

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base  
Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e  
Naturali

**Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”**



*Laurea triennale in Fisica*

## **Dinamica degli ammassi di galassie**

**Relatori:**

Prof. Salvatore Capozziello  
Dott. Micol Benetti

**Candidato:**

Davoud Ahmadi  
Matricola N85/673

A.A. 2017/2018

# Indice

1 Galassie e ammassi.....	1
1.1 Le galassie e la sequenza di Hubble.....	2
1.2 Gruppi, ammassi e superammassi.....	4
1.3 Ammassi ricchi.....	6
1.4 Densità di galassie negli ammassi.....	8
2 Dinamica degli ammassi .....	10
2.1 Profili di densità.....	10
2.2 Densità ed estensione del nucleo.....	11
2.3 Velocità di dispersione.....	13
2.4 Rapporto massa luminosità.....	14
2.5 Classificazione degli ammassi.....	15
3 Proprietà X-ray e questioni irrisolte.....	20
3.1 Meccanismi di emissione degli ammassi di galassie.....	20
3.2 Proprietà X-ray.....	21
3.3 Equilibrio idrostatico.....	24
3.4 Frazione barionica.....	26
3.5 Materia oscura.....	27
Appendice.....	31

# 1 Galassie e ammassi

Il primo tentativo di catalogare gli “oggetti nebulosi” (alcuni dei quali oggi sappiamo essere galassie) risale al XVII secolo e fu operato dal siciliano Giovan Battista Odierna, un secolo e mezzo prima della realizzazione del catalogo di Messier, considerato essere il primo catalogo astronomico di oggetti diversi dalle stelle. Nel 1920, in seguito alle osservazioni di Curtis ebbe luogo il dibattito tra Shapley e lo stesso Curtis sulla natura della Via Lattea, delle nebulose e sulle dimensioni dell’universo. Successivamente grazie alle osservazioni di Hubble è stato possibile accertare che le nebulose fossero oggetti troppo distanti per far parte della Via Lattea. Ebbero così inizio lo studio e la classificazione delle galassie concepite in senso moderno. Il primo ammasso fu invece osservato da Messier nel 1779, ma lo studio di questi oggetti fu approfondito solo nel Novecento da studiosi quali Zwicky ed Abell che nel 1950 stilò la prima catalogazione degli ammassi.

L’obiettivo della seguente tesi consiste nello studio delle caratteristiche (strutturali e dinamiche) fondamentali degli ammassi di galassie, con particolare attenzione alle implicazioni cosmologiche derivanti dallo studio di dette entità astronomiche. In primo luogo si procederà col definire le galassie ed i loro aggregati (gruppi e ammassi e superammassi), enumerandone le proprietà salienti, successivamente si analizzeranno i principali criteri in uso per classificare gli ammassi (in particolare la classificazione di Abell) unitamente alle caratteristiche dinamiche che li contraddistinguono, infine si passeranno brevemente in rassegna i più rilevanti interrogativi che ancora permangono sui meccanismi (dinamici e non) connotanti gli ammassi di galassie, nonché le principali teorie nate dalla necessità di trovare risposta a detti interrogativi.

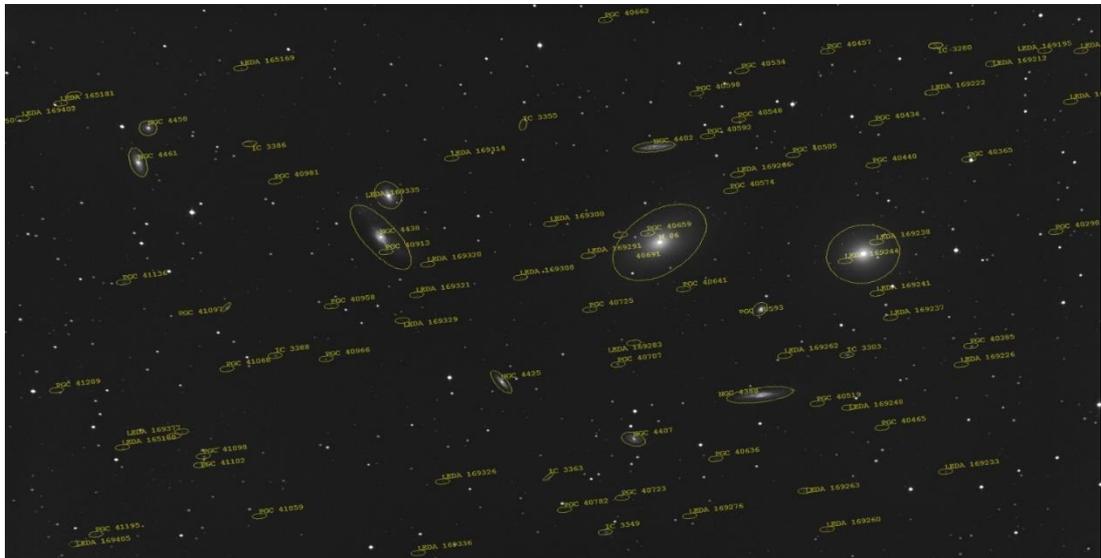


Figura 1: l'ammasso della Vergine, l'ammasso di galassie più prossimo alla terra (1.8 Mpc)

