao zbroj ovih dviju vremenskih skala (jednadžbe 7 i 8). Treba napomenuti da su ove vremenske skale izvedene uz fiksni omjer masa $\mu = 1/3$ te fiksnu ukupnu masu (barionska + tamna materija), te fiksnu barionsku masu. Ono što je variralo između simulacija je udio plinske spram zvjezdane mase.

Slika 3 prikazuje Xu et al. (2012) te Casteels et al. (2014) vremenske skale stapanja, u usporedbi s originalnom Kitzbichler & White (2008) vremenskom skalom. Vidi se da su one znatno kraće od Kitzbichler & White skale.

Xu et al. (2012) te Casteels et al. (2014) su odabrane kao dva primjera opažачkih studija u kojima vremenske skale stapanja variraju. Većina opažачkih studija pretpostavlja donekle drugačiju skalu stapanja u odnosu na druge, povećavajući razlike između rezultata. U našim rezultatima se pri usporedbama s opažanjima koristimo izmjerenim udjelima bliskih parova koje djelimo s vremenskom skalom stapanja iz Kitzbichler & White (2008). To radimo kako bi osigurali što prikladniju usporedbu, što je dodatno motivirano činjenicom da je model nastanka galaksija korišten u tom radu sličan GALFORM-u. U Odjeljku VI ćemo pokazati da je ovaj izbor opravdan barem za masivne galaksije ($M_* > 10^{10} M_{\odot}$), a većina mjerenja udjela bliskih parova se odnosi na galaksije tak-



Slika 3: Vremenska skala stapanja koja se koristi za pretvorbu udjela bliskih parova u stopu stapanja. Puna smeđa linija predstavlja vremensku skalu danu jednadžbom 6. Sve stope stapanja iz opažaćkih studija koje koristimo radi usporedbe u ovom radu su pomnožene s odgovarajućim faktorom ili funkcijom tako da odgovaraju toj vremenskoj stali stapanja (više detalja u tekstu).

vih masa. Također napominjemo da ovaj izbor isključuje usporedbe s opažaćkim studijama koje se koriste morfološkim selekcijskim kriterijima (npr. asimetričnost).

Dodatne razlike između opažaćkih rezultata postoje zbog raznih izbora parametara selekcije, čak i ako je metoda ista. Na primjer, malena i velika stapanja se razlikuju po tome da je omjer masa galaksija koje sudjeluju u stapanju manji, odnosno veći, od nekog graničnog omjera $M_{\text{sat}}/M_{\text{pri}} = \mu$, te μ varira od studije do studije. Česti izbori su 1/2.5, 1/3, 1/4, 1/6. No, moguće je konvertirati udjele bliskih parova te stope stapanja galaksija. Formula za ovu konverziju je dana u Xu et al. (2012).

Uz omjere mase, opažaćki rezultati variraju zbog raznih kriterija pri odabiru parova ovisno o njihovim dinamičkim svojstvima. Udjeli bliskih parova variraju po tome koja je maksimalna projicirana separacija te maksimalna separacijska brzina. Česti izbori za prvu veličinu su 20, 30, 50, 75 and 100 h^{-1}kpc , dok za drugu se često bira 200, 300, 500 te 1000 kms^{-1} . Kao što je pokazano u Kitzbichler & White (2008), ovisnost udjela bliskih parova o projiciranoj udaljenosti je otprilike linearna. Koristimo se tim rezultatima za konverziju opažaćkih udjela bliskih parova na jedinstvenu vrijednost.

IV. STOPE STAPANJA

Ovdje predstavljamo naše rezultate o stopama stapanja galaksija. Računate su iz simulacija pomoću metode opisane u Odjeljku III A. Stope stapanja iz opažaćkih studija (koje koristimo radi usporedbe) su računane

množenjem udjela bliskih parova iz tih studija s Kitzbichler & White (2008) vremenskom skalom stapanja. Također smo koristili razne konverzijske faktore kako bismo ispravili efekte različitih selekcijskih kriterija i učinili sva mjerenja usporedivim (kao što je opisano u Odjeljku III C).

Uspoređujemo našu stopu stapanja s opažaćkim rezultatima udjela bliskih parova ili stopa stapanja kao funkcije zvjezdanih masa galaksija (Domingue et al. 2009, Xu et al. 2012, Casteels et al. 2014, Robotham et al. 2014), kao i crvenog pomaka (Kartalpepe et al. 2007, Lin et al. 2008, Xu et al. 2012, Keenan et al. 2014, Robotham et al. 2014, Man et al. 2016, Mundy et al. 2017). Sve ove studije imaju zajedničku značajku (isključujući Casteels et al. 2014) da ne uključuju dodatne selekcijske kriterije na bazi morfoloških karakteristika.

A. Ovisnost o zvjezdanoj masi

Gornji graf Slike 4 prikazuje stope malenih ($\mu \in [0.1, 0.25]$) i velikih stapanja galaksija ($\mu \in [0.25, 1]$) kao funkcije zvjezdanih mase na crvenom pomaku $z \approx 0.1$. Naša stopa velikih stapanja (crvena linija) se dobro slaže s opažanjima, kao i sa hidrodinamičkom simulacijom Illustris (rezultati uzeti iz Rodriguez-Gomez et al. 2015). Dobro slaganje pronalazimo i s rezultatima iz Domingue et al. (2009) te Xu et al. (2012), koje su proučavale galaksije u SDSS i COSMOS poljima, slijedom. Naša stopa velikih stapanja se također dobro slaže s rezultatima Casteels et al. (2014), no napominjemo da ova usporedba nije znatno bitna s obzirom da njihova selekcija bliskih parova izbacuje one koji su nedovoljno asimetrični. Pronalazimo dobro slaganje s ispravljenim rezultatima iz Robotham et al. (2014), studije galaksija u GAMA-II polju.

Jedna značajka stope stapanja galaksija u GALFORM modelu—koja do sada nije predviđena nekim rezultatima simulacija te je samo viđena opažaćki u rezultatima Robotham et al. (2014)—je postojanje maksimuma te naglog pada vrijednosti stope stapanja galaksija na velikim masama ($M_* > 10^{11} M_{\odot}$). Moguće je da većina simulacija i opažaćkih studija ne predviđa ovu značajku kao rezultat njenog ugađivanja uzimanjem malenog broja intervala mase, što je pak rezultat veličine uzorka. Naše stope malenih i velikih stapanja prikazane na Slici 4 predstavljaju statistiku temeljenu na ≈ 16 milijuna stapanja (što odgovara 40 intervala mase), ilustrirajući potreban broj događaja kako bi se postigla masena rezolucija na kojoj je ova značajka vidljiva.

S obzirom da niti Illustris simulacija niti većina opažanja ne detektira ovu značajku, moglo bi se argumentirati da je ona pogrešna predikcija GALFORM-a. No, postoje teorijska razmatranja koja pojačavaju našu pouzdanost u to da se radi o dobroj predikciji, i da će ta značajka biti ustanovljena kao stvarna u budućim opažaćkim studijama (s većom masenom rezolucijom). Naime, stopa stapanja galaksija ovisi o oko-

lini dane galaksije mase M_* na više načina. Jedan od načina je masena distribucija njenih satelita ispod mase M_* . Ovo u biti odgovara satelitskoj funkciji zvjezdanih masa galaksija (FZMG), koja nasljeđuje sve glavne značajke ‘normalne’ FZMG. Konkretno, ona također ima eksponencijalni pad na visokim masama (npr. Yang et al. 2009). Ako pogledamo brojnu gustoću galaksija na $M_* = 10^{11.25} M_\odot$ (početak eksponencijalnog pada u FZMG vidljiv na Slici 1), očekujemo da će stopa velikih stapanja galaksija početi naglo padati kao rezultat sve većeg nedostatka galaksija sličnih masa. Ovo zaista vidimo u položaju pada stope velikih stapanja galaksija na Slici 4. Slično tome, maksimum i pad je vidljiv i u stopi malenih stapanja galaksija, no to se dešava na većim masama. To je očekivano s obzirom da malena stapanja uključuju galaksije s manjim omjerom masa.

Dotatna značajka stope stapanja koja se također može objasniti promatranjem FZMG-a je strmiji rast koji dolazi odmah prije maksimuma i eksponencijalnog pada. Ovo ponašanje je također viđeno u Illustris simulaciji, a naša interpretacija je da se radi o rezultatu lokalno ravnog ponašanja u FZMG na tim masama, umjesto pada. Masena gustoća galaksija pada sporije na tim masama, što rezultira u strmijoj stopi stapanja. Pretpostavljamo da se dodatne značajke u stopi stapanja mogu povezati sa ostalim značajkama u FZMG.

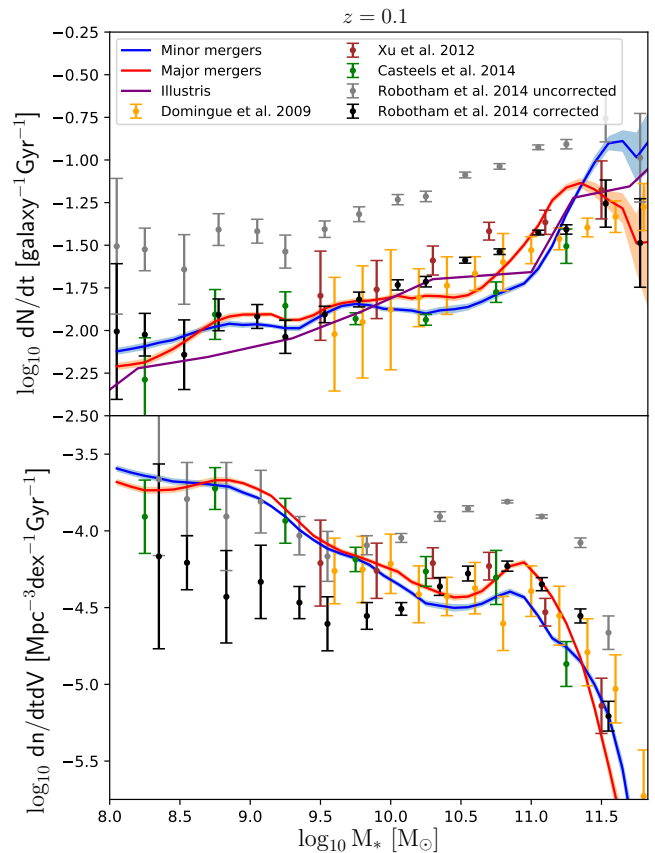
Naša interpretacija ovih rezultata je pojačana ako pogledamo stope stapanja kao funkcije zvjezdanih mase na više crvenih pomaka (gornji grafovi na Slici 5). Maksimum i eksponencijalni pad se pomiču prema manjim masama i za malena i za velika stapanja, a taj pomak prati pomak u eksponencijalnom padu viđenom u FZMG-u. Slično tome, zaoštavanje rasta stope stapanja prije maksimuma se smanjuje na višim crvenim pomacima, a to je vjerojatni rezultat nestanka lokalnog platoa u FZMG-u na istim masama. Općenito, vidimo da se stopa stapanja izgladuje, u skladu sa izgladivanjem FZMG, kako se pomičemo prema većim crvenim pomacima.

