



Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN ASTRONOMIA

**Evoluzione delle relazioni di scala di galassie nella
simulazione Illustris**

RELATORE

MAURO D'ONOFRIO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

CANDIDATO

SAVERIO ALBERINI



Abstract

Tramite l'utilizzo della simulazione cosmologica Illustris TNG, avanguardia della ricerca nel campo, è possibile studiare in diversi modi il processo di formazione ed evoluzione delle galassie. In particolare è possibile indagare sulle ragioni fisiche che portano ad avere determinate relazioni di scala e seguire come esse variano con il crescere del tempo cosmico, mentre con le osservazioni si è limitati ad epoche cosmiche molto più vicine a quella attuale. In questa tesi ci si concentra sullo studio delle relazioni sui piani $\log(L) - \log(\sigma)$, $\log(I_e) - \log(R_e)$, $\log(R_e) - \log(M^*)$ e il piano fondamentale per galassie early-type (ETGs), e come esse cambiano dal tempo cosmico attuale a $z = 1$.

Si differenziano due casi: il primo con una selezione degli oggetti solo in massa, per i quali la riproduzione della simulazione è verificata fino a $z = 1$ e il secondo dove si scelgono oggetti appartenenti ad uno stesso alone, e la cui riproduzione delle relazioni di scala tenderà ad essere meno affidabile con il crescere del tempo cosmico. Nello specifico osserveremo relazioni di scala con caratteristiche non troppo distanti da quelle che descrivono un sistema in equilibrio viriale.

Indice

ABSTRACT	i
1 INTRODUZIONE	1
2 TEORIA GENERALE	3
2.1 Evoluzione delle galassie	3
2.2 Relazioni di scala	5
2.3 Relazione Luminosità-Dispersione di velocità	6
2.4 Relazione Brillanza-Raggio	7
2.5 Relazione Massa-raggio	7
2.6 Piano fondamentale	7
3 SIMULAZIONE TNG	9
3.1 Caratteristiche generali	9
3.2 Struttura	11
4 ESTRAZIONE E ANALISI DATI	13
4.1 Estrazione	13
4.2 Analisi	15
5 CONCLUSIONI	19
6 APPENDICE	21
BIBLIOGRAFIA	28
RINGRAZIAMENTI	31

1

Introduzione

Nonostante siano ormai passati decenni dall'introduzione delle prime relazioni di scala per le galassie ellittiche la loro giustificazione fisica non è ad oggi del tutto chiara. Per questa tesi sono state utilizzate la relazione Luminosità-Dispersione di velocità (Faber & Jackson 1976 [1]), Brillanza-Raggio (Kormendy 1977 [2]), la Massa-Raggio (Chiosi & Carraro 2002 [3]) e il piano fondamentale (Djorgovski & Davies 1976 [4]). Oltre a queste ne esistono molte altre, in questo caso si è scelto il confronto fra proprio queste quattro perché esse considerano le principali caratteristiche delle galassie e quindi si ritiene abbiano un'interpretazione fisica più generale. Va in oltre detto che tali relazioni non presentano sempre un andamento lineare, infatti a seconda della massa la curva interpolante avrà gradienti con inclinazione diversa (Graham 2013 [5]). Tuttavia questo aspetto non verrà rilevato da questa analisi in quanto il campione di masse selezionato sarà piuttosto ristretto. Il procedimento seguito è stato elaborato sulla falsa riga di quanto presentato da D'Onofrio et al. (2019)[6], con l'intento di fare un passo in avanti utilizzando i dati TNG invece che quelli Illustris.

2

Teoria generale

2.1 EVOLUZIONE DELLE GALASSIE

Studi a grandi scale sono riusciti a dimostrare una distribuzione omogenea ed isotropa della materia nell'universo, in particolare si osserva che le galassie tendono a raggrupparsi fra di loro in ammassi e superammassi, i quali sono collegati l'un l'altro da strutture filamentari. In generale una buona simulazione si deve basare su una solida teoria scientifica, nel nostro caso si utilizza il modello standard della cosmologia, ovvero il modello Lambda-CDM (dove CDM sta per Cold Dark Matter). Esso prevede un Universo a curvatura piatta dominato dall'energia e dalla materia oscura. Le componenti sono suddivise come segue:

- la costante cosmologica (Λ), è sostanzialmente l'energia oscura (rappresentata dall'energia del vuoto), giustifica l'espansione accelerata dell'Universo e costituisce circa il 68% della densità di energia totale
- la materia oscura fredda (CDM), che è materia non barionica non termalizzata, costituisce il 27% della massa-energia totale
- la materia barionica (gas interstellare e materia condensata), che rappresenta solo il 5% del totale

Come già accennato, si è osservato un forte grado di isotropia e omogeneità a grandi scale in tutto l'Universo, la cui causa fisica fondamentale risiede nel perfetto spettro di corpo

nero della radiazione cosmica di fondo. Tuttavia da ulteriori analisi sono comparse delle piccole anisotropie, senza le quali sarebbe stato impossibile giustificare l'esistenza di strutture come galassie e ammassi. Infatti il carattere di tali disomogeneità è parte fondamentale delle condizioni iniziali dalle simulazioni numeriche.

La formazione e l'evoluzione delle galassie è estremamente complessa e ad oggi non interamente compresa. Tuttavia grazie alle simulazioni numeriche siamo in grado di studiare diversi processi di interazione fra le galassie che ne determinano la loro storia evolutiva. L'attore principale nell'evoluzione delle galassie è senza dubbio la gravità, ma a complicare ulteriormente la situazione vi sono diversi processi astrofisici, come ad esempio l'evoluzione delle popolazioni stellari, le esplosioni di supernovae, la formazione e l'interazione dei buchi neri supermassivi, ecc..., in questo elaborato però ci si concentrerà solamente sugli aspetti gravitazionali. Quando si parla di formazione ed evoluzione delle galassie due modelli vengono tradizionalmente presi in considerazione: (i) modello di collasso monolitico, che prevede la formazione delle galassie ad epoche molto remote attraverso il collasso di una nube di gas protogalattico, determinando poca evoluzione della funzione di massa dopo $z = 3$, e (ii) il modello gerarchico, nel quale le galassie interagiscono continuamente le une con le altre e la funzione di massa varia molto nell'intervallo di redshift $0 \leq z \leq 2$. Nel nostro caso si intende indicare con il termine "evoluzione delle galassie" la storia di merging di aloni di materia oscura e i conseguenti effetti sulla materia barionica che hanno determinato la struttura delle galassie come le osserviamo al giorno d'oggi. Infatti quando due aloni di materia si scontrano abbiamo un mescolamento (in inglese *merging*) delle varie componenti da cui sono formati. Quindi la morfologia e le proprietà fisiche di due galassie che si stanno fondendo verranno alterate durante il processo. I tipi di interazione fra due galassie vengono generalmente divisi in due: *major merger* e *minor merger*; come si intuisce facilmente la principale differenziazione tra i due risiede nelle differenti masse coinvolte. Nei *minor mergers* avremo quindi una galassia più piccola che viene assorbita da una più massiva senza che le caratteristiche fisiche di quest'ultima varino significativamente. La galassia più piccola entrerà a far parte dell'alone dell'altra finché non sarà distrutta dalle forze mareali o dall'attrito dinamico che la farà precipitare definitivamente all'interno dell'altra, un esempio di questo tipo di merging sono le *Magellanic clouds*, che attualmente stanno orbitando nell'alone della Via lattea. Mentre per i *major mergers* gli aloni che entreranno in collisione avranno masse comparabili e quindi i cambiamenti del sistema finale saranno molto drastici, in questo caso entreranno in gioco diversi processi astrofisici, come ad esempio violente esplosioni stellari ed espulsione di getti di materia. In particolare l'evoluzione delle popolazioni stellari risente molto delle quantità

di gas presenti nei progenitori prima del merging, nel caso essi siano ricchi di gas il processo si dice *wet* (letteralmente “umido”) oppure quando il gas è disponibile in modeste quantità e gioca solo un ruolo marginale si usa l’aggettivo *dry* (“secco”).

Infine va specificato che per il tipo di analisi evolutiva che si vuole fare in questa tesi si andrà a considerare solamente le galassie *early-type* (ETGs), in quanto le relazioni di scala adoperate sono quelle che descrivono meglio questa classe morfologica di oggetti.

