

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI SCIENZE  
Corso di Laurea in Astronomia  
Dipartimento di Fisica e Astronomia

**FORMAZIONE  
DELLE  
GALASSIE**

Elaborato finale

**Candidato:**  
Federico Crovetti

**Relatore:**  
Prof. Daniele Dallacasa

---

Sessione II  
Anno Accademico 2015/2016

# Indice

<b>1</b>	<b>Cosa sono le galassie</b>	<b>3</b>
1.1	Classificazione e struttura . . . . .	3
1.2	Distribuzione . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Materia oscura e cenni evolutivi dell'universo</b>	<b>6</b>
2.1	Big Bang . . . . .	6
2.2	Radiazione cosmica di fondo . . . . .	7
2.3	Materia Oscura . . . . .	7
2.3.1	Varietà di materia oscura . . . . .	8
2.4	Evidenze sperimentali . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Modelli di formazione galattica</b>	<b>10</b>
3.1	Modello del collasso monolitico . . . . .	10
3.1.1	Collasso monolitico dissipativo . . . . .	11
3.1.2	Problematiche del modello ELS . . . . .	12
3.2	Modello del merging gerarchico . . . . .	13
3.2.1	Formazione del disco spesso . . . . .	13
3.2.2	Formazione del disco sottile . . . . .	14
3.3	Formazione delle galassie ellittiche . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Quasar e radio-galassie</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>17</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>19</b>

## Sommario

Nel seguente elaborato esploreremo le generalità sulla formazione delle galassie, descrivendone le caratteristiche fisico-morfologiche salienti e aggiungendo qualche elemento sulla loro dinamica. Quest'ultima, ci porterà ad esplorare un ambito di estremo interesse astrofisico in costante espansione, quello della materia oscura e del suo ruolo nella formazione delle galassie. Vedremo inoltre i due modelli principali della loro genesi, faremo una breve analisi delle problematiche a loro associate e discuteremo brevemente di oggetti di interesse cosmologico, quali i Quasar e le Radio-galassie. In definitiva, per la complessità e la scarsa conoscenza di questi fenomeni, non si è ancora giunti ad un modello unico che sia in grado di essere coerente con la varietà di galassie che osserviamo nel cielo, rimanendo con una visione frammentaria e piuttosto lontana dall'essere completa.

*Some people say: "How can you live without knowing?". I don't know what they mean. I always live without knowing, that is easily. How you get to know is what I want to know.*

---

Richard P. Feynman

# Capitolo 1

## Cosa sono le galassie

### 1.1 Classificazione e struttura

Le galassie, le componenti base della struttura della cosmic web, sono agglomerati di materia formati a vari redshift nel nostro universo, in base alla loro natura, come vedremo durante questo scritto. Queste presentano conformazioni e composizioni di vario tipo, venendo classificate per prime da Hubble, attraverso il suo famoso diagramma a "Tuning Fork" (fig 1.1). Le classi principali in cui vengono suddivise le galassie sono:

- *Ellittiche*
- *Lenticolari*
- *Spirali*
- *Spirali barrate*
- *Irregolari*

Le galassie *Ellittiche* (E0, E3, E5, E7) sono caratterizzate da un colore rossastro nello spettro ottico, a causa della presenza prevalente di stelle rosse e antiche, emittenti tramite corpo nero, dalla presenza di mezzo interstellare molto caldo, ionizzato, con temperature nell'ordine di  $10^7$  °K e dall'assenza di polvere. La loro morfologia consta di un bulge molto grande e luminoso, il quale copre la luminosità del poco definito ed espanso "disco" di stelle. Esse vengono definite tali anche, e soprattutto, per la loro forma ellissoidale, sub-classificate in base alla loro ellitticità (EN) così definita:

$$N = 10\left(1 - \frac{b}{a}\right) \quad (1.1)$$

Ove  $N$  è l'ellitticità e  $b$  ed  $a$  sono rispettivamente l'asse minore e l'asse maggiore.

Le galassie *Lenticolari* sono nel grafico di Hubble la fase di transizione fra le ellittiche e le spirali. Si noti bene che il concetto di "fase di transizione" può avere un risvolto evolutivo. Esse sono caratterizzate da basse densità di mezzo interstellare, caldo, come quelle ellittiche. La differenza principale fra queste due tipologie, sta nella presenza di un disco brillante di stelle, ma non abbastanza da non essere fortemente oscurato dalla brillantezza del bulge.