## 1.1 Le Galassie e la sequenza di Hubble

E' possibile definire una galassia come un vasto insieme di stelle, gas e polveri (questi ultimi costituenti il cosiddetto mezzo interstellare) uniti da forze di natura gravitazionale. Le galassie possono contenere da poche decine di milioni a mille miliardi di stelle e, nella porzione di universo attualmente accessibile all'osservazione, se ne contano più di cento miliardi. Queste hanno un diametro variabile tra i 1000 ed i 100000 pc, separate da distanze dell'ordine dei Mpc. Si è soliti catalogare le galassie in base alla morfologia delle stesse, uno degli schemi di classificazione maggiormente in uso è la cosiddetta Sequenza

di Hubble (elaborata da Edwin Powell Hubble tra il 1926 ed il 1936), essa consente di distinguere:

**Galassie ellittiche**, dotate di forma ellissoidale e connotate da una distribuzione stellare piuttosto uniforme, queste galassie sono descritte da un numero intero, variabile da 0 (corrispondente ad una forma praticamente sferica) a 7 (associato a profili molto allungati), che ne descrive l'ellitticità. Sono inoltre caratterizzate da un'esigua presenza di materia interstellare, cui è associato un tasso ridotto di formazione di nuove stelle, risultando pertanto popolate da stelle piuttosto vecchie.

**Galassie lenticolari**, a loro volta divisibili in tre sottoclassi in base alla presenza più o meno marcata di "barre". Dotate di struttura discoidale con un bulge sferico al centro queste galassie possiedono (come le galassie ellittiche) ridotte quantità di materia interstellare, caratteristica cui, come visto in precedenza, è associato uno scarso tasso di formazione stellare.

**Galassie a spirale**, contraddistinte da un bulge centrale (simile ad una galassia ellittica e contenente le stelle più vecchie e, talvolta, un buco nero) dal quale si dipartono dei bracci (popolati da stelle giovani e nubi di gas) configurantisi in strutture spiraleggianti in base alla morfologia del cui avvolgimento è possibile introdurre un'ulteriore classificazione. Tali galassie spiccano inoltre per l'entità del momento angolare posseduto, circa cinque volte maggiore di quello delle galassie ellittiche.

**Galassie a spirale barrata**, le più abbondanti nell'universo osservabile, che si distinguono dalle precedenti per la presenza di una barra attraversante il bulge, dalla quale hanno origine i caratteristici bracci.

**Galassie irregolari**, la cui forma non è riconducibile ad alcuna delle tipologie indicate in precedenza, caratterizzate dall'abbondanza di stelle giovani e materia interstellare. Queste galassie possiedono una

morfologia non regolare, spiegabile nei termini di una grande varietà di fenomeni, tra cui è possibile annoverare la fusione tra galassie o l'effetto gravitazionale di una galassia vicina.

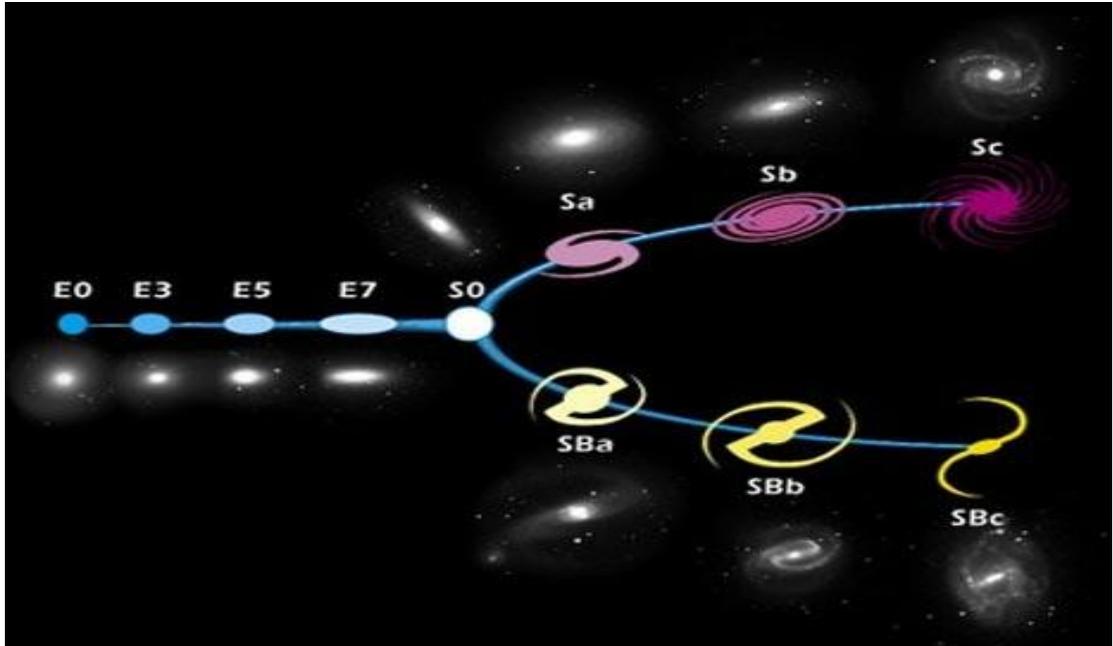


Figura 2: il tipico diagramma a diapason che riassume la sequenza di Hubble. La lettera E contraddistingue le galassie ellittiche ed è seguita da un numero che indica l'ellitticità, le sigle S ed SB indicano, rispettivamente, le galassie a spirale ed a spirale barrata.