2.2 RELAZIONI DI SCALA

Il merging galattico è un processo non collisionale, quindi si può approssimare le stelle a delle particelle “catturate” dal potenziale gravitazionale della galassia a cui appartengono. Siccome si considera solamente l’autogravità dell’oggetto si avrà un tempo di free-fall abbastanza breve (10^8 anni) e quindi si pensa che tutte le galassie raggiungano velocemente, dopo la loro formazione, la situazione di equilibrio viriale. Inoltre si ricorda che le galassie *early-type* sono dinamicamente supportate dalla velocità di dispersione (ovvero le stelle non seguono un moto ordinato). Possiamo quindi studiare il comportamento delle ETGs mediante il teorema del viriale approssimato al primo ordine:

$$M = \frac{k_v}{G} R_e \sigma^2 \quad (2.1)$$

con M la massa totale della galassia, k_v un fattore che tiene in conto il fatto che il sistema è non-omologo e l’uso di parametri strutturali misurati invece che quantità teoriche, G la costante gravitazionale, R_e il raggio effettivo e σ la dispersione di velocità centrale. Se moltiplichiamo e dividiamo per L l’equazione appena espressa avremo:

$$L = \frac{k_v L}{GM} R_e \sigma^2 = L_0 \sigma^2 \quad (2.2)$$

Quindi per i sistemi per cui vale l’equilibrio viriale avremo $L \propto \sigma^2$, che nel piano logaritmico mi darà una retta con pendenza 2 se si considera L_0 costante. Il che però non è vero in generale, infatti per un insieme di galassie diverse L_0 dipende fortemente dalle caratteristiche delle popolazioni stellari dell’oggetto.

Invece per una singola galassia si può generalizzare questo procedimento e ottenere:

$$L = L'_0 \sigma^\beta \quad (2.3)$$

con L in luminosità solari e β che dipende dalla storia particolare dell'oggetto, quindi i rapporti tra le quantità fisiche di ogni singola galassia differiranno tra loro e soprattutto non avranno la stessa interpretazione delle relazioni di scala per una popolazione di galassie. In particolare le relazioni di scala per un insieme di galassie dipenderà dal tasso di formazione medio, dal rapporto massa-luce medio e dall'età del sistema. Quindi lo scattering delle relazioni presentate in seguito dipenderà dalle deviazioni dei singoli oggetti dalle condizioni di equilibrio viriale, si osserverà che tali deviazioni sono di lieve entità soprattutto al tempo cosmico attuale. Con le simulazioni numeriche si può dimostrare come sia L'_0 che il punto zero della relazione 2.2 dipendano fortemente dal tempo cosmico (D'Onofrio et al. 2019[6]), questo richiede quindi una giustificazione teorica più profonda della semplice assunzione di equilibrio viriale. Sebbene le galassie non siano sistemi in equilibrio viriale possiamo capire molto dal grado con cui si discostano da esso. Non va dimenticato che le galassie dinamicamente dominate dalla materia oscura e quindi è necessario chiedersi che ruolo giochi nelle relazioni di scala. In particolare nello studio D'Onofrio et al. (2019)[6] hanno notato come il comportamento osservato nel piano $\log(L) - \log(\sigma)$ sia dominato dalla componente oscura della massa, e come il valore zero di questa relazione sia sostanzialmente indipendente da σ .

Come già anticipato i diversi tipi morfologici prevedono diverse relazioni di scala, in questa tesi ci interesseremo solamente di quelle riguardanti le ETGs, in particolare la $L - \sigma$ (Faber-Jackson), $I_e - R_e$ (Kormendy), la $M - R_e$ e il piano fondamentale.

2.3 RELAZIONE LUMINOSITÀ-DISPERSIONE DI VELOCITÀ

Similmente alla relazione Tully-Fisher per le galassie ellittiche per le ETG si ha la relazione Faber-Jackson (FJ), la quale indica il legame tra la dinamica interna e la luminosità, nello specifico:

$$L \propto \sigma^\alpha \quad (2.4)$$

con L in luminosità solari e σ dispersione di velocità centrale, dove il valore dell'esponente trovato da Faber e Jackson è $\alpha = 4$ anche se, come vedremo, esso potrà variare molto, come ad esempio abbiamo già visto nel caso di sistemi in equilibrio virale. Al contrario della Tully-Fisher questa relazione è meno stretta, a indicare che c'è un altro fattore che "disturba" il fit perfetto, il quale vedremo essere il raggio effettivo (vedi 2.6).

2.4 RELAZIONE BRILLANZA-RAGGIO

$$I_e \propto R_e^\alpha \quad (2.5)$$

La relazione di Kormendy stabilisce che il raggio effettivo (R_e) sia legato alla brillantezza effettiva (I_e) da una relazione lineare. Diversi studi hanno confermato che le ETGs luminose in cluster seguano approssimativamente l'andamento $\alpha \sim -1.2$ sul piano $\log(I_e) - \log(R_e)$, di poco diversa dalla pendenza prevista nel caso del teorema viriale che è $\alpha = -1$. Questa relazione conferma il fatto intuitivo che le galassie più luminose sono le più grandi, infatti se si considera la relazione che lega la luminosità totale della galassia L con la brillantezza effettiva:

$$L = I_e 2\pi R_e^2 \quad (2.6)$$

allora per i valori più bassi di brillantezza avremo le galassie ellittiche più luminose.

2.5 RELAZIONE MASSA-RAGGIO

Per i sistemi in equilibrio viriale si avrà che la massa stellare scala linearmente con il raggio effettivo, come in 2.1, il fatto che ciò non sia riscontrato nelle galassie ellittiche ci dice ancora una volta che esse non sono degli oggetti in equilibrio viriale. L'inclinazione di tale relazione è determinata dalla struttura fisica dell'oggetto, e in particolare il punto zero è specificato dalla densità che esso aveva alla sua formazione. Inoltre l'inclinazione non è costante in tutto il range di masse, ma bensì presenta un irripidimento: partendo da una relazione quasi piatta per masse minori di $10^{10} M_\odot$ e andando verso rette interpolanti con pendenza pari a 1 (nel piano logaritmico) per le galassie massive.

2.6 PIANO FONDAMENTALE

Il piano fondamentale (FP) mette in relazione la dimensione (R_e), densità (I_e) e la massa (derivata dalla σ) delle galassie ellittiche, osservando che esse hanno la tendenza a stare fortemente raggruppate lungo un piano, che solitamente viene indicato con:

$$\log(R_e) = A \log(\sigma) + B \log(I_e) + C \quad (2.7)$$

con A , B e C coefficienti che descrivono ogni singolo FP e quindi le caratteristiche fisiche di ogni gruppo di oggetti. Questa particolare disposizione che assumono le ETGs indica la

presenza di un meccanismo di auto-regolazione durante la loro formazione ed evoluzione. La caratteristica più rilevante del FP osservata è l'inclinazione rispetto alla predizione per un sistema virializzato e omologo. Questa deviazione sembrerebbe essere dovuta per la maggior parte dal fatto che le ETGs non sono sistemi perfettamente omologhi e anche da un contributo degli effetti delle popolazioni stellari. Un riscontro teorico delle caratteristiche particolari del FP si ottiene considerando una versione generalizzata del teorema del viriale in modo da considerare anche il contributo della materia oscura (Teorema del viriale in forma tensoriale). Il punto zero del FP è stato dimostrato dipendere dal rapporto M/L , e siccome questo varia nel tempo cosmico ci si aspetta varino anche i coefficienti del FP (D'Onofrio et al. 2006[7]). Inoltre la FJ e la Kormendy sono strettamente legate al piano fondamentale, nello specifico possono essere rappresentate come due proiezioni di quest'ultimo. Infatti il piano fondamentale nasce con l'intento di aumentare la precisione del fit trovato con la FJ, e per fare ciò si è ipotizzata la correlazione con un terzo parametro che poi si è rivelato essere il raggio.

3

Simulazione TNG

Le simulazioni a grande scala sono uno dei più potenti mezzi per indagare la natura del cosmo in maniera efficace fino ad epoche passate. Ormai diversi anni fa i ricercatori hanno iniziato sviluppando simulazioni prettamente gravitazionali fino a sempre più raffinati modelli semi-analitici per giungere poi a quelle numeriche (Vogelsberger et al. 2020 [8]). Quella usata in questa tesi appartiene proprio a quest'ultima categoria e rappresenta lo stato dell'arte delle simulazione cosmologiche. Tali simulazioni a grande a scala degli ultimi anni sono riuscite a produrre dati consistenti con le osservazioni sia a scale di centinaia di comoving megaparsec ($cMpc$) si al livello di singole galassie ($< 1kpc$). Le simulazioni, rispetto ai dati osservativi, offrono la possibilità di seguire come evolve uno stesso oggetto nel corso del tempo cosmico e inoltre forniscono stime precise di diverse quantità fisiche. Il loro utilizzo ha come vantaggio l'assenza delle incertezze osservative che sono comunque presenti in un set di dati reali, tuttavia il confronto con dati osservativi è necessario sia per migliorare le simulazioni che per permetterci di allargare la nostra conoscenza del cosmo.

