

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

Formazione delle galassie

Tesi di laurea

Presentata da:
Thomas Belvedere

Relatore:
**Chiar.mo Prof.
Daniele Dallacasa**

Anno Accademico 2019-2020

Sommario

In questa tesi si vuole dare un'idea generale di come si sono formati i vari tipi di galassie. All'inizio si parte con un riassunto di come si è formata l'idea di galassia nella storia dell'uomo e di come siamo arrivati a capire che la nostra è solo una tra le tante.

In seguito vengono spiegati i tipi di galassie che possiamo vedere e le loro caratteristiche.

Dopo aver dato un'idea delle condizioni iniziali in cui si trovava l'universo dopo il Big Bang, vengono presentati due modelli di formazione di galassie a spirale (top-down e bottom-up) e uno per le galassie ellittiche (merging).

Un capitolo è stato dedicato anche alla formazione degli ammassi di galassie. Concludendo, sono state riportate alcune osservazioni che sono state fatte riguardo la materia oscura e riguardo la Via Lattea.

Indice

1	Formazione dell'idea di galassia nella storia	1
2	Cosa sono le galassie	3
2.1	Tipi di galassie	3
2.1.1	Galassie ellittiche	3
2.1.2	Galassie a spirale	3
2.1.3	Galassie lenticolari (S0)	4
2.1.4	Galassie irregolari	4
3	Condizioni iniziali	4
3.1	fasi iniziali dell'universo	4
3.2	Distribuzione della materia barionica nell'universo	5
4	Modelli di formazione di galassia	7
4.1	Modello top-down	7
4.2	Modello bottom-up	8
4.3	Merging galattico	8
5	Ammassi di galassie	11
6	Osservazioni	13
6.1	Materia oscura	13
6.2	Via lattea	14
7	Conclusioni	15

1 Formazione dell'idea di galassia nella storia

Le galassie prendono il nome da *galaxias* che in greco vuol dire “lattea”. Il motivo è che nella mitologia classica la Via Lattea nacque dalle gocce del latte fuoriuscito dal seno della dea Era verso il cielo, mentre allattava Eracle, le quali poi divennero la via percorsa dagli dei per raggiungere il palazzo del re e della regina degli dei.



Figura 1.1: Tintoretto, Nascita della Via Lattea, 1578-80

Intorno al 350 A.C Aristotele, come altri filosofi prima di lui, descrisse la galassia come una fascia di stelle molto lontane e una prima conferma di questo arrivò con Galileo Galilei nel 1610 grazie alle sue osservazioni tramite l'uso di uno dei primi cannocchiali.

Nel 1755 col trattato “Storia universale della natura e teoria” di Immanuel Kant, abbiamo una prima speculazione su cosa siano le galassie più nel dettaglio e come si siano formate. Secondo Kant la galassia era un enorme corpo composto da stelle che ruotavano attorno attorno al centro per la gravità come il nostro sistema solare e che la scia di stelle della Via Lattea fosse dovuta ad un effetto prospettico. Teorizzò inoltre che alcune nebulose che si vedevano erano in realtà altre galassie come la nostra ma molto lontane.

Nel 1785 William Herschel provò a disegnare la via lattea basandosi sulle sue osservazioni supponendo che le stelle avessero tutte la stessa luminosità e che il nostro sistema solare si trovasse al suo interno.

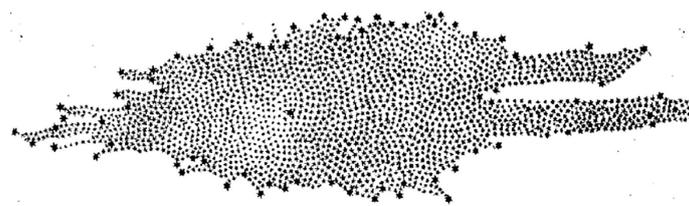


Figura 1.2: modello della galassia secondo William Herschel, 1785

Fino ai primi anni '20 la comunità scientifica non era ancora tutta d'accordo nel dire che ci fossero altre galassie al di fuori della nostra. Questo è noto come il "grande dibattito" o dibattito Shapley-Curtis. Iniziò nel 1920 tra Heber Curtis, che sosteneva la teoria degli "universi isola", e Harlow Shapley, che invece sosteneva che il nostro universo fosse interamente contenuto nella Via Lattea.

Il dibattito fu definitivamente risolto da Edwin Hubble nel 1924. Con le sue osservazioni fatte tramite il telescopio Hooker, Hubble riuscì a distinguere le stelle all'interno di quelle che si pensava fossero solo nebulose e a determinarne la distanza dimostrando che non potevano trovarsi all'interno della nostra galassia. Nel 1929, assieme a Milton Humason, Hubble riuscì a formulare la legge di Hubble che determina la distanza di una galassia da noi osservando il suo redshift e quindi il suo allontanamento. Questa legge (precedente formulata da Georges Lemaître nel 1927) era una importante conferma a favore della teoria di un universo in espansione e anche a quella del Big Bang, formulata da Georges Lemaître e George Gamow.

