

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

Formazione delle galassie

Presentata da:
Tommaso Carpillo

Relatore:
Chiar.ma Prof.ssa
Marcella Brusa

Anno Accademico 2021/2022

Sommario

Le galassie sono componenti fondamentali alla base della struttura dell'universo, lo studio riguardante la loro formazione è quindi di centrale importanza per la completa comprensione di ciò che ci circonda.

Lo scopo di questo elaborato è quello di spiegare i principali modelli conosciuti di formazione delle galassie, partendo da un'introduzione nella quale si presenteranno le informazioni necessarie per la corretta comprensione dei fenomeni. Il corpo centrale dell'elaborato si focalizzerà sull'analisi dei modelli di formazione delle varie componenti che costituiscono le galassie, includendo una breve trattazione sulla nascita dei buchi neri primordiali.

In conclusione si presenterà un possibile modello di formazione della Via Lattea, ottenuto tramite evidenze osservative.

Indice

1	Definizione e classificazione delle galassie	4
1.1	Il problema della distanza delle galassie: da Kant a Hubble	4
1.2	Classificazione morfologica delle galassie	5
1.3	Parametri principali	7
2	Il contesto cosmologico	7
2.1	Il modello Λ CDM	8
2.2	Breve storia del nostro universo	9
3	Modelli di formazione delle galassie	10
3.1	Formazione degli sferoidi	11
3.1.1	Collasso monolitico	11
3.1.2	Merging	12
3.1.3	Modello ibrido	12
3.2	Formazione dei dischi	13
3.3	Formazione dei bracci a spirale	14
3.4	Formazione dei buchi neri primordiali	15
4	Considerazioni sulla Via Lattea	17
5	Conclusioni	18

1 Definizione e classificazione delle galassie

1.1 Il problema della distanza delle galassie: da Kant a Hubble

La parola **galassia** deriva dal termine greco $\gamma\alpha\lambda\alpha\xi\iota\alpha\varsigma$ (*galaxias*) che significa “di latte” o “latteo”, in riferimento al colore che assume la nostra galassia se osservata a occhio nudo. La scoperta di questi oggetti astronomici può essere ricondotta alla metà del diciassettesimo secolo, periodo durante il quale gli venne dato il nome di *nebulae*.

Nel 1755 Immanuel Kant fu tra i primi a formulare una teoria nel tentativo di spiegare perché la luce di questi oggetti apparisse particolarmente “sfocata” se osservata dalla Terra. Secondo Kant, che a sua volta si era ispirato a una teoria dell’astronomo inglese Thomas Wright, le galassie apparivano così nebuloose in quanto si sarebbe trattato di veri e propri sistemi esterni alla Via Lattea, una sorta di “*universi isola*” separati da enormi distanze. La prima catalogazione si deve a Charles Messier che dal 1771 iniziò a identificare diversi di questi oggetti associando ad ognuno la lettera M seguita da un numero.

La vera rivoluzione relativa al dibattito sulle *nebulae* e la loro posizione arriverà però non prima di un secolo dopo, verso la fine del 1800, grazie all’avvento dell’astrofotografia che permise di catturare immagini sempre più precise e dettagliate. Con lo sviluppo di questa tecnologia, fondamentale per le osservazioni, si poterono gettare le basi per uno dei più grandi dibattiti della storia dell’astronomia.

La mattina del 26 aprile del 1920 gli astronomi **Harlow Shapley** e **Heber Curtis** discussero pubblicamente a proposito della questione sulla distanza delle *nebulae*, presentando i loro punti di vista diametralmente opposti. Shapley riteneva che l’intero universo fosse limitato alla Via Lattea e che le *nebulae* osservate nei secoli precedenti semplicemente ne facessero parte, portando avanti un’idea comune alla quasi totalità degli scienziati dell’epoca, probabilmente spinti inconsciamente dal desiderio di contenere le dimensioni dell’universo.

Dal canto suo Curtis era invece più a favore della visione kantiana delle *nebulae* come oggetti separati dalla nostra galassia, una visione che avrebbe avuto come conseguenza un aumento esponenziale delle dimensioni dell’universo.

La risposta definitiva a questo dibattito arrivò solo pochi anni dopo nel 1923, quando **Edwin Hubble** osservò per la prima volta una stella variabile nella galassia di Andromeda appena percettibile sulle lastre fotografiche, con un periodo di variazione piuttosto lungo, pari a 31 giorni. Qualche anno prima l'astronoma **Henrietta Levitt** aveva dimostrato che per le stelle variabili esiste una legge di proporzionalità diretta tra il periodo e la luminosità intrinseca massima, permettendo ad Hubble di stimare un valore elevato per la luminosità della stella variabile da lui osservata. Conoscendo luminosità apparente e intrinseca, legate alla distanza da un'equazione matematica, Hubble fu in grado di calcolare quest'ultima quantità per la sua stella, e di conseguenza della galassia a cui apparteneva, collocandola a un milione di anni luce, ben al di fuori del raggio della Via Lattea stimato dallo stesso Shapley.