3.1 CARATTERISTICHE GENERALI

The Next Generation Illustris (TNG) nasce sulla base della già molto prolifica simulazione Illustris, ed è costituita da un insieme di simulazioni gravo-magnetoidrodinamiche a diverse scale. Rispetto al suo predecessore nel codice di TNG sono stati implementati dei miglioramenti ai metodi numerici e sono stati introdotte nuove considerazioni fisiche che hanno

irrobustito le predizione della simulazione. In particolare sono presenti sostanziali modifiche del modello fisico di formazione delle galassie (*Galaxy Formation Model*[9]), le principali riguardano la crescita e feedback dei buchi neri supermassivi, venti stellari e evoluzione stellare.

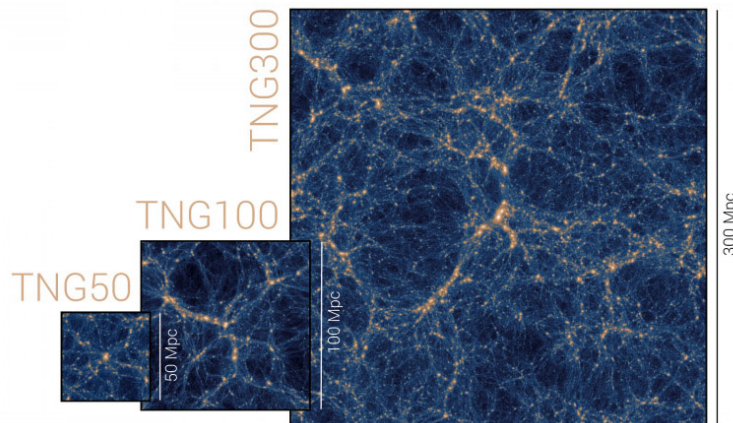


Figura 3.1: Confronto dei diversi volumi cosmici generati dalle tre simulazioni, Figura 1 di Nelson et al. 2019[10]

Il progetto TNG si divide in simulazioni di 3 volumi: TNG₅₀, TNG₁₀₀ e TNG₃₀₀. L'unica differenza fra le tre è la scala spaziale e quindi la risoluzione degli oggetti simulati, rispettivamente si ha 50,100 e 300 cMpc, valore che indica la lunghezza di un lato del volume preso in considerazione. In questa tesi si è scelto TNG₁₀₀ (Nelson et al. 2019 [10]) perchè essa riproduce realisticamente la formazione e l'evoluzione delle galassie attraverso il tempo cosmico, mentre la prima (TNG₅₀) è pensata per lo studio di singole galassie e la terza (TNG₃₀₀) per interi ammassi. TNG risolve le equazioni dinamiche per l'evoluzione accoppiate di materia oscura e materia barionica, partendo da redshift di $z = 127$ fino al tempo attuale $z = 0$, nello specifico si basa sul codice AREPO con approssimazioni al secondo ordine sia sullo spazio che sul tempo. Per intuirne la complessità basti pensare che sono dell'ordine delle decine di milioni di timestep quelli richiesti dalle simulazioni ad alta risoluzione per riprodurre le galassie fino a redshift zero. L'algoritmo AREPO utilizza un approccio quasi-Lagrangiano, ovvero utilizza un griglia spaziale che, al contrario del caso Euleriano, segue il moto del fluido, con la densità dei punti della griglia che si adatta alla densità del fluido. La TNG₁₀₀ è resa pubblica attraverso 6 run: tre diverse risoluzioni per il caso puramente gravitazionale (solo materia oscura) e tre per quello che considera anche il contributo barionico. Per l'utilizzo delle relazioni di scala è stato quindi scelto quest'ultimo e in particolare è stato scelto il run a risoluzione più alta. Nello specifico tale run avrà le caratteristiche principali elencate in

Tabella 3.1. Punto di forza di queste simulazioni è che si basano su consolidato framework

Volume [$cMpc^3$]	L_{box} [$cMpc/h$]	m_{DM} [$10^6 M_\odot$]	m_{bar} [$10^6 M_\odot$]
106.5 ³	75	7.5	1.4

Tabella 3.1: Caratteristiche principali TNG100, maggiori dettagli in Nelson et al. 2019 [10]

cosmologico (come si vedrà nel paragrafo 3.2) e quindi devono essere fatte delle scelte specifiche per i parametri in gioco, in questo caso il team che ha sviluppato TNG ha scelto di utilizzare quelli della Planck Collaboration (2015):

$$\Omega_{\Lambda,0} = 0.6922, \Omega_{m,0} = 0.3089, \Omega_{b,0} = 0.0486, \sigma_8 = 0.8159, n_s = 0.9667, h = 0.6774$$

3.2 STRUTTURA

La simulazione è divisa in 100 snapshots, che contengono vari tipi di particelle (gas, materia oscura, stelle e buchi neri) e permettono un'analisi più accurata nell'estrazione dei dati (si veda ad esempio l'estrazione delle dispersioni di velocità). Gli snapshots sono ordinati cronologicamente con il numero 99 che rappresenta la simulazione a $z = 0$ mentre il numero 0 rappresenta $z = 127$. Va inoltre specificato che, essendo $M \sim 10^6 M_\odot$ la risoluzione della simulazione è ovvio che le particelle stellari rappresentino in realtà degli ammassi e non delle singole stelle. Per ogni snapshots due diversi algoritmi hanno eseguito le catalogazioni degli oggetti su base gravitazionale: friends-of-friends (FoF) per gli aloni, e SUBFIND per i sottoaloni. La differenza fra i due cataloghi sta nelle dimensioni: i sottoaloni sono raggruppamenti esigui di materia (sia oscura che barionica), mentre gli aloni sono raggruppamenti di sottoaloni, quindi avranno necessariamente dimensioni e masse maggiori di quest'ultimi. Per il tipo di lavoro che qua si vuole svolgere si considererà i sottoaloni come delle galassie, mentre gli aloni come ammassi di galassie (anche se ciò non è strettamente vero per tutti gli scopi scientifici alla quale può essere sottoposta la simulazione).

Per quanto riguarda l'evoluzione degli oggetti TNG si basa puramente sul modello di accrescimento gerarchico, nello specifico sono presenti due diversi *Merger Trees*. In sostanza essi consistono in alberi evolutivi grazie ai quali è possibile ricostruire la storia di merging dei vari sottoaloni. Sono stati realizzati con due algoritmi diversi (SUBLINK e LHALOTREE) ed a seconda degli scopi scientifici è preferibile uno rispetto l'altro, tuttavia entrambi portano allo stesso risultato generale. Per il carattere qualitativo di questa analisi è stato scelto

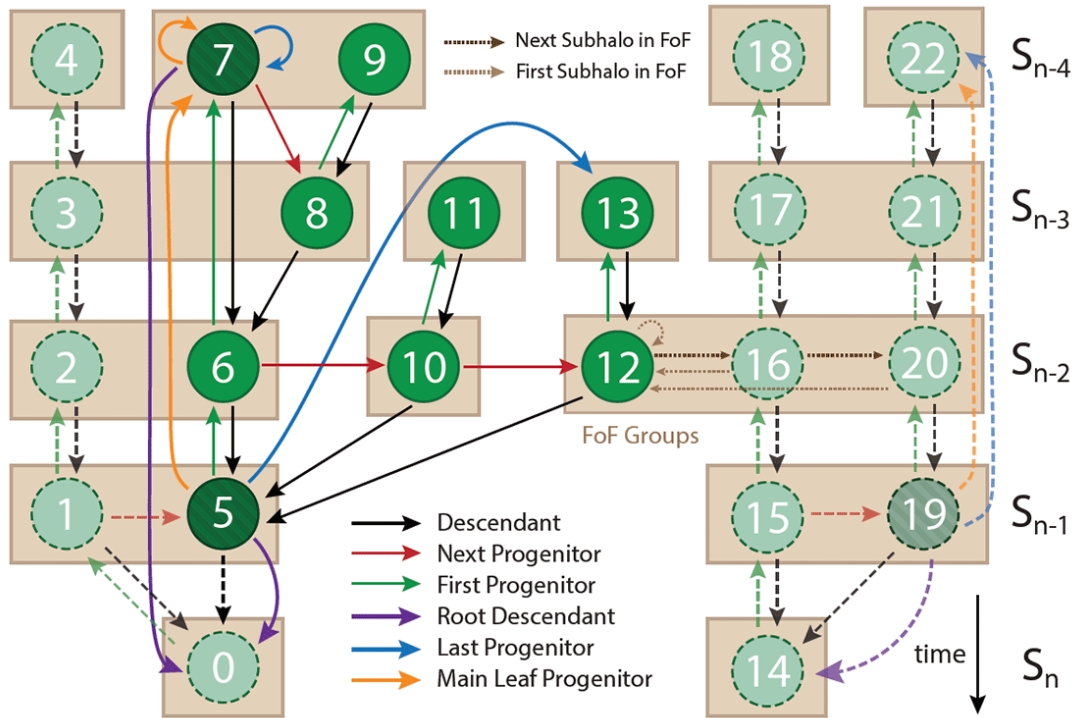


Figura 3.2: Struttura schematica dell'albero di merging generato dai due algoritmi. Le righe indicano i diversi snapshots, con il tempo cosmico che cresce verso il basso. I cerchi verdi rappresentano i nodi dell'albero (ovvero i sottoaloni), mentre i riquadri beige sono gli aloni FoF. Il *Main Progenitor Branch* è indicato dalla freccia arancione ed è lungo quella serie di sottoaloni che si è seguita l'evoluzione. Fonte: <https://www.tng-project.org/data/docs/specifications/>

l'albero generato da SUBLINK semplicemente perché il più efficiente e più facilmente accessibile. Entrambi gli algoritmi si basano solamente sull'evoluzione dei sottoaloni, infatti gli aloni FoF non giocano un ruolo principale nella determinazione dell'albero di merging. Il quesito fondamentale che ci si deve porre nello studio dell'evoluzione galattica attraverso una simulazione è come riconoscere lo stesso oggetto a diversi redshift. In questo caso, per farlo si è seguita l'evoluzione dei sottoaloni lungo il *Main Progenitor Branch* (MPB), ovvero il ramo del progenitore con la storia più massiva (il ramo evolutivo che contiene la maggior parte della massa totale dell'albero). Ulteriori dettagli nella sezione dedicata all'estrazione dei dati.