Le galassie a *Spirale* (Sa, Sb, Sc) sono caratterizzate da un bulge, un disco sottile ed un disco spesso, entrambi ben definiti, contrariamente a quelli delle galassie prima citate. Nel disco sottile si osserva una grande varietà di fasi del mezzo interstellare e polvere, la quale, insieme al gas freddo ivi presente, favorisce materialmente la formazione stellare, che non si osserva in molti casi nel disco spesso. La caratteristica visiva più evidente che le distingue dalle altre, precedentemente menzionate, è la presenza dei *bracci*, fenomeni di perturbazione della densità in rotazione attorno al bulge e sul disco di stelle, che presentano un alto contenuto di polvere e gas freddo. Essi infatti, al passaggio sul disco stellare provocano l'addensamento del gas freddo favorendo la formazione stellare. Le galassie a spirale sono caratterizzate, soprattutto, da uno spettro ottico molto piccato nel blu, in funzione della presenza di formazione stellare, nonché da una grande luminosità infrarossa dovuta alla polvere ( $\approx 0.30L_{\text{gal}}$ ). La loro sottoclassificazione è determinata in base all'apertura ed al numero dei loro bracci.

Le galassie a *Spirale Barrata* (SBa, SBb, SBc) sono molto simili a quelle a spirale, differenziandosi per il fatto che i bracci non si dipanano direttamente dal bulge, ma da una struttura a barra che lo attraversa.

Anche per loro vale il solito metodo di subclassificazione.

Infine le galassie *Irregolari* (Irr I, Irr II), a differenza di tutte le tipologie sopra citate, non presentano la tipica struttura bulge più disco, ma bensì una distribuzione di stelle e materiale interstellare su un volume di forma irregolare, con una distribuzione radiale di materia più uniforme rispetto alle altre, con la peculiare assenza di un bulge centrale. Le galassie irregolari sono un luogo di fiorente produzione stellare, anche se comunque non paragonabile a quella delle galassie *starburst*, manifesta nella grande luminosità blu nella banda ottica.

Infine, è doveroso specificare che esiste una componente comune a tutte le classi di galassie precedentemente elencate: come scopriremo più avanti, sono tutte immerse in un alone di *Materia Oscura*. Altre sottoclassi sono state aggiunte dall'epoca di pubblicazione del diagramma di Hubble, ma non le tratteremo per brevità.

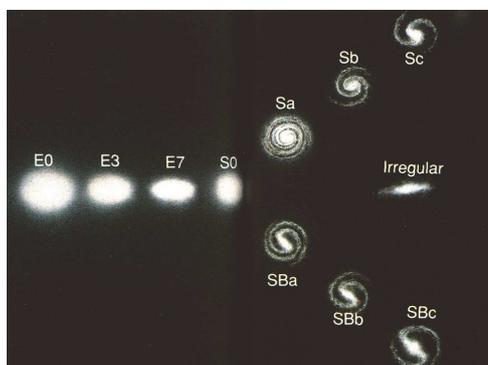


Figura 1.1: Diagramma di Hubble

## 1.2 Distribuzione

Le galassie nell'universo si trovano principalmente raggruppate in quelli che sono chiamati *Ammassi*, ovvero congregazioni di galassie, che orbitano attorno ad un comune centro di massa. Sono caratterizzati da una notevole massa ( $\approx 10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$ ) e dalla presenza di gas molto rarefatto e caldo ( $\approx 10^8 K$ ).

Tale gas intergalattico (IGM) è derivante dal processo evolutivo dell'ammasso: le galassie, o gli ammassi (fig 1.3), che entrano in collisione fra loro, lo fanno in genere con ad velocità molto superiore a quella del suono in esso, e vengono spogliate dell'ISM (mezzo interstellare) attraverso le onde d'urto che si generano durante la collisione. Il gas viene poi scaldato dal potenziale gravitazionale e trasportato nelle zone intergalattiche. Dopo avere raggiunto una situazione di equilibrio, il gas così sottratto alle galassie, non riesce a raffreddarsi se non in tempi molto lunghi, eccedenti il tempo di Hubble, tramite Bremsstrahlung, a causa della bassissima densità. Tali ammassi si possono raggruppare nei *Superammassi*, se rispettano una certa relazione fra le velocità relative.

Nonostante questa apparente raggruppamento di massa, la distribuzione degli ammassi nell'universo è praticamente isotropa (fig 1.2).

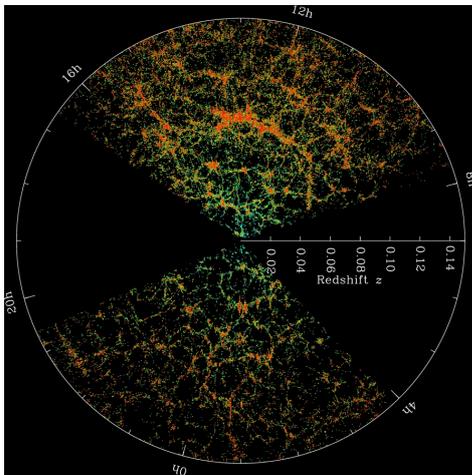


Figura 1.2: Distribuzione delle galassie nell'universo al corrispondente redshift

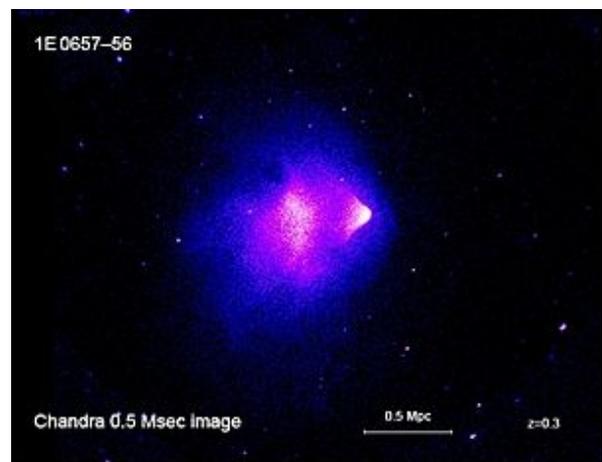


Figura 1.3: Questo è il Bullet Cluster. Nell'immagine si può apprezzare gli effetti di uno scontro fra galassie.