1.2 Classificazione morfologica delle galassie

Risolto il mistero dietro alla distanza delle galassie, Hubble si dedicò all'osservazione di questi oggetti per poi realizzarne una classificazione morfologica nel 1926.

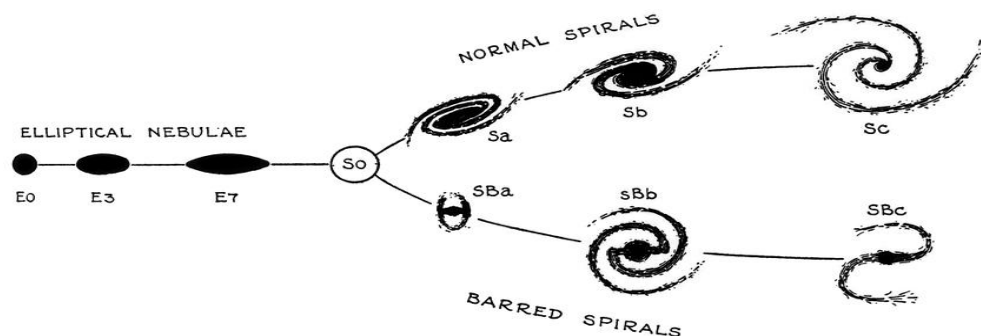


Figura 1: *La classificazione originale di Hubble*

Le principali galassie osservabili vennero divise da Hubble in quattro categorie: **ellittiche**, **lenticolari**, **a spirale** e **irregolari** ordinate in sequenza partendo da quelle definite *early type* fino a quelle denominate *late type* seguendo un modello **evoluzionistico** secondo cui le galassie cambiavano forma nel tempo. Ognuna di queste tipologie presenta caratteristiche differenti:

1. **Galassie ellittiche**, le prime nel modello evolucionistico di Hubble, sono caratterizzate da una più o meno evidente forma ellittica. Queste galassie variano tra di loro principalmente nell'aspetto e sono classificate sulla base del parametro chiamato **ellitticità** definito come:

$$\epsilon = 1 - \frac{b}{a} \quad (1)$$

dove a e b sono rispettivamente l'asse maggiore e minore della galassia ellittica. I valori dell'ellitticità sono compresi tra 0 e 1 e moltiplicandoli per 10 si ottiene il parametro n con cui si distinguono le varie galassie ellittiche tramite la nomenclatura "En". Di conseguenza le galassie E0 risulteranno visibili in cielo quasi come delle circonferenze, mentre quelle E7 saranno caratterizzate da una forma più "schacciata". Ad oggi si sa inoltre che queste galassie contengono al loro interno *buchi neri super massivi* aventi 10^{-3} volte la massa stellare della galassia a cui appartengono. Sono anche caratterizzate da una popolazione stellare molto vecchia che spiega come mai non sia possibile osservare supernovae di tipo II, in favore invece di quelle di tipo Ia che nascono dall'interazione di due nane bianche, ovvero stelle già uscite dalla main sequence. Infine il fenomeno di formazione stellare è molto raro e il gas al loro interno è caldo.

2. **Galassie lenticolari**, rappresentate con la sigla S0, nella classificazione di Hubble sono disposte tra quelle ellittiche e quelle a spirale. Similmente alle prime non presentano alcun tipo di struttura a spirale ma, come le seconde, sono composte da un disco sottile costituito prevalentemente da stelle.
3. **Galassie a spirale**, caratterizzate dalla presenza di una struttura a spirale più o meno definita nel disco, sono costituite da una parte centrale chiamata **bulge**, simile a una galassia ellittica da un punto di vista morfologico, e da una struttura a **disco** con spessore variabile che viene divisa in **thin disk** e **thick disk**. Infine il disco è immerso in un alone stellare, in inglese **halo**. Queste galassie sono divise a loro volta in diverse sottocategorie. Una prima distinzione le separa in galassie **a spirale normale (S)** o **a spirale barrata (SB)**, a seconda della forma della struttura centrale, mentre un'ulteriore classificazione le divide sulla base di diverse quantità, come l'avvolgimento dei bracci e la grandezza del bulge stesso, in tre categorie identificate con le lettere dalla a alla c dove l'ordine alfabetico corrisponde a una diminuzione delle caratteristiche appena descritte. Ad oggi si sa che questa tipologia di galassie è caratterizzata da una popolazione molto giovane di stelle

nel disco per via delle grandi quantità di gas freddo e idrogeno neutro presenti, entrambi fondamentali per l'innesco del processo di formazione stellare.

4. **Galassie irregolari**, non rientrano in nessuna delle categorie precedenti. Hubble inizialmente non le incluse nella sua classificazione, mentre ad oggi sono considerate come una sorta di estensione delle galassie a spirale.