4

Estrazione e analisi dati

4.1 ESTRAZIONE

Il gruppo TNG offre diverse soluzioni per l'estrazione dei loro dati, siccome tutte le fasi del processo sono state svolte con il computer personale di chi scrive, per una questione di più facile gestione della grande quantità di file analizzati si è optato per un procedimento in remoto. Ovvero la maggior parte dei dati viene semplicemente analizzata tramite un'interfaccia web apposita (<https://www.tng-project.org/api/>), mentre vengono scaricate solo le informazioni relative alle particelle stellari (per il calcolo di R_e e σ). Questo procedimento e la realizzazione dei grafici sono stati svolti interamente tramite script in Python 3.6.9 creati ad hoc.

Il processo di estrazione dati si è sviluppato sostanzialmente in due fasi: prima si è analizzato un gruppo di galassie, selezionate semplicemente in base alla loro massa, a $z = 0$ seguendone poi l'evoluzione lungo il *Main Progenitor Branch* fino a $z = 1$ e conseguentemente si è seguita l'evoluzione di uno gruppo di galassie, facenti parti di uno stesso alone, sempre fino a $z = 1$. Infine sono stati messi a confronto i due diversi procedimenti.

Per il primo procedimento si sono selezionate tutte le galassie con una massa stellare ($M^* > 10^{9.5} M_\odot$) a $z = 0$, imponendo che contenessero almeno 10 particelle stellari (necessarie per la considerazione fotometriche delle relazioni di scala). Di questi oggetti è stata estratta la massa totale e la luminosità in banda V, mentre della loro componente stellare sono state estratte le posizioni, in coordinate comoving (x,y,z) , velocità e luminosità in banda V. Per prima cosa si è considerata la proiezione su un piano (scegliendo arbitrariamente $z = 0$), se

ne è quindi calcolato il raggio efficace R_e e la dispersione di velocità lungo la linea di vista σ . Grazie al R_e è stato facile ricavarsi la brillantezza superficiale a tale distanza I_e , utilizzando la relazione che li lega:

$$I_e = \frac{L}{2\pi R_e^2} \quad (4.1)$$

con L luminosità totale dell'oggetto.

Inoltre per determinare la morfologia sono stati utilizzati i dati relativi al coefficiente di Gini G , che misura l'omogeneità del flusso luminoso proveniente da diversi pixel di una galassia e M_{20} , che misura al secondo ordine il momento spaziale dei pixel che contribuiscono per il 20% della luminosità totale, entrambi resi disponibili da Rodriguez-Gomez+(2019)[11]. In accordo con D'Onofrio et al. (2019)[6] si considera ETG l'oggetto con $M_{20} < -2.00$ e $G > 0.55$. I vincoli morfologici sono stati imposti solamente sulla selezione di sottoaloni, iniziale in quanto i dati resi disponibili da Rodriguez-Gomez+(2019)[11] sono esclusivamente relativi a $z = 0$. Infine la procedura è stata reiterata ai seguenti redshift [0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 1], ma invece della semplice selezione in massa i sottoaloni sono stati scelti di volta in volta seguendo la loro individuale storia evolutiva lungo i vari MPB.

Più delicato invece il procedimento della ricostruzione della storia evolutiva di un gruppo di galassie particolare. Inizialmente l'idea era quella di selezionare uno specifico alone e seguirne la storia evolutiva ma ciò non è stato possibile e si è optato per una soluzione leggermente diversa. Per capire meglio il perché delle scelte fatte si presenta l'intero procedimento dall'iniziale scelta di seguire il singolo alone fino alla soluzione adottata. Innanzitutto si è selezionato l'alone da seguire, in questo caso si è semplicemente scelto quello più massivo in quanto ci si aspetta che esso sia quello con la storia più lunga. Poi per considerare lo stesso oggetto a epoche diverse è stato necessario ricostruire la sua storia sulla base di un sottoalone, in quanto gli algoritmi di merging sono sviluppati sull'evoluzione di quest'ultimi (come già visto nel paragrafo 3.2). Quindi si è scelto di "identificare" l'alone con il suo sottoalone più massivo, così facendo è bastato seguire l'evoluzione di quest'ultimo lungo il suo MPB e controllare che ad ogni step esso sia sempre l'oggetto con più massa. In questo modo la storia evolutiva del sottoalone rispecchia quella dell'alone FoF scelto. Tale procedimento è stato eseguito a redshift [0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 1], ci si è dovuti necessariamente fermare a $z = 1$ in quanto è stato difficile trovare sottoaloni che lungo l'evoluzione nel MPB appartenessero sempre all'alone scelto a $z = 0$. Essendo tuttavia il campione ancora troppo esiguo in numero si è scelto di accorpare insieme le galassie di diversi aloni, in particolare si sono selezionati i 5 aloni più massivi a $z = 0$ e si è quindi applicato per ognuno il procedimento

visto sopra.

Per aggiungere un ulteriore numero di elementi all'analisi appena descritta si è poi deciso, per i sottoaloni che non si riusciva a seguire fino a $z = 1$, di considerare nella loro storia evolutiva anche gli oggetti non facenti parte del MPB. Quindi si sono considerati anche i rami secondari dell'albero evolutivo ma solamente per gli oggetti i cui progenitori non appartenessero più all'alone selezionato, così da ottenere un campione più cospicuo di galassie anche a $z = 1$.

4.2 ANALISI

Tutte le figure hanno gli stessi tipi di elementi: i dati rappresentati dai cerchi colorati, la retta interpolante (ottenuta con il metodo dei minimi quadrati) e l'inclinazione di tale retta. In questa sezione sono presenti solamente i plot dei dati a $z = 0$, per quelli completi invece si rimanda all'apposita sezione in Appendice 6. Il primo caso è quello in cui si è selezionato il campione semplicemente con un vincolo sulla massa e il numero stellare. I dati sono presentati tutti in scala logaritmica, partendo dalla FJ avremo ad esempio:

$$\log L = \alpha \log \sigma + \log L'_0 \quad (4.2)$$

Osservando (Figura 4.1) si nota un andamento molto stretto e una retta di fit con inclinazione che non si scosta di troppo da quella del viriale (pendenza 2) e un valore di scatter rms di 0.2 (a $z = 0$) che non varia significativamente con il crescere del redshift ed è leggermente più basso del valore osservato 0.32 (D'Onofrio et al. 2019 [6]). La pendenza vicina a quella dell'andamento viriale non sorprende, in quanto il campione scelto è abbastanza ristretto in massa, con una selezione di galassie che ricoprisse un range più ampio di masse una relazione lineare non sarebbe sufficiente per fittare tutti i dati. Per quanto riguarda la sua evoluzione (Figura 6.1) si nota che il numero di oggetti non varia sensibilmente (come ci si aspettava), mentre l'inclinazione subisce un leggero appiattimento. La diminuzione della pendenza sembrerebbe in contrasto con quanto trovato da D'Onofrio et al. (2019) [6], i quali registrano un aumento della pendenza con il crescere di z , interpretato da loro come un allontanamento dall'equilibrio viriale.

Anche per la relazione Brillanza-Raggio (Figura 4.2) si nota un buon fit della retta interpolante, diversa ma prossima a quella del viriale (pendenza -1).

Il caso evolutivo (Figura 6.2) presenta un leggero appiattimento della retta interpolante.