Dok se ove značajke mogu objasniti kao rezultat značajki u FZMG, naglašavamo da ovaj efekt nije jednosmjernan. Naime, evoluciju zvjezdane gustoće galaksija možemo opisati preko jednadžbe kontinuiteta:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial M_*} \left(\frac{dM_*}{dt} n \right) = \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{merg}}, \quad (9)$$

gdje je dM_*/dt brzina masenog rasta galaksija, a $(dn/dt)_{\text{merg}}$ je član koji odgovara gubitku broja galaksija koje nestaju kao rezultat stapanja. Stapanja čine dio prvog člana (uz rast zvjezdane mase zbog nastanka zvijezda), a potpuno su odgovorna za drugi član. Drugim riječima, stapanja galaksija mogu direktno proizvesti lokalno (u smislu mase) veće brojne gustoće galaksija, kao i nedostatak galaksija na drugim masama.

Gustoće stapanja galaksija, prikazane na donjim grafovima Slika 4 i 5, se također slažu s opažajkim studijama. Postoji maleno neslaganje na nižim masama, no ono je unutar intervala nepouzdanosti. Također niti ne



Slika 4: Stope stapanja galaksija kao funkcije zvjezdane mase (najmasivnijeg pretka) na crvenom pomaku $z \approx 0.1$. Predviđene stope stapanja GALFORM-a su prikazane plavim i crvenim linijama za malena ($\mu \in [0.1, 0.25]$) i velika ($\mu \in [0.25, 1]$) stapanja, slijedom, dok točke predstavljaju stope velikih stapanja iz opažajkih studija. Potonje vrijednosti su pomnožene odgovarajućim faktorima kako bi se nadoknadile razlike u selekcijskim kriterijima. Računate su iz opažajki izmjerenih udjela bliskih parova primjenom univerzalne formule za vremensku skalu stapanja iz Kitzbichler & White (2008) (više detalja u Odjeljku III C). Rasponi pouzdanosti opservacijskih studija odgovaraju intervalu od 1σ , dok zasjenjeni rasponi pouzdanosti oko naših rezultata iz GALFORM-a predstavljaju intervale od 2σ . Gore: Stope stapanja galaksija uspoređene sa opažanjima i Illustris simulacijom. Dolje: Gustoće stopa stapanja uspoređene s opažanjima.

očekujemo da će GALFORM savršeno reproducirati brojne gustoće za galaksije malenih masa.

Donji grafovi Slike 5 prikazuju gustoće stopa stapanja galaksija kao funkcije zvjezdanih masa na raznim crvenim pomacima. Evolucija je općenito slična evoluciji funkciji zvjezdanih masa galaksija, ali naglašavamo postojanje ‘udubine’ između dviju karakterističnih masa ($10^9 M_\odot$ te $10^{11} M_\odot$ za $z = 0$, no za druge crvene pomake su drugačije vrijednosti). Ova udubina je vjerojatno po-

vezana s udubinom u funkciji zvjezdanih masa galaksija, slično kao i stopa stapanja. Vidi se da udubina nestaje do $z \approx 3$.

B. Ovisnost o crvenom pomaku

Slika 6 prikazuje stope stapanja galaksija zvjezdane mase $M_* = 10^{10.8} M_\odot$ kao funkcija crvenog pomaka do $z \approx 1$, u usporedbi s opažanjima. Vidi se dobro slaganje, no naša stopa stapanja počinje pokazivati znakove pada, što se ne vidi direktno u opažajkim rezultatima.

Također uspoređujemo naše rezultate s opažanjima na većim crvenim pomacima (Man et al. 2016 i Mundy et al. 2017) pod Slikom 7. Ova usporedba je učinjena uz dvije masene selekcije; $M_* > 10^{10} M_\odot$ (samo Mundy et al.) te $M_* > 10^{11} M_\odot$. Taj izbor se obično koristi s obzirom da je lakše detektirati masivnije galaksije na većim crvenim pomacima. No, one su manje brojne, što zahtjeva da biramo sve galaksije iznad te mase, umjesto da detaljno proučavamo ovisnost o masi. Man et al. proučavaju stapanja galaksija u UltraVISTA/3DHST poljima, dok su u Mundy et al. predstavljeni rezultati iz mnogih polja (GAMA, UDS, VIDEO, COSMOS, CANDELS).

Naša stopa stapanja se dobro slaže s opažajkim rezultatima na velikim crvenim pomacima. Bilo koje razlike su reda razlika između opažajkih rezultata međusobno. Na dovoljno velikim crvenim pomacima je statistička pogreška u našim rezultatima dovoljno velika da nije jasno nastavi li stopa stapanja rasti ili počne li padati.

S ovime na umu, u Slici 8 predstavljamo ovisnosti stopa stapanja za više zvjezdanih masa do velikih crvenih pomaka. Stope stapanja pokazuju ovisnost o masi kao neka potencija (što se vidi u donjim grafovima) sve do određenog crvenog pomaka, nakon kojeg počnu naglo padati. Ovaj crveni pomak se smanjuje što je veća zvjezdana masa u pitanju—predlažemo da je razlog za ovo ponašanje isti kao i za sličan pad stope stapanja kao funkcije mase (gornje grafovi na Slici 5). Naime, stopa stapanja galaksija neke mase kao funkcija crvenog pomaka bi trebala naglo padati na onom crvenom pomaku za koji galaksije tih masa prelaze u ekspanzionalno potisnuti režim u funkciji zvjezdanih masa galaksija (Slika 1).

C. Ovisnost o omjeru mase

Stapanja galaksija se obično kategoriziraju u dvije skupine: malena ($\mu \in [0.1, 0.25]$) i velika ($\mu \in [0.25, 1]$). Ovdje predstavljamo općenitije rezultate, odnosno ovisnost stope stapanja o omjeru mase dvije galaksija μ . Proučavamo kumulativnu stopu stapanja galaksija $dN/dt(> \mu)$, definiranu kao stopu stapanja galaksija iznad danog omjera masa (ali ne idemo ispod $\mu = 0.1$ jer bi stopa stapanja divergirala). Također proučavamo i diferencijalnu stopu stapanja $dN/dtd\mu$. Radi lakšeg razmatranja dijelimo obje veličine s ukupnom stopom stapanja

dN/dt (između $\mu = 0.1$ i $\mu = 1$):

$$\text{Kumulativna stopa stapanja} = \frac{dN/dt(> \mu)}{dN/dt}, \quad (10)$$

$$\text{Diferencijalna stopa stapanja} = \frac{dN/dtd\mu(> \mu)}{dN/dt}. \quad (11)$$

Prednost ovakvih definicija (odnosno dijeljenjem s ukupnom stopom stapanja) je što nam daje normalizirane funkcije u odnosu na omjer mase, tako da je kumulativna stopa stapanja uvijek jednaka 1 za $\mu = 0.1$, dok diferencijalna stopa stapanja mjeri relativni doprinos stapanja u danom intervalu omjera masa ukupnoj stopi. Ovakva definicija omogućava proučavanje stope stapanja galaksija kao funkcije omjera masa na raznim zvjezdanim masama i crvenim pomacima, a bez da se u tu ovisnost “miješa” direktna ovisnost stope stapanja o tim dvjema veličinama.

Slika 9 prikazuje kumulativne i diferencijalne stope stapanja galaksija kao funkcije omjera masa za više primarnih masa na $z = 0.1$. Općeniti trend je da masivnije galaksije imaju veći doprinos od većih omjera masa. No, na galaksijama umjerenih masa nije sasvim jasno je li ovaj trend lokalno prekršen.

Kako bismo proučili ovaj trend (promjenu ovisnosti o omjeru masa za galaksije različitih primarnih masa), računamo srednju vrijednost omjera masa $\langle \mu \rangle = \langle M_{*,\text{sat}}/M_{*,\text{pri}} \rangle$. Ona se može računati iz

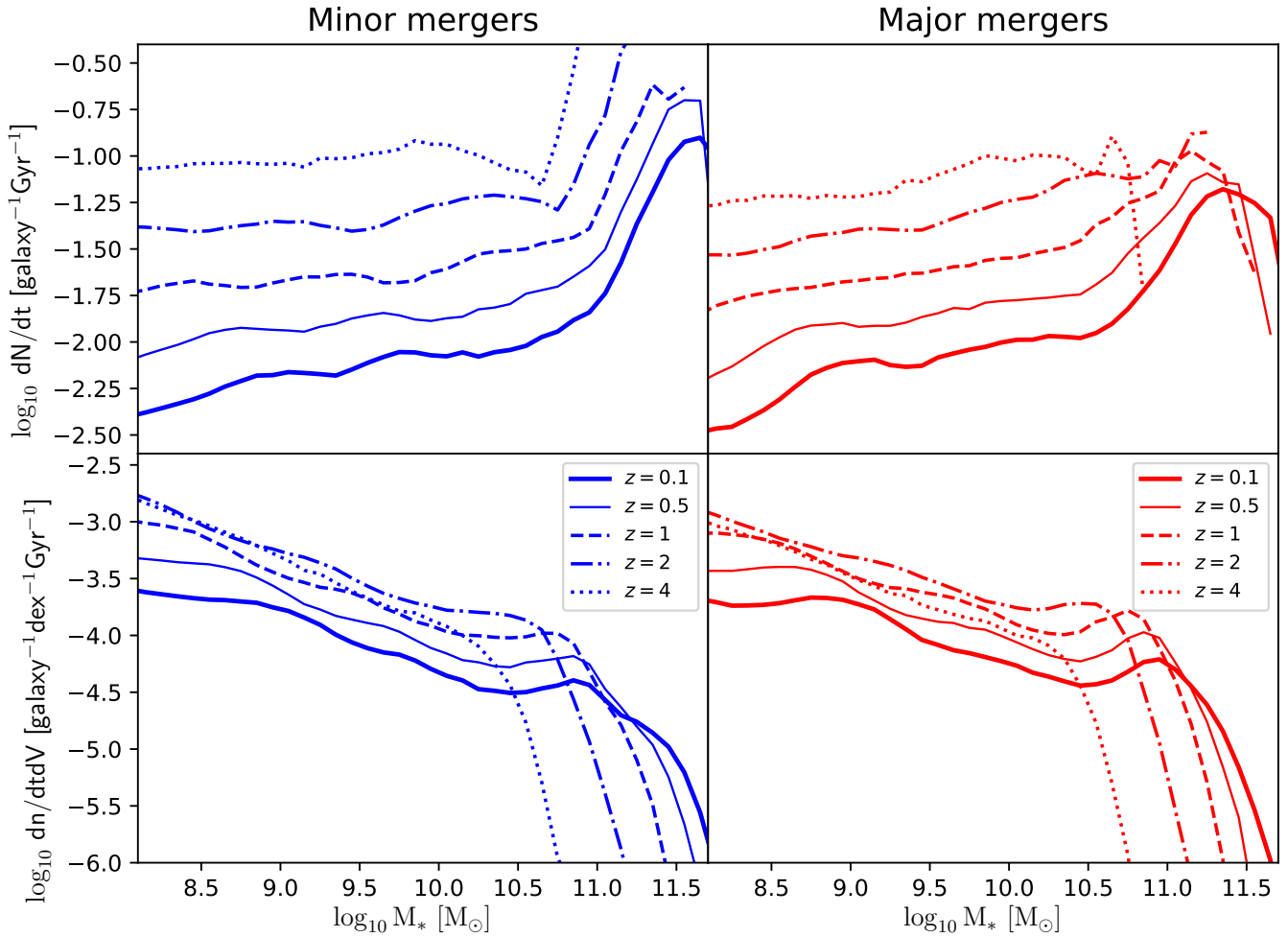
$$\langle \mu \rangle = \int_{0.1}^1 \mu f d\mu, \quad (12)$$

gdje je f diferencijalna stopa stapanja dana jednadžbom 11. Umjesto ove metode koristimo se alternativnim načinom. Računamo stopu stapanja iz simulacije direktno—ovime se izbjegavaju međukoraci svrstavanja omjera masa po raznim intervalima, čime se gubi preciznost.