1.3 Parametri principali

In generale le galassie sono sistemi mantenuti dalla forza di gravità, composti da: stelle, mezzo interstellare, resti di stelle e materia oscura. Oltre alla classificazione morfologica di Hubble, possono essere descritte ulteriormente da tre quantità principali:

1. **Massa**, generalmente compresa tra le 10^7 e le 10^{12} masse solari. Al di sotto di questo range si parla di *ammassi globulari*, mentre al di sopra si parla di *ammassi di galassie*.
2. **Dimensioni**, misurate tramite il **raggio effettivo** (R_e), ovvero il raggio entro cui è compresa la metà del flusso luminoso totale proveniente dalla galassia, che è incluso nel range: $100\text{pc} < R_e < 50\text{kpc}$.
3. **Dispersione di velocità** (σ), quantità con cui si misura il moto delle stelle in una galassia, generalmente racchiusa nell'intervallo di valori: $30\text{km/s} < \sigma < 400\text{ km/s}$

2 Il contesto cosmologico

Una volta definiti i protagonisti del racconto, prima di procedere oltre, è necessario specificare il palcoscenico in cui la storia prende piede, ovvero il contesto cosmologico all'interno del quale avviene la formazione delle galassie. La **cosmologia** è la scienza che ha come oggetto lo studio dell'universo nel suo insieme dando particolare importanza alla sua nascita ed evoluzione. Per interpretare l'universo, i cosmologi hanno ideato diversi "modelli", ma quello che attualmente risulta essere il più attendibile è il cosiddetto **modello cosmologico standard**, in quanto è quello che riesce al meglio a spiegare diversi fenomeni osservati come la **cosmic microwave background** o l'espansione dell'universo teorizzata dallo stesso Hubble.

2.1 Il modello Λ CDM

Il modello Λ CDM è lo schema migliore per spiegare la cronologia degli eventi dopo il Big Bang e per capire come nascono le enormi e complicate strutture che sono le galassie. Si tratta di un modello cosmologico basato sull'assunto per cui l'universo può essere considerato **omogeneo** e **isotropo** su scale sufficientemente grandi; l'84% della materia che costituisce l'universo sarebbe **materia oscura fredda**. I candidati migliori per identificare la materia oscura sono i così detti **relicti termici**, particelle che nelle epoche iniziali dell'universo si trovavano in equilibrio con la radiazione da cui si sono successivamente disaccoppiate.

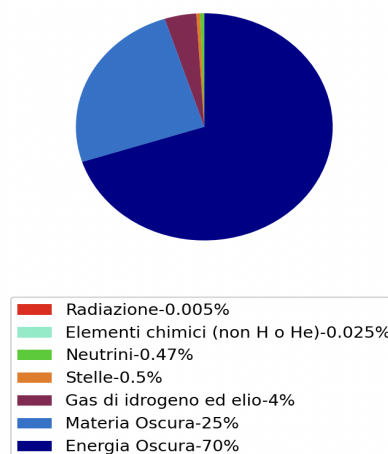
Questi relicti possono classificarsi sulla base della loro velocità termica, in particolare il modello cosmologico preso in considerazione prende il nome proprio dalla materia oscura più fredda chiamata **Cold Dark Matter (CDM)** che sarebbe alla base della formazione di strutture di dimensione dell'ordine delle galassie.

Al contrario ad esempio della **Hot Dark Matter (HDM)**, la materia oscura fredda potrebbe essere costituita da particelle più massive generalmente identificate come **Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)** la cui velocità termica risulta essere trascurabile rispetto a quella delle particelle di HDM, che si aggira intorno a valori superiori ai 100 km/s, impedendogli di essere attratte gravitazionalmente su scala galattica.

La lettera Λ , nel nome del modello, fa riferimento alla **costante cosmologica**, ovvero a un termine che viene introdotto nelle equazioni con l'intento di accordare la teoria formulata per descrivere il nostro universo con i dati ottenuti dalle osservazioni, ed è associata all'**energia oscura**.

In definitiva l'universo, secondo il modello Λ CDM, è da considerarsi costituito da un 70% di **energia oscura**, un 25% di **materia oscura**, un 5% circa di **barioni** e una frazione trascurabile di fotoni e neutrini. Per comprendere al meglio questo modello è però necessario fare un passo indietro all'inizio del tempo.

Componenti principali dell'universo secondo il modello cosmologico standard



2.2 Breve storia del nostro universo

A pochi istanti dal Big Bang la materia barionica era completamente ionizzata e accoppiata con i fotoni. In questo periodo l'universo era totalmente opaco in quanto i fotoni non potevano propagarsi liberamente per via dei continui processi di scattering Thomson con gli elettroni liberi.

Con il passare del tempo l'universo iniziò ad espandersi causando quindi un calo di temperatura e densità che ha permesso, a circa 3 minuti dal Big Bang, la **nucleosintesi primordiale** ovvero la formazione di litio e elio.