2 Cosa sono le galassie

Le galassie sono agglomerati di stelle, gas, polvere e materia oscura e vengono considerati i "mattoni" che costituiscono l'universo. Esse possono avere caratteristiche molto diverse tra loro e c'è ancora molto che dobbiamo capire a riguardo.

2.1 Tipi di galassie

Nel 1936 lo stesso Hubble ideò un sistema di classificazione per le galassie in base alla loro morfologia ancora usato ai nostri giorni: la Sequenza di Hubble. A sinistra posizionò le galassie ellittiche classificate in base alla loro ellitticità da 0 a 7 secondo la seguente legge.

$$N = 10(1 - a/b) \quad (2.1)$$

Al centro posizionò le galassie lenticolari e a destra in due categorie diverse le galassie a spirale e le galassie a spirale barrate suddivise a loro volta in base 3 sotto-classi, a, b e c, al decrescere della rilevanza del nucleo rispetto ai bracci. Un posto a parte spetta alle galassie irregolari.

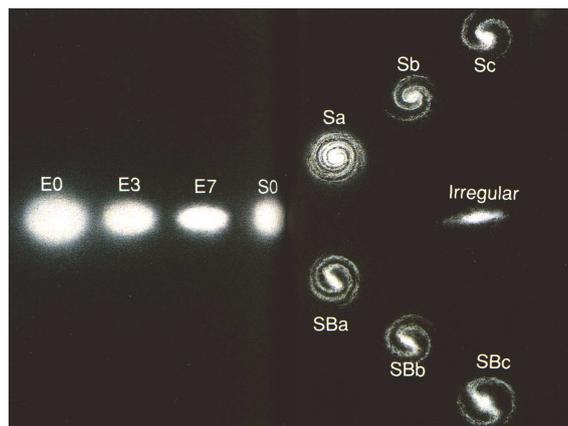


Figura 2.1: diagramma di Hubble

2.1.1 Galassie ellittiche

Esse hanno dimensioni da 1 a 200 kPc con masse da $10^5 M_{\odot}$ a $10^7 M_{\odot}$. Le stelle, che si muovono di moti casuali, sono la componente principale. Di solito si trovano negli ammassi di galassie. Al loro interno non c'è gas freddo e quindi non avviene formazione stellare. Le stelle sono più vecchie e hanno una metallicità molto bassa. Inizialmente Hubble pensava che fossero uno stadio iniziale delle galassie a spirale ma successive osservazioni hanno dimostrato il contrario.

2.1.2 Galassie a spirale

Hanno dimensioni di qualche kPc a decine, con masse da $10^6 M_{\odot}$ a $10^{11} M_{\odot}$. Sono composte da stelle, molto gas e polvere. All'interno vi è formazione stellare attiva.

si trovano solitamente in ambienti di bassa densità, quindi sono meno diffuse negli ammassi. Il mezzo interstellare costituisce circa il 5-10 % della massa totale di una galassia a spirale e la sua distribuzione è in funzione della distanza dal centro. Le galassie a spirale barrate sono molto simili ma presentano un nucleo con una forma allungata. La nostra galassia si pensa che sia una galassia a spirale barrata di tipo SBa.

2.1.3 Galassie lenticolari (S0)

Sono simili alle galassie ellittiche ma presentano un picco a $100 \mu\text{m}$ (IR) dovuto alla polvere. Hanno dimensioni di decine di kPc con masse da $10^8 M_{\odot}$ a $10^{11} M_{\odot}$. Si pensa che siano spirali in esaurimento

2.1.4 Galassie irregolari

Sono una distribuzione uniforme di gas interstellare e stelle che non presentano una morfologia come gli altri tipi di galassia.

3 Condizioni iniziali

Per capire come avviene la formazione delle galassie bisogna conoscere prima le condizioni iniziali in cui avviene. Per farlo bisogna avere un'idea del Big Bang e delle fasi successive ad esso.