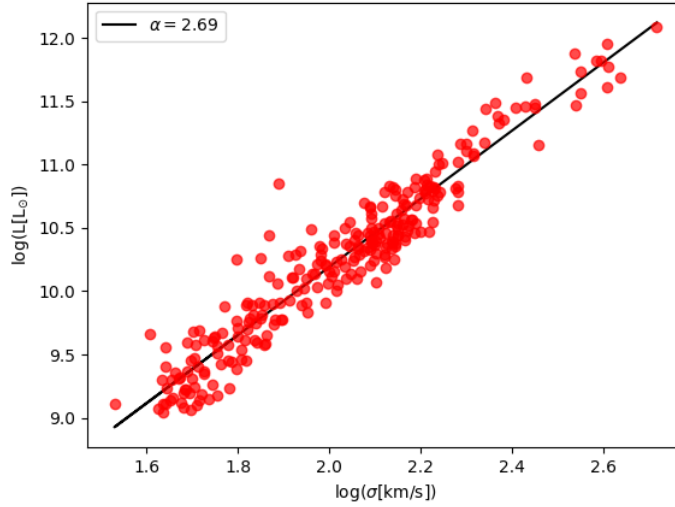


Figura 4.1: Relazioni Luminosità-Dispersione di velocità centrale a $z = 0$, per sottoaloni scelti con vincolo di massa.

Per quanto riguarda la relazione Massa-Raggio (Figura 4.3) i punti sono molto più scatterati, il che tuttavia è in accordo con quanto trovato da D’Onofrio et al.(2019)[6]. L’evoluzione di tale relazione (Figura 6.3) è accentuata solo per gli ultimi redshift considerati, per i quali si ha un leggero appiattimento.

La relazione meglio riprodotta dai dati simulati è senza dubbio il piano fondamentale (Figura 4.4), infatti è lampante come la retta interpoli bene i dati.

L’evoluzione del piano fondamentale (6.4) descritta dai due parametri presenta anch’essa un leggero appiattimento nell’intervallo di redshift considerato.

Nel secondo caso per il quale si è imposto il vincolo di appartenenza all’alone FoF più massiccio a $z = 0$ avremo i seguenti grafici. Una considerazione che vale per tutte e quattro le relazioni è quella, come già anticipato in precedenza, del progressivo diminuire del numero di sottoaloni con il crescere del tempo cosmico. Questo è dovuto alla difficoltà di ricondurre l’appartenenza di un sottoalone, lungo il suo MPB, allo stesso alone per diversi z .

Si vede che per l’evoluzione della FJ (Figura 6.5) il trend sembra essere lo stesso trovato nel caso precedente, inoltre per quanto riguarda la retta interpolante in Tabella 4.1 sono riportate le pendenze trovate ai vari redshift con la loro incertezza, le quali risultano in accordo con i valori trovati da D’Onofrio et al.(2019) [6].

Anche per la relazione Brillanza-Raggio (Figura 6.6) e la Massa-Raggio (Figura 6.7) l’evoluzione delle pendenze sembra essere confermata. Tuttavia non sono risultati significativi in quanto

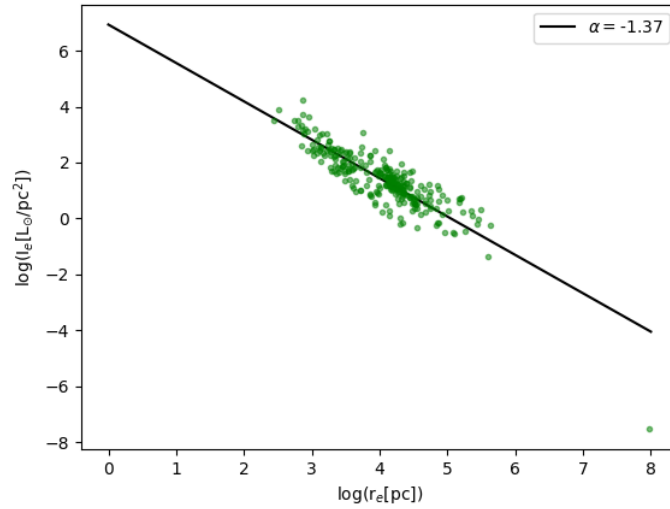


Figura 4.2: Relazioni Brillanza-Raggio a $z = 0$, per sottoaloni scelti con vincolo di massa.

z	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1
α	2.73	2.66	2.64	2.55	2.53	2.6	2.57	2.6
$\Delta\alpha$	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7

Tabella 4.1: Pendenze e incertezza della retta di fit a vari z .

il numero di oggetti si riduce drasticamente con il tempo cosmico, per questo si è deciso di considerare anche i sottoaloni al di fuori del MPB. In tal caso si vede come, per tutte le relazioni (Figure 6.9,6.10,6.11,6.12) si ha un aumento del numero degli oggetti (come previsto) ma al contempo si nota che il loro scattering cresce con il tempo cosmico, infatti il valore di scatter rms trovato varia da valori 0.1 a 0.4. Questo probabilmente dovuto al fatto che quando si va a selezionare un sottoalone non facente parte del MPB non si hanno informazioni sulla morfologia di tale oggetto, ed è quindi probabile che esso vari (anche molto) dalle early-type.

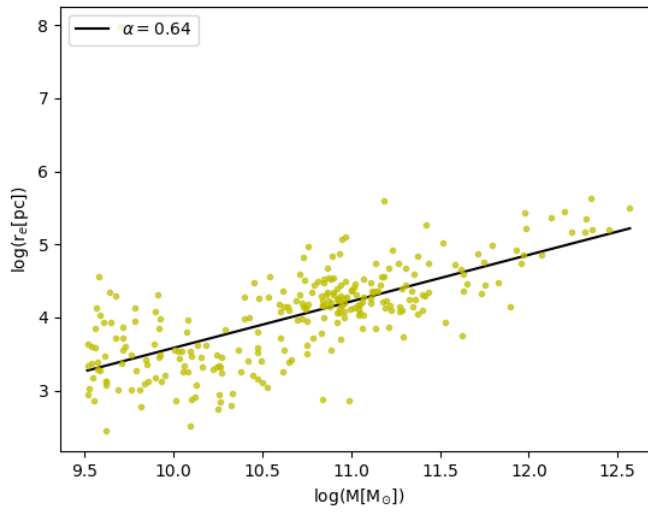


Figura 4.3: Relazioni Massa-Raggio a $z = 0$, per sottoaloni scelti con vincolo di massa.

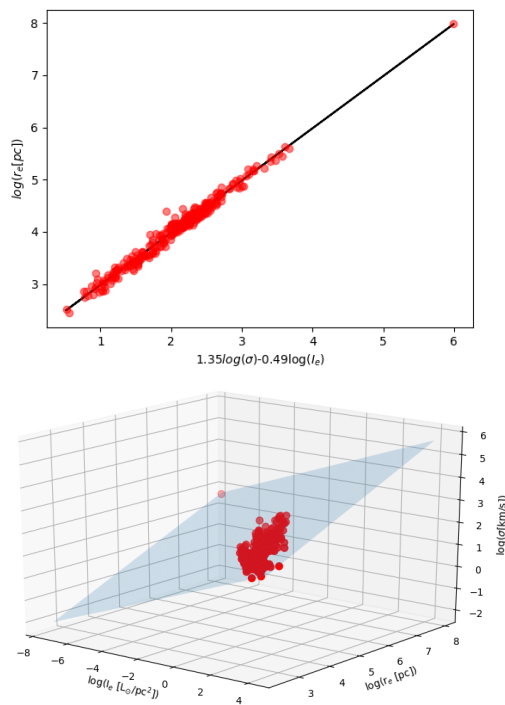


Figura 4.4: Sopra: piano fondamentale a $z = 0$ in 2D, per sottoaloni scelti con vincolo di massa. Sotto: stesso piano fondamentale che a sinistra ma in questo caso visualizzato nello spazio tridimensionale.

5

Conclusioni

La riproduzione delle leggi di scala dei dati osservativi è stata verificata sia nel caso si siano scelti oggetti non dinamicamente correlati che nel caso in cui si sia imposta l'appartenenza ad uno stesso gruppo. Nel primo caso si è potuto osservare la corretta riproduzione delle relazioni di scala anche a tempi cosmici passati, mentre il secondo caso si è dimostrato più delicato, per il quale diversi accorgimenti vanno presi se si vuole cercare un uguale riscontro. Inoltre si è visto che, seguendo l'evoluzione lungo l'MPB, non ci si allontana significativamente dall'equilibrio viriale, allora si può supporre che nella recente storia evolutiva tali oggetti siano stati in stato rilassato e che quindi per ricostruire la storia di merging in maniera dettagliata si debba andare a $z > 1$.

Nelle relazioni per cui si è registrata una leggera variazione di pendenza si è avuto un appiattimento interpretabile come un avvicinamento all'equilibrio viriale con il crescere del redshift. Il che in realtà non conferma quanto ci si potrebbe aspettare, ovvero un progressivo avanzamento verso uno stato più rilassato, ma piuttosto evidenzia come in epoche recenti ($z < 1$) vi sia stato un progressivo, seppur debole, allontanamento dallo stato virializzato. Per quanto riguarda la stretta concentrazione dei punti sul FP è sintomo di una popolazione di galassie di simile struttura e rapporto M/L che evolve debolmente nel tempo.