Rezultat ove procedure je prikazan na Slici 10. Srednji omjer masa se slabo povećava za galaksije malenih i srednjih masa, ali općenito vrijedi $\langle \mu \rangle \approx 0.3$. Oštar rast se vidi blizu karakteristične mase povezane s poravnanjem funkcije zvjezdane mase galaksija (Slika 1). Ovo je očekivani rezultat s obzirom da su te galaksije okružene većim brojem galaksija sličnih masa. Na još većim masama srednji omjer masa kreće naglo padati, a ovo je povezano s ekspanzionalnim prigušenjem broja galaksija velikih masa u funkciji zvjezdanih masa galaksija. Promjena srednjeg omjera mase se slaže s trendovima u funkciji zvjezdanih masa galaksija. Također pokazuje da su veliki sudari sve dominantniji s vremenom, no taj efekt je značajan samo u režimu galaksija velikih masa.

V. UDIO BLISKIH PAROVA

Stopa stapanja galaksija je korisna i intuitivna veličina koja govori dosta o nastanku i evoluciji galaksija, no njen



Slika 5: Stope malenih ($\mu \in [0.1, 0.25]$) i velikih ($\mu \in [0.25, 1]$) stapanja galaksija kao funkcije zvjezdane mase na raznim crvenim pomacima. Različiti tipovi linija predstavljaju različite crvene pomake, prema legendi. Linije su prekinute na onim masama gdje više nisu detektirana stapanja. *Gore*: Stope stapanja galaksija. *Dolje*: Gustoće stopa stapanja galaksija.

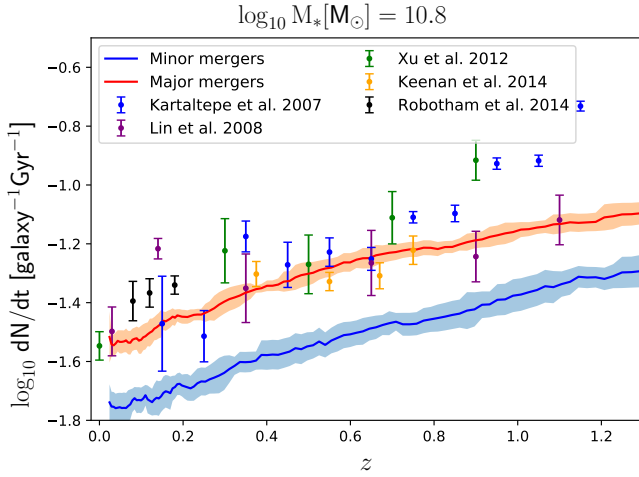
glavni nedostatak je što ju se ne može direktno izmjeriti. S ovime na umu, ovdje računamo udjele bliskih parova (koji jesu direktno mjerljivi) za velike ($\mu \in [0.25, 1]$) parove. Procedura kojom su oni računati je opisana u Odjeljku III B. Proučavamo udio bliskih parova kao funkciju zvjezdane mase primarne galaksije para kao i crvenog pomaka, a također gledamo i ovisnost o maksimalnoj projiciranoj separaciji para te maksimalnoj separacijskoj brzini.

Slika 11 prikazuje naš predviđeni udio bliskih parova u usporedbi s opažanjima, uz izbor dinamičkih selekcijskih kriterija: $r_{\text{proj}} < 20 \text{ h}^{-1} \text{ kpc}$ i $|v_{\text{sep}}| < 500 \text{ km s}^{-1}$. Usporedba je učinjena s opažajkim studijama koje također primjenjuju samo te selekcije, bez dodatnih selekcija temeljenih na morfologiji (izuzevši Casteels et al. (2014, koje ostavljamo kao jednu od nedavnih studija gdje je promatrana ovisnost o zvjezdanoj masi).

S gornje lijeve slike vidimo da je naš udio velikih bli-

skih parova u dobrom slaganju s opažanjima za galaksije umjerenih i velikih masa. Vidimo da se postiže maksimum te pad na velikim masama, iz istih razloga kao i stopa stapanja (Odjeljak IV A). Ovo ponašanje vidimo i u mjerenjima iz Robotham et al. (2014). Na nižim masama ($M_* < 10^{10} M_{\odot}$) naš udio bliskih parova postiže veće vrijednosti ($\approx 10\%$) nego izmjerene u opažajkim studijama. Moguće je da je ovo krivo predviđanje GALFORM modela, no ne isključujemo mogućnost da opažajke studije ne uspiju ‘uhvatiti’ sve bliske parove. Razlog je taj što je to teže razlučiti par galaksija što su one bliže (npr. reda 5 kpc), a za galaksije manjih masa se očekuje da su češće u takvim bliskim parovima. Uz to, vremenska skala stapanja je dulja za galaksije manjih masa (npr. Kitzbichler & White 2008, naš Odjeljak VI), što znači da se mogu nalaziti unutar malih udaljenosti dulje (a bez da se stope).

S ostalih grafova na Slici 11 vidimo da se udio bliskih



Slika 6: Stopa stapanja galaksija zvjezdane mase $M_* = 10^{10.8} M_\odot$. Plave i crvene linije predstavljaju naša predviđanja za malena ($\mu \in [0.1, 0.25]$) i velika stapanja ($\mu \in [0.25, 1]$), dok točke predstavljaju opažачke studije velikih stapanja, prema legendi. Opažачke stope stapanja su izračunate kao što je opisano pod Slikom 4.

parova za razne selekcije masa slaže s opažanjima (kao funkcija crvenog pomaka). Štoviše, ovisnosti su slične onima za stope stapanja (Slike 6 i 7), koje su izvedene koristeći vremensku skalu stapanja iz Kitzbichler & White (2008), a čija karakteristika je da pokazuje slabu evoluciju s crvenim pomakom. Implikacija ovog slaganja je da se vremenska skala stapanja koju predviđa GALFORM dobro slaže s onom iz Kitzbichler & White studije. Ovo diskutiramo detaljnije u Odjeljku VI.

Na lijevom grafu na Slici 12 prikazujemo udio velikih bliskih parova kao funkciju zvjezdanih mase za nekoliko crvenih pomaka. Maksimum te pad na velikim masama se pomiče prema nižim masama za veće crvene pomake, slično ponašanju stope stapanja (Slika 5). Predlažemo opet isto objašnjenje za ovo—da se radi o ulasku galaksija u eksponencijalno prigušen režim brojeva galaksija koji se vidi u funkciji zvjezdanih masa galaksija.

Na desnom grafu prikazujemo kako se udio velikih bliskih parova mijenja s crvenim pomakom za galaksije raznih masa. Ovdje se bez sumnje vidi da udjeli bliskih parova počnu padati na nekom crvenom pomaku. Ovakvo ponašanje je bilo teže za potvrditi za stopu stapanja (Slika 8) s obzirom da općenito detektiramo manje stapanja nego bliskih parova u bilo kojem intervalu mase na bilo kojem crvenom pomaku.

VI. VREMENSKA SKALA STAPANJA

A. Ovisnost o zvjezdanoj masi i crvenom pomaku

Iz izračunatih stopa stapanja i udjela bliskih parova moguće je odmah izračunati i vremensku skalu stapanja

(za velika stapanja). Prema definiciji (jednadžba 5) ona slijedi kao:

$$T_{\text{mg}} = f \times \left(\frac{dN}{dt} \right)^{-1}, \quad (13)$$

odnosno samo je potrebno podijeliti udio bliskih parova sa stopom stapanja.

Slika 13 prikazuje vremensku skalu stapanja za konverziju udjela velikih ($\mu \in [0.25, 1]$) bliskih parova u stope stapanja, s dinamičkom selekcijom koja odgovara $r_{\text{proj}} < 20 \text{ h}^{-1} \text{ kpc}$ i $|v_{\text{sep}}| < 500 \text{ kms}^{-1}$. Na gornjem lijevom grafu je prikazana vremenska skala kao funkcija zvjezdane mase na tri crvena pomaka. Također je prikazana Kitzbichler & White (2008) vremenska skala (na $z = 0$), no napominjemo da direktna usporedba nije sasvim moguća. Razlog je što je vremenska skala iz tog rada prikladna za stapanja galaksija masa *iznad* dane mase, a ne za galaksija *te* mase. Također, u tom radu su dane vrijednosti samo za galaksije masa iznad $M_* > 10^{10} M_\odot$. Njihova relacija prikazuje manji (logaritamski) nagib od našeg ($a = -0.3$ njihov, $a = -0.48$ naš). Na višim masama su vremenske skale slične, a na nižim je naša znatno dulja od njihove. Ovo je rezultat višeg udjela bliskih parova, no napominjemo da usporedba na nižim masama i tako nije sasvim valjana.