## 1.2 Gruppi, Ammassi e Superammassi

Raramente si riscontra la presenza di galassie isolate<sup>1</sup> nell'universo, generalmente esse si organizzano in strutture più complesse (tenute insieme dalla mutua attrazione gravitazionale), tra queste si annoverano gruppi, ammassi e superammassi. I **gruppi** sono i più piccoli aggregati di galassie conosciuti (ne contengono meno di 50) e

presentano masse dell'ordine di  $10^{13}$  masse solari, gli **ammassi** si configurano come sistemi legati e virilizzati (cioè stabili) che constano di galassie (dalle cinquanta alle mille) che si muovono in un comune potenziale di natura gravitazionale, sono caratterizzati dalla presenza di grandi quantità di gas intergalattico la cui massa totale supera quella delle galassie dell'ammasso di un fattore due. Anche tenendo conto del contributo della massa del gas (che essendo approssimativamente in equilibrio col campo gravitazionale si dispone secondo le linee del medesimo rivelandone la forma) le velocità relative delle galassie risultano troppo elevate affinché esse possano costituire un sistema legato da un potenziale generato dalla sola massa rilevabile, questo dato ha condotto ad ipotizzare l'esistenza della cosiddetta *materia oscura* (non individuabile se non indirettamente, tramite i suoi effetti gravitazionali), la cui natura è ancora oggetto di discussione e studio e che dovrebbe costituire secondo le stime attuali circa l'85% della massa totale degli ammassi. Ammassi e gruppi possono organizzarsi ad un livello ulteriore, dando origine ai **superammassi**, queste strutture, a differenza di quelle analizzate in precedenza, non devono la loro esistenza all'attrazione gravitazionale, bensì al flusso di Hubble e sono a loro volta inquadrate in complessi di dimensioni maggiori come filamenti, muri e piani. Gli ammassi di galassie sono studiati e classificati in base ad alcune grandezze fondamentali (la definizione di alcune delle quali è riportata in appendice), i cui valori caratteristici sono riportati nella seguente tabella:

1 per galassia isolata si intende una galassia non facente parte di aggregati come gruppi o ammassi

Property	Rich clusters	Groups and poor clusters
Richness	30-300 galaxies	3-30 galaxies
Radius	$(1-2) h^{-1}$ Mpc	$(0.1-1) h^{-1}$ Mpc
Radial velocity dispersion	400-1400 km s <sup>-1</sup>	100-500 km s <sup>-1</sup>
Radial velocity dispersion <sup>d</sup> (median)	$\sim 750$ km s <sup>-1</sup>	$\sim 250$ km s <sup>-1</sup>
Mass ( $r \leq 1.5 h^{-1}$ Mpc)	$(10^{14}-2 \times 10^{15}) h^{-1} M_{\odot}$	$(10^{12.5}-10^{14}) h^{-1} M_{\odot}$
Luminosity ( $B$ ) ( $r \leq 1.5 h^{-1}$ Mpc)	$(6 \times 10^{11}-6 \times 10^{12}) h^{-2} L_{\odot}$	$(10^{10.5}-10^{12}) h^{-2} L_{\odot}$
$\langle M / L_B \rangle^g$	$\sim 300 h M_{\odot} / L_{\odot}$	$\sim 200 h M_{\odot} / L_{\odot}$
X-ray temperature	2-14 keV	$\lesssim 2$ keV
X-ray luminosity	$(10^{42.5}-10^{45}) h^{-2}$ erg s <sup>-1</sup>	$\lesssim 10^{43} h^{-2}$ erg s <sup>-1</sup>
Cluster number density	$(10^{-5}-10^{-6}) h^3$ Mpc <sup>-3</sup>	$(10^{-3}-10^{-5}) h^3$ Mpc <sup>-3</sup>
Cluster correlation scale	$(22 \pm 4) h^{-1}$ Mpc ( $R \geq 1$ )	$(13 \pm 2) h^{-1}$ Mpc
Fraction of galaxies in clusters or groups	$\sim 5\%$	$\sim 55\%$

Tabella 1: schema riassuntivo delle principali proprietà di gruppi ed ammassi (definizioni in appendice).

### 1.3 Ammassi ricchi

E' possibile dividere in categorie gli ammassi di galassie in base alla loro "ricchezza", ovvero in base al numero di galassie associate nell'ammasso. Gli ammassi ricchi contengono (in base alla definizione fornita da Abell) almeno trenta galassie connotate da luminosità maggiore di  $m_3 + 2^m$  (dove  $m_3$  indica la magnitudine della terza galassia

più luminosa dell'ammasso) in un raggio di circa  $1.5h^{-1}$  Mpc dal centro dell'ammasso. Questi aggregati, le cui galassie si muovono con velocità dell'ordine di  $750 \text{ km s}^{-1}$ , presentano una massa tipica dell'ordine di  $5 \times 10^{14} h^{-1}$  masse solari nel solito raggio caratteristico di  $1.5h^{-1}$  Mpc alla quale contribuisce anche il plasma intergalattico, (la cui rilevazione è possibile grazie alle emissioni di raggi X (per bremsstrahlung) con una densità di circa  $10^{-3}$  elettroni per  $\text{cm}^3$ . La temperatura di questo gas può variare dai 2 ai 14 keV attestandosi mediamente intorno ai 5 keV. Al centro degli ammassi più compatti e regolari si trova spesso una gigantesca galassia ellittica che domina la dinamica dell'ammasso. Questa galassia viene chiamata Brightest Cluster Galaxy (BCG). Molte BCGs hanno due o più nuclei, se i nuclei sono immersi in uno stesso alone si parla di dumbbell galaxy, cioè galassia a manubrio. Le galassie cD (dette central dominant, nonostante il nome cD venga dalla classificazione delle galassie effettuata da Morgan, dove D sta per diffuse) sono BCG con un alone diffuso ed asimmetrico con bassa brillantezza superficiale. Queste galassie stanno al centro della buca di potenziale dell'ammasso, nella maggior parte dei casi ferme. Gli ammassi ricchi ad alta densità si caratterizzano anche per la relativa rarità con la quale possono essere osservati, la loro densità numerica nello spazio è stimata intorno ai  $10^{-5}$  ammassi per  $\text{Mpc}^3$ , di ben tre ordini di grandezza inferiore rispetto alla densità numerica delle galassie luminose. Si riscontra che la densità numerica degli ammassi ricchi presenta una forte dipendenza dalla ricchezza degli stessi.