Nel caso in cui si sono presi i progenitori dal MPB, queste osservazioni potrebbero portare a pensare che il gruppo di sotto aloni in esame ha avuto durante la sua recente storia evolutiva una serie di merging con oggetti più piccoli e che quindi non abbiamo mutato significativamente le proprie caratteristiche fisiche. Tuttavia tali interazioni possono aver di-

sturbato il sistema abbastanza da “spostarlo” dall’evoluzione passiva che l’avrebbe portato verso l’equilibrio viriale.

Nonostante tutto la simulazione TNG si è confermata come strumento efficace (e fondamentale) per ricerche di questo tipo che, data la complessità del problema, possono essere ampliate e perfezionate in uno svariato numero di combinazioni.

6

Appendice

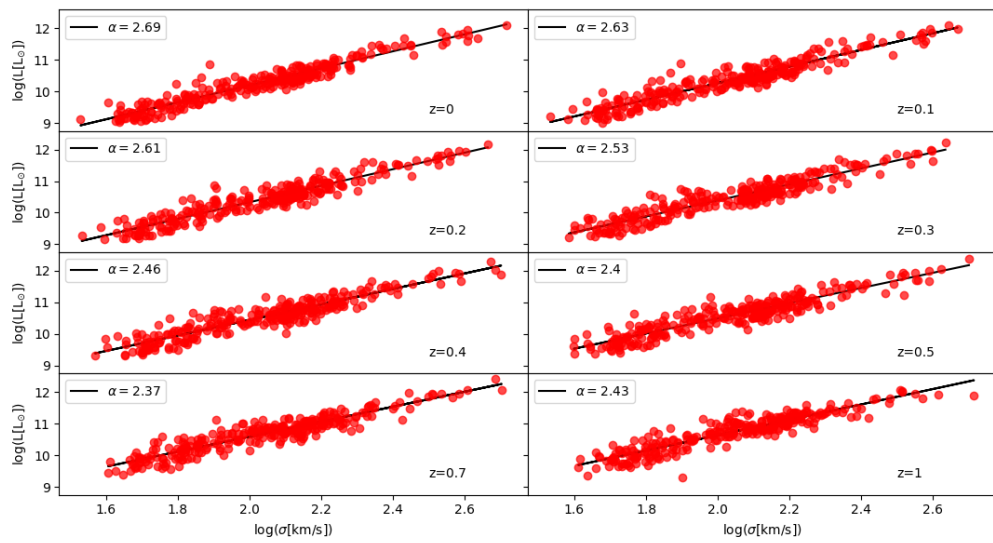


Figura 6.1: Relazioni FJ a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincolo di massa.

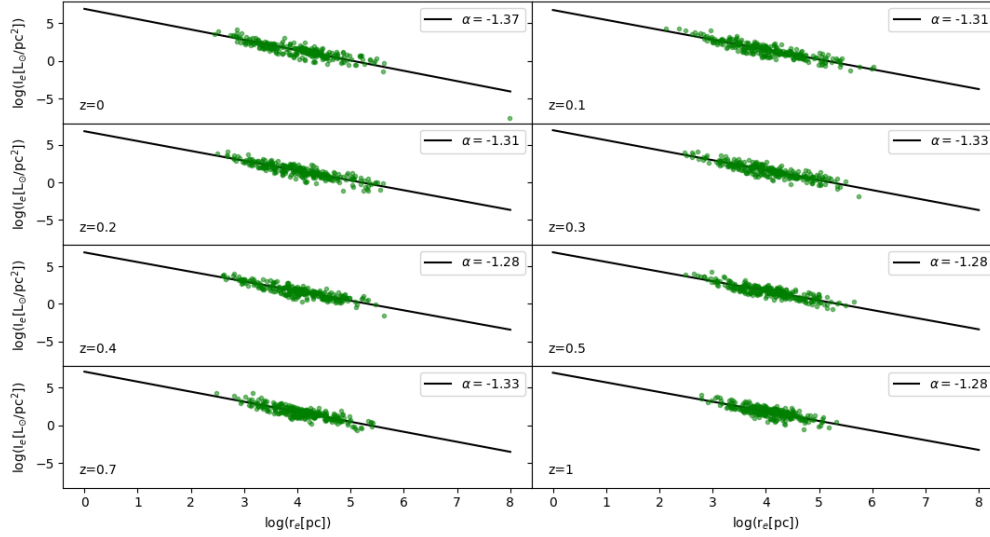


Figura 6.2: Relazioni Brillanza-Raggio a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincolo di massa.

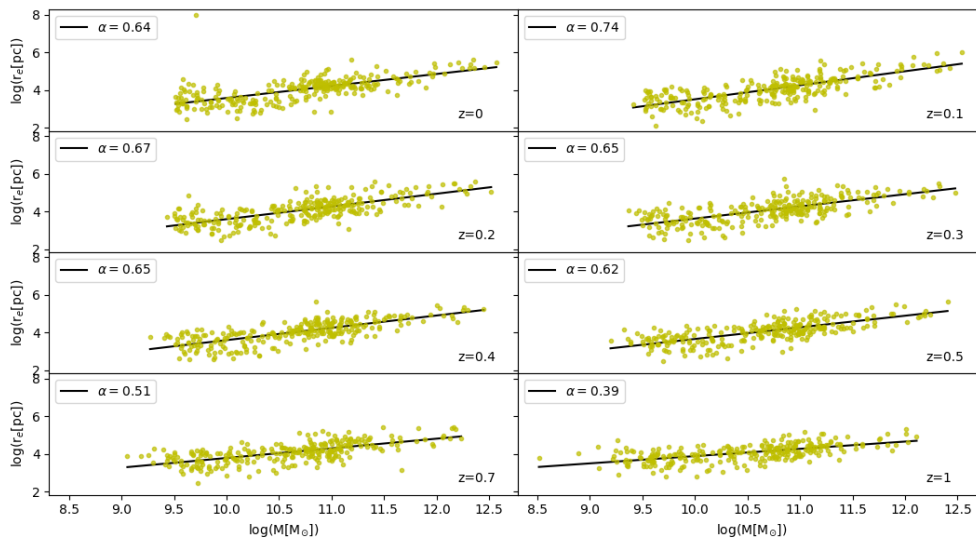


Figura 6.3: Relazioni Massa-Raggio a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincolo di massa.

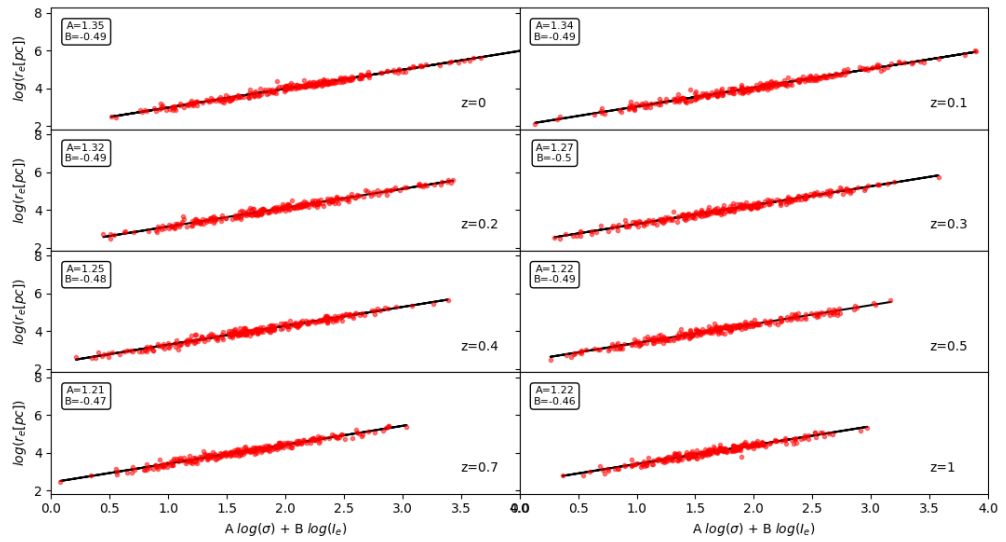


Figura 6.4: Piano fondamentale a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincolo di massa.