3.1 fasi iniziali dell'universo

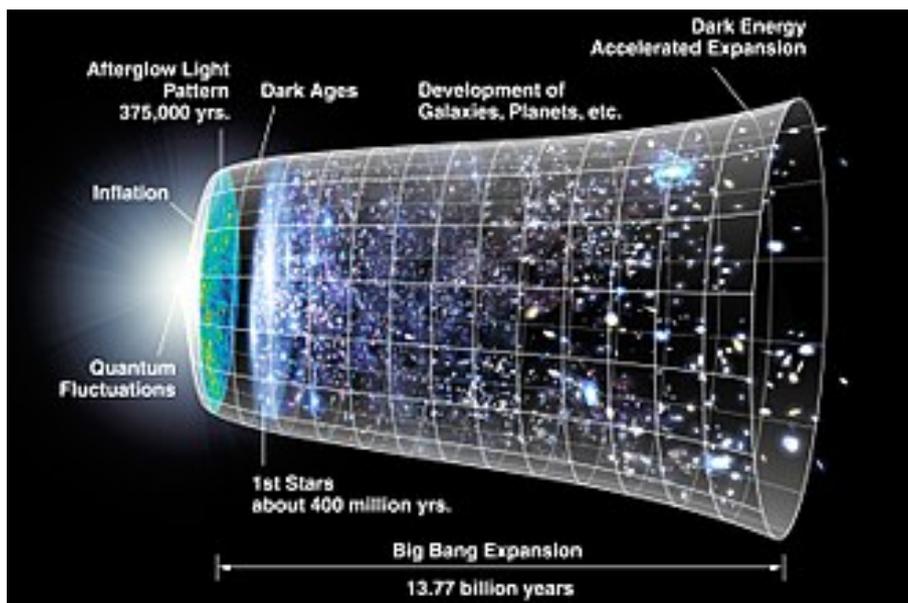


Figura 3.1: rappresentazione dell'universo dal Big Bang ad oggi

- *Big Bang* (0 s): il Big Bang è il collasso di una singolarità primordiale che ha dato vita al nostro universo avvenuto circa 13.7 miliardi di anni fa
- *Epoca di Planck* (10^{-43} s): periodo in cui le 4 forze fondamentali (elettromagnetica, gravitazionale e nucleare forte e debole) non erano ancora distinte. L'universo era ancora troppo energetico per creare alcuna particella
- *Inflazione* (10^{-37} s - 10^{-32} s): fase in cui l'universo si espanse almeno 10^{78} volte le sue dimensioni iniziali diminuendo la sua densità e temperatura
- *Bariogenesi* ($10^{-6} M_{\odot}$ s): prevale la materia sull'antimateria
- *Epoca della Big Bang nucleosintesi* (100 s): si formano i primi nuclei di Elio e di Litio
- *Epoca della ricombinazione* ($t= 3 \times 10^5$ anni): l'universo è abbastanza freddo da permettere la ricombinazione e ridurre le interazioni tra fotoni e materia e diventa trasparente alla radiazione. La radiazione emessa dalla combinazione degli atomi in di questo periodo possiamo ancora osservarla ed è nota come Radiazione cosmica di fondo (CMB).

3.2 Distribuzione della materia barionica nell'universo

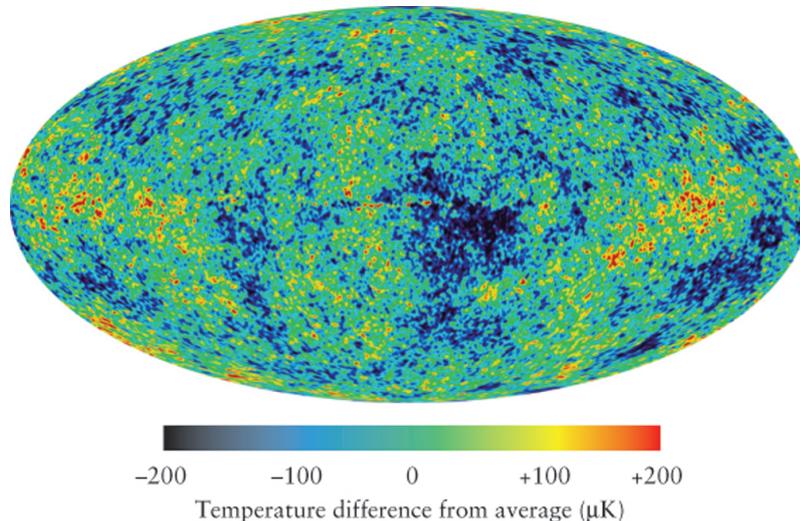


Figura 3.2: Disomogeneità nella temperatura della radiazione cosmica di fondo

Osservando la CMB possiamo notare delle differenze infinitesime di temperatura tra le varie zone dell'universo dell'ordine di 10^{-6} K. Queste disomogeneità sono dovute al fatto che l'esplosione primordiale dovuta alla separazione radiazione-materia non è stata del tutto isotropa.

Bastava una piccola perturbazione (fluttuazione quantistica) per fare in modo che la gravità cominciasse ad agire in maniera diversa in alcuni punti. Se l'universo fosse

stato perfettamente isotropo allora le particelle avrebbero avuto attrazione gravitazionale nulla e non ci sarebbe stata formazione galattica.

Per far sì che si formino le strutture galattiche che vediamo oggi c'è bisogno però di un ulteriore ingrediente: la materia oscura. Le disomogeneità formatesi si sarebbero dovute annullare a causa dell'espansione dell'universo quindi ne deduciamo che dobbiamo tenere conto anche di una materia non barionica, ovvero la materia oscura, che ha fatto sì che il gas barionico si distribuisse formando strutture più complesse. L'organizzazione "spugnosa" osservata per le galassie è quindi dovuta grazie all'influenza gravitazionale della materia oscura poiché ha attratto il gas all'interno delle sue buche gravitazionali.