Negli anni immediatamente successivi alla scoperta ed allo studio di questi oggetti, sorsero problematiche cosmologiche interessanti, quali la materia oscura ed il suo ruolo nella formazione e nell'evoluzione delle strutture galattiche. Vedremo brevemente, nei prossimi capitoli, ciò che sappiamo di essa e quale è il suo ruolo nella nostra analisi.

# Capitolo 2

## Materia oscura e cenni evolutivi dell'universo

### 2.1 Big Bang

La prima tappa per la comprensione dei fenomeni che si vogliono illustrare in questo elaborato, è l'origine dell'universo così come lo conosciamo, il Big Bang. Il Big Bang è il modello cosmologico accettato per dare un inizio al nostro universo, modello che consiste nell'esplosione di una singolarità primordiale circa 13,6 miliardi di anni fa. Si dà di seguito un breve riassunto delle fasi salienti della nascita dell'universo:

- Big Bang ( $t = 0s$ );
- Epoca dell'unificazione ( $t = 10^{-43}s$ ): Le forze sono unificate;
- Inflazione ( $t = 10^{-35}s$ ): Espansione esponenziale dell'universo;
- Epoca dei quark ( $t \approx 10^{-32}s$ ): Dopo l'epoca dell'inflazione rimane un plasma di particelle fondamentali e bosoni. Le forze, elettrodebole ed elettroforte, si separano;
- Bariogenesi ( $t = 10^{-6}s$ ): Prevala la materia sull'antimateria;
- Epoca della nucleosintesi ( $t = 100s$ ): Si formano i primi nuclei di Elio e di Litio;
- Era dell'opacità ( $t = 200s$ ): La frequenza di plasma è tale da non lasciare passare la radiazione;
- Epoca della ricombinazione ( $t = 3 \times 10^5 \text{anni}$ ): La temperatura dell'universo è abbastanza bassa da permettere la ricombinazione e ridurre le interazioni fra fotoni e materia. L'universo diventa trasparente alla radiazione.

## 2.2 Radiazione cosmica di fondo

L'eredità delle fasi primordiali del nostro universo, è la *Radiazione cosmica di fondo* (CMB), attraverso la quale se ne studiano i suoi primi istanti di vita. Essa è una radiazione, diffusa su tutta la volta celeste che permea tutto l'universo, di corpo nero di temperatura pari a  $\approx 2,7$  °K. La CMB arriva dalla superficie di ultimo scattering della radiazione, corrispondente a quando l'universo aveva un'età di  $3 \times 10^5$  anni. La temperatura presenta delle piccole disomogeneità dell'ordine di  $10^{-6}$  °K che individuano perturbazioni di densità (fig 2.1), dalle quali hanno avuto origine le strutture che osserviamo oggi. Siccome queste disomogeneità sono imputabili alla perdita di energia da parte dei fotoni al passaggio nelle buche di potenziale gravitazionale, mediante esse possiamo comprendere quali erano le condizioni favorite per il collasso di nubi di gas, dando pesi diversi ai modelli di formazione galattica.