$R$	$N_R$	$n_c (> N_R)h^3$ (Mpc <sup>-3</sup> )	$d (> N_R) h^{-1}$ (Mpc)
$\geq 0$	$\geq 30$	$13.5 \times 10^{-6}$	42
$\geq 1$	$\geq 50$	$6.0 \times 10^{-6}$	55
$\geq 2$	$\geq 80$	$1.2 \times 10^{-6}$	94

Tabella 2: densità numerica degli ammassi di galassie, R indica la classe di ricchezza,  $n_c$  il numero di ammassi e d la distanza ottenuta da stime del redshift.

## 1.4 Densità di galassie negli ammassi

La frazione di galassie contenute in ammassi di classe di ricchezza  $R > 0$  si attesta intorno al 5% (all'interno del raggio di Abell  $R_A$ ), aumentando al crescere del raggio ed al diminuire dell'intervallo di ricchezza dell'ammasso, mentre il numero medio di galassie in ammassi di classe di ricchezza  $R > 0$ , per le quali risulti  $m \leq m_3 + 2^m$  in un raggio di  $1.5h^{-1}$  Mpc è di circa, 56.

Gli ammassi dotati di classe di ricchezza maggiore di zero presentano inoltre una densità numerica media di galassie luminose (nel caratteristico raggio di Abell) di circa  $3 h^3$  galassie per Mpc<sup>3</sup>, questo dato (se confrontato con la densità di galassie luminose stimata per l'universo, che si attesta intorno alle  $1.5 \times 10^{-2} h^3$  galassie per Mpc<sup>3</sup>) indica che la densità numerica media delle galassie luminose negli ammassi è ben 200 volte maggiore di quella degli stessi oggetti nell'universo conosciuto. Il rapporto tra le due densità presenta dipendenza dagli intervalli di ricchezza degli ammassi considerati, esso inoltre aumenta enormemente se, in luogo della densità numerica

nell'ammasso si considera solo quella del nucleo del medesimo, attestandosi intorno a valori dell'ordine di  $10^4$ - $10^5$ .



## 2 Dinamica degli ammassi

In questo capitolo si analizzeranno i principali aspetti della dinamica degli ammassi di galassie, nonché i criteri di classificazione di questi ultimi. Si inizierà con l'illustrazione dei modelli oggi in uso per rendere conto dei profili di densità degli ammassi e dei risultati ai quali si perviene attraverso detti modelli; successivamente ci si concentrerà su aspetti squisitamente dinamici (come la velocità di dispersione ed il rapporto massa-luminosità) ed infine si passeranno in rassegna le classificazioni più importanti di cui oggi ci si avvale al fine di catalogare gli ammassi di galassie ed i fondamenti su cui esse si basano.

### 2.1 Profili di densità

E' possibile descrivere la distribuzione radiale della densità di galassie caratterizzante gli ammassi ricchi modellizzando la stessa come profilo isoterma legato di Emden<sup>1</sup> o, in alternativa, avvalendosi dell'approssimazione di King<sup>1</sup> (limitatamente alla regione centrale dell'ammasso). Nel secondo caso si ottengono le seguenti espressioni, riferentisi rispettivamente al profilo spaziale e proiettato:

$$n_g(r) = n_g^0 (1+r^2/R_c^2)^{-3/2}$$

$$S_g(r) = S_g^0 (1+r^2/R_c^2)^{-1}$$

in cui  $n_g^0$  ed  $S_g^0$  rappresentano le densità centrali, mentre  $R_c$  indica il

raggio del nucleo dell'ammasso, cioè la distanza dal centro per la quale risulti  $S_g(R_c) = S_g^0/2$ , vale inoltre la seguente relazione:  $S_g^0 = 2 R_c n_g^0$ . Un

altro indicatore della distribuzione media di densità di galassie di un ammasso è rappresentato dalla funzione di correlazione, per le galassie con classe di ricchezza  $R$  maggiore di uno detta funzione assume i seguenti andamenti:

$$\xi_{gc}(r) \simeq 130r^{-2.5} + 70r^{-1.7}$$

$$\xi_{gc}(r) \simeq 120r^{-2.2} .$$

Dove  $r$  rappresenta il raggio espresso in  $\text{Mpc } h^{-1}$ .

I profili di densità sono connotati da un andamento in funzione del raggio della seguente tipologia:

$$n_g(r) \propto r^{-2.4 \pm 0.2} \text{ (spatial), } r > R_c$$

$$S_g(r) \propto r^{-1.4 \pm 0.2} \text{ (projected), } r > R_c .$$

## 2.2 Densità ed estensione del nucleo

La densità numerica di galassie centrali negli ammassi ricchi e compatti è (limitatamente alle galassie nel range delle tre magnitudini corrispondenti alle maggiori luminosità) di circa  $10^3 h^3$  galassie per  $\text{Mpc}^3$  con punte di  $10^3 h^4$  galassie per  $\text{Mpc}^3$  per gli ammassi compatti più ricchi. Per quanto concerne invece la densità essa possiede un andamento del tipo:

$$\begin{aligned}\rho_0(\text{mass}) &\simeq 9\sigma_{r,c}^2/4\pi GR_c^2 \\ &\sim 4 \times 10^{15} \mathcal{M}_\odot \text{Mpc}^{-3} [(\sigma_{r,c}/10^3 \text{ km s}^{-1})/(R_c/0.2 \text{ Mpc})]^2 h^2\end{aligned}$$

in cui  $\sigma_{r,c}$  rappresenta la velocità radiale di dispersione ( espressa in  $\text{km s}^{-1}$ ) ed  $R_c$  indica il raggio del nucleo dell'ammasso ( in Mpc), Gli ammassi ricchi e compatti presentano valori di  $R_c$  dell'ordine di  $(0.1-0.25) h^{-1} \text{ Mpc}$ , mentre il gas interno (la cui densità si attesta intorno ai  $10^{-3}$  elettroni per  $\text{cm}^3$ ) all'ammasso emettente raggi X è connotato da un raggio variabile da  $0.1$  a  $0.3 h^{-1} \text{ Mpc}$ .

Va notato che il raggio del nucleo della distribuzione di massa stimato mediante osservazione basate sul lensing gravitazionale risulta più piccolo rispetto al raggio ottenuto basandosi sulla distribuzione delle galassie e del gas all'interno dell'ammasso.

Le frazioni esprimenti i contributi delle diverse tipologie di galassie alla popolazione di un ammasso risultano difformi rispetto ai corrispondenti rapporti che rendono conto dell'ammontare relativo delle diverse galassie nell'universo, questa difformità varia in dipendenza delle caratteristiche dell'ammasso considerato.

Cluster type	E	S0	Sp	(E+S0)/Sp
Regular clusters (cD)	35%	45%	20%	4.0
Intermediate clusters (spiral-poor)	20%	50%	30%	2.3
Irregular clusters (spiral-rich)	15%	35%	50%	1.0
Field	10%	20%	70%	0.5

Tabella 3: frazioni delle diverse tipologie di galassie nelle principali categorie di ammassi.

La frazione di galassie ellittiche ed S0 aumenta avvicinandosi al nucleo degli ammassi ricchi e compatti, mentre si riscontra l'andamento opposto per le galassie a spirale la cui frazione nel nucleo di taluni ammassi è stimata intorno allo zero.

## 2.3 Velocità di dispersione

Le velocità radiali di dispersione caratterizzanti le galassie che popolano gli ammassi ricchi possono variare da 400 fino a 1400 km s<sup>-1</sup> con una mediana di circa 750 km s<sup>-1</sup>. Una debole correlazione è riscontrabile tra la velocità di dispersione delle galassie di un ammasso e la ricchezza dello stesso, in particolare gli ammassi più ricchi esibiscono velocità di dispersione mediamente superiori. I sopracitati valori della velocità di dispersione risultano consistenti con le stime ottenute dallo studio della temperatura del gas interno agli ammassi, nonché con le velocità dedotte analizzando il lensing gravitazionale degli ammassi stessi.

I profili di temperatura e le velocità di dispersione concepiti come funzioni della distanza dal centro dell'ammasso sono stati misurati per un numero molto ristretto di ammassi. Detti profili risultano tipicamente isotermi (in particolare si riscontra che la temperatura e la velocità di dispersione al quadrato risultano approssimativamente costanti per  $r \lesssim 0.5-1h^{-1}$  Mpc, diminuendo a distanze maggiori).

Una prima stima della velocità di dispersione può essere ottenuta dal seguente calcolo teorico:

al fine di risalire alla velocità di una galassia all'interno di un ammasso risulta preliminarmente necessario sottrarre la velocità media dell'ammasso stesso. Sia  $\langle z \rangle$  il redshift galattico medio, la componente

radiale della velocità di una galassia e la sua dispersione varranno rispettivamente:

$$v_r = (z - \langle z \rangle) c$$

$$\sigma_r = \langle (v_r - \langle v_r \rangle)^2 \rangle^{1/2}$$

indicando con  $p(v_r)dv_r$  la probabilità di trovare una galassia avente velocità radiale compresa nell'intervallo infinitesimo delimitato da  $v_r$  e  $v_r+dv_r$  e trascurando velocità per le quali risulti  $|v_r - \langle v_r \rangle| > 3 \sigma_r$  la distribuzione è ben approssimata da una Gaussiana, per cui si ha:

$$p(v_r)dv_r = [1/\sigma_r (2\pi)^{1/2}] \exp(-v_r^2/2\sigma_r^2) dv_r$$

Una distribuzione Gaussiana per una componente della velocità corrisponde ad un sistema di particelle distinguibili in equilibrio termodinamico, il che a sua volta conduce ad una distribuzione di Maxwell-Boltzmann delle velocità, per la quale risulta  $\langle v^2 \rangle = 3 \sigma_r^2$ , quindi è lecito scrivere:

$$(3/2) kT = (\langle m \rangle / 2) \langle v^2 \rangle = (\langle m \rangle / 2) 3 \sigma_r^2$$

dove  $\langle m \rangle$  è la massa media delle galassie,  $T$  rappresenta la temperatura, mentre  $k$  è la costante di Boltzmann) da cui è possibile ricavare la velocità di dispersione  $\sigma_r$ .

Il limite più evidente delle approssimazioni usate ai fini del precedente calcolo sta nel fatto che non tutte le galassie di un ammasso possiedono la stessa temperatura (in altri termini un ammasso non è un sistema termodinamicamente all'equilibrio).