A circa 400 000 anni dal Big Bang, gli effetti di scattering Thomson divennero trascurabili permettendo ai fotoni di propagarsi liberamente. Proprio da questo periodo ha origine la già citata cosmic microwave background, ovvero l'istantanea più antica possibile del nostro universo. Sempre durante quest'ultima fase, le temperature e le densità erano calate sufficientemente da permettere la nascita di atomi neutri dalla ricombinazione di idrogeno, elio e litio con gli elettroni, nell'epoca della **ricombinazione cosmologica**. Successivamente, ebbe inizio il periodo chiamato **dark ages** in cui l'universo era costituito solamente da **materia oscura** e gas neutro, che si estende da circa 400 000 a 100 milioni di anni dopo il Big Bang. Quest'ultima epoca si conclude con la formazione dei primi oggetti luminosi, le stelle di popolazione III, la cui forte radiazione ultravioletta cominciò a ionizzare il gas che le circondava nella così detta fase di **reionizzazione**.

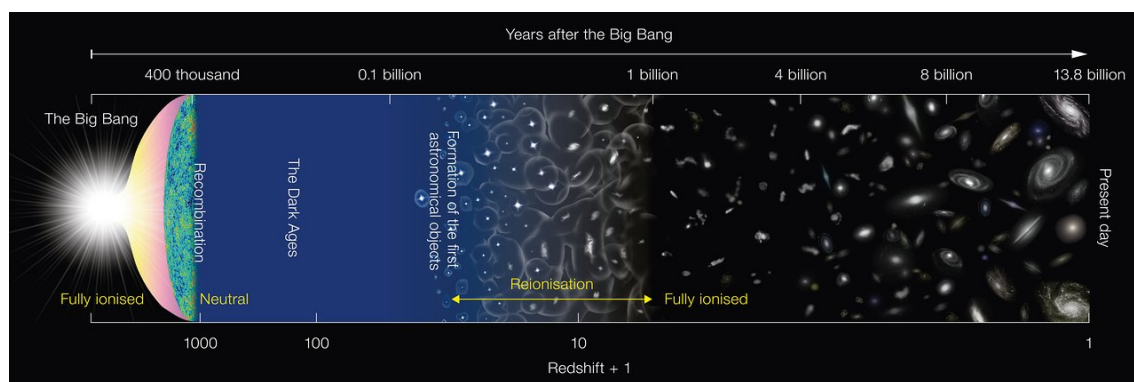


Figura 2: *Linea temporale di vita dell'universo*

Le prime galassie cominciarono ad apparire circa un centinaio di milioni di anni dopo il Big Bang da aloni di materia oscura con massa equivalente a 10^8 masse solari. Nel modello Λ CDM, quest'ultimi si sono formati dal collasso di materia oscura fredda in regioni in cui l'attrazione gravitazionale è stata in grado di superare l'espansione dell'universo. Inizialmente piccoli, questi aloni sono cresciuti anche grazie all'unione con altri simili creando l'ambiente in cui poi si sono formate le prime galassie, tramite il così detto **merging gerarchico**.

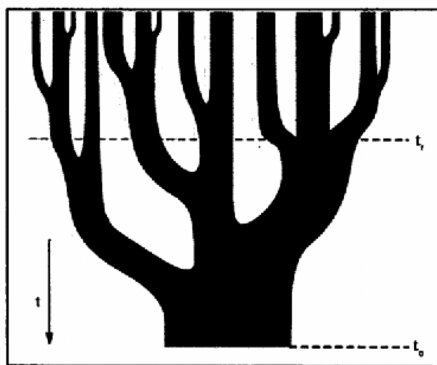


Figura 3: *Schema del fenomeno del merging che porta alla formazione di aloni materia oscura più grandi a partire da diversi più piccoli. Il tempo scorre dall'alto verso il basso.*

3 Modelli di formazione delle galassie

Le galassie cominciarono a formarsi dal collasso di zone con alta densità caratterizzate prevalentemente da materia oscura e in minor parte anche da una componente barionica, tendenzialmente gas primordiale. Diversamente da come si formano gli aloni di materia oscura, i quali possono interagire solo gravitazionalmente (si veda paragrafo 2.2), il gas essendo composto da materia barionica, si raffredda emettendo radiazione e formando le stelle che andranno a comporre le galassie. In questa sezione si tratterà la formazione delle galassie presentando nel dettaglio diversi modelli per le principali componenti che le costituiscono, compresi i buchi neri solitamente presenti al loro interno.

3.1 Formazione degli sferoidi

Con il termine **sferoidi** si fa riferimento al bulge delle galassie a spirale e lenticolari ma anche alla componente principale di stelle delle galassie ellittiche. Entrambi sono sistemi caratterizzati da distribuzioni di densità stellare ellissoidali e condividono diverse proprietà cinematiche e strutturali. Per la formazione degli sferoidi esistono due modelli principali.