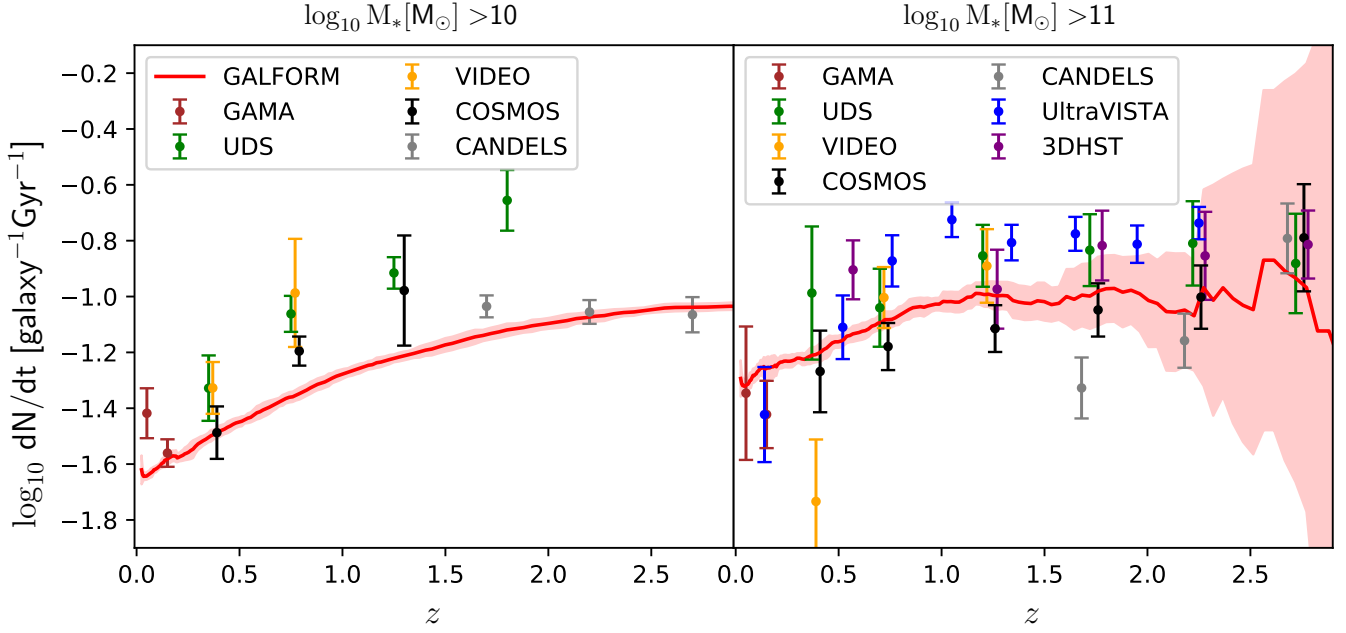
Na lijevom gornjem grafu Slike 13 također primjećujemo aproksimativno ponašanje zakona potencije (kao funkcija zvjezdane mase), koje se općenito vidi na svim crvenim pomacima. S ovime na umu, pretpostavljamo ovisnost vremenske skale stapanja sljedećeg oblika za svaki crveni pomak:

$$\log_{10} T_{\text{mg}} = b + a \log_{10} \left(\frac{M_*}{10^{10} M_\odot} \right), \quad (14)$$

gdje je $b = \log_{10} T_0$ normalizacija, a a nagib (eksponent) ovisnosti o zvjezdanoj masi. Ove aproksimacije su prikazane crnim linijama u gornjem grafovima Slike 13. Na gornjem desnom grafu vidimo da ova aproksimacija dobro obuhvaća ponašanje vremenske skale stapanja s crvenim pomakom. Vidimo dobro slaganje slabe evolucije s crvenim pomakom, koja je viđena i u prijašnjim rezultatima (Kitzbichler & White 2008 i Lotz et al. 2010b).

Donji grafovi Slike 13 prikazuju kako se nagib i normalizacija ove linearne regresije (u prostoru mase) mijenjaju kao funkcije crvenog pomaka. Dok se normalizacija mijenja relativno jednostavno, nagib pokazuje ponašanje koje bi zahtjevalo formulu s minimalno tri parametra. Umjesto toga, biramo srednju vrijednost nagiba i normalizacije ($a = -0.5$ i $b = -0.24$) u masi, a onda radimo prilagodbu vremenske skale stapanja (kao funkcije crvenog pomaka) sljedećeg oblika:

$$\log_{10} T_{\text{mg}} = (0.24 \pm 0.16) - (0.5 \pm 0.05) \log_{10} \left(\frac{M_*}{10^{10} M_\odot} \right) + c \log_{10}(1+z) + d \times z. \quad (15)$$



Slika 7: Stope stapanja galaksija za galaksije zvjezdane mase iznad neke vrijednosti (dane iznad grafova) kao funkcije crvenog pomaka. Crvene linije i zasjenjene regije (1σ –intervali pouzdanosti) predstavljaju naše stope velikih stapanja ($\mu \in [0.25, 1]$), dok točke predstavljaju opažačke rezultate iz raznih polja, prema legendi. UltraVISTA i 3DHST su uzeti iz Man et al. (2016), dok su rezultati ostalih polja uzeti iz Mundy et al. (2017). Ove vrijednosti su dobivene na isti način kao što je opisano pod Slikom 4.

Potom pronalazimo c i d za svaki interval zvjezdane mase. Posljednji član je motiviran činjenicom da vremenske skale stapanja počnu naglo padati na nekom crvenom pomaku. Kao što je vidljivo s gornjeg desnog grafa na Slici 13, nagib c ovisnosti o crvenom pomaku mijenja vrijednosti s blago pozitivnih (blago rastuće vremenske skale stapanja) za galaksije većih masa na blago negativne (blago padajuće vremenske skale) za galaksije manjih masa. Crveni pomak na kojem vremenska skala počne naglo padati (kvantificirano parametrom d) se također mijenja s masom. Drugim riječima, c i d su funkcije zvjezdane mase. Usprkos tome, vidimo da uzimanjem srednjih vrijednosti $c = 0.5$ i $d = -0.14$ dobro aproksimira stvarne vrijednosti (siva linija na Slici 13). Konačno, to znači da vremensku skalu stapanja (za dinamički prozor $r_{\text{proj}} < 20 \text{ h}^{-1}\text{kpc}$ i $|v_{\text{sep}}| < 500 \text{ kms}^{-1}$) možemo aproksimativno računati iz:

$$T_{\text{mg}} = (1.7 \pm 0.8) \text{ Gyr} \left(\frac{M_*}{10^{10} M_{\odot}} \right)^{-0.5 \pm 0.05} \times (1+z)^{0.5 \pm 0.1} e^{-(0.14 \pm 0.15)z}. \quad (16)$$

B. Ovisnost o projiciranoj separaciji

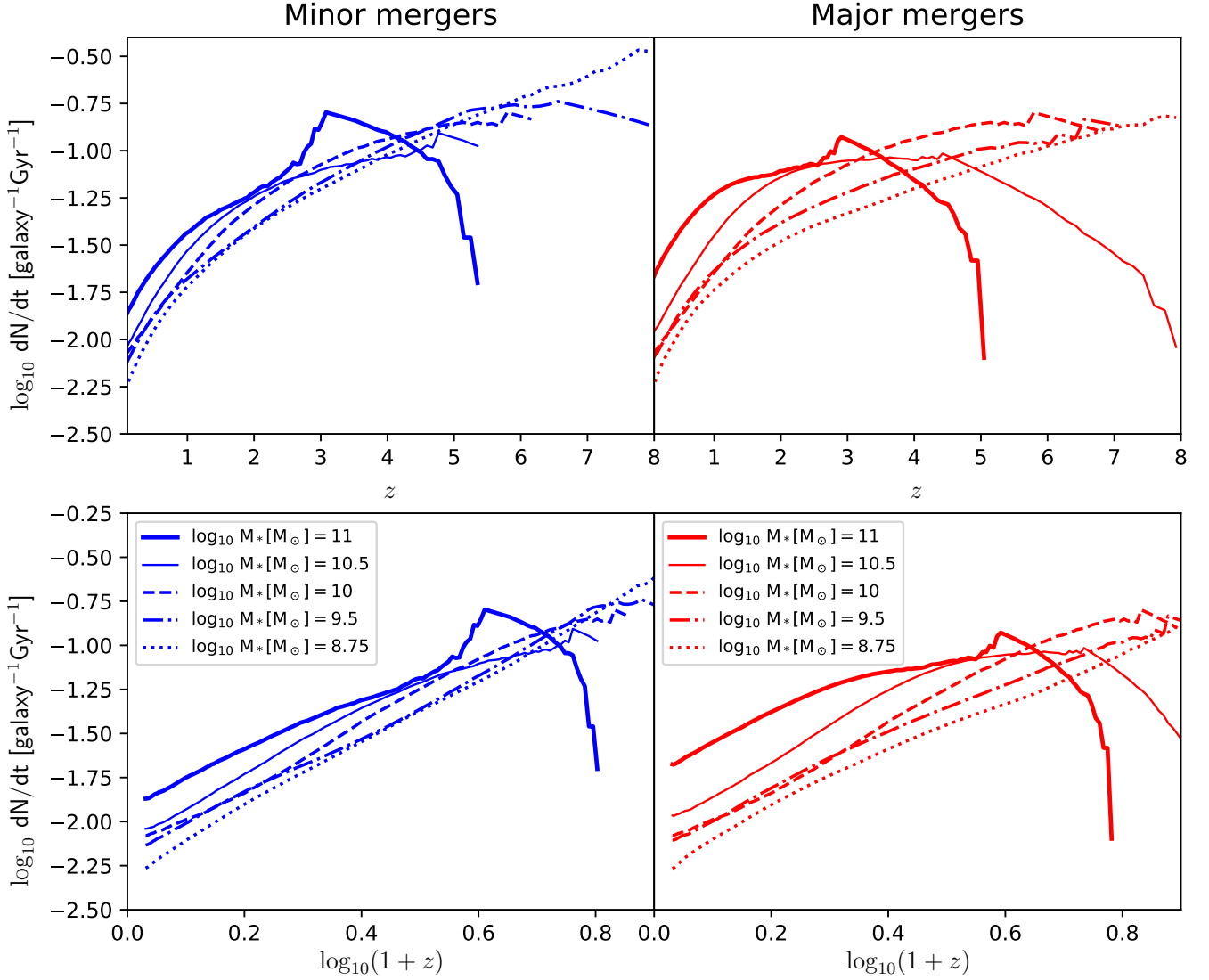
Vremenske skale stapanja nasljeđuju svoju ovisnost o projiciranoj separaciji iz iste ovisnosti udjela bliskih parova. Opažačke studije uzimaju razne vrijednosti mak-

simalnih projiciranih separacija—zbog ovog razloga je bitno odrediti kako vremenska skala ovisi o toj veličini. U prijašnjim studijama je bilo pokušano odrediti ovu ovisnost samo za par vrijednosti (npr. Kitzbichler & White) s uobičajenom pretpostavkom da je ovisnost linearna. Ovdje predstavljamo vremenske skale stapanja izvedene iz udjela bliskih parova s $r_{\text{proj}} < r_{\text{max}}$, gdje je izabrano 15 različitih vrijednosti za r_{max} između 5 i $75 \text{ h}^{-1}\text{kpc}$. Maksimalna separacijska brzina se držala na konstantnoj vrijednosti od 500 kms^{-1} .

Slika 14 prikazuje naše rezultate za ove selekcije. Gornji lijevi graf prikazuje vremensku skalu stapanja kao funkciju zvjezdane mase na $z = 0.1$ za nekoliko selekcija projiciranih udaljenosti. Masena ovisnost se slabo mijenja promjenom selekcija, s time da je glavna promijenjena normalizacija. Nagib djeluje konstantan za različite selekcije.

Gornji desni graf prikazuje ovisnost o crvenom pomaku za nekoliko projiciranih separacija, kao i za različite mase. Opet se vidi da oblik ovisnosti ostaje isti dokle god se gledaju fiksne mase (predstavljene raznim bojama).