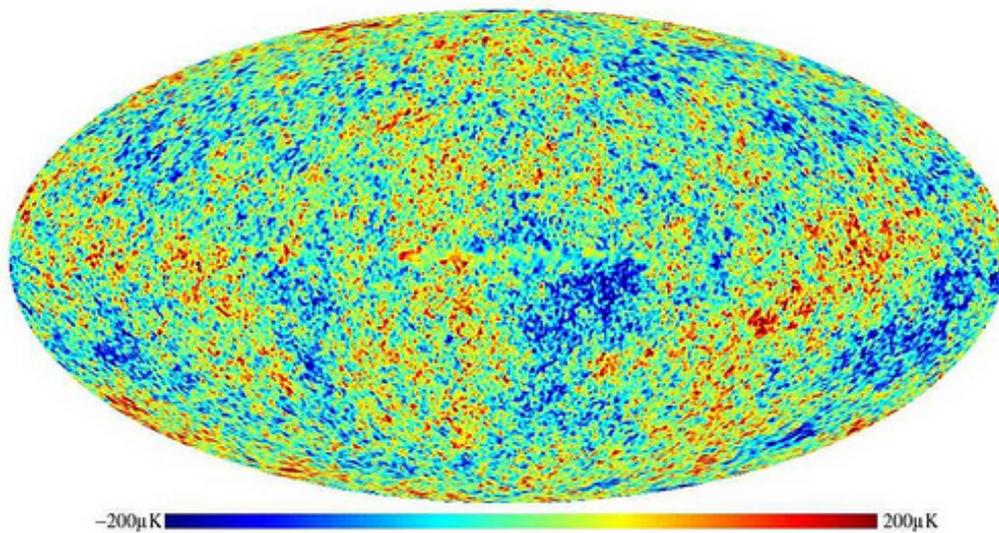


Figura 2.1: Fluttuazioni di temperatura nella radiazione cosmica di fondo

La causa di queste perturbazioni è da ricercarsi nell'anisotropia della distribuzione della *Materia Oscura*, generatasi durante il Big Bang. Essa è un concetto di fondamentale importanza in quanto senza la formazione di questi ammassi primordiali, la materia barionica sarebbe stata dispersa in modo isotropo, impedendo la formazione di qualsiasi struttura tramite interazione gravitazionale.

## 2.3 Materia Oscura

La materia oscura è uno degli enigmi cosmologici più interessanti che vengono studiati al giorno d'oggi. Essa è nata come necessità teorica dallo studio della dinamica degli ammassi di galassie e delle galassie stesse. Al giorno d'oggi la comunità scientifica, nonostante le divisioni causate da teorie di gravità modificata sulle lunghe scale, è abbastanza compatta nell'affermare la sua reale esistenza. La materia oscura comporrrebbe, mediamente, il 90% della massa delle galassie e della massa presente nell'universo. Purtroppo non interagisce elettromagneticamente e quindi è impossibile da osservare

direttamente. Tutto ciò che sappiamo su di essa è che deve interagire solo gravitazionalmente con la materia barionica presente nell'universo, mentre la sua composizione è ignota. La materia oscura per quanto ne sappiamo oggi, si può dividere in materia oscura *fredda* e materia oscura *calda*. Queste tipologie hanno un ruolo fondamentale nell'ideazione dei modelli di formazione galattica, in quanto la *Materia oscura fredda* favorisce la formazione di strutture più piccole, mentre la *Materia oscura calda* favorisce strutture più grandi. L'espansione dell'universo è differenziale, e la materia oscura gioca un ruolo fondamentale in questo fenomeno: nelle zone prive di materia, o scarsamente popolate, l'espansione avviene regolarmente secondo la legge di Hubble, portando all'allontanamento delle galassie e degli ammassi, mentre nelle zone dove l'interazione gravitazionale è più forte, e quindi vi è una gran concentrazione di materia, questo non avviene.

### 2.3.1 Varietà di materia oscura

La materia oscura, come già accennato prima, si divide in *materia oscura calda* (HDM) e *materia oscura fredda* (CDM).

La CDM si suppone essere composta da diverse categorie di oggetti: alcuni molto massivi, come composti di materia barionica difficili da osservare, ad esempio pianeti e buchi neri (Baryonic Dark Matter) e particelle sub-atomiche massive denominate WIMPs (Non-Baryonic Dark Matter). Dagli esperimenti e dalle osservazioni, si comprende che la componente barionica della materia oscura non è sufficientemente presente per colmare la massa mancante nell'universo, mentre particelle come le WIMPs non sono ancora state osservate.

La CDM assume un ruolo fondamentale nel modello di formazione gerarchica, poiché è in grado di dare luogo a piccoli ammassi, che attirano la materia barionica nella propria buca di potenziale, favorendo la formazione di micro-strutture che daranno luogo a strutture più grandi. Questo punto di vista è solitamente chiamato *bottom-top*.

La HDM ha come componente principale i neutrini, particelle relativistiche, debolmente massive, che interagiscono solo gravitazionalmente ed attraverso la forza nucleare forte. Questi neutrini generatisi durante l'epoca della nucleosintesi del Big Bang, per la loro natura di particelle veloci (calde) favoriscono la formazione di ammassi di grandi dimensioni, che riguardano il modello di collasso monolitico.

Analizzeremo in seguito questi due modelli.

## 2.4 Evidenze sperimentali

Portiamo come esempio di evidenza sperimentale dell'esistenza della materia oscura, la forma della curva di rotazione tipica di una galassia.