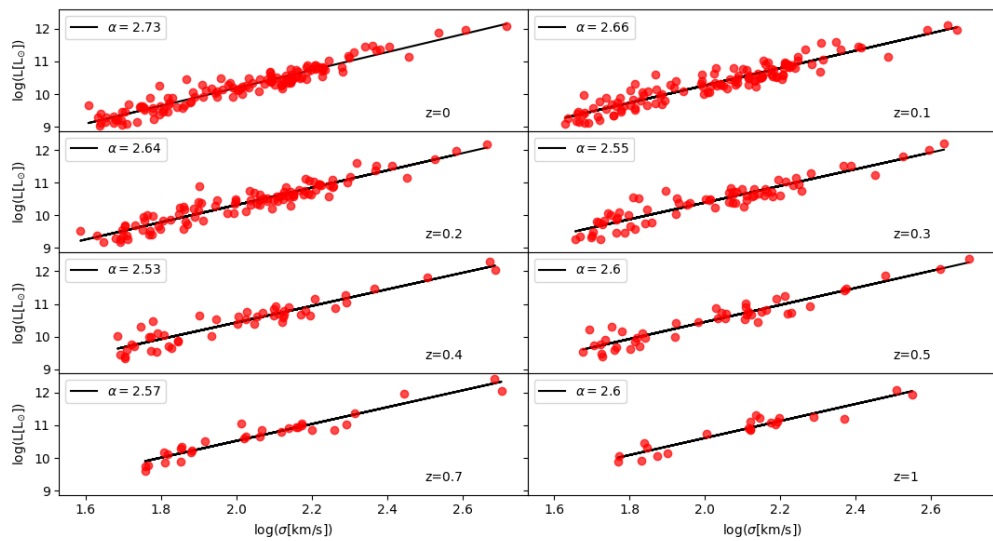


Figura 6.5: Relazioni FJ a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincolo di appartenenza allo stesso alone, lungo MPB.

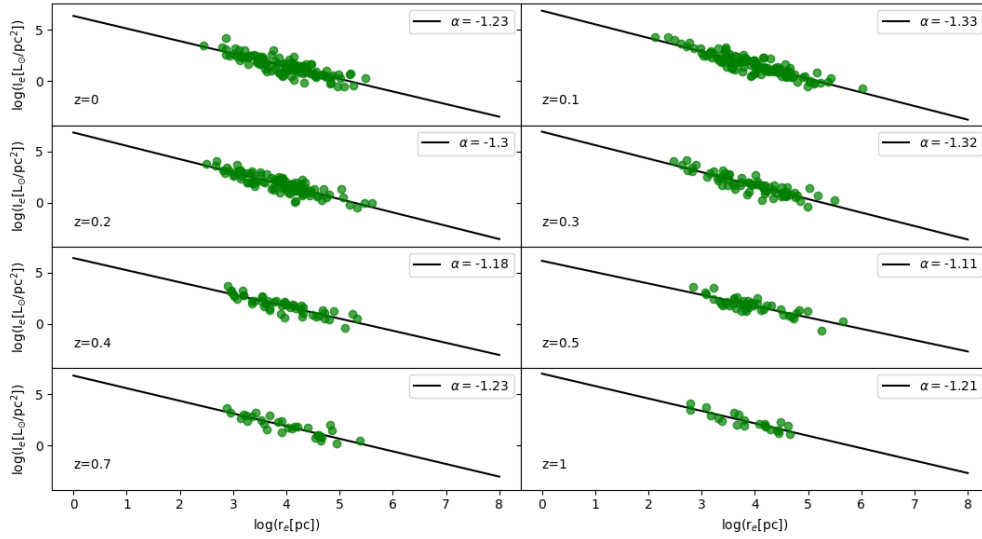


Figura 6.6: Relazioni Brillanza-Raggio a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincolo di appartenenza allo stesso alone, lungo MPB.

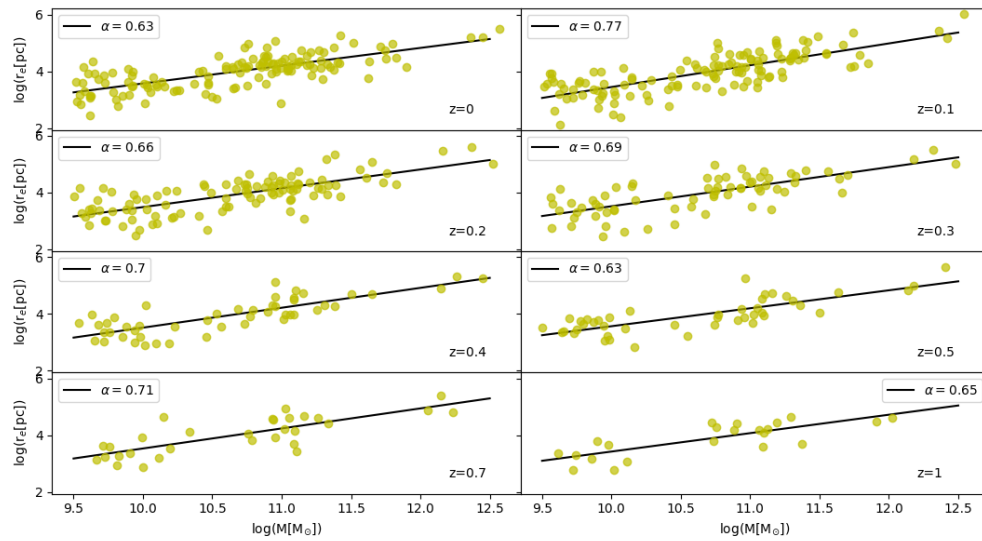


Figura 6.7: Relazioni Massa-Raggio a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincoli di appartenenza allo stesso alone, lungo MPB.

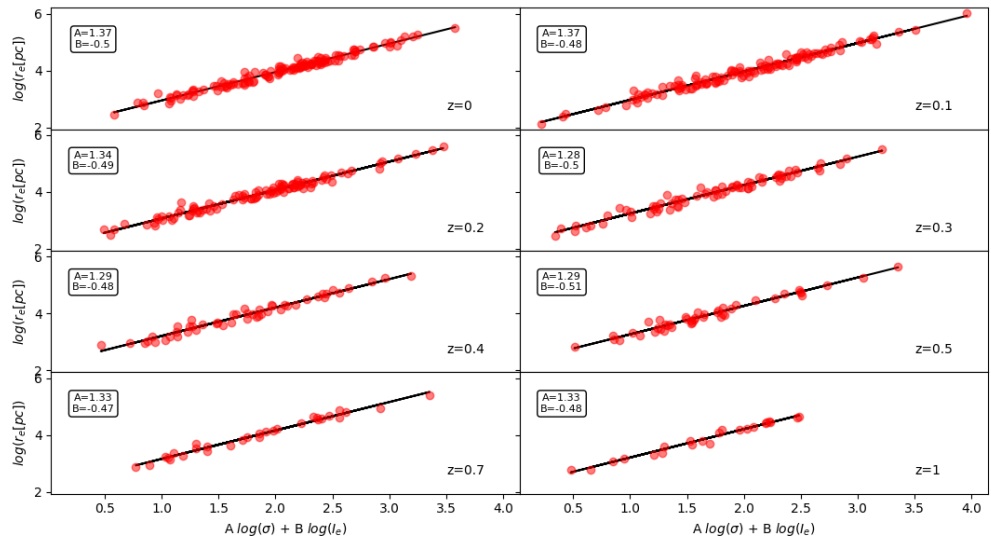


Figura 6.8: Piano fondamentale a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincolo di appartenenza allo stesso alone, lungo MPB.

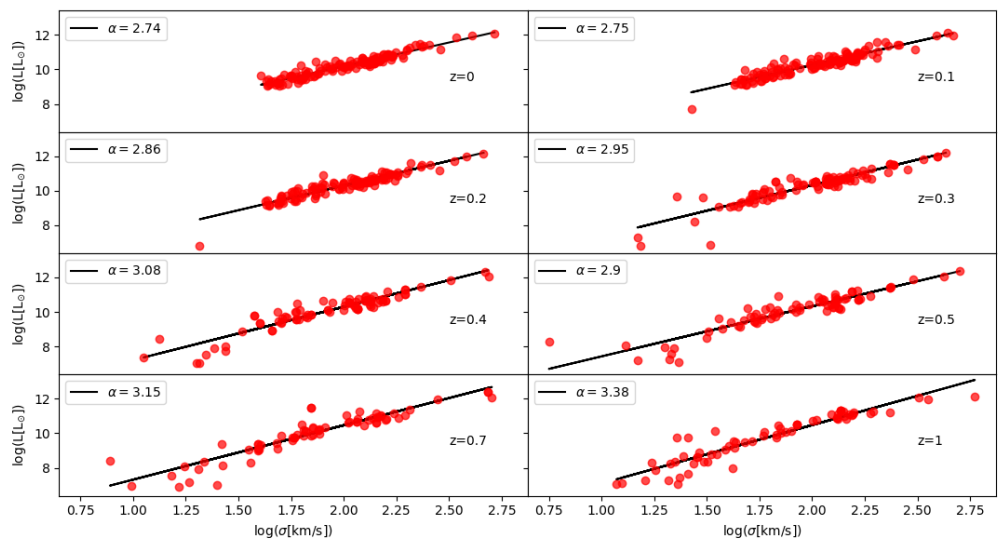


Figura 6.9: Relazioni FJ a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincolo di appartenenza allo stesso alone.

