

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

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

Formazione delle galassie

Presentata da:
Caterina Liboni

Relatore:
Chiar.ma Prof.ssa
Marcella Brusa

Anno Accademico 2021/2022

Sommario

Le galassie sono strutture che popolano l'universo e i primi studi riguardanti la loro formazione e composizione risalgono a qualche secolo fa.

Nella seguente trattazione si illustreranno i principali metodi di classificazione in base alla configurazione morfologica oppure rispetto ad altre proprietà caratteristiche.

Al fine di comprendere al meglio i modelli teorici in grado di dare una spiegazione su come si siano originate le galassie, si esporranno le fasi fondamentali dell'evoluzione dell'universo e le proprietà della materia oscura.

Infine ci si soffermerà su un particolare modello di formazione e sull'influenza che può avere riguardo ai buchi neri all'interno delle galassie.

Indice

1	Cosa sono le galassie	4
1.1	Classificazione delle galassie	4
1.1.1	Galassie ellittiche	5
1.1.2	Galassie a spirale	6
1.1.3	Galassie lenticolari	7
1.1.4	Galassie irregolari	7
2	Condizioni iniziali per la formazione di galassie	8
2.1	Dal Big Bang alle prime galassie	8
2.2	Materia oscura	9
2.3	Modello Λ -CDM	10
3	Modelli di formazione delle galassie	11
3.1	Formazione dei bracci a spirale	11
3.2	Modelli di formazione degli sferoidi	12
3.2.1	Collasso monolitico	12
3.2.2	Merger	13
3.2.3	Nuovo modello di formazione	14
4	Merging di galassie	15
4.1	Proprietà dei residui di merging	16
4.2	Merging di buchi neri supermassivi	17
5	Conclusioni	18

1 Cosa sono le galassie

Le galassie sono strutture legate gravitazionalmente costituite da stelle, polveri, gas, resti di stelle e materia oscura.

Esse sono caratterizzate da tre valori fondamentali:

1. la **massa**, la quale si trova in un intervallo che va da $10^7 M_{\odot}$ a $10^{12} M_{\odot}$ dove con M_{\odot} si intende una massa solare;
2. la **dimensione**, che viene misurata attraverso il suo **raggio effettivo** R_e , raggio entro il quale è contenuta metà della luminosità totale. Esso può spaziare da 100 pc a 50 kpc;
3. la **dispersione di velocità** σ , che definisce il moto delle stelle all'interno della galassia e varia tra 30 km/s e 400 km/s.

1.1 Classificazione delle galassie

La prima classificazione delle galassie venne teorizzata da Hubble nel 1926. Egli riteneva che le galassie seguissero uno schema evolutivo che le portava a variare la loro morfologia nel tempo, ovvero che nascessero come ellittiche e diventassero successivamente a spirale. Secondo la sua classificazione, le galassie vengono divise in quattro macrocategorie: **galassie ellittiche** (early type), **galassie a spirale** (late type), **galassie lenticolari** e **galassie irregolari**. Successivamente i coniugi De Vaucouleurs aggiunsero nuove categorie rispetto a quelle definite da Hubble, come le galassie debolmente barrate, le galassie i cui bracci sono "spezzati" e le galassie considerate a disco, ma irregolari.

La classificazione può avvenire non solo in base alla morfologia, ma anche rispetto ad altri parametri come la luminosità, la brillantezza superficiale, il colore, il gas contenuto e il tasso di formazione stellare.