Nell'immagine (fig 2.2) si notano 4 curve che rappresentano la distribuzione di velocità delle varie zone della galassia, in funzione della distanza dal centro. Tre di queste curve formano la curva osservata, quella più in alto. Ogni curva è calcolata in base alla velocità di rotazione del gas, eseguita con l'osservazione dell'emissione in linea dell'HI, per la velocità nel disco, ed in base alla velocità del gas e delle stelle nelle zone più esterne della galassia, l'*Halo*. Prima dell'inizio di studi intensivi sulla cinematica delle galassie, si credeva che la velocità degli oggetti diminuisse sempre più allontanandosi

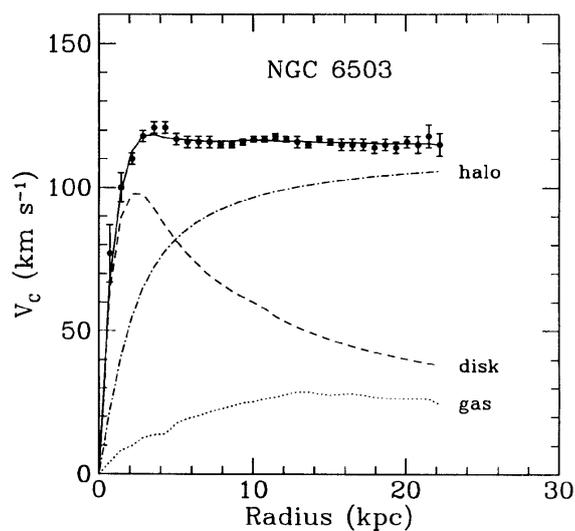


Figura 2.2: Curva di rotazione di NGC6503 osservata ed attesa. Il contributo della materia oscura è indicato nella curva di rotazione dell'alone, dove essa risiede (linea tratto-punto)

dal centro, seguendo intuitivamente la distribuzione di velocità kepleriana che prevede una dipendenza della velocità dal raggio come  $r^{-\frac{1}{2}}$ . Con l'avvento di strumenti più sofisticati e la scoperta della riga in emissione dell'HI si notò, mediante l'osservazione della riga a 21cm (HI), che le galassie erano molto più estese di quanto si credesse, e, cosa più importante, che la curva di rotazione, dopo un piccolo assestamento, rimaneva piatta, indicando la costanza della velocità di rotazione per le zone esterne al bulge. Ciò significa che la distribuzione di massa non crolla come ci si aspettava. Allontanandosi verso le zone esterne la densità di materia barionica cade, ma tali perdite vengono sopperite da un aumento di densità di materia oscura, la quale contribuisce a mantenere densità tali, da rendere la curva di rotazione piatta.

# Capitolo 3

## Modelli di formazione galattica

### 3.1 Modello del collasso monolitico

Il modello del collasso monolitico, detto anche *ELS*, fu la prima proposta di modellizzazione di formazione di strutture galattiche, avanzata da Eggen, Lynden-Bell e Sandage. Essi, dagli studi sui gradienti di metallicità, sull'eccentricità delle orbite delle stelle, e sui loro momenti angolari, nelle vicinanze del sole, osservarono una correlazione fra questi parametri.

Si osserva che le stelle a bassa metallicità sono localizzate nell'alone, e posseggono orbite molto eccentriche, mentre quelle ad alta metallicità sono relegate vicino al piano della galassia. Il modello ELS giustifica questa distribuzione di stelle di diversa metallicità, tramite la formazione delle stelle nell'halo in modo quasi indipendente dalla formazione di quelle sul disco e nelle regioni centrali, in un mezzo interstellare che non è ancora stato arricchito di metalli dalle esplosioni di supernovae. Le zone centrali della nube sono in generale più dense, e sono caratterizzate da collasso più rapido che localizza l'evoluzione delle stelle presenti in quelle zone, favorendo un rate di formazione stellare molto alto; è per questo motivo che, secondo ELS, nella zona del bulge, si osservano stelle molto antiche e con una metallicità più alta. La citata presenza di stelle antiche ad alta metallicità, è dovuta al rapido arricchimento della zona da parte di frequenti esplosioni di supernovae, in quanto il collasso più rapido ha dato luogo ad una formazione stellare prematura rispetto alle altre zone, non con un solo tipo di stelle, ma con un numero distribuito su tutto lo spettro di massa, e con una probabilità di formazione più alta di stelle con piccola massa, e più longeve, definita da una funzione chiamata *Initial-Mass-Function*. Questo, unito al fatto che in epoche remote la massa di Jeans era più grande rispetto ad ora, abbreviando ulteriormente la vita delle stelle più massive.

Tuttavia esistono importanti discrepanze fra la quantità di stelle antiche con bassa metallicità: la quantità osservata delle medesime risulta inferiore rispetto a quella prevista dall'attuale teoria dell'IMF. Il problema prende il nome di "G-Dwarf Problem". Poichè la nostra comprensione in merito alla formazione stellare non è ancora adeguata, sono state proposte varie soluzioni dal peso equipollente. Si è ipotizzato che, una IMF primordiale preveda un ribaltamento nella produzione di stelle, nelle epoche di formazione galattica, rispetto a quella odierna: la formazione di stelle più massive era molto più probabile di quelle meno massive qualche miliardo di anni fa. Si è ipotizzato anche l'esistenza di un disco dalla metallicità iniziale  $Z_0 \neq 0$ , alterato dall'esplosione di stelle

di Popolazione III. Infine si è pensato anche ad un disco meno denso del previsto, in continuo accrescimento, che avrebbe portato alla produzione di poche stelle, nel tempo in cui la metallicità iniziale non era ancora stata alterata. Il disco della galassia si sarebbe invece formato, per la conservazione del momento angolare iniziale della nube, con la diminuzione del raggio tramite il collasso.