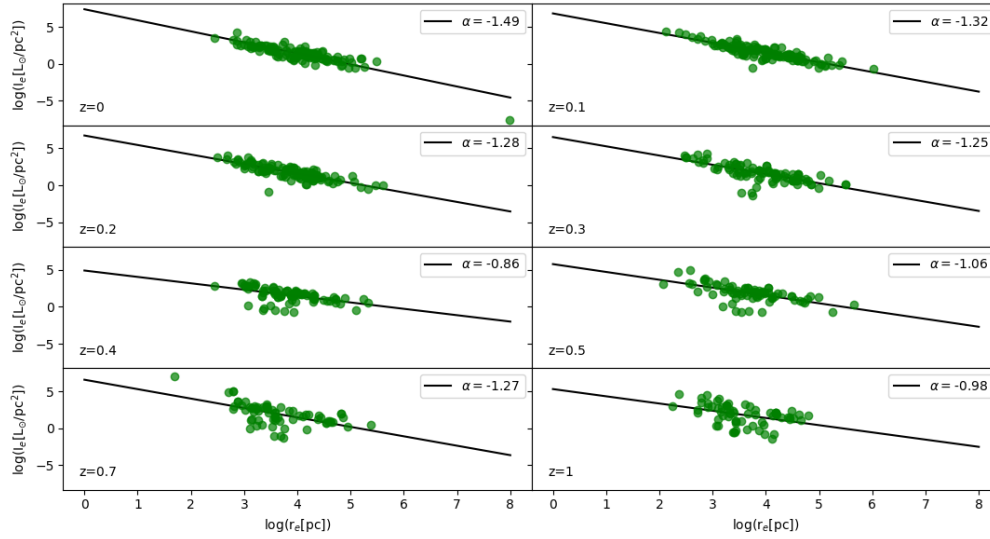


Figura 6.10: Relazioni Brillanza-Raggio a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincolo di appartenenza allo stesso alone.

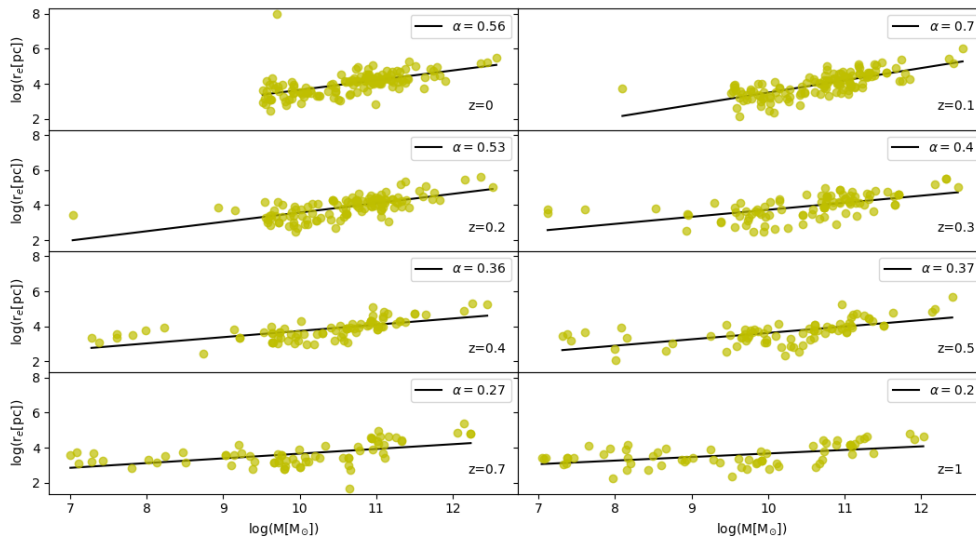


Figura 6.11: Relazioni Massa-Raggio a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincolo di appartenenza allo stesso alone.

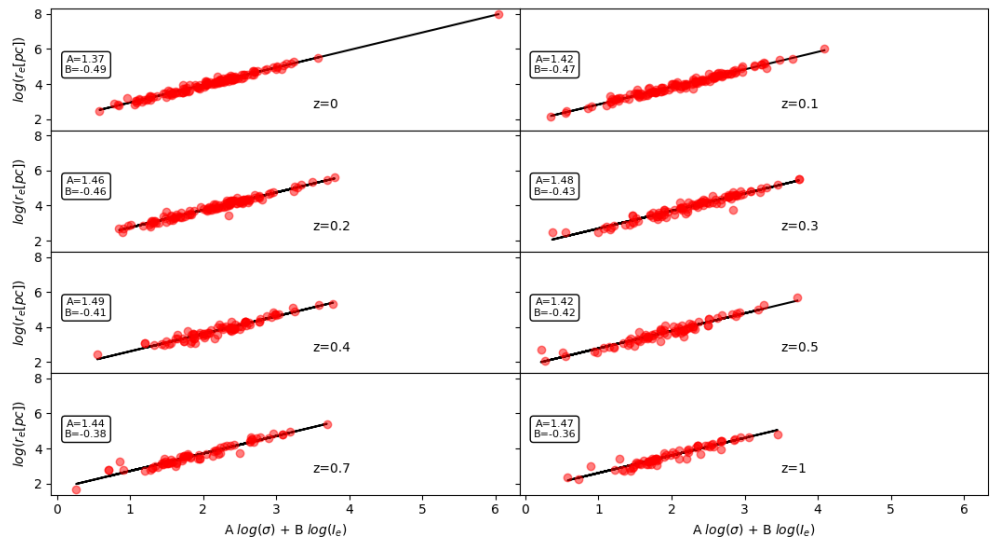


Figura 6.12: Piano fondamentale a diversi tempi cosmici, per sottoaloni scelti con vincolo di appartenenza allo stesso alone.

Bibliografia

- [1] S. M. Faber and R. E. Jackson, “Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies.” *apj*, vol. 204, pp. 668–683, Mar. 1976.
- [2] J. Kormendy, “Brightness distributions in compact and normal galaxies. I. Surface photometry of red compact galaxies.” *apj*, vol. 214, pp. 359–382, Jun. 1977.
- [3] C. Chiosi and G. Carraro, “Formation and evolution of elliptical galaxies,” *mnras*, vol. 335, no. 2, pp. 335–357, Sep. 2002.
- [4] S. Djorgovski and M. Davis, “Fundamental Properties of Elliptical Galaxies,” *apj*, vol. 313, p. 59, Feb. 1987.
- [5] A. W. Graham, *Elliptical and Disk Galaxy Structure and Modern Scaling Laws*, 2013, vol. 6, p. 91.
- [6] M. D’Onofrio, C. Chiosi, M. Sciarratta, and P. Marziani, “The parallelism between galaxy clusters and early-type galaxies: II. The scaling relations,” *arXiv e-prints*, p. arXiv:1907.09367, Jul. 2019.
- [7] M. D’Onofrio, T. Valentiniuzzi, L. Secco, R. Caimmi, and D. Bindoni, “Toward understanding the origin of the fundamental plane for early-type galaxies,” *nar*, vol. 50, no. 6, pp. 447–460, Sep. 2006.
- [8] M. Vogelsberger, F. Marinacci, P. Torrey, and E. Puchwein, “Cosmological simulations of galaxy formation,” *Nature Reviews Physics*, vol. 2, no. 1, pp. 42–66, Jan. 2020.
- [9] A. Pillepich, V. Springel, D. Nelson, S. Genel, J. Naiman, R. Pakmor, L. Hernquist, P. Torrey, M. Vogelsberger, R. Weinberger, and F. Marinacci, “Simulating galaxy formation with the IllustrisTNG model,” *mnras*, vol. 473, no. 3, pp. 4077–4106, Jan. 2018.

- [10] D. Nelson, V. Springel, A. Pillepich, V. Rodriguez-Gomez, P. Torrey, S. Genel, M. Vogelsberger, R. Pakmor, F. Marinacci, R. Weinberger, L. Kelley, M. Lovell, B. Diemer, and L. Hernquist, “The IllustrisTNG simulations: public data release,” *Computational Astrophysics and Cosmology*, vol. 6, no. 1, p. 2, May 2019.
- [11] V. Rodriguez-Gomez, G. F. Snyder, J. M. Lotz, D. Nelson, A. Pillepich, V. Springel, S. Genel, R. Weinberger, S. Tacchella, R. Pakmor, P. Torrey, F. Marinacci, M. Vogelsberger, L. Hernquist, and D. A. Thilker, “The optical morphologies of galaxies in the IllustrisTNG simulation: a comparison to Pan-STARRS observations,” *mnras*, vol. 483, no. 3, pp. 4140–4159, Mar. 2019.

Ringraziamenti

RINGRAZIO: il Relatore Mauro D'Onofrio per l'aiuto (soprattutto quello a distanza), Mauro Sciarratta per i preziosi consigli sugli script Python e infine i miei genitori per il supporto che mi hanno sempre fatto avere.