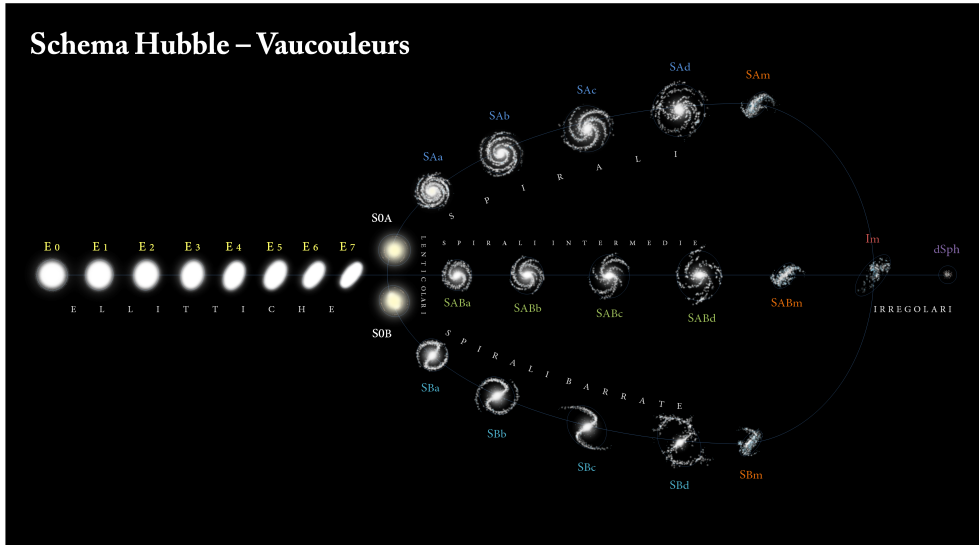


Figura 1: Classificazione delle galassie Hubble - De Vaucouleurs.

1.1.1 Galassie ellittiche

Le galassie ellittiche sono costituite principalmente da stelle molto vecchie che, in alcuni casi, possono avere anche la stessa età dell'universo. A causa della loro composizione stellare, in esse non si osservano "esplosioni" di supernovae di tipo II, nuova formazione stellare e gas freddo. Si notano invece diverse esplosioni di supernovae di tipo Ia che derivano dall'interazione tra due nane bianche, le quali sono stelle già uscite dalla sequenza principale.

La sottoclassificazione delle galassie ellittiche si basa sulla loro forma, ovvero su quanto essa si discosti da un'ellisse. È perciò necessario definire una variabile detta **ellitticità** espressa come

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

con b e a rispettivamente semiasse minore e semiasse maggiore dell'ellisse, che permetta di determinare quanto valga il discostamento. I valori dell'ellitticità variano da 0 a 1 e moltiplicandoli per 10 si ottengono gli indici che identificano le tipologie di galassie ellittiche.



Figura 2: Esempio di galassia ellittica gigante NGC 1316.

Le sottocategorie possono variare da E_0 , se hanno una forma quasi circolare, a E_7 , nel caso in cui abbiano l'aspetto più ellittico osservabile. Al centro di queste galassie si trova solitamente un buco nero supermassivo con una massa pari a $10^{-3} M_*$, dove M_* è la massa della galassia che lo contiene.

1.1.2 Galassie a spirale

Le galassie a spirale o a disco sono composte principalmente da stelle giovani. Questo è dovuto alla frequente formazione stellare che si svolge nel disco sottile, in particolare nei bracci della spirale ricchi di polveri e gas freddo come l'idrogeno neutro.



Figura 3: Esempio di galassia a disco M81.

Al centro di queste galassie si può chiaramente riconoscere un rigonfiamento, detto **bulge**, composto da stelle molto vecchie, ma con elevata metallicità. Al suo interno è presente un buco nero con una massa pari a 10^{-3} masse del bulge. Tutti gli elementi che compongono una galassia a spirale sono racchiusi nell'**alone** in cui risiedono anche stelle vecchie con la metallicità più bassa nella galassia.

Anche le galassie a spirale, come quelle ellittiche, possono essere suddivise in sottocategorie in base ad aspetti morfologici. Si possono infatti distinguere galassie a spirale o a spirale barrata e, in base all'avvolgimento dei bracci attorno al bulge e alla grandezza del bulge, si assegnano delle lettere dalla *a* alla *c*, dalla galassia con i bracci più avvolti e il bulge più grande fino a quella con i bracci meno avvolti e il bulge più piccolo.

1.1.3 Galassie lenticolari

Le galassie lenticolari sono una categoria intermedia tra le galassie ellittiche e quelle a spirale. Nella classificazione di Hubble vengono identificate con S0.

Non presentano bracci a spirale né regioni HII, ma sono composte da un disco sottile e un bulge predominante rispetto a quello presente nelle galassie a spirale. Possono anche avere una struttura con una barra centrale detta SB0.