### 3.1.1 Collasso monolitico dissipativo

Come ben sappiamo, un collasso implica un aumento di densità e di temperatura della nube, poichè avviene una trasformazione di energia potenziale gravitazionale in energia termica. Questo diviene evidente quando consideriamo la nube di gas come un sistema quasi-statico ed applichiamo il *Teorema del Viriale*:

$$-2\langle K \rangle = \langle U \rangle \quad (3.1)$$

Con  $K$ = energia cinetica del sistema e  $U$ = energia potenziale del sistema.

Dato che nel teorema del viriale usiamo il valor medio dell'energia cinetica del sistema, possiamo scrivere la medesima come il prodotto dell'energia cinetica media delle particelle, che dipende da  $\langle v^2 \rangle$ , per il numero di particelle che compongono la nube. Da qui, ricavando la  $\langle v^2 \rangle$ , possiamo trovare la dispersione di velocità delle particelle definita come  $\sigma = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$ , ovvero:

$$\sigma = \left( \frac{3}{5} \frac{GM}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

Con  $M$ = massa della nube ed  $R$ = dimensione della nube.

Dall'eguaglianza fra l'energia tipica di una particella di gas e la sua energia termica:

$$\frac{1}{2} \mu m_{\text{H}} \sigma^2 = \frac{3}{2} k_{\text{B}} T_{\text{virial}} \quad (3.3)$$

Otteniamo la temperatura tipica del gas nel suo stato di equilibrio quasi-statico:

$$T_{\text{virial}} = \frac{\mu m_{\text{H}} \sigma^2}{3k_{\text{B}}} \quad (3.4)$$

Esprimiamo ora il rate di raffreddamento per unità di volume come:

$$r_{\text{cool}} = n^2 \Lambda(T) \quad (3.5)$$

Dove  $n^2$  rappresenta il quadrato della densità numerica delle particelle e  $\Lambda(T)$  è quella che viene chiamata "*Cooling Function*", che esprime la quantità di energia liberata per unità di volume in funzione della temperatura. La funzione  $\Lambda(T)$  tiene in considerazione tutti i tipi di processi fisici che possono portare al raffreddamento di una nube calda, come la ricombinazione, le transizioni legato-legato, la bremsstrahlung e lo scattering compton. Si osservano due gobbe nel grafico di fig 3.1 che corrispondono alle temperature di ricombinazione dell'idrogeno e dell'elio. Dalla temperatura di  $10^6$  °K in poi, i principali meccanismi di raffreddamento diventano la bremsstrahlung e l'inverse

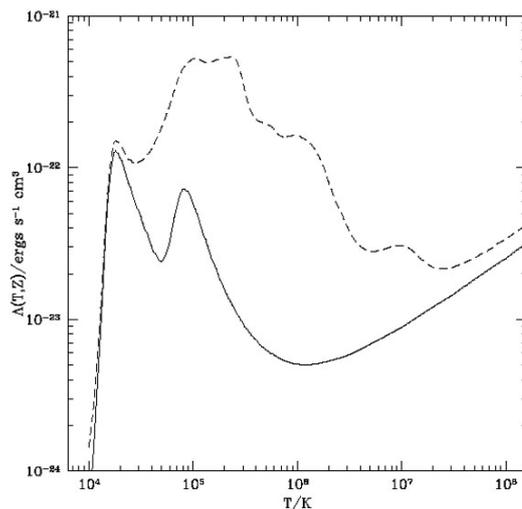


Figura 3.1: Grafico della cooling function  $\Lambda(T)$

compton (si noti che  $r_{\text{cool}}$  tiene conto dell'emissività di bremsstrahlung col termine  $n^2$ ). Ora possiamo ricavare il tempo di raffreddamento:

$$r_{\text{cool}} V t_{\text{cool}} = \frac{3}{2} N k_B T_{\text{virial}} \quad (3.6)$$

E quindi:

$$t_{\text{cool}} = \frac{3 k_B T_{\text{virial}}}{2 n \Lambda(T)} \quad (3.7)$$

Ora è interessante mettere a confronto il tempo di raffreddamento con il tempo di caduta libera per il collasso di nubi proto-galattiche, inserendo le giuste quantità al posto dei nostri parametri. Abbiamo due possibilità:

- $t_{\text{cool}} < t_{\text{free-fall}}$ : In questo caso la temperatura della nube di gas si abbassa più velocemente di quanto la struttura collassi sul tempo scala di caduta libera, quindi la pressione non riesce a bilanciare la forza di gravità. Si ottiene così un collasso praticamente su tempi dinamici;
- $t_{\text{cool}} > t_{\text{free-fall}}$ : Se la nube non riesce più ad irradiare efficientemente l'energia ottenuta dal collasso la sua temperatura si alzerà adiabaticamente, frenando in modo considerevole il collasso. In questa situazione rientra in gioco l'equilibrio quasistatico che pone un limite inferiore ed uno superiore alla massa di gas che riesce a collassare, rispettivamente  $10^8 M_{\odot}$  e  $10^{12} M_{\odot}$ . Galassie più grandi sono probabilmente il risultato di un merging.