Successivamente hanno cominciato a formarsi le prime nubi e le prime stelle formate da solo elio e idrogeno (stelle di popolazione 3) che poi hanno prodotto elementi più pesanti necessari per la formazione di altre stelle e corpi celesti.

4 Modelli di formazione di galassia

Si teorizza che le prime galassie a formarsi sono le galassie a spirale in quanto hanno stelle più giovani rispetto a quelle ellittiche. Ci sono diverse teorie su come un agglomerato di gas e stelle può assumere quella forma ma non ce n'è ancora una che predice esattamente ciò che viene osservato

4.1 Modello top-down

Olin Eggen, Donald Lynden-Bell, and Allan Sandage nel 1962 proposero una teoria in cui il disco della galassia si forma da un collasso monolitico di una enorme nuvola di gas. La distribuzione di materia nel primo stadio dell'universo era in raggruppamenti dove c'era materia oscura. Questi raggruppamenti interagivano tra loro gravitazionalmente assumendo un momento angolare.

Man mano che la materia barionica si raffreddava, dissipava energia contraendosi. Con la conservazione del momento angolare la materia più vicina al centro accelerò la sua rotazione fino ad appiattirsi in un disco piatto. Una volta che il disco si raffredda il gas non è più in equilibrio e comincia a rompersi in tante sfere di gas formando le stelle.

Dal momento che la materia oscura non si dissipa e interagisce solo gravitazionalmente essa rimane fuori dal disco e prende il nome di alone oscuro (dark halo). Il modello ELS è noto anche come teoria top-down perché parte da una nuvola di gas unica che si divide in altre più piccole.

In contrasto con quanto predetto dal modello ELS, per esempio, è possibile trovare alcune stelle fuori dal disco galattico a differenza da quanto sarebbe predetto. Inoltre circa la metà delle stelle orbitanti la galassia, al di fuori del disco, possiede un moto retrogrado, fornendo un momento angolare netto nullo nell'alone.

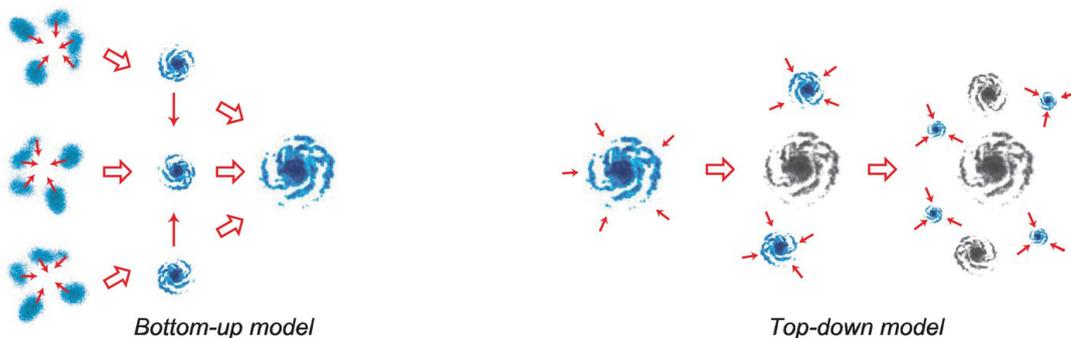


Figura 4.1: Rappresentazione schematica dei modelli bottom-up e top-down

4.2 Modello bottom-up

Nella teoria Bottom-up avviene il processo inverso rispetto a quella top-down. Al posto di partire da una nuvola grande che si suddivide in nuvole più piccole, questa teoria afferma che le galassie si sono formate dall'unione di tanti raggruppamenti di materia con una massa simile a quella di un ammasso stellare. In seguito alla formazione di galassie poi queste si sono raggruppate a loro volta in ammassi di galassie a causa dell'attrazione gravitazionale. Anche in questo caso il risultato è un disco di materia barionica circondata da un alone di materia oscura per gli stessi motivi del modello ELS.

Attualmente non si sa che processo fermi la contrazione. Forse il rallentamento potrebbe essere dovuto alla radiazione da stelle nuove o ad un nucleo galattico attivo. Anche l'alone di materia oscura potrebbe avere un coinvolgimento in questo processo.

Durante il collasso è ragionevole credere che questo avvenga più rapidamente verso il comune centro di massa di queste componenti, ove le interazioni fra queste sono più frequenti. Quindi, la prima regione a formarsi è il bulge. E' da notare che durante il merging i lembi esterni evolvono quasi indipendentemente, infatti è proprio questa la presupposta natura delle galassie irregolari.

4.3 Merging galattico

Il merging galattico può avvenire quando due galassie collidono e si pensa sia il responsabile per la formazione delle galassie ellittiche.