1.1.4 Galassie irregolari

Le galassie irregolari sono solitamente caratterizzate da poche regioni HII a chiazze e per questo possono essere inserite nella stessa categoria delle late type insieme alle galassie a spirale.

2 Condizioni iniziali per la formazione di galassie

Gli eventi successivi al Big Bang hanno portato svariate modifiche all'universo nelle sue prime fasi, consentendo la formazione di oggetti luminosi come le galassie.

I cosmologi, al fine di fornire una motivazione sul verificarsi di tali fenomeni o sul perché l'universo abbia le caratteristiche osservate, hanno ideato dei modelli cosmologici. Il più accreditato attualmente è il modello Λ -CDM che sarebbe in grado di fornire una spiegazione attendibile riguardo a proprietà e caratteristiche dell'universo (si veda paragrafo 2.3).

Risulta perciò necessario, per garantire una corretta comprensione della formazione delle galassie, conoscere gli eventi che hanno portato l'universo a tali condizioni e definire la struttura cosmologica in cui si siano sviluppate.

2.1 Dal Big Bang alle prime galassie

Pochi istanti dopo il Big Bang, la materia barionica era completamente ionizzata e accoppiata con fotoni. L'universo immerso in questo fluido era opaco a causa del continuo scattering Thomson con gli elettroni liberi. Esso cominciò ad espandersi costringendo temperatura e densità a decrescere e, circa tre minuti dopo il Big Bang, iniziò la nucleosintesi primordiale di elementi più pesanti dell'idrogeno.

Dopo 400.000 anni dal Big Bang, sia temperatura che densità erano diminuite a tal punto da consentire la ricombinazione cosmologica, ovvero la nascita di atomi neutri. Nello stesso periodo l'universo diventò trasparente ed ebbero inizio i "Dark Ages", anni bui, in cui non erano ancora presenti oggetti in grado di emettere radiazione. Contemporaneamente si originò la radiazione cosmica di fondo, CMB (*cosmic microwave radiation*), la cui rilevazione ci consente di ottenere un'immagine dell'universo primordiale.

L'universo creatosi risultò costituito da materia oscura e gas neutro diffuso composto da idrogeno, elio e litio.

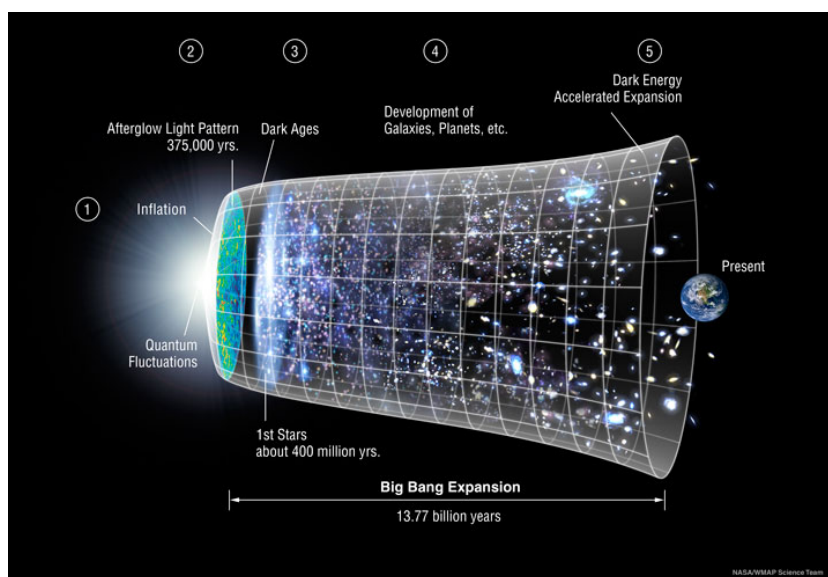


Figura 4: Evoluzione dell'universo.

L'evoluzione e il collasso di questo gas guidato dalla materia oscura, uno dei maggiori costituenti dell'universo, permise la formazione delle prime galassie.

Sebbene si conosca poco della materia oscura, essa è fondamentale per la formazione galattica poiché gli aloni ospitano i primi oggetti luminosi tra cui anche le galassie.