### 3.1.2 Problematiche del modello ELS

Come già citato in precedenza, questo modello sarebbe supportato dalla materia oscura calda, la quale, con le sue tensioni interne a causa delle alte energie, darebbe origine ad un sezionamento di nubi molto grandi, formando più galassie da un unico grande ammasso di gas iniziale. Questo modello fitta bene con le osservazioni per la maggior

parte delle caratteristiche salienti. Tuttavia, tramite il modello ELS, non si riesce a spiegare la differenza di età fra ammassi globulari e stelle appartenenti all'alone ( $\approx 2 \times 10^9$  anni) e la loro distribuzione di moto: 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.

## 3.2 Modello del merging gerarchico

Una possibile risposta alle problematiche del modello ELS potrebbe derivare dal *Modello del merging gerarchico*. Secondo gli studi condotti sulle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo le masse tipiche di nubi protogalattiche più probabili sarebbero nell'ordine di circa  $10^6 - 10^8 M_\odot$ , considerevolmente minori di quelle necessarie per la creazione di una galassia delle dimensioni tipiche osservate tramite collasso monolitico. Questi "frammenti", che andranno ad unirsi per formare le strutture dalle masse tipiche osservate, seguono un'evoluzione indipendente, con diverse storie di formazione stellare. Le nubi tuttavia seguono la stessa gerarchia di collasso, più rapido nelle zone centrali dove la densità è maggiore, andando ivi a formare una grande quantità di ammassi globulari, e più lento nelle regioni esterne. Nel merging gerarchico la fa da padrone la materia oscura fredda, la quale per la sua natura poco energetica, favorisce il raggruppamento di più frammenti, ognuno nato nella propria buca di potenziale di materia oscura fredda. Quando essi entrano in collisione le forze mareali e di frizione dinamica smembrano queste piccole proto-galassie intaccandone i "nuclei" composti di ammassi globulari: gli ammassi vengono distrutti dalle forze mareali e dalla frizione dinamica, ma quelli meno massivi in misura minore. Alcuni degli ammassi rimanenti vengono proiettati nelle zone dell'alone. Questo spiegherebbe l'uniformità delle masse di questi ( $\approx 10^5 M_\odot$ ). Questa visione inoltre sarebbe in grado di giustificare il moto retrogrado di alcuni di questi: non c'è nessuna regione particolare per credere che il senso di rotazione sia la stessa in tutti i frammenti.

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.

### 3.2.1 Formazione del disco spesso

Per la formazione del disco spesso sono stati elaborati due modelli che prevedono due condizioni iniziali del gas molto diverse:

- Gas caldo: Il gas nelle prossimità del disco si trova ad una temperatura di circa  $10^6$  °K. Eguagliando l'energia termica tipica di una particella con il suo potenziale gravitazionale dovuto alla materia nelle zone più vicine al disco otteniamo una scala di altezza  $h$  che ci da il "limite" di estensione della densità di materia sopra e sotto al disco:

$$h(T) = \left( \frac{3k_b T}{2.53\pi G m \rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

Facendo il calcolo per valori tipici osservati nella Via Lattea otteniamo  $h \approx 2.2 \text{Kpc}$ . Questo valore è da confrontare con quello osservato di 1 Kpc. Nelle prime fasi di vita della galassia la formazione stellare nella regione del disco spesso è florida: il gas caldo si raffredda prima per bremsstrahlung e poi per emissione in linea, portando all'aumento di densità di gas freddo. Tuttavia, dopo un periodo fiorente, le temperature del gas vengono innalzate dalle esplosioni di supernovae e le densità tornano a diminuire in modo considerevole, fino a che la formazione stellare si ferma a causa dell'alta temperatura del gas e le sue basse densità, che ne impediscono il raffreddamento efficiente.

- Gas freddo: Una formulazione alternativa suppone l'accrescimento di un gas freddo, permettendo alla materia di depositarsi su di un disco dallo spessore simile a quello del disco sottile, grazie al quale ha inizio un'intensa produzione di stelle. Il disco assumerà le sue dimensioni tipiche in seguito al riscaldamento causato dal merging di un'altro frammento nel disco, portandolo alla temperatura adeguata.

### 3.2.2 Formazione del disco sottile

Dopo la formazione del disco spesso, i gas molecolari più freddi continuano la propria discesa verso il piano del disco, assestandosi ad un'altezza di scala più bassa, formando quello che viene chiamato *Disco Sottile*.

Qui la formazione stellare è molto florida per la grande quantità di polvere e gas freddo presente, la quale viene controbilanciata dall'innalzamento della temperatura del gas dovuto alle esplosioni di supernovae. Una volta ri-raffreddatosi, il gas, torna ad avere densità e temperature tali da permettere di nuovo uno SFR alto. E' questo meccanismo che tiene in equilibrio il disco sottile e quasi costante il suo spessore.