Na donjim grafovima prikazujemo eksplicitnu ovisnost vremenske skale stapanja o maksimalnoj projiciranoj separaciji za razne zvjezdane mase i crvene pomake. Lijevo (na $z = 0.1$) prikazuje linearnu aproksimaciju $T_{\text{mg}} \propto r_{\text{max}}$ centriranu oko vrijednosti $r_{\text{max}} = 20 \text{ h}^{-1}\text{kpc}$. Ova aproksimacija (koju očekujemo iz argumenata dinamičkog trenja, te pronađena u Kitzbichler & White (2008)) ne predviđa dovoljno veliku vremensku skalu na



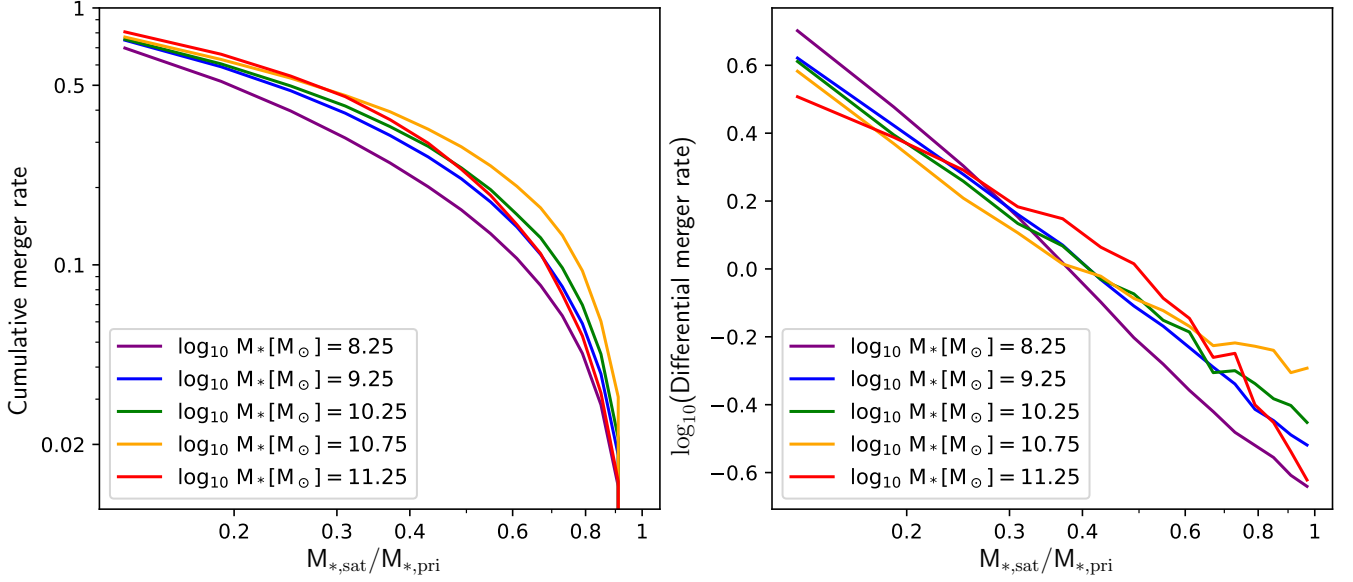
Slika 8: Malena ($\mu \in [0.1, 0.25]$) i velika ($\mu \in [0.25, 1]$) stopa stapanja galaksija određenih zvjezdanih masa (prema legendi), kao funkcije dviju različitih skala crvenog pomaka (gore-linearna te dolje- $\log_{10}(1+z)$). Linije su prekinute tamo gdje više nisu detektirana stapanja.

velikim vrijednostima maksimalne separacije, a predviđa prevelik broj na malenim vrijednostima. Iz ovog razloga uzimamo alternativnu aproksimaciju $T_{\text{mg}} \propto r_{\text{max}}^\alpha$, te računamo α za sve intervale mase i crvenog pomaka.

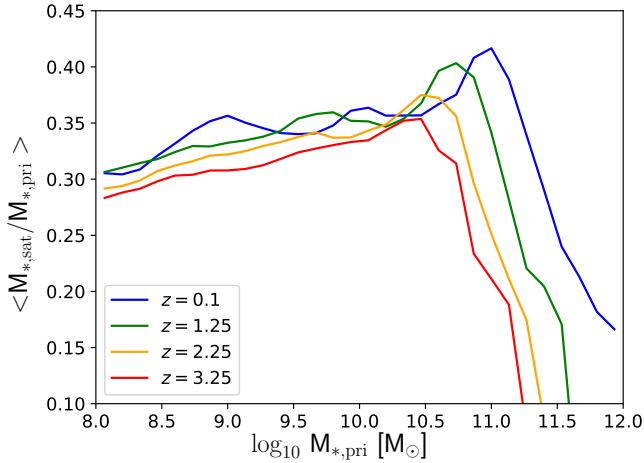
Pronalazimo da se ovaj nagib mijenja preko masa i crvenih pomaka, no općenito ima vrijednosti između 1.3 (za galaksije velikih masa) i 2 (za galaksije malenih masa). Ova varijacija se može objasniti kroz jednostavna razmatranja. Vremenska skala dinamičkog trenja (jednadžba 1) je proporcionalna kvadratu stvarne (3D) separacije primarne i satelitske galaksije, što implicira linearnu relaciju između vremenske skale i projicirane separacije. S druge strane, broj galaksija koje nisu fizički blizu nego su rezultat projekcije bi trebao rasti proporcionalno s površinom neba, odnosno s kvadratom projicirane separacije.

S obzirom da vremenska skala stapanja raste kao $T_{\text{mg}} \propto r_{\text{max}}^{1.3}$ za galaksije visokih masa, zaključujemo da ove galaksije imaju bliske parove i u stvarnom i u projiciranom prostoru (no većinom u stvarnom). S druge strane, ponašanje na niskim masama ($T_{\text{mg}} \propto r_{\text{max}}^2$) implicira da su gotovo svi parovi na ovim masama rezultat projekcije te da nisu fizički povezani.

Usprkos ovoj varijaciji s masom uzimamo srednju vrijednost $\alpha = 1.5$. Ova aproksimacija je prikazana punim linijama na oba donja grafa. Vidimo da ona bolje obuhvaća ovisnosti nego linearna aproksimacija, iako donekle predviđa premalene vrijednosti za veće zvjezdane mase na malenim separacijama ($r_{\text{max}} < 10 \text{ h}^{-1} \text{ kpc}$). Uzimamo ovu aproksimaciju bez obzira na ovaj nedostatak jer opažačke studije rijetko uzimaju toliko malene mak-



Slika 9: Normalizirane kumulativne i diferencijalne stope stapanja galaksija kao funkcije omjera mase na $z = 0.1$ za galaksije različitih zvjezdanih masa, prema legendi. Ove veličine su definirane jednadžbama 10 i 11, slijedom.



Slika 10: Ovisnost srednjeg omjera mase o masi primarne galaksije na više različitih crvenih pomaka, prema legendi. Stapanja galaksija za čiji omjer masa vrijedi $\mu < 0.1$ su isključene iz ovog računa.

simalne separacije. Uz ovaj izbor, naša formula za vremensku skalu stapanja (jednadžba 16) sada postaje:

$$T_{\text{mg}} = (1.7 \pm 0.8) \text{ Gyr} \left(\frac{r_{\text{max}}}{20 \text{ h}^{-1} \text{ kpc}} \right)^{1.5 \pm 0.3} \times \left(\frac{M_*}{10^{10} M_\odot} \right)^{-0.5 \pm 0.05} (1+z)^{0.5 \pm 0.1} e^{-(0.14 \pm 0.15)z}. \quad (17)$$

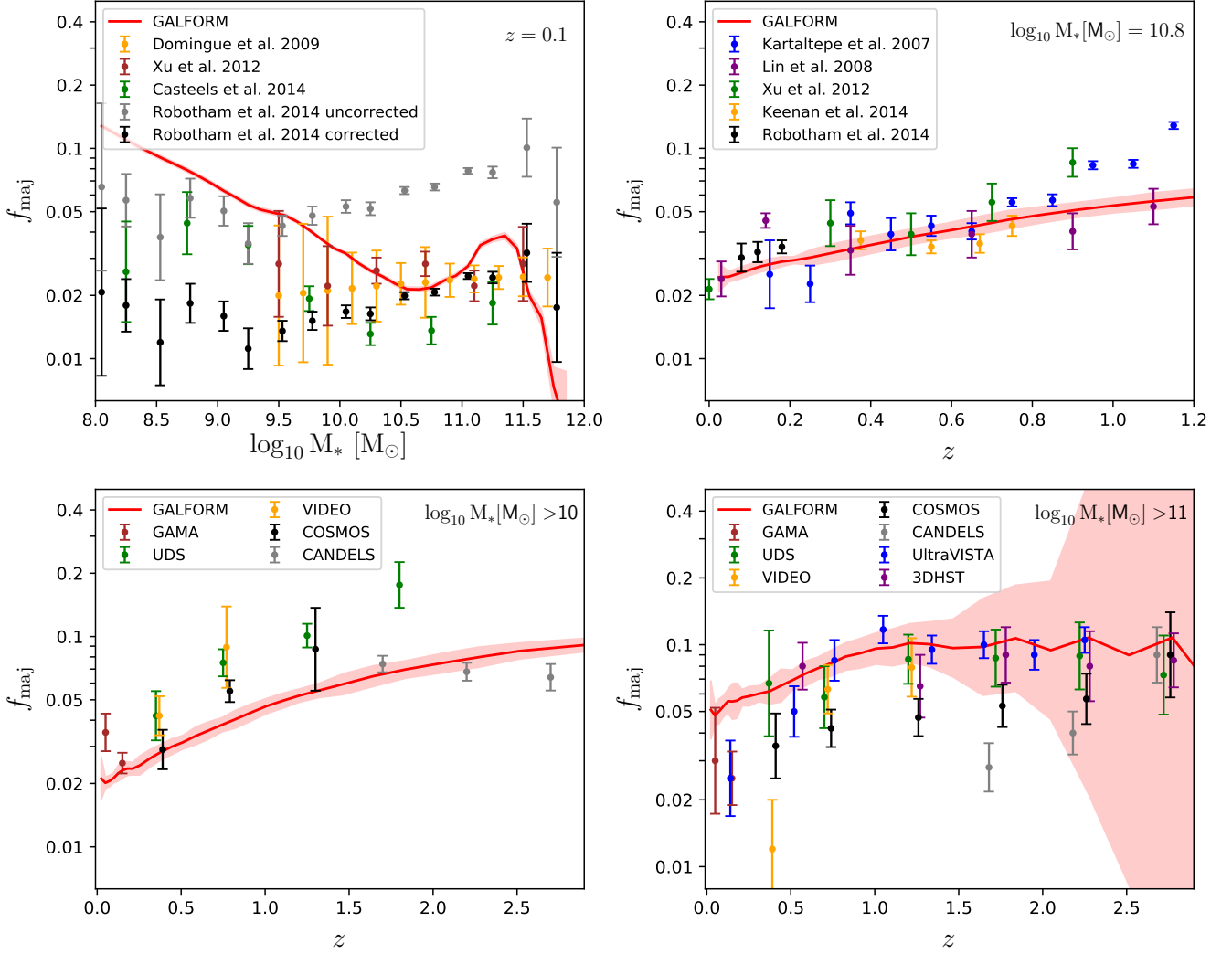
C. Ovisnost o separacijskoj brzini

Sada se okrećemo ovisnosti vremenske skale stapanja o maksimalnoj separacijskoj brzini. Ovaj selekcijski kriterij za bliske parove je također relativno proizvoljan i u studijama se koriste mnoge selekcije. Do sada nije bilo neke detaljne studije u kojoj bi se promatrala ovisnost vremenske skale stapanja o ovoj veličini. S ovime na umu, proučavali smo ovu ovisnost uzevši selekcije na 15 različitih vrijednosti v_{max} između 100 and 3000 kms^{-1} , u analogiji s procedurom iz prijašnjeg odjeljka za projicirane separacije. U ovu svrhu je projicirana separacija držana na konstantnoj vrijednosti $r_{\text{max}} = 20 \text{ h}^{-1} \text{ kpc}$.