## 2.4 Rapporto massa-luminosità

La tipica massa di un ammasso ricco nel raggio di  $1.5h^{-1}$  Mpc (stimata applicando il teorema del viriale ad una distribuzione isoterma) vale:

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_{\text{cl}}(\leq 1.5) &\simeq \frac{2\sigma_r^2(1.5h^{-1} \text{ Mpc})}{G} \simeq 0.7 \times 10^{15} \left( \frac{\sigma_r}{1000} \right)^2 \\ &\simeq 0.4 \times 10^{15} h^{-1} \mathcal{M}_{\odot} \quad (\text{for } \sigma_r \sim 750 \text{ km s}^{-1}). \end{aligned}$$

Per gli ammassi connotati da classe di ricchezza  $R \geq 0$  il range di variabilità della massa contenuta nel solito raggio caratteristico di  $1.5h^{-1}$  Mpc è il seguente:

$$\mathcal{M}_{\text{cl}}(\leq 1.5) \sim (0.1-2) \times 10^{15} h^{-1} \mathcal{M}_{\odot}.$$

La tipica luminosità media (nel blu) caratterizzante un ammasso di galassie ricco in un raggio di  $1.5h^{-1}$  Mpc vale:

$$L_{\text{cl}}(\leq 1.5) \sim 10^{12} h^{-2} L_{\odot}$$

Con un range di variabilità caratteristico di:

$$L_{\text{cl}}(\leq 1.5) \sim (0.6-6) \times 10^{12} h^{-2} L_{\odot}$$

Dai dati precedenti si inferisce il seguente rapporto massa/luminosità:

$$(M/L_B)_{\text{cl}} \sim 300h (\mathcal{M}_{\odot}/L_{\odot}).$$

Da queste stime relative alla dinamica degli ammassi si deduce una densità di massa nell'universo tale da non permettere alla forza di gravità di arrestarne l'espansione.

## 2.5 Classificazione degli ammassi

Esistono diversi criteri in base ai quali è possibile suddividere in categorie gli ammassi di galassie, indichiamo di seguito le classificazioni maggiormente in uso:

- La classificazione di Abel divide gli ammassi in una sequenza unidimensionale spaziante da ammassi irregolari a regolari, basandosi sul presupposto che gli ammassi regolari siano dinamicamente più evoluti.
- Zwicky classifica gli ammassi in compatti, medio-compatti ed aperti.
- Bautz e Morgan distinguono ammassi di tipo 1 (dominati da una singola galassia cD centrale, ammassi di tipo 2 (la cui galassia più brillante è intermedia tra una cD ed una gigante ellittica) ed ammassi di tipo 3 (connotati dall'assenza di una galassia dominante).
- Rood e Sastry propongono unca classificazione biforcata comprendente sei distinte tipologie di ammassi:
  1. cD, dominato da una galassia cD.
  2. B (binary), dominato da due galassie luminose.
  3. L (line), in cui almeno tre delle galassie più luminose risultano allineate.
  4. C (core), in cui almeno quattro delle dieci galassie più brillanti vanno a costituire un nucleo compatto.
  5. F (flat), le cui galassie più brillanti assumono una configurazione appiattita.
  6. I (irregular), caratterizzati dalla disposizione irregolare delle galassie costituenti.
- Struble e Rood riorganizzano le tipologie proposte da Rood e Sastry in un diagramma lineare.
- Morgan distingue gli ammassi di tipo i (con molte galassie a spirale) da quelli di tipo ii (con poche spirali).
- Oemler, infine, suddivide gli ammassi in spiral rich (nei quali prevalgono le spirali), spiral poor (ammassi contenenti in

prevalenza galassie S0) e cD (dominati da una cD ed abbondanti di galassie ellittiche o S0).



Figura 3: L'ammasso Perseo, tipico esempio di ammasso L

Pur sembrando profondamente diversi i sopracitati sistemi di classificazione sono in realtà strettamente correlati (ad esempio un ammasso regolare tende ad essere compatto), ciò mostra che la dinamica di un ammasso presenta una marcata dipendenza dal suo contenuto galattico e viceversa.

Regular (Early) Property	Intermediate	Irregular (late)	
	type clusters	clusters	type clusters
Zwicky type	Compact	Medium-compact	Open
BM type	I, I-II, II	(II), II-III	(II-III), III
RS type	cD,B,(L,C)	(L),(F),(C)	(F),I
Shape symmetry	Symmetrical	Intermediate	Irregular shape
Central concentration	High	Moderate	Low
Galactic content	Elliptical-rich	Spiral-poor	Spiral-rich
E fraction	35%	20%	15%
S0 fraction	45%	50%	35%
Sp fraction	20%	30%	50%
E:S0:Sp	3:4:2	2:5:3	1:2:3
Radio emission	~ 50% detection	~ 50% detection	~ 25% detection
X-ray luminosity	High	Intermediate	Low
Fraction of clusters	~ 1/3	~ 1/3	~ 1/3
Examples	A401, Coma	A194	Virgo, A1228

Tabella 4: principali classificazioni degli ammassi con relative proprietà.



### 3 Proprietà X-ray e questioni irrisolte

All'inizio di questo capitolo si analizzeranno i principali meccanismi radiativi che caratterizzano gli ammassi di galassie, ponendo l'accento sulle proprietà X-ray. Successivamente si esamineranno questioni ancora aperte, quali ad esempio l'esistenza o meno dell'equilibrio idrodinamico di gas e galassie col potenziale gravitazionale dell'ammasso di cui fanno parte o la stima della frazione barionica, cui è strettamente collegato il problema della materia oscura.