2.2 Materia oscura

Si definisce materia oscura la materia che non è rilevabile attraverso radiazione emessa o assorbita.

La materia oscura può essere suddivisa in barionica e non barionica; quest'ultima risulta essere il principale componente dell'universo. Le particelle più adatte a rappresentare la materia oscura sono i "relicti termici", particelle che erano in equilibrio termico con la radiazione nell'universo primordiale e che si sono successivamente disaccoppiate. Possono essere suddivise rispetto alla velocità termica con cui si sono disaccoppiate, perciò avremo materia oscura calda, fredda e temperata:

- la **materia oscura calda** (HDM : *Hot Dark Matter*) è composta da particelle relativistiche di piccola massa come i neutrini. Le elevate velocità impediscono loro di essere legate gravitazionalmente su scala galattica, perciò non vengono prese in considerazione per la formazione delle galassie;
- la **materia oscura fredda** (CDM : *Cold Dark Matter*) è costituita da particelle massive debolmente interagenti, WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*), non relativistiche aventi la possibilità di creare strutture su qualsiasi scala, perciò anche su quella galattica;
- la **materia oscura temperata** (WDM : *Warm Dark Matter*) è formata da particelle con massa intermedia tra neutrini di HDM e WIMPs. Esse riescono a creare strutture su piccola scala, risultando meno adatte alla formazione delle galassie.

2.3 Modello Λ -CDM

Il modello Λ -CDM, detto anche modello cosmologico standard, si basa sull'ipotesi che l'universo sia omogeneo e isotropo con una presenza dominante di materia oscura fredda, circa l'84%, rispetto a quella ordinaria. Gli aloni che permettono la formazione galattica si generano dal collasso gravitazionale di materia oscura fredda in regioni nelle quali la densità di materia è in grado di contrastare l'espansione dell'universo.

Il modello cosmologico standard è considerato il più valido poiché risulta in grado di spiegare il funzionamento dell'universo tenendo conto di dati osservativi come la radiazione cosmica di fondo alle microonde e l'espansione dell'universo.

Supponendo che il modello sia valido, è possibile ricavare i parametri cosmologici con estrema precisione. In particolare, applicandolo all'universo odierno, si trova che l'**energia oscura**, indicata con la lettera Λ , costante cosmologica, costituisce il **70%** del budget di energia-materia, mentre gli apporti della materia oscura e di quella barionica corrispondono rispettivamente al 25% e al 5%.

3 Modelli di formazione delle galassie

La prima formazione delle galassie è stata possibile grazie al collasso di materia oscura e gas nell'universo primordiale. Il gas presente negli aloni si raffreddò e iniziò a formare le stelle che avrebbero potuto portare ad uno sviluppo galattico.

Tutte le galassie che possiamo vedere ai giorni nostri sono il risultato di processi di formazione differenti che hanno creato le diverse morfologie.

Vari studi hanno teorizzato modelli per comprendere come si siano formate le galassie nell'universo. Attraverso la seguente trattazione verranno analizzati alcuni modelli di formazione dei bracci a spirale e degli sferoidi, componente principale delle galassie ellittiche e bulge delle galassie a disco, poiché formati attraverso lo stesso processo.

3.1 Formazione dei bracci a spirale

I bracci delle galassie a spirale non sono strutture materiali, ma onde di densità in cui si accumulano gas e stelle.

Attualmente non è stata definita un'unica teoria in grado di spiegare come si siano formate queste strutture, ma esistono alcune ipotesi.

La prima sostiene che le onde di densità siano quasi stazionarie e si propaghino nel disco come se fossero onde del mare. La loro persistenza nel sistema sarebbe paragonabile al tempo di Hubble, ovvero circa 14,4 miliardi di anni (superiore all'età dell'universo).

Altre ipotesi, come la "*swing amplifier*", sostengono invece che il tempo di vita dei bracci sia più breve e che la loro formazione sia dovuta ad una instabilità che avrebbe provocato un trascinarsi della spirale preesistente dando vita alla forma osservata. Nonostante non sia stata riscontrata nelle galassie reali, questa ipotesi risulta essere una soluzione accettabile per la teoria delle onde di densità.