Molte galassie nell'universo sono gravitazionalmente legate ad altre galassie, il che vuol dire che non riusciranno mai a fuggire dall'attrazione gravitazionale. Se due galassie a spirale hanno dimensioni simili la galassia risultante non assomiglierà a nessuna delle progenitrici ma sarà invece ellittica come si può vedere nelle immagini di seguito. Le foto sono di otto merging differenti dal momento che è un processo troppo lento per essere osservato dall'inizio alla fine.

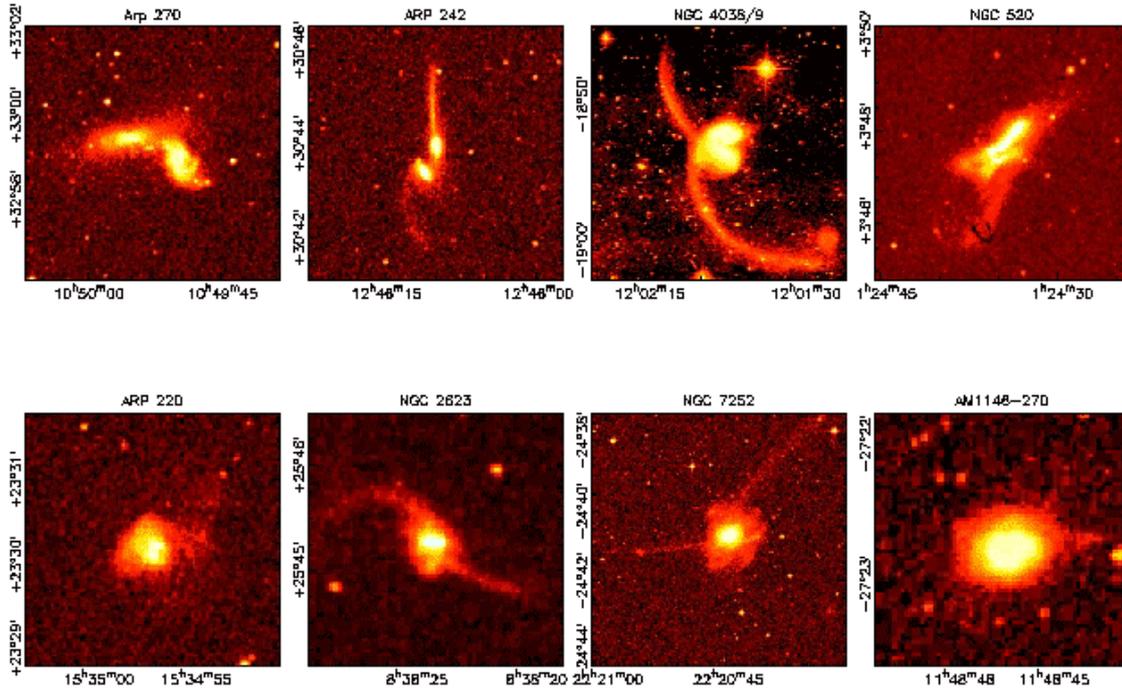


Figura 4.2: (immagini di 8 merging differenti formati da galassie iniziali simili

Ci sono anche molti tipi di merging galattico che non risultano necessariamente in una galassia ellittica ma in una modifica alla loro struttura.

Il merging tra due galassie è un evento violento e lo scontro del mezzo interstellare delle due galassie può creare onde d'urto che possono scaldare il gas e anche formare nuove stelle nella galassia ellittica. Il fatto che il mezzo interstellare delle due galassie venga “bruciato” velocemente è il motivo per cui all'interno delle galassie ellittiche c'è pochissimo mezzo interstellare e non c'è più formazione stellare a differenza invece delle galassie a spirale.

Nei centri degli ammassi di galassie si nota una maggiore concentrazione di galassie ellittiche, le quali lasciano il posto a quelle a spirale nelle zone più remote il che supporta la teoria di una creazione tramite merging. Questa visione è supportata anche da osservazioni effettuate ad alto redshift dove si osservano un numero inferiore di galassie ellittiche rispetto a quelle a spirale andando indietro nel tempo, unite alla presenza di sempre più numerose strutture irregolari dal colore blu, rispetto al presente, che sono con ogni probabilità le componenti che generano strutture galattiche per merging.

Ci sono vari tipi di merging che possono accadere e vengono suddivisi in base a quante galassie collidono e di che tipo.



Figura 4.3: Merging di due galassie NGC 4676 chiamato anche "i topi" a causa delle loro "code" di stelle e gas

5 Ammassi di galassie

Gli ammassi di galassie possono contenere dalle 100 alle 1000 galassie con diametro di dimensioni da 1 a 5 Mpc.

Il mezzo intergalattico (ICM, intracluster medium) è molto diffuso e si trova alla temperatura di $10^7 - 10^8$ K. Guardando un ammasso vediamo nel centro plasma termico che emette per Bremsstrahlung e nelle periferie plasma non termico in cui vi è un forte campo magnetico e quindi riceviamo emissione di sincrotrone. Gli elettroni caldi dell'ICM è anche in grado di diffondere per Inverse Compton i fotoni della CMB i quali diventano più energetici e ciò comporta uno shift verso il blu della plankiana della CMB.