## 3.3 Formazione delle galassie ellittiche

Fino ad ora abbiamo discusso due modelli che descrivono la formazione di galassie a spirale, ma cosa possiamo dire sulle galassie ellittiche?

La nostra comprensione sui processi di formazione è ancora molto parziale, ma esistono già delle possibili risposte nate dalle osservazioni: 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. Questi dati lasciano pensare che le galassie ellittiche potrebbero essere il risultato di un merging a bassa velocità di una o più galassie a spirale, le quali si rilasserebbero su un profilo ellissoidale una volta raggiunto l'equilibrio viriale. 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.

# Capitolo 4

## Quasar e radio-galassie

Gli ultimi tipi di galassie di cui parleremo sono le *Radio-Galassie*, oggetti con una brillantezza nella banda radio e dalle dimensioni, sempre nella banda radio, molto più grandi rispetto a quelle delle galassie "standard". Nella fig. 4.1, osserviamo i due componenti

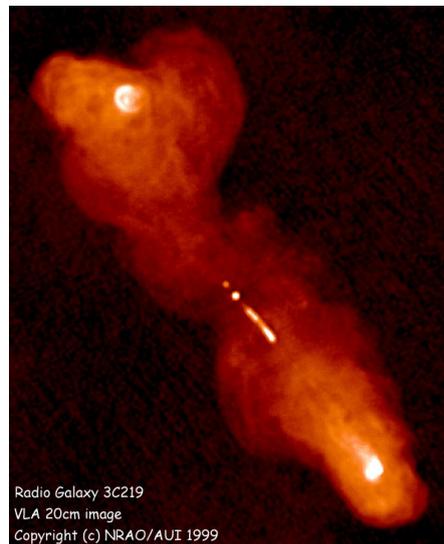


Figura 4.1: Radio-galassia 3C219 nella banda radio

principali di una radio-galassia: La galassia centrale ed i lobi. La prima cosa che si nota sono le notevoli dimensioni dei lobi (Mpc) rispetto a quelle della galassia (Kpc). Essi sono composti da un plasma di elettroni relativistici, emittenti per sincrotrone, che vengono accelerati nel bulge della galassia ed espulsi tramite getti polari. Ma come vengono accelerate queste particelle fino a velocità relativistiche? Molte osservazioni hanno portato a sospettare che nei bulge delle galassie a spirale ed ellittiche risieda un *Buco Nero Supermassiccio* (SMB), più o meno attivo. Nelle osservazioni compiute sulle galassie si nota che la presenza di questi lobi non è una caratteristica comune: Si pensa che nella maggior parte delle galassie, questo buco nero sia inattivo, poichè questi fenomeni di emissione non si osservano di frequente. Le galassie che presentano questo fenomeno vengono chiamate radio-galassie. Si suppone che in tempi remoti anche le galassie che oggi risultano "inattive" possedessero un tipo di emissione simile. Esisterebbe quindi una fase della vita della galassia in cui essa presenta una forte attività radio grazie alla presenza del buco nero supermassiccio al suo interno, aprendo la

porta a nuove possibilità per la formazione di galassie.

Esistono oggetti chiamati *Quasar* risalenti alle prime fasi di vita dell'universo che potrebbero aver dato origine alle radio-galassie o agli AGN. Questi oggetti, estremamente luminosi, sarebbero dei buchi neri molto massicci che emettono radiazione tramite la caduta in essi di materiale molto caldo nel disco di accrescimento. Questo meccanismo di trasformazione di materia in energia è molto efficiente, molto più di qualsiasi reazione termonucleare.

Sappiamo che la presenza di buchi neri super massicci nel centro delle galassie, e la loro origine stessa, potrebbero essere compatibili con l'evoluzione di questi oggetti, poichè per rendere inattivo un buco nero è sufficiente che esso raggiunga la sua *Luminosità di Eddington*.

# Capitolo 5

## Conclusioni

In questo elaborato abbiamo esplorato le caratteristiche principali delle galassie e la loro genesi. Esistono molte strade attraverso le quali possono essersi formate le galassie, ma manchiamo ancora di una comprensione generale, dalla quale poter dedurre tutte le deviazioni da ciò che ci aspettiamo ed anche di un modello coerente di formazione di galassie. Questo è un campo di ricerca estremamente vasto e l'intento di questo scritto, illustrativo.



# Bibliografia

- [1] B. W. Carroll, D. A. Ostlie (2014), *An Introduction to Modern Astrophysics*, Pearson New International Edition, Harlow.
- [2] H. Karttunen, P. Kroger, H. Oja, M. Poutanen, K. J. Donner (2006), *Fundamental Astronomy*, Springer, New York.
- [3] L. Ciotti, *Appunti del corso di Astrofisica Extragalattica*.
- [4] D. Dallacasa, *Appunti del corso di Processi Di Radiazione e MHD*.
- [5] M. S. Longair (2008), *Galaxy Formation*, Astronomy and Astrophysics Library, Springer.