3.2 Modelli di formazione degli sferoidi

Bulge e galassie ellittiche sono sistemi con una distribuzione di densità stellare ellissoidale mantenuti in equilibrio dalla pressione, invece che dalla rotazione come le galassie a disco. I modelli principali di formazione sono due:

1. **monolitico** : modello basato sul collasso gravitazionale di una singola protogalassia, ovvero un sistema progenitore composto da stelle, materia oscura e gas;
2. **gerarchico / merger** : modello basato sulla fusione di galassie preesistenti.

Oltre a questi due modelli negli ultimi anni è stato implementato un **terzo modello** dato dall'unione dei due precedenti che risulta essere al momento il più accreditato.

3.2.1 Collasso monolitico

Il collasso monolitico è uno scenario di formazione ideale poiché assume che le stelle all'interno del sistema si siano formate prima della virializzazione, perciò la gravità risulta essere l'unica forza agente in questo scenario.

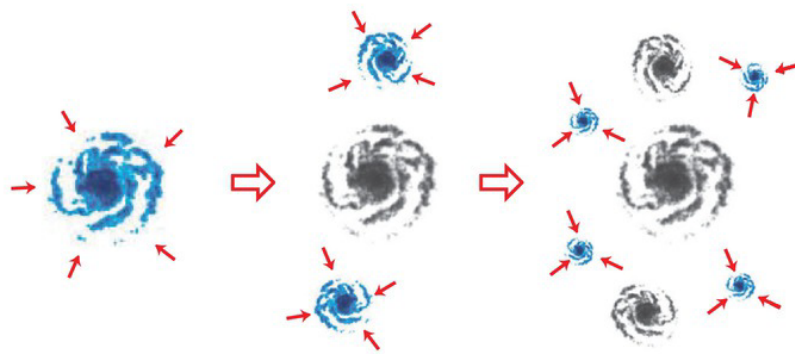


Figura 5: Collasso monolitico.

Il modello più semplice è il **collasso non dissipativo** (riferito ad un sistema privo di gas) che corrisponde ad una pura evoluzione gravitazionale di una distribuzione iniziale delle stelle all'incirca sferica con un'energia cinetica molto bassa. Durante il collasso, la materia si concentra maggiormente al centro della nube che, per la conservazione del momento angolare, aumenta la sua rotazione. Il gas, non essendo gravitazionalmente stabile, si spezza in diverse regioni che tendono a raffreddarsi e condensare formando le stelle.

Le simulazioni numeriche a N-corpi basate sul modello monolitico hanno mostrato che il collasso non dissipativo è in grado di riprodurre bene alcune proprietà sia del bulge che delle galassie ellittiche.

Il modello non dissipativo però presenta delle limitazioni poiché trascura alcuni effetti importanti. Nel caso in cui si voglia tener conto di questi ultimi, è necessario considerare il caso dissipativo che però risulta più complesso e non verrà illustrato nella seguente trattazione.

Grazie al **modello dissipativo** è possibile risolvere alcune problematiche sollevate dal modello precedente, mentre altre restano irrisolte: è perciò necessario ricercare la soluzione in un nuovo modello.

3.2.2 Merger

Lo scenario della formazione per merging è stato uno dei primi ad essere proposto nel 1977 dallo scienziato Toomre. Secondo questo modello una fusione tra due o più galassie a spirale, aventi circa la stessa massa, porterebbe come risultato un sistema stellare dominato dalla componente sferoidale.

Anche per questo modello è possibile identificare il processo più semplice con quello non dissipativo, ovvero il caso in cui le galassie responsabili della fusione siano povere di gas freddo, consentendo di trascurare la formazione stellare.

Sappiamo che il merging è un fenomeno comune nell'universo e, grazie a simulazioni

numeriche a N-corpi sempre più precise, sono stati ottenuti risultati compatibili con la morfologia e il profilo di densità di bulge e galassie ellittiche.