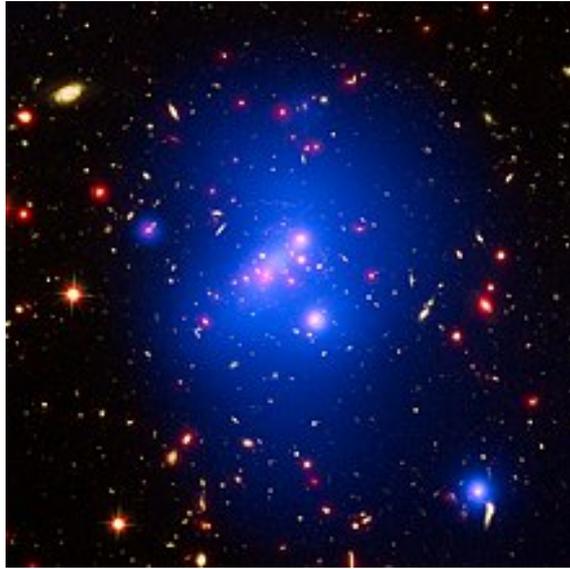


Figura 5.1: Ammasso di galassie IDCS J1426

Premessa necessaria è che non tutte le galassie fanno parte di ammassi. Così come per le singole galassie, anche la formazione degli ammassi si riconduce ai processi che hanno seguito al Big Bang. In realtà, solo il 10 % di questi oggetti è legato a queste strutture. Il restante 90 % delle galassie è solitamente di massa minore rispetto alla media; esse sono definite galassie di campo. Non sono tuttavia completamente isolate.

In seguito all'epoca del disaccoppiamento materia-radiazione, come si è visto, le piccole perturbazioni in temperatura della CMB sono cresciute fino a generare delle nubi, all'interno delle quali sono nate le stelle di popolazione III. Dopo la loro esplosione e la reionizzazione, è stata possibile l'aggregazione di strutture più grandi: le prime protogalassie. Come abbiamo detto, gli oggetti più grandi hanno bisogno di più tempo per aggregarsi: di conseguenza, è logico pensare che la formazione degli ammassi abbia necessitato di più tempo per avvenire rispetto a quella delle singole galassie.

Possiamo quindi affermare che la nascita di questi ultimi sia un processo di tipo

bottom-up, ovvero avvenuto a causa di aggregazioni successive di galassie già formate. Le protogalassie, quindi, hanno iniziato a sentire l'attrazione gravitazionale reciproca e hanno cominciato a formare un primo protoammasso.

Su questa scala, però, molto maggiore che nel caso delle singole galassie, non è possibile trascurare l'espansione dell'Universo, che si oppone alla gravità che farebbe avvicinare tra loro le strutture galattiche. Di conseguenza, dobbiamo supporre che l'attrazione gravitazionale ha vinto, a lungo andare, la battaglia con l'espansione; questo dualismo, però, ha generato un forte ritardo nella formazione degli ammassi. D'altra parte, un collasso senza ostacoli avrebbe potuto impedire la generazione delle singole galassie, perché sarebbe stato troppo veloce per dare tempo a queste strutture di formarsi.

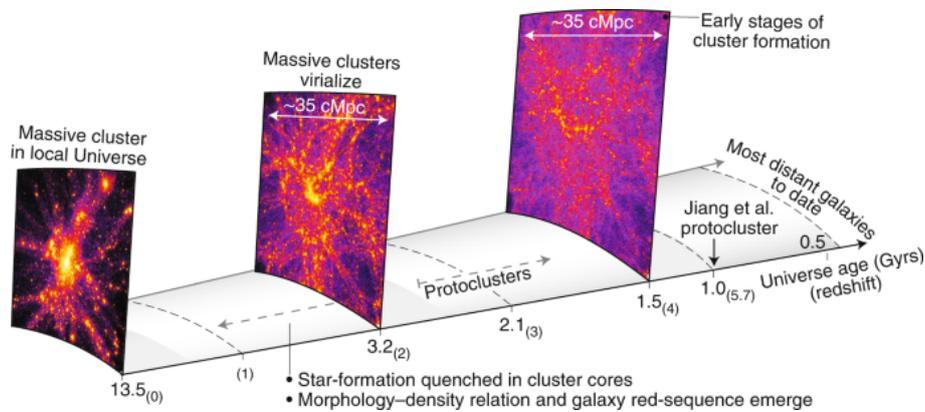


Figura 5.2: Fasi della formazione di un ammasso di galassie

Nei miliardi di anni successivi, comunque, gli ammassi hanno continuato ad evolversi attraverso la cattura di altre galassie e le collisioni con altri oggetti simili. Portandoci ad una scala ancora maggiore, possiamo ipotizzare che la formazione dei superammassi abbia richiesto un tempo ancora maggiore e che sia, di conseguenza, ancora in corso.