3.1.1 Collasso monolitico

Il modello preso in considerazione, prevede la formazione degli sferoidi a partire dal collasso di una singola protogalassia. La versione più semplice di questo modello è quella del **collasso non dissipativo**, in cui si considera l'evoluzione di un sistema di stelle distribuite più o meno sfericamente, assumendo idealmente che la gravità sia l'unica forza in gioco. Il collasso non dissipativo è guidato dal processo di **rilassamento violento**, il quale consiste nella redistribuzione delle energie orbitali in un potenziale gravitazionale che varia sensibilmente nel tempo. Considerando invece gli effetti dissipativi, le simulazioni mostrano che il risultato si può ottenere solo con valori iniziali molto bassi del momento angolare; con valori più alti, infatti, si otterrebbe una struttura schiacciata più simile a un disco.

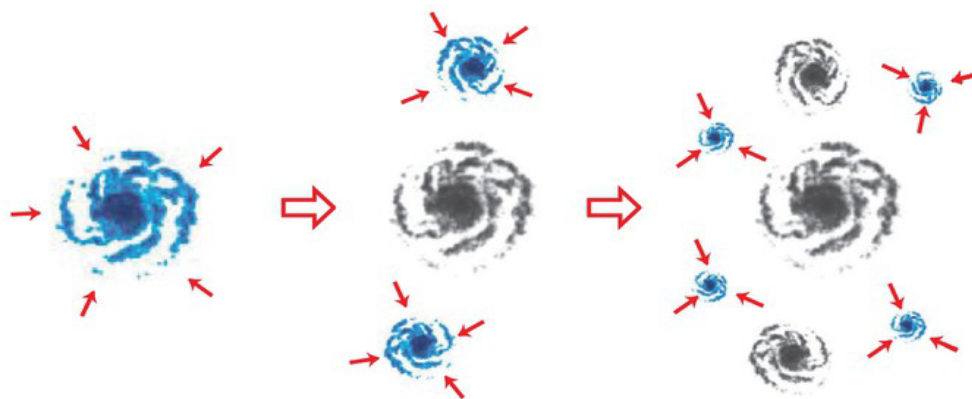


Figura 4: *Rappresentazione del collasso monolitico*

3.1.2 Merging

Questo modello, si basa sull'unione di almeno due galassie a spirale di massa simile che danno come risultato uno sferoide. Durante l'unione, l'energia cinetica ordinata del disco viene trasformata in energia cinetica casuale che quindi trasforma le galassie a spirale, supportate dalla rotazione ordinata delle loro componenti, in sistemi tenuti insieme dalla pressione, come i bulge o le galassie ellittiche stesse. Anche in questo caso, la versione più semplice del modello è non dissipativa, dove quindi si considerano galassie con poco gas e formazione stellare trascurabile, ma le simulazioni a N corpi ci mostrano che può essere implementato anche il caso dissipativo con risultati simili.

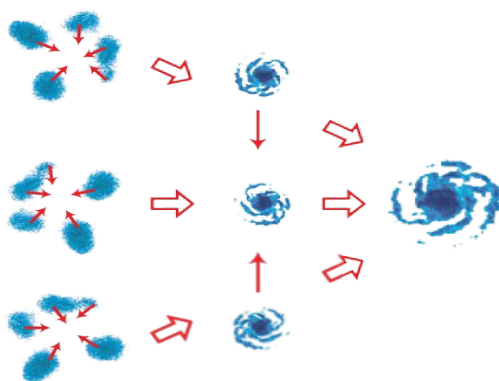


Figura 5: *Rappresentazione del fenomeno di merging*

3.1.3 Modello ibrido

Entrambi i modelli appena presentati possono a volte risultare troppo approssimativi per la corretta descrizione dei processi che avvengono realmente. Una versione più accurata la si può però ottenere dall'unione delle caratteristiche di entrambi. Questo metodo, detto appunto **ibrido**, può essere essenzialmente diviso in due fasi:

1. prima fase di formazione stellare che avviene “**in situ**” nell’alone progenitore tramite merge dissipativi o per via dell’alta instabilità del disco di gas, tendenzialmente ad alti redshift.
2. seconda fase di formazione stellare “**ex situ**” in cui si ha un aumento della massa stellare totale dato da fenomeni di merging non dissipativo con stelle di altre galassie, tendenzialmente a valori di redshift minori.