Slika 15 prikazuje rezultate ove analize. Gornji lijevi graf prikazuje kako se ovisnost vremenske skale stapanja o masi mijenja raznim izborima maksimalne separacijske brzine. Primjećujemo da nagib ostaje isti, kao i kod mijenjanja projicirane separacije. Također primjećujemo da vremenska skala konvergira do vrijednosti $v_{\text{max}} = 1000 \text{ kms}^{-1}$, što vidimo time da ne postoji skoro nikakva razlika između vremenske skale stapanja za tu vrijednost i za $v_{\text{max}} = 3000 \text{ kms}^{-1}$.

Na gonjem desnom grafu prikazujemo ovisnost vremenske skale o crvenom pomaku za tri zvjezdane mase i nekoliko izbora maksimalnih separacijskih brzina. Vidimo slično ponašanje kao i prije—ovisnost o crvenom pomaku se ne mijenja preko različitih selekcija. Također primjećujemo konvergenciju do $v_{\text{max}} = 1000 \text{ kms}^{-1}$.

Na donjim grafovima prikazujemo eksplicitnu ovisnost o maksimalnoj separacijskoj brzini za razne zvjezdane mase i crvene pomake. Konvergencija vremenske skale od ovdje potpuno vidljiva, i s time na umu pretpostavljamo



Slika 11: Udio velikih ($\mu \in [0.25, 1]$) bliskih parova iz naše analize (crvene linije i zasjenjena područja) u usporedbi s opažanjima. Dinamički selekcijski kriteriji koje primjenjujemo su: $r_{\text{proj}} < 20 \text{ h}^{-1}\text{kpc}$ i $|v_{\text{sep}}| < 500 \text{ kms}^{-1}$. Rasponi pouzdanosti i zasjenjena područja predstavljaju intervale od 1σ te 2σ , slijedom. Rezultati iz opažачkih studija su skalirani prema gore ili dolje ovisno o tome koje vrijednosti su uzete za maksimalnu projiciranu separaciju u danoj studiji.

ovisnost oblika:

$$T_{\text{mg}} \propto \beta \operatorname{erf}\left(\frac{v_{\text{max}}}{V_0}\right)^\gamma. \quad (18)$$

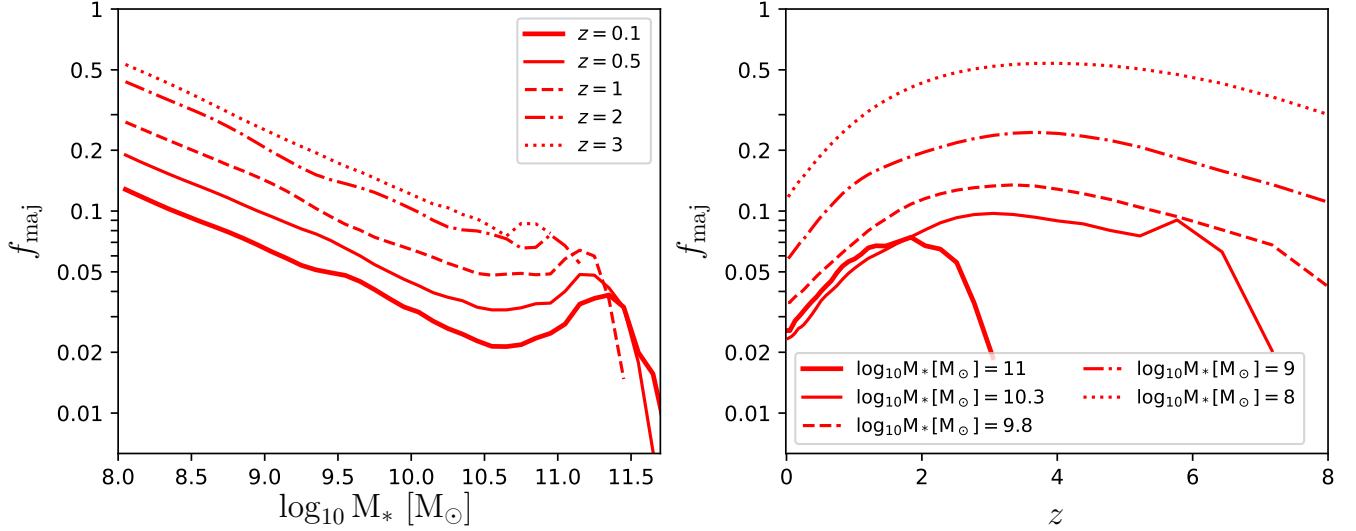
Pronalazimo da ovi parametri svi ovise o zvjezdanoj masi i crvenom pomaku, no uzimanje srednjih vrijednosti vodi do zadovoljavajućih rezultata (uz srednje vrijednosti $\beta = 1.3 \pm 0.1$, $V_0 = (550 \pm 50) \text{ kms}^{-1}$ i $\gamma = 0.75 \pm 0.06$). Ova aproksimacija je prikazana u donjim grafovima punim linijama. Kao što vidimo, ona dobro obuhvaća ponašanje zakona potencije na niskim separacijskim brzinama ($v_{\text{max}} < 500 \text{ kms}^{-1}$), kao i saturaciju na višim separacijskim brzinama. S obzirom da ovisnost o separacijskoj brzini postiže saturaciju do $v_{\text{max}} = 1000 \text{ kms}^{-1}$, predlažemo da se ova vrijednost uzima kao dobar selekcijski kriterij koji će obuhvatiti sve bliske parove (u odnosu

na separacijske brzine) neovisno o zvjezdanoj masi i crvenom pomaku.

Uz sve aproksimacije koje smo primijenili, naša konačna vremenska skala stapanja se može prikazati sljedećom formulom (kao funkcija zvjezdane mase i crvenog pomaka, ali i maksimalne projicirane separacije i separacijske brzine):

$$T_{\text{mg}} = T_0 r_{\text{max},20}^\alpha \operatorname{erf}(v_{\text{max},0}^\beta) M_{*,10}^\gamma (1+z)^\delta e^{\varepsilon z}, \quad (19)$$

gdje 7 parametara slijede: $T_0 = (2.2 \pm 0.9) \text{ Gyr}$, $\alpha = 1.5 \pm 0.3$, $V_0 = (550 \pm 50) \text{ kms}^{-1}$, $\beta = 0.75 \pm 0.06$, $\gamma = -0.5 \pm 0.05$, $\delta = 0.5 \pm 0.1$ te $\varepsilon = -0.14 \pm 0.15$, gdje su udaljenosti, brzine i mase normalizirane kao: $r_{\text{max},20} = r_{\text{max}}/20 \text{ h}^{-1}\text{kpc}$, $v_{\text{max},0} = v_{\text{max}}/V_0$ te $M_{*,10} = M_*/10^{10} M_\odot$.



Slika 12: Udio velikih ($\mu \in [0.25, 1]$) bliskih parova s dinamičkom selekcijom od: $r_{\text{proj}} < 20 \text{ h}^{-1} \text{ kpc}$ i $|v_{\text{sep}}| < 500 \text{ kms}^{-1}$. Linije su prekinute tamo gdje više nisu detektirani bliski parovi. *Lijevo*: Udio velikih bliskih parova kao funkcija zvjezdane mase za nekoliko crvenih pomaka. *Desno*: Udio velikih bliskih parova kao funkcija crvenog pomaka za nekoliko zvjezdanih masa.

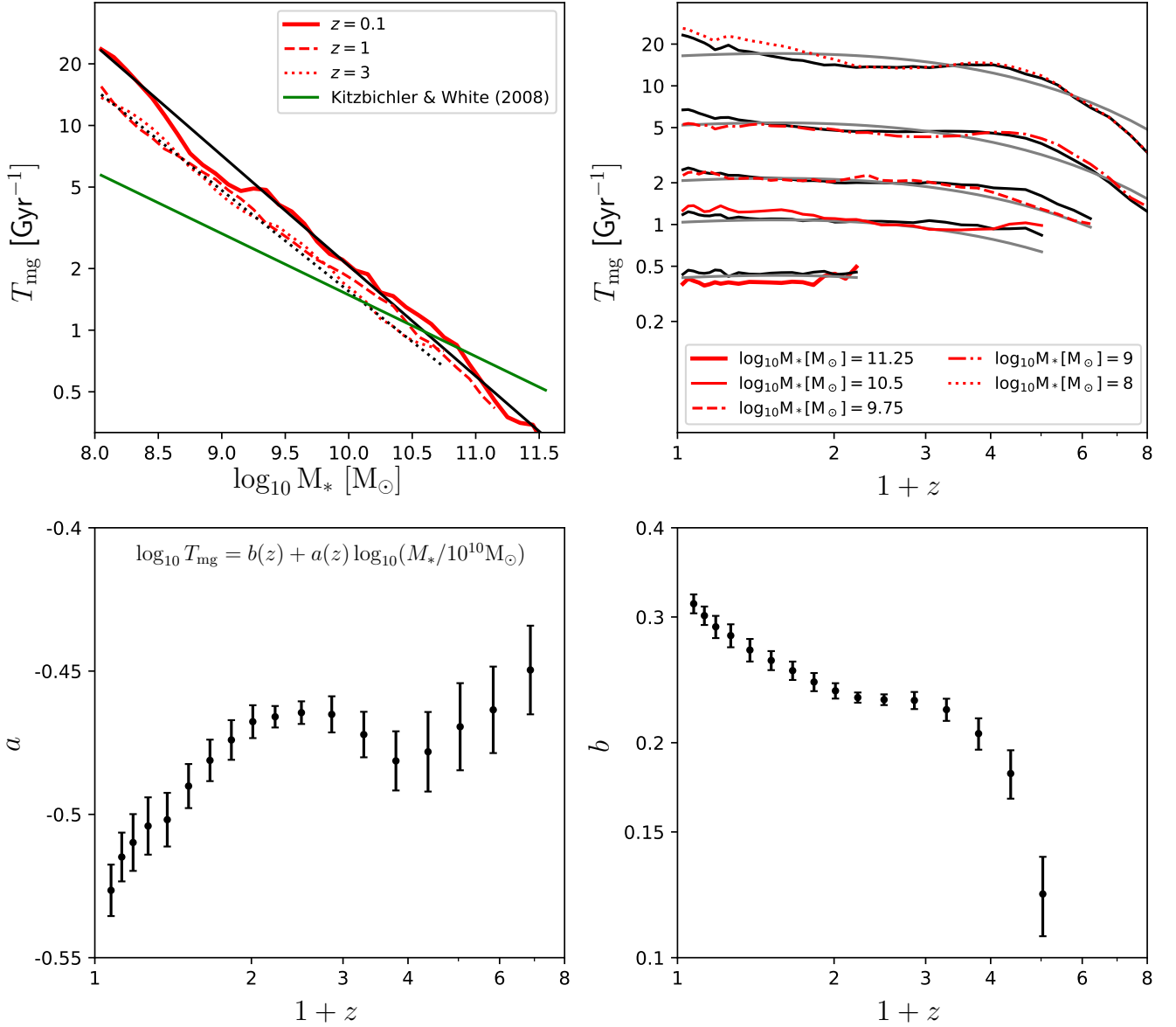
VII. SAŽETAK I ZAKLJUČAK

U ovom radu smo koristili GALFORM, poluanalitički model nastanka galaksija, kako bismo proučavali stope stapanja, udjele bliskih parova te vremenske skale stapanja s najvećom preciznošću do sada. To je moguće zbog velikog volumena simulacije Planck Millennium, kao i zbog velikog broja vremenskih trenutaka u kojima su zapisana svojstva svih galaksija. Kao rezultat toga smo mogli proučavati veličine vezane uz stapanja do preciznosti od 40 intervala zvjezdane mase između 10^8 i $10^{12} M_{\odot}$, kao i 40 intervala crvenog pomaka između $z = 0$ i $z = 10$. Iz naše analize zaključujemo sljedeće:

- Stope stapanja predviđene GALFORM-om se slažu dobro s opažanjima i hidrodinamičkom simulacijom Illustris preko širokog raspona zvjezdanih masa i crvenih pomaka. Uvjet za ovo slaganje je da se koristi univerzalna vremenska skala pri pretvorbi opažački izmjerenih udjela bliskih parova u stope stapanja.
- Kao funkcije zvjezdane mase, naša stopa stapanja naglo pada u režimu masivnih galaksija (iznad $M_* \approx 10^{11.3} M_{\odot}$ na $z = 0$), u slaganju s nedavnim promatranjima. Ovaj pad očekujemo zbog eksponencijalnog prigušenja brojeva galaksija u tom režimu, koji je vidljiv u funkciji zvjezdanih masa galaksija. Zvjezdana masa na kojoj započne nagli pad u stopi stapanja se smanjuje (do vrijednosti $M_* \approx 2 \times 10^{10.5} M_{\odot}$ na $z = 4$) kako se pomičemo prema višim crvenim pomacima. Ovaj pomak je također u skladu s ponašanjem funkcije zvjezdanih masa galaksija. Taj pad također vidimo

u ponašanju stope stapanja kao funkcije crvenog pomaka.

- Malena stapanja ($\mu \in [0.1, 0.25]$) su otprilike jednako česta kao velika stapanja ($\mu \in [0.25, 1]$) preko širokog raspona zvjezdane mase i crvenog pomaka. Ovo se ne slaže s nedavnim rezultatima koji predviđaju stope malenih stapanja 2-3 puta češće od stopa velikih stapanja, ali napominjemo da je ovo vjerojatno rezultat uske definicije malenih stapanja ($\mu \in [0.1, 0.25]$). Pronalazimo da se srednji omjer mase stapanja (između $\mu = 0.1$ i $\mu = 1$) slabo povećava s vrijednosti $\langle \mu \rangle = 0.3$ do $\langle \mu \rangle = 0.35 - 0.4$ kao funkcija zvjezdane mase primarne galaksije između $M_* = 10^8 M_{\odot}$ i $M_* = 10^{10.5} - 10^{11.3} M_{\odot}$, gdje potonji interval odgovara crvenim pomacima $z = 0 - 4$. Iznad ovih masa, srednji omjer masa naglo pada. Ovo je rezultat eksponencijalnog prigušenja brojeva galaksija-galaksije u ovom režimu imaju sve manje susjednih galaksija sličnih masa s kojima se mogu stapati.
- Naš udio velikih ($\mu \in [0.25, 1]$) bliskih parova se dobro slaže s opažanjima za umjerene i velike zvjezdane mase ($M_* > 10^{10} M_{\odot}$) te za sve crvene pomake za koje postoje mjerenja. Na nižim masama postoji neslaganje—GALFORM predviđa veći udio parova nego što je izmjeren. Napominjemo da je moguće objašnjenje nedostatak detektiranih bliskih parova u opažanjima, kao rezultat problema s razlučivanjem parova malenih i bliskih galaksija.
- Pronašli smo aproksimativnu funkciju koja dobro opisuje vremensku skalu velikih stapanja za sve



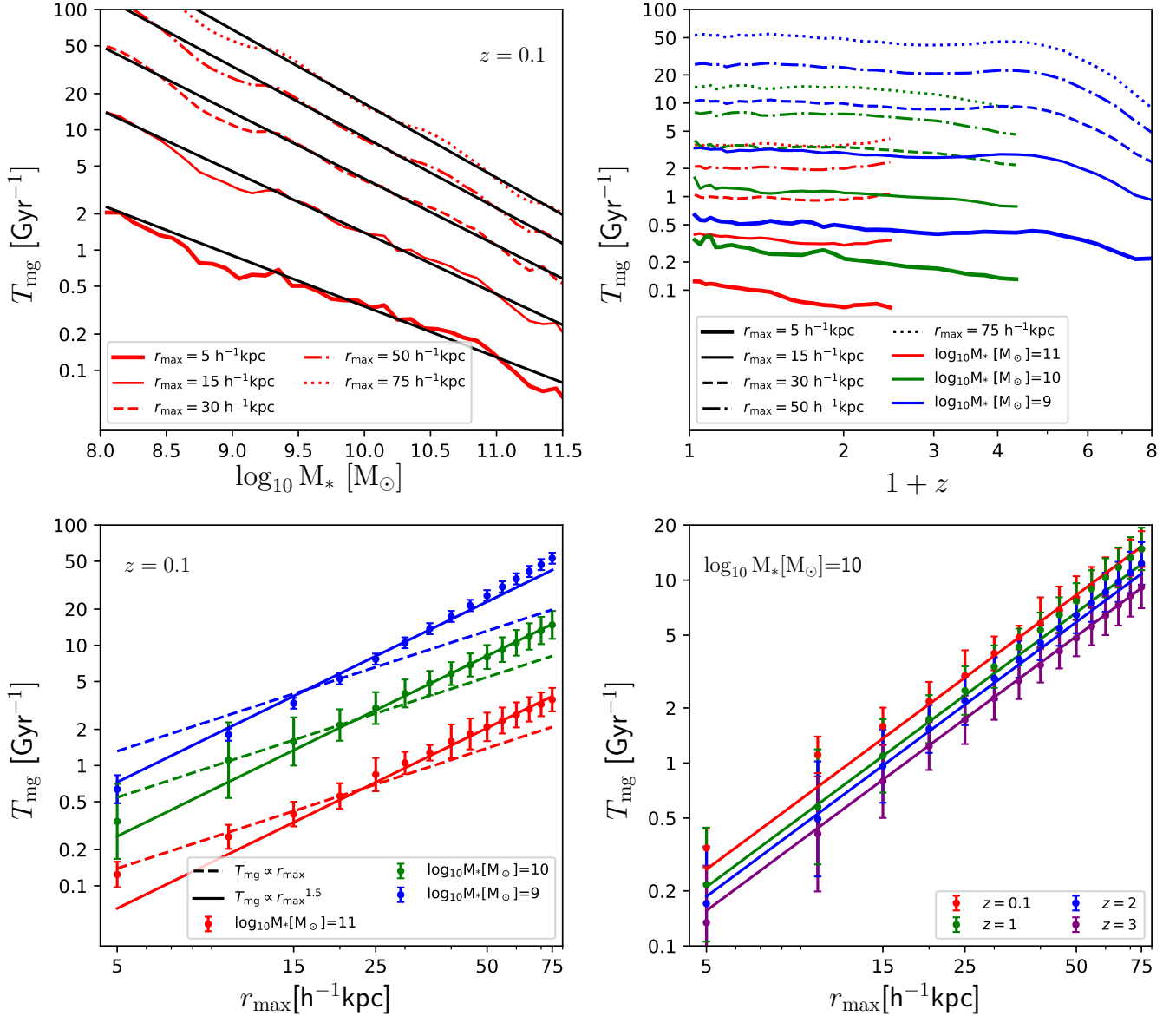
Slika 13: Vremenska skala stapanja za konverziju velikih ($\mu \in [0.25, 1]$) bliskih parova u stopu stapanja, uz dinamičku selekciju $r_{\text{proj}} < 20 \text{ h}^{-1} \text{ kpc}$ i $|v_{\text{sep}}| < 500 \text{ kms}^{-1}$. Linije su prekinute tamo gdje stopa stapanja naglo pada na 0 (kao rezultat nedostatka stapanja u uzorku). Crvene linije predstavljaju naše rezultate iz GALFORM modela, dok crne linije odgovaraju aproksimaciji zakona potencije (u odnosu na masu) za svaki crveni pomak, koje su dane jednažbom 14. Gore lijevo: Vremenska skala stapanja kao funkcija zvjezdane mase. Crne linije (aproksimacije zakona potencije) su prikazane za $z = 0$ (puna linija) i $z = 3$ (crtkana linija). Gore desno: Vremenska skala stapanja kao funkcija crvenog pomaka. Sive linije predstavljaju aproksimaciju danu jednažbom 15. Dolje: Ovisnosti nagiba a i normalizacije b zakona potencije ovisnosti vremenske skale stapanja o zvjezdanoj masi (dane jednažbom 14).

zvjezdane mase i crvene pomake, kao i bilo koje dinamičke selekcijske kriterije:

$$T_{\text{mg}} = 2.2 \text{ Gyr} \times r_{\text{max},20}^{1.5} \text{erf}(v_{\text{max},0}^{0.75}) \times M_{*,10}^{-0.5} (1+z)^{0.5} e^{-0.14z}, \quad (20)$$

gdje je $r_{\text{max},20} = r_{\text{max}}/20 \text{ h}^{-1} \text{ kpc}$, $v_{\text{max},0} = v_{\text{max}}/550 \text{ kms}^{-1}$ te $M_{*,10} = M_*/10^{10} M_\odot$. Naša

vremenska skala stapanja pokazuje strmiju ovisnost o zvjezdanoj masi nego što je očekivano iz prijašnjih studija (nagib od -0.5 umjesto -0.3), kao i strmiju ovisnost o maksimalnoj projiciranoj separaciji bliskih parova (nagib 1.5 umjesto 1.0). S obzirom na maksimalnu separacijsku brzinu pronalazimo da broj parova (kao i vremenska skala) saturiraju do vrijednosti $v_{\text{max}} = 1000 \text{ kms}^{-1}$ za sve zvjezdane