Se osserviamo ad alti redshift ci aspettiamo, quindi, di osservare ammassi con densità minori e strutture più caotiche rispetto agli oggetti nelle vicinanze. In effetti, le osservazioni mostrano che gli ammassi primordiali ($z > 1$) sono meno massicci, meno densi e formati da galassie al cui interno è presente gas ancora in fase di collasso. I primi oggetti simili a quelli che conosciamo cominciano a essere visibili a $z \approx 1$. Non conosciamo ancora il destino a cui andranno incontro queste immense strutture, poiché esso dipende dall'evoluzione stessa dello spazio-tempo. L'Universo è, in questo momento, troppo giovane rispetto ai tempi scala necessari alla formazione completa di questi oggetti. La loro aggregazione potrebbe continuare fino a coinvolgere l'intero cosmo; d'altra parte, l'espansione dell'Universo potrebbe arrivare ad annullare la forza attrattiva tra gli ammassi, ponendo quindi un limite alla massa che essi possono raggiungere.

6 Osservazioni

6.1 Materia oscura

La materia oscura è uno degli enigmi cosmologici più interessanti che vengono studiati al giorno d'oggi. Essa è nata, come abbiamo in parte già visto, dalla necessità di spiegare la formazione delle galassie, degli ammassi di galassie e della loro dinamica. La materia oscura comporrebbe, mediamente, il 90 % della massa delle galassie e della massa presente nell'universo.

Purtroppo non interagisce elettromagneticamente e quindi è impossibile da osservare e per farlo dobbiamo guardare come interagisce gravitazionalmente con la materia barionica.

Portiamo come esempio di evidenza sperimentale dell'esistenza della materia oscura, la forma della curva di rotazione tipica di una galassia. Come accade per le orbite planetarie, in base alla seconda legge di Keplero, le stelle con orbite galattiche più grandi dovrebbero avere velocità orbitali minori, ma tale legge è applicabile soltanto a stelle vicine al centro galassia a spirale poiché presuppone che la massa racchiusa dall'orbita sia costante. Invece di diminuire a grandi raggi, nei bracci della galassia le velocità orbitali rimangono con ottima approssimazione costanti. L'implicazione è che la massa racchiusa da orbite di raggio via via maggiore aumenti anche per stelle che sono apparentemente vicine al limite della galassia. Sebbene si trovino presso i confini della parte luminosa della galassia, questa ha un profilo di massa che apparentemente continua ben al di là delle regioni occupate dalle stelle.

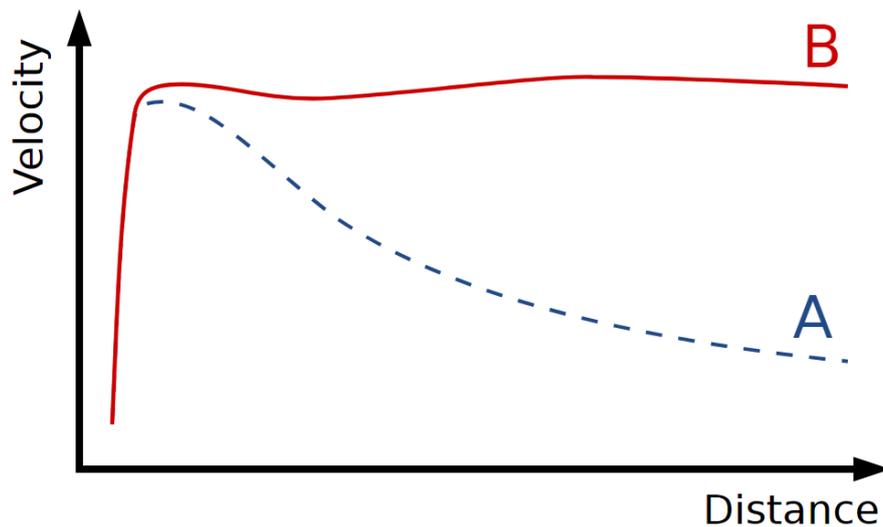


Figura 6.1: Curva di rotazione della galassia: (A): predetta; (B): osservata

6.2 Via lattea

La nostra galassia è una spirale barrata grande 12 Kpc, ha una massa di $6.82 \times 10^{11} M_{\odot}$. Si stima che contenga circa 100 miliardi di stelle. Il nostro sistema solare si trova a circa 7,6 kpc dal suo centro.

In futuro anche la nostra galassia farà merging galattico. La via lattea e Andromeda sono gravitazionalmente legate e al momento si stanno avvicinando ad alte velocità. Andromeda è una galassia a spirale barrata che si trova 770 kpc distante da noi ed è la più vicina alla nostra. Si pensa che la loro collisione avverrà tra meno di 5 miliardi di anni. Durante la collisione, si pensa che il sole e il resto del sistema solare cambierà il suo moto attorno al centro della galassia. Il prodotto di questo merging potrebbe essere una galassia ellittica.