3.2 Formazione dei dischi

Le galassie a disco sono strutture piatte supportate dalla rotazione delle loro componenti barioniche. La rotazione viene inizialmente acquisita dagli aloni di materia oscura i quali, non essendo sferici ma bensì degli ellissoidi triassiali, subiscono le forze mareali generate dalla distribuzione non omeogenea di massa che li circonda. Per quantificare la rotazione degli aloni si utilizza un termine chiamato **parametro di spin**:

$$\lambda = \frac{J|E|^{1/2}}{GM_{\Delta}^{5/2}} \quad (2)$$

dove J è l'intensità del momento angolare, E è l'energia totale e M_{Δ} è la massa viriale dell'alone. Un sistema non rotazionale avrà $\lambda = 0$, mentre un disco in rotazione avrà $\lambda \simeq 0.4$. Il disco si forma partendo dall'attrazione gravitazionale che subisce la materia barionica da parte dell'alone. Inizialmente il gas si scalda fino a raggiungere la temperatura dell'alone di materia oscura. Il processo fondamentale che porta alla formazione del disco è il **collasso dissipativo** del gas il quale, al contrario della materia oscura che conserva la sua energia, tende invece a perderla raffreddandosi, provocando quindi la sua contrazione. Unendo questa considerazione alla conservazione del momento angolare totale, si ottiene perciò che la nube di gas si stabilizza in un disco rotante il cui piano è perpendicolare alla direzione originale del momento angolare. Con il tempo sempre più gas si raffredda e nelle zone più dense all'interno cominciano i processi di formazione stellare. La stabilità del disco è rappresentata dal parametro Q :

$$Q \sim E_{kinetic}/E_{grav} \quad (3)$$

dove per valori di $Q > 1$ il disco è mantenuto stabile dall'energia cinetica che si oppone in maniera efficiente al collasso gravitazionale, mentre per valori di $Q < 1$ il disco è instabile e si frammenta in parti più piccole.



Figura 6: Immagine della galassia NGC 891 in cui risulta evidente la struttura a disco.

3.3 Formazione dei bracci a spirale

L'effettivo processo di formazione dei bracci a spirale non è stato ancora del tutto compreso. Esistono però diverse teorie e modelli in grado di giustificare alcune principali evidenze osservative:

1. Le Galassie lenticolari (S0), che non sono costituite da un disco di gas freddo, tendenzialmente non presentano i bracci a spirale.
2. Se i bracci a spirale fossero costituiti da gas e stelle, dovrebbero allungarsi nella direzione di rotazione per poi eventualmente sparire, come evidenziato dal **winding problem**.

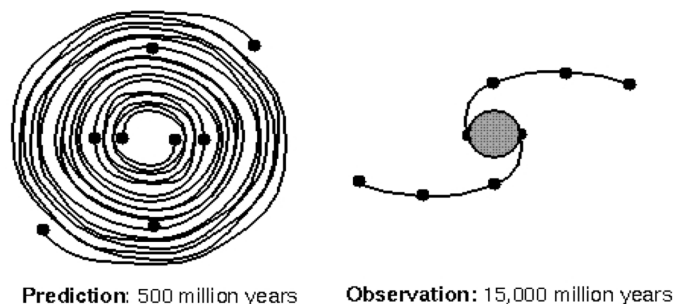


Figura 7: *Rappresentazione schematica del winding problem*

La prima osservazione lascia intuire che il disco composto da gas freddo deve avere una qualche influenza sulla formazione dei bracci a spirale, mentre la seconda permette di affermare che la tipica struttura a spirale non può essere formata da materia.

Il modello attualmente più accreditato è quello che descrive i bracci a spirale come “**density waves**”, secondo la teoria originale descritte come onde stazionarie con un tempo di persistenza paragonabile al tempo di Hubble t_H , ovvero il tempo di vita dell’universo.

Queste onde sarebbero delle zone ad alte densità che si muovono più lentamente delle stelle e del materiale interstellare che compone il disco nelle quali, per via delle condizioni di densità presenti, si ha il fenomeno della formazione stellare.

Un altro modello è chiamato **swing amplifier**, secondo il quale i bracci a spirale avrebbero un tempo di vita significativamente più breve e nascerebbero da una conformazione iniziale a spirale che diventa instabile con il tempo “oscillando” verso la conformazione a spirale finale.

3.4 Formazione dei buchi neri primordiali

Una frazione delle galassie che popolano attualmente l’universo mostra attività nel nucleo, osservabile sotto forma di radiazione in diverse bande dello spettro elettromagnetico, che non può essere spiegata dai normali processi di formazione stellare. Questa radiazione è attribuita agli **Active Galactic Nuclei (AGN)** e l’origine della maggior parte delle emissioni deriverebbe da un buco nero super massivo all’interno delle galassie.