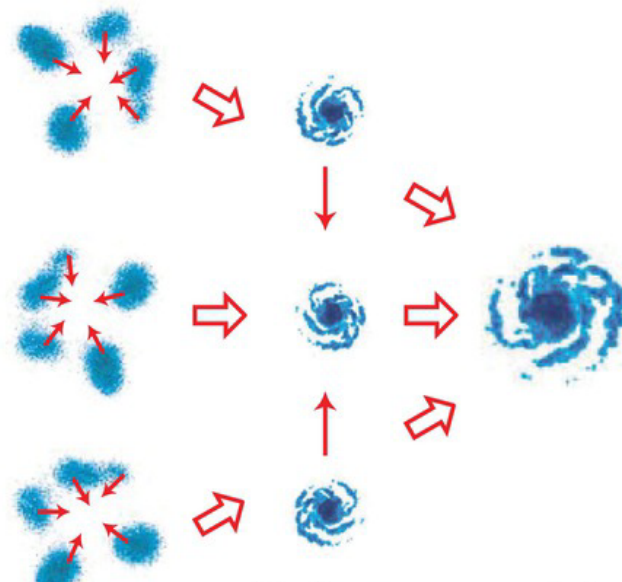


Figura 6: Merger.

Si può implementare un modello più sofisticato detto dissipativo in grado di riprodurre i dati ottenuti per il modello non dissipativo, ma tenendo in considerazione la formazione di nuove stelle che porta la dispersione di energia.

3.2.3 Nuovo modello di formazione

I due modelli precedentemente descritti non sono in grado di giustificare al meglio i dati sulle osservazioni riguardanti la formazione di bulge e galassie ellittiche. È stato perciò necessario ipotizzare un nuovo modello, detto **ibrido**, combinando i due precedenti.

In generale il modello è strutturato in due diverse fasi:

1. fase ad alto redshift caratterizzata da formazione stellare "**in situ**", in cui le stelle nascono nell'alone progenitore principale attraverso la fusione dissipativa delle galassie a disco oppure per un'instabilità violenta del disco;

2. fase a basso redshift caratterizzata da formazione stellare ”**ex situ**”, in cui le stelle si sono già formate nelle galassie prima della fusione e subiscono successivamente un accrescimento dato dal merging di sferoidi preesistenti.

Il contributo che le due fasi possono avere sui sistemi galattici è differente: ad esempio, la seconda fase risulta preponderante per galassie molto massive.

4 Merging di galassie

Il merging è uno dei fenomeni più frequenti nell’universo, soprattutto nei cluster di galassie. Il suo studio è molto importante poiché permette di comprendere cosa potrebbe succedere alla nostra galassia quando si fonderà con la vicina galassia di Andromeda. Non è però sempre possibile che questo processo si verifichi, poiché dipende dai parametri orbitali e dalle proprietà interne delle galassie interagenti.



Figura 7: Fusione di galassie.

Gli "incontri" tra galassie possono essere suddivisi in due tipologie rispetto alla velocità relativa di interazione:

1. **fly-by** : si verifica quando le velocità relative risultano elevate. Si osserva una perturbazione temporanea delle due galassie che però non sono in grado di fondersi;
2. **merging** : si verifica nel caso in cui la velocità relativa sia sufficientemente bassa da permettere la fusione delle galassie di partenza.

La fusione tra due o più galassie viene classificata anche rispetto alla materia contenuta al loro interno: si avranno **fusioni non dissipative**, nel caso in cui i due sistemi coinvolti siano poveri di gas, e **fusioni dissipative** in caso contrario.

Interagendo tra loro, le galassie sono soggette a forze mareali che possono portare la perdita di massa di una delle due attraverso il *tidal stripping*. Nel caso in cui entrambe le galassie abbiano una componente gassosa, non agisce soltanto il *tidal stripping*, ma anche il *ram-pressure stripping* che può privare una delle due galassie del gas.

4.1 Proprietà dei residui di merging

Conoscendo la composizione delle galassie e le tipologie possibili di merging, con l'aiuto di alcune simulazioni, è possibile ricavare una previsione sulle proprietà che potrebbero avere i residui dati dalla loro fusione:

- i residui generati dal **merging non dissipativo** (per sistemi composti solo da materia oscura e stelle) risultano poco densi, perciò con dimensioni maggiori e dispersione di velocità inferiore rispetto a quella delle galassie progenitrici.