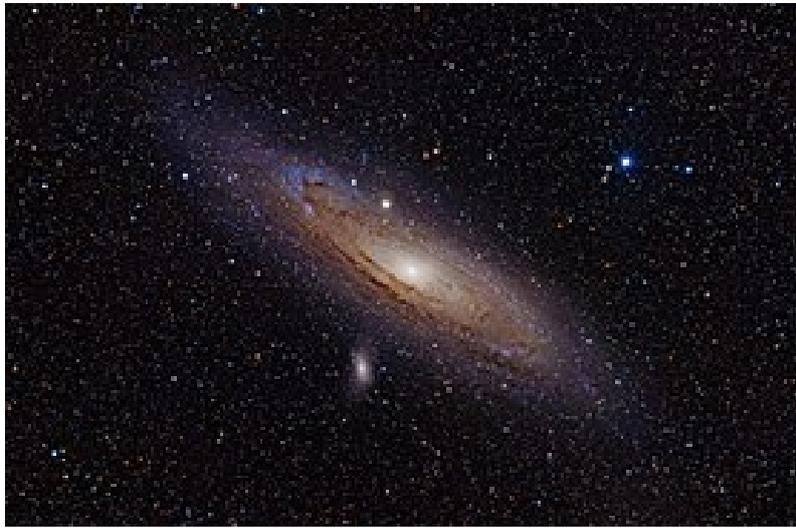


Figura 6.2: La galassia Andromeda

Nel 1994 è stato scoperto che la Via Lattea ha una galassia satellite, la Galassia Nana Ellittica del Sagittario, la quale viene attualmente lacerata e gradualmente "mangiata" dalla Via Lattea. Si pensa che questo genere di eventi siano piuttosto comuni nell'evoluzione di grandi galassie.

7 Conclusioni

Con questa tesi siamo partiti descrivendo la formazione della Via Lattea come uno spargimento di latte in cielo da parte di una Dea della mitologia classica. Oggi abbiamo un'idea più concreta e realistica di cosa sia la nostra galassia e di come sia nata ma più cose scopriamo più scopriamo quanto poco sappiamo ancora.

I modelli di formazione galattica attuali devono ancora trovare una soluzione che predica in maniera esatta ciò che vediamo e non possiamo nemmeno dire di capire a fondo quelle previsioni che invece ci risultano corrette, come la materia oscura. Forse i nostri colleghi greci di più di due mila anni fa erano più sicuri di noi nell'affermare di sapere come si era sviluppato il cosmo ma d'altronde il progresso scientifico non sta solo nel trovare le risposte, ma anche nel trovare le domande.

Con questa tesi e con questa triennale posso dire, felicemente, di aver trovato entrambe.

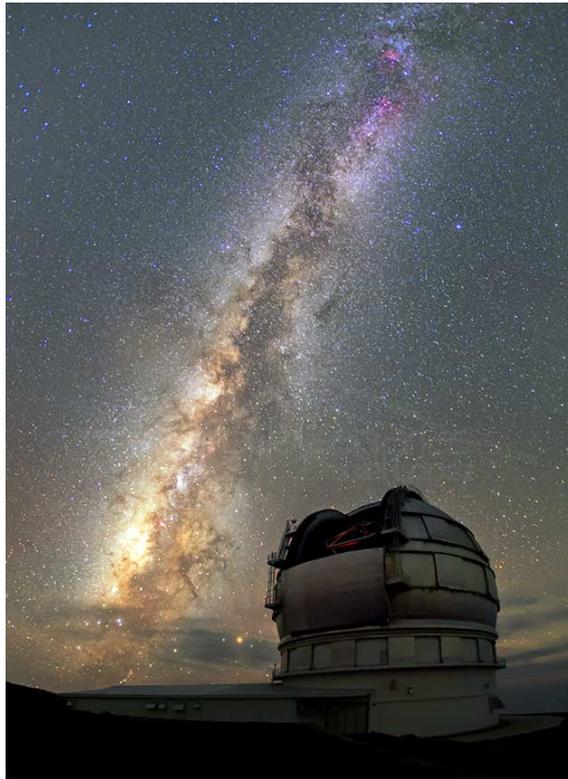


Figura 7.1: La via lattea vista dall'osservatorio di La Palma

Riferimenti bibliografici

- [1] L. Ciotti. *Appunti di Astrofisica Extragalattica*.
- [2] D. Dallacasa. *Appunti di Processi di Radiazione e MHD*.
- [3] P. Focardi. *Appunti di Storia dell'astronomia*.
- [4] F. Bosch H. Mo and S. White. *Galaxy Formation and Evolution*, 2010.
- [5] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, and K. J. Donner. *Fundamental Astronomy*, 2017.