Nel corso del tempo sono state osservate diverse relazioni tra alcune caratteristiche degli sferoidi delle galassie e la massa del buco nero contenuto al loro interno. Sappiamo ad esempio che esiste una proporzionalità lineare tra la massa del buco nero e la massa stellare dello sferoide, conosciuta come **Magorrian relation**:

$$\mathcal{M}_\bullet \propto \mathcal{M}_\star \quad \text{con} \quad \mathcal{M}_\bullet/\mathcal{M}_\star \approx 0.001 - 0.005 \quad (4)$$

ma anche una legge che lega la massa del buco nero con la dispersione di velocità nelle zone più centrali dello sferoide:

$$\log\left(\frac{\mathcal{M}_\bullet}{10^8 \mathcal{M}_\odot}\right) = B_\bullet + b_\bullet \left(\frac{\sigma_0}{200 \text{ km s}^{-1}}\right) \quad \text{con} \quad 4 \lesssim b_\bullet \lesssim 5 \quad \text{e} \quad B_\bullet \approx 0.5. \quad (5)$$

Questo ci permette di affermare che probabilmente le galassie e i buchi neri hanno condiviso il loro processo di evoluzione nel tempo. Inoltre *quasi stellar objects*, la tipologia di AGN con la luminosità bolometrica più elevata, sono stati osservati fino a redshift maggiori di 7 e i loro buchi neri hanno masse dell’ordine di $10^{8-9} \mathcal{M}_\odot$, quindi il processo di accrescimento con cui le hanno raggiunte deve essere stato molto efficiente. Le nostre conoscenze a riguardo possono essere riassunte essenzialmente da tre modelli:

1. Nella prima ipotesi si pensa che i “semi” dei buchi neri siano costituiti da circa $100 \mathcal{M}_\odot$ di resti di **stelle di popolazione III**. Il principale problema di questo modello è il forte feedback di queste stelle che rimuoverebbe grandi quantità di gas tramite fotoionizzazione e fotoevaporazione. Di conseguenza i “semi” sarebbero localizzati in zone a bassa densità dove il collasso di gas non potrebbe avvenire a velocità sufficienti per la formazione di un buco nero agli alti redshift osservati.

L'unica soluzione per questo modello sarebbe supporre condizioni locali specifiche in grado di soddisfare i requisiti del regime di accrescimento di Eddington:

$$\dot{\mathcal{M}}_{Edd} \equiv \frac{L_{Edd}}{\epsilon_{rad} c^2} \quad (6)$$

dove ϵ_{rad} è l'efficienza radiativa dell'AGN. Il risultato è un buco nero con $\mathcal{M}_\bullet \sim 10^2 \mathcal{M}_\odot$.

2. La seconda ipotesi vede i buchi neri nascere dal rapido collasso **globale** di grandi nubi di gas nelle regioni più interne, quando quest'ultime diventano instabili per via di una velocità rotazionale insufficiente. Questo conduce all'accumulo di gas nel centro che può portare alla formazione di un'unica **stella super massiva** con massa fino a $10^6 \mathcal{M}_\odot$. Dalle simulazioni sappiamo che, una volta esaurito il bruciamento dell'idrogeno, la contrazione nel nucleo all'interno di stelle di questo tipo può portare alla nascita di un buco nero con $\mathcal{M}_\bullet \sim 10^5 \mathcal{M}_\odot$.
3. Nell'ultimo caso, simile al precedente, si ha sempre a che fare con il collasso di grandi nubi di gas ma questa volta su scala **locale**. Il risultato è un **ammasso stellare** molto denso che, tramite merging, andrà a formare nuovamente una stella super massiva il cui collasso produrrà infine un buco nero con $\mathcal{M}_\bullet \sim 10^3 \mathcal{M}_\odot$ [7].

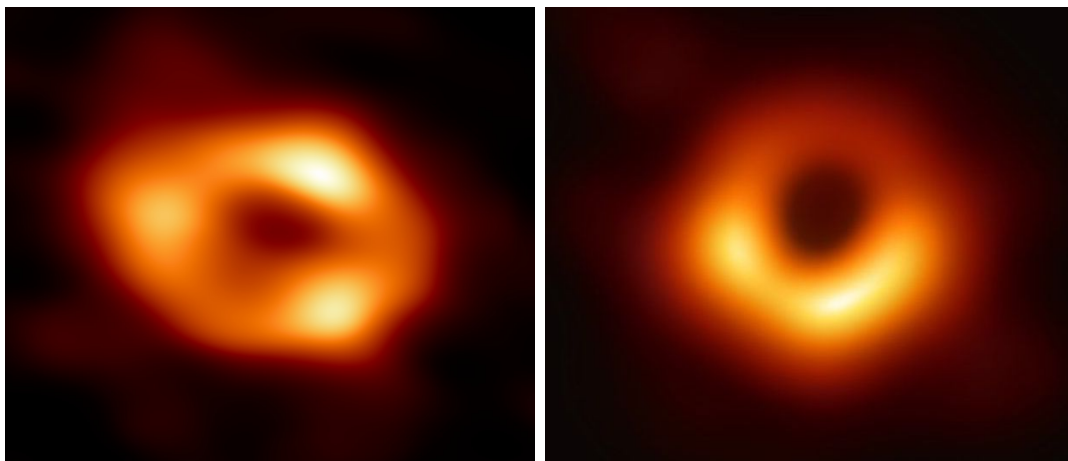


Figura 8: A sinistra Sagittarius A*, il buco nero al centro della nostra galassia, a destra il primo buco nero mai osservato, situato al centro della galassia M87.