Anche la morfologia della nuova galassia potrebbe essere differente rispetto a quella delle galassie che l'hanno generata;

- il residuo del **merging dissipativo** (per sistemi contenenti anche una parte di gas) è più concentrato rispetto al caso precedente, perciò ha dimensioni inferiori e dispersione di velocità superiore. Il gas presente all'interno delle galassie progenitrici, durante la fusione, potrebbe essere compresso, riscaldato o dissipare energia, portando ad una possibile formazione stellare. Per questo motivo la descrizione delle proprietà dei residui generati dal merging dissipativo è solo qualitativa.

4.2 Merging di buchi neri supermassivi

All'interno delle galassie solitamente è presente un buco nero supermassivo che, durante il merging, potrebbe subire delle modifiche a livello dinamico e morfologico.

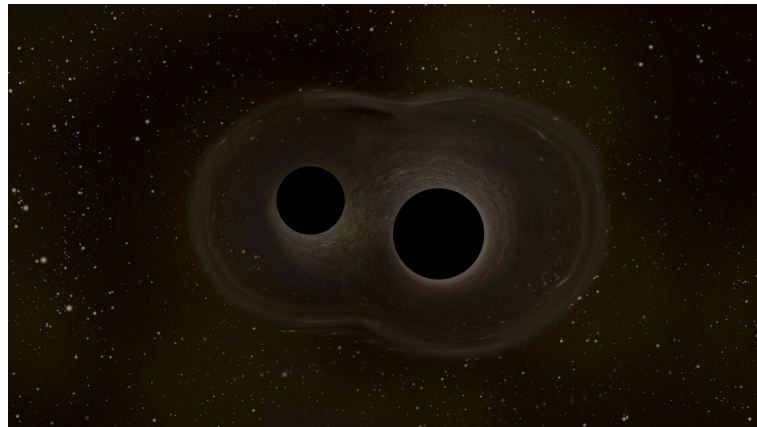


Figura 8: Simulazione del merging di due buchi neri.

Generalmente la galassia meno massiva spiraleggia verso il centro della galassia ospite più massiva e, a causa del *tidal stripping*, perde la materia oscura e i barioni lasciando il buco nero scoperto. Quest'ultimo inizia ad orbitare attorno al buco nero della galassia ospite dando vita ad un sistema binario di buchi neri.

L'orbita tende a restringersi gradualmente fino a raggiungere una distanza critica che porterebbe i due buchi neri a fondersi generando un unico buco nero al centro della galassia appena formata.

Non si conosce perfettamente come si siano formati i primi buchi neri supermassivi nell'universo, né se si siano generati prima o dopo le galassie che li contengono. Si ritiene però che possano essersi formati grazie ad un rapido collasso nella parte più interna della galassia portando alla formazione di una stella supermassiva. Questa, dopo aver concluso il bruciamento dell'idrogeno, contrarrebbe il suo nucleo dando origine ad un buco nero, di massa $10 M_{\odot}$ circa, in grado di accrescere la propria massa grazie all'envelope della stella.

5 Conclusioni

Lo studio della formazione galattica è un campo di ricerca in continua evoluzione che fornisce nuovi modelli in grado di spiegare, sempre più nel dettaglio, come possa avvenire questo fenomeno così comune.

Nella trattazione appena conclusa si è voluto affrontare il tema della nascita delle galassie attraverso la descrizione dell'universo primordiale e delle teorie di formazione principali, al fine di fornire una spiegazione generale e approfondire alcuni temi importanti.

Essere in grado di conoscere gli avvenimenti e le dinamiche che hanno originato le galassie permette di migliorare anche lo studio dell'evoluzione di queste strutture che dominano l'universo.

Bibliografia

- [1] MO H., VAN DEN BOSCH F., WHITE S. *Galaxy formation and evolution*. Cambridge University Press, 2010.
- [2] CIMATTI A., FRATERNALI F., NIPOTI C. *Introduction to galaxy formation and evolution: From Primordial Gas to Present-Day Galaxies*. Cambridge University Press, 2020.
- [3] CIOTTI L. *Appunti corso di Astrofisica Extragalattica*. 2022.
- [4] KARTTUNEN H., KRÖGER P., OJA H., POUTANEN M., DONNER K.J. *Fundamental Astronomy*, fifth edition ed. Springer, 2007.