#### 3.1 Meccanismi di emissione degli ammassi di galassie

In banda X gli ammassi sono le sorgenti più comuni dell'universo con una luminosità variabile dai  $10^{35}$  ai  $10^{45}$  erg/s. Principale responsabile dell'emissione di raggi X è il gas caldo presente tra le galassie di un ammasso, esso si trova ad una temperatura di circa  $10^8$  K e presenta una densità di circa  $10^{-3}$  atomi per  $\text{cm}^3$ . In queste condizioni il fenomeno di emissione più rilevante è rappresentato dalla bremsstrahlung termica, dovuta al frenamento di particelle cariche (in prevalenza elettroni) causato dal campo coulombiano generato da cariche di segno opposto.

Un altro tipico meccanismo di emissione (questa volta in banda radio) caratterizzante gli ammassi di galassie è dato dall'emissione di sincrotrone, questo fenomeno è dovuto all'interazione di una popolazione non termica di elettroni con un campo magnetico. All'emissione radio di un ammasso contribuiscono in prevalenza le galassie, si è notato inoltre che gli ammassi più evoluti nella

classificazione di Rood-Sastre (cD, B, C e L) ed in quella di Bautz-Morgan tendono ad avere un'emissione radio più persistente. Le più potenti sorgenti radio si trovano spesso al centro degli ammassi, associate con le galassie dominanti nell'ottico, quali le cD. Solitamente le galassie isolate possiedono una struttura radio relativamente semplice e simmetrica, caratterizzata da un'emissione centrale in corrispondenza del nucleo della galassia ed una più estesa e diffusa, solitamente articolantesi in due lobi posizionati simmetricamente rispetto al nucleo ed in modo tale che la retta congiungente i due lobi passi per il nucleo stesso. Le galassie organizzate in ammassi tendono invece ad avere una struttura più complessa e meno simmetrica: si va da sorgenti in cui i 2 lobi non sono allineati col nucleo galattico (bent-doubles o wide-angle-tails) ad altre in cui si ha solo una coda che parte dal nucleo, come una cometa (head-tail o narrow-angle-tail). Un'altra struttura radio presente in alcuni ammassi di galassie è un alone diffuso più grande del nucleo dell'ammasso ma più piccolo dell'ammasso stesso (stimabile con il suo raggio di Abell). Non sono fenomeni molto comuni e per spiegarli sono state proposte diverse teorie sull'origine di questi aloni, la spiegazione più semplice e quotata è quella per cui questi elettroni provengano dalle sorgenti radio galattiche più forti dell'ammasso, e che si muovano in un campo magnetico  $B \approx 1\mu\text{G}$ , consistente con le osservazioni in banda X.

Altri due meccanismi di emissione che contraddistinguono gli ammassi di galassie sono dati dalla cosiddetta rotazione di Faraday (consistente in un effetto che modifica la polarizzazione della radiazione attraversante un mezzo immerso in un campo magnetico) e dall'effetto Sunyaev-Zeldovich che si configura come una perturbazione dello spettro della radiazione cosmica di fondo quando questa attraversa il gas interno agli ammassi.

### 3.2 Proprietà X-ray

Come visto in precedenza gli ammassi di galassie sono caratterizzati da una massiccia emissione di raggi X, dovuta alla bremsstrahlung termica verificantesi nel gas interno agli ammassi. Per la luminosità x-ray di un ammasso, dovuta alla bremsstrahlung termica di un gas a temperatura  $T_x$  dotato di densità elettronica uniforme  $n_e$  ed esteso in una regione sferica di raggio  $R_x$ , in una banda energetica dei fotoni compresa tra i valori  $E_1$  ed  $E_2$  vale la seguente relazione di proporzionalità:

$$L_x \propto n_e^2 R_x^3 T_x^{0.5} g(e^{-E_1/kT_x} - e^{-E_2/kT_x}).$$

In cui  $g$  rappresenta il fattore di Gaunt, il cui valore varia lentamente in funzione dell'energia e della temperatura.

La luminosità bolometrica (cioè comprensiva di tutte le lunghezze d'onda) dovuta a bremsstrahlung termico del nucleo di un ammasso può essere invece approssimata come segue:

$$L_x(\text{core}) \simeq 1.4 \times 10^{42} n_e(\text{cm}^{-3})^2 R_c(\text{kpc})^3 kT_x(\text{keV})^{0.5} h^{-2} \text{ erg s}^{-1}.$$

Property	Typical value of range
$L_x$ (2-10 keV)	$\sim (10^{42.5}-10^{45})h^{-2} \text{ erg s}^{-1}$
$I_x(r)$	$I_x(r) \propto [1+(r/R_c)^2]^{-3}\beta^{+1/2}$
$\langle\beta\rangle$	$\sim 0.7$
$\rho_{\text{gas}}(r)$	$\rho_{\text{gas}}(r) \propto [1+(r/R_c)^2]^{-3}\beta^2$
	$\propto [1+(r/R_c)^2]^{-1}$
$kT_x$	$\sim 2-14 \text{ keV}$
$T_x$	$\sim 2 \times 10^7-10^8 \text{ K}$
$\beta_{\text{spect}} = \sigma_r^2 / kT_x / \mu m_p$	$\sim 1$
$R_c(x)$	$\sim (0.1-0.3)h^{-1} \text{ Mpc}$
$n_e$	$\sim 3 \times 10^{-3}h^{1/2} \text{ cm}^{-3}$
$\mathcal{M}_{\text{gas}} (\lesssim 1.5h^{-1} \text{ Mpc})$	$\sim 10^{13.5} \mathcal{M}_{\odot} [\text{range: } (10^{13}-10^{14}) \mathcal{M}_{\odot} h^{-2.5}]$
$\mathcal{M}_{\text{gas}} / \mathcal{M}_{\text{cl}} (\lesssim 1.5 h^{-1} \text{ Mpc})$	$\sim 0.07 (\text{range: } 0.03-0.15 h^{-1.5})$
Iron abundance	$\sim 0.3 \text{ solar} (\text{range: } 0.2-0.5)$

Tabella 5: principali proprietà relative all'emissione nello spettro X-ray.