4 Considerazioni sulla Via Lattea

Avendo spiegato i principali metodi di formazione delle componenti galattiche, si possono ora fare delle considerazioni sulla formazione della galassia che ospita il sistema solare: la **Via Lattea**. Si tratta di una galassia a spirale barrata SBc con massa nell'ordine delle $10^{12}M_{\odot}$ e un diametro di circa 27 kpc.

Lo studio della composizione chimica delle stelle presenti nella galassia è fondamentale per capirne la formazione, in quanto esistono diversi parametri in grado di rivelare informazioni fondamentali. Tra questi, l'esame della **metallicità** risulta essere uno dei più rilevanti. La presenza di metalli, tendenzialmente, può essere evidente in stelle più giovani formatesi in un gas diverso da quello primordiale, composto invece solo da idrogeno ed elio. Il risultato di questa analisi mostra come la Via Lattea sia un esempio perfetto del perché la separazione netta dei processi di formazione in collasso monolitico e merging possa essere a volte una semplificazione eccessiva, a favore invece dell'ipotesi di un modello di formazione ibrido. La metallicità delle stelle della Via Lattea (si veda Figura 9), infatti, ci racconta di una prima formazione dell'alone seguita da quella del disco, in concordanza con il collasso monolitico. Allo stesso tempo però, la distribuzione dell'abbondanza stellare differisce tra il thin disk e il thick disk, lasciando presumere che quest'ultimo possa essersi formato dall'unione con una o più galassie satellite, con diversa formazione stellare, in accordo con il modello del merging [6].

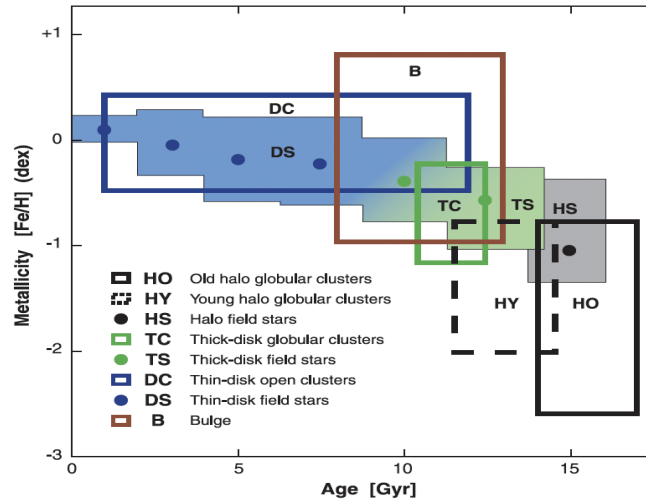


Figura 9: *Relazione metallicità-età per le diverse componenti della Via Lattea.*

5 Conclusioni

Come evidenziato nell'elaborato, lo studio della formazione delle galassie è un campo della ricerca astronomica ancora costellato di dubbi e incertezze. Se da un punto di vista scientifico questo può essere visto come una carenza, assumendo una differente prospettiva, ciò può essere interpretato come un'opportunità per sviluppare nuove tecnologie al servizio di future osservazioni, potenzialmente in grado di aiutare a comprendere anche ciò che ora risulta quasi totalmente sconosciuto.

Esistono comunque modelli, ottenuti grazie alle simulazioni, in grado di svelare a poco a poco quell'intricato mistero che è l'universo in cui viviamo, ma l'unico modo per perfezionare la conoscenza è tramite la ricerca e lo sviluppo di nuove tecnologie all'altezza degli interrogativi che si presenteranno di volta in volta.

Il recente lancio del **James Webb Space Telescope** è sicuramente un enorme passo avanti in questo senso e chissà se proprio grazie a lui il futuro delle nostre conoscenze, su come i blocchi fondamentali dell'universo nascono e si sviluppano, potrà finalmente diventare più chiaro.



Figura 10: Immagine della Via Lattea catturata nei pressi dell'Atacama Large Millimeter Array in Chile.

Bibliografia

- [1] BALBI A., PICCIONI R. *Cosmicomic*. Codice Edizioni, 2021.
- [2] CIMATTI A. *Slide del corso Galaxy Formation and Evolution*. 2022.
- [3] CIMATTI A., FRATERNALI F., NIPOTI C. *Introduction to galaxy formation and evolution: From Primordial Gas to Present-Day Galaxies*. Cambridge University Press, 2020.
- [4] CIOTTI L. *Appunti corso di Astrofisica Extragalattica*. 2022.
- [5] FOCARDI P. *L'uomo e il cosmo*, prima edizione ed. 1088press, 2019.
- [6] KARTTUNEN H., KRÖGER P., OJA H., POUTANEN M., DONNER K.J. *Fundamental Astronomy*, fifth edition ed. Springer, 2007.
- [7] VIGNALI C. *Slide del corso Active Galactic Nuclei and Supermassive Black Holes*. 2022.