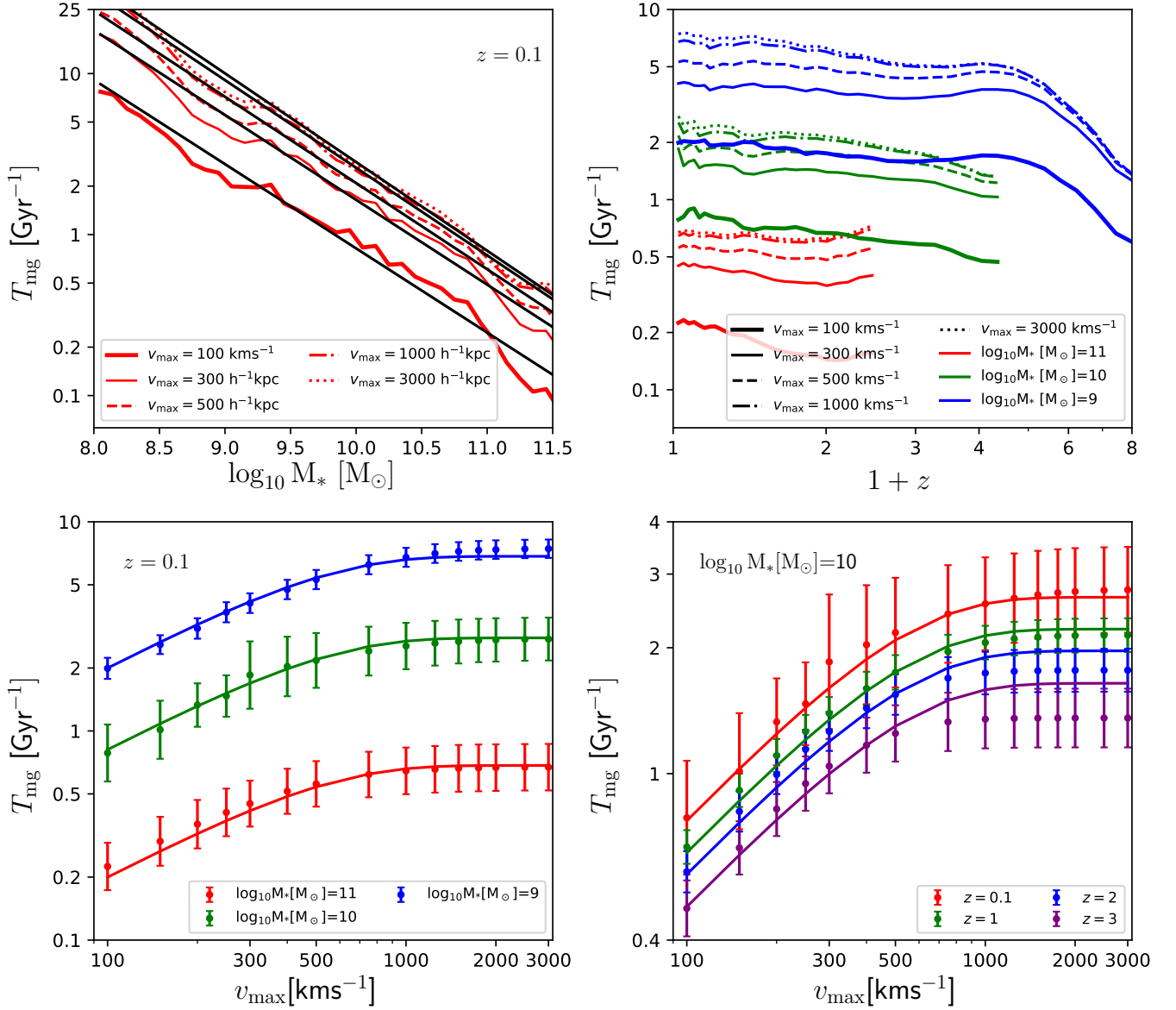


Slika 14: Vremenska skala stapanja za konverziju velikih ($\mu \in [0.25, 1]$) bliskih parova u stope stapanja, uz razne dinamičke selekcijske kriterije $|v_{\text{sep}}| < 500 \text{ kms}^{-1}$ te $r_{\text{proj}} < r_{\text{max}}$, gdje r_{max} varira između 5 i $75 \text{ h}^{-1} \text{ kpc}$. *Gore lijevo*: Vremenska skala stapanja kao funkcija zvjezdane mase za nekoliko dinamičkih selekcija, prema legendi. Crvene linije predstavljaju rezultate iz GALFORM modela, dok crne linije predstavljaju prilagodbe zakona potencije na $z = 0.1$, dane jednadžbom 14. *Gore desno*: Vremenska skala stapanja kao funkcija crvenog pomaka za tri različite zvjezdane mase i nekoliko dinamičkih selekcija, prema legendi. Boje predstavljaju različite mase, dok tipovi linija predstavljaju dinamičke selekcije. *Dolje*: Ovisnost vremenske skale stapanja o maksimalnoj separacijskoj udaljenosti za nekoliko zvjezdanih masa i crvenih pomaka. Točke i intervali pouzdanosti (1σ) predstavljaju naše rezultate za 15 selekcija dok linije predstavljaju aproksimacije. Crtkane linije predstavljaju linearnu aproksimaciju $T_{\text{mg}} \propto r_{\text{max}}$, dok pune linije predstavljaju aproksimaciju oblika $T_{\text{mg}} \propto r_{\text{max}}^{1.5}$.

mase i crvene pomake. Predlažemo ovu vrijednost kao univerzalni selekcijski kriterij.

- Pronalazimo da niskomasene galaksije čine većinom projicirane parove, dok visokomasene galaksije čine i fizičke i projicirane parove, no većinom fizičke.

Ovo je u slaganju s opažanjima koja pronalaze da se niskomasene galaksije puno rijede stapaju od visokomasenih.



Slika 15: Vremenska skala stapanja za konverziju velikih bliskih parova ($\mu \in [0.25, 1]$) u stope stapanja, uz razne dinamičke selekcije $r_{\text{max}} = 20 \text{ h}^{-1}\text{kpc}$ te $|v_{\text{sep}}| < v_{\text{max}}$, gdje v_{max} varira između 100 i 3000 kms^{-1} . *Gore lijevo*: Vremenska skala stapanja kao funkcija zvjezdane mase za nekoliko dinamičkih selekcija, prema legendi. Crvene linije predstavljaju rezultate iz GALFORM modela, dok crne linije predstavljaju aproksimaciju zakona potencije na $z = 0.1$, danu jednadžbom 14. *Gore desno*: Vremenska skala stapanja kao funkcija crvenog pomaka za tri zvjezdane mase i nekoliko dinamičkih selekcija, prema legendi. Boje predstavljaju različite mase, dok tipovi linija različite dinamičke selekcije. *Dolje*: Ovisnost vremenske skale stapanja o maksimalnoj separacijskoj brzini za nekoliko masa i crvenih pomaka. Točke i intervali pouzdanosti (1σ) predstavljaju naše rezultate za 15 selekcija dok linije predstavljaju aproksimacije dane jednadžbom 18.

VIII. REFERENCE

Baldry I. K. et al. (2012), MNRAS, 421, 621
 Baugh, C. M.; Gonzalez-Perez, Violeta; Lagos, Claudia del P; Lacey, Cedric G.; Helly, John C.; Jenkins, Adrian; Frenk, Carlos S.; Benson, Andrew J.; Bower, Richard G.; Cole, Shaun (2019), MNRAS, 483(4), 4922

Benson, A. J. (2005), MNRAS, 358(2), 551
 Casteels, K. R. V. et al. (2014), MNRAS, 445(2), 1157
 Catinella, B. et al. (2010), MNRAS, 403(2), 683
 Chabrier, G. (2003), PASP, 115(809), 763
 Chandrasekhar, S. (1943), ApJ, 97, 255
 Conselice, C. J. (2006), ApJ, 638(2), 686
 Conselice, C. J. (2009), MNRAS, 399, L16

- Domingue, D. L., Xu, C. K., Jarrett, T. H., Cheng, Y. (2009), arXiv:0901.4545v1
- Gonzalez-Perez, V.; Lacey, C. G.; Baugh, C. M.; Lagos, C. D. P.; Helly, J.; Campbell, D. J. R.; Mitchell, P. D. (2014), MNRAS, 439, 264
- Guo, Q.; White, S. D. M. (2008), MNRAS, 384, 2
- Hopkins P. F. et al. (2010), ApJ, 715, 202
- Jiang, C. Y.; Jing, Y. P.; Faltenbacher, A.; Lin, W. P.; Li, Cheng, (2008), ApJ, 675(2), 1095
- Kartaltepe, J. S. et al. (2007), ApJ, 172, 320
- Keenan, R. C.; Foucaud, S.; De Propris, R.; Hsieh, B. C.; Lin, L.; Chou, R. C. Y.; Huang, S.; Lin, J. H.; Chang, K. H. (2014), ApJ, 795(2), 16
- Kennicutt, R. C. Jr. (1983), ApJ, 272, 54
- Kitzbichler, M. G.; White, S. D. M. (2008), MNRAS, 391(4), 1489
- Lacey, Cedric G.; Baugh, Carlton M.; Frenk, Carlos S.; Benson, Andrew J.; Bower, Richard G.; Cole, Shaun; Gonzalez-Perez, Violeta; Helly, John C.; Lagos, Claudia D. P.; Mitchell, Peter D. (2016), MNRAS, 462(4), 3854
- Lin, L. et al. (2008), ApJ, 681, 232
- Lotz, Jennifer M.; Jonsson, Patrik; Cox, T. J.; Primack, Joel R. (2008), MNRAS, 391(3), 1137
- Lotz, Jennifer M.; Jonsson, Patrik; Cox, T. J.; Primack, Joel R. (2010), MNRAS, 404(2), 575
- Lotz, Jennifer M.; Jonsson, Patrik; Cox, T. J.; Primack, Joel R. (2010), MNRAS, 404(2), 590
- Lotz, J. M.; Jonsson, P.; Cox, T. J.; Croton, D.; Primack, J. R.; Somerville, R. S.; Stewart, K. (2011), ApJ, 742(2), 22
- Man, Allison W. S.; Zirm, Andrew W.; Toft, Sune (2016), ApJ, 830(2), 22
- Moffett, A. J. (2016), MNRAS, 457(2), 1308
- Mundy, C. J.; Conselice, C. J.; Duncan, K. J.; Almaini, O.; Häußler, B.; Hartley, W. G. (2017), MNRAS, 470(3), 3507
- Robotham, A. S. G. et al. (2014), MNRAS, 444(4), 3986
- Rodriguez-Gomez, V. et al. (2015), MNRAS, 449, 49
- Stewart, K. R.; Bullock, J. S.; Barton, E. J.; Wechsler, R. H. (2009), ApJ, 702(2), 1005
- Tomczak et al. (2014), ApJ, 783(2), 15
- Xu, C. K.; Zhao, Y.; Scoville, N.; Capak, P.; Drory, N.; Gao, Y. (2012), ApJ, 747(2), 17
- Yang, Xiaohu; Mo, H. J.; van den Bosch, Frank C. (2009), ApJ, 695(2), 900