La funzione di luminosità nella banda X degli ammassi di galassie (ovvero la densità numerica di ammassi con luminosità X-ray compresa tra  $L_x$  ed  $L_x + d L_x$ ) può essere approssimata come segue:

$$\Phi_x(L_x)dL_x \simeq 2.7 \times 10^{-7} (L_x/10^{44})^{-1.85} \exp(-L_x/8.1 \times 10^{44}) (dL_x/10^{44}) \text{ Mpc}^{-3}$$

assumendo  $h = 0.5$ .

In alternativa la funzione di luminosità può anche essere approssimata con la seguente legge di potenza:

$$\Phi_x(L_x)dL_x \simeq 2.2 \times 10^{-7} (L_x/10^{44})^{-2.17} (dL_x/10^{44}) \text{ Mpc}^{-3} (h = 0.5).$$

Si riscontra una correlazione tra proprietà ottiche ed X-ray degli ammassi, alcune dipendenze fondamentali di grandezze fisiche descriventi un ammasso in funzione della temperatura X-ray dello stesso sono riportate nella seguente tabella.

Properties	Correlation
$\sigma_r - T$	$\sigma_r \text{ (km s}^{-1}\text{)} \simeq (332 \pm 52)[kT \text{ (keV)}]^{0.6 \pm 0.1}$
$T - N_{0.5}$	$kT \text{ (keV)} \simeq 0.3 N_{0.5}^{0.95 \pm 0.18}$
$L_x - N_{0.5}$	$L_x(\text{bol}) \sim 1.4 \times 10^{40} N_{0.5}^{3.16 \pm 0.15} h^{-2}$
$L_x - f_{\text{sp}}$	$L_x(\text{bol}) \simeq 0.6 \times 10^{43} f_{\text{sp}}^{-2.16 \pm 0.11} h^{-2}$
$f_{\text{sp}} - T$	$f_{\text{sp}} \simeq 1.2 [kT \text{ (keV)}]^{-0.94 \pm 0.38}$
$T - L_x$	$kT \text{ (keV)} \simeq 0.3 [L_x(\text{bol}) h^2 / 10^{40}]^{0.297 \pm 0.004}$

Tabella 6: correlazione tra proprietà ottiche ed X-ray.

### 3.3 Equilibrio idrostatico

I modelli tutt'ora usati per descrivere gli ammassi si basano sull'assunto che il gas e le galassie di un ammasso siano approssimativamente in equilibrio idrostatico col potenziale gravitazionale che tiene unito l'ammasso stesso. Se così fosse per il gas dovrebbe valere la relazione:

$$\frac{dP_{\text{gas}}}{dr} = -\frac{GM_{\text{cl}}(\leq r)\rho_{\text{gas}}}{r^2}$$

in cui  $P_{\text{gas}}$  e  $\rho_{\text{gas}}$  rappresentano rispettivamente pressione e densità del gas, mentre  $M_{\text{cl}}(\leq r)$  rappresenta la massa dell'ammasso contenuta in un raggio  $r$ . Essa può essere rappresentata dalla relazione:

$$M_{\text{cl}}(\leq r) = -\frac{kT}{\mu m_p G} \left( \frac{d \ln \rho_{\text{gas}}(r)}{d \ln r} + \frac{d \ln T}{d \ln r} \right) r ,$$

in cui figurano, tra le altre grandezze, la temperatura  $T$  e la massa media delle particelle del gas ( $\mu m_p$ ).

Per quanto riguarda le galassie esse sono soggette al medesimo potenziale e verificano l'uguaglianza:

$$M_{\text{cl}}(\leq r) = -\frac{\sigma_r^2}{G} \left( \frac{d \ln \rho_{\text{gal}}(r)}{d \ln r} + \frac{d \ln \sigma_r^2}{d \ln r} + 2A \right) r ,$$

Nella quale  $\sigma_r$  è la velocità radiale di dispersione,  $\rho_{\text{gal}}$  rappresenta il profilo di densità della galassia considerata, mentre il termine  $A$  tiene conto di un'eventuale anisotropia nella distribuzione delle velocità delle galassie.

Dividendo membro a membro le due relazioni precedenti si ottiene:

$$\beta_{\text{spec}} \equiv \frac{\sigma_r^2}{kT/\mu m_p} = \frac{d \ln \rho_{\text{gas}}(r)/d \ln r + d \ln T/d \ln r}{d \ln \rho_{\text{gal}}(r)/d \ln r + d \ln \sigma_r^2/d \ln r + 2A} ,$$

In cui  $\beta_{\text{spec}}$  indica il rapporto tra l'energia per unità di massa del gas e l'energia per unità di massa delle galassie, determinabile sperimentalmente studiando la velocità di dispersione delle galassie e la temperatura del gas. Dalle osservazioni su un vasto campione di ammassi si stima un valore di  $\beta_{\text{spec}}$  di  $1 \pm 0.1$  e ciò risulta consistente con l'ipotesi di equilibrio idrostatico (almeno approssimativo) di galassie e gas col potenziale dell'ammasso. Un'immediata conseguenza della stima del parametro  $\beta_{\text{spec}}$  ottenuta è che, mediamente, l'energia per unità di massa delle galassie e del gas di uno stesso ammasso sono approssimativamente coincidenti ( $\sigma^2_r \simeq kT/\mu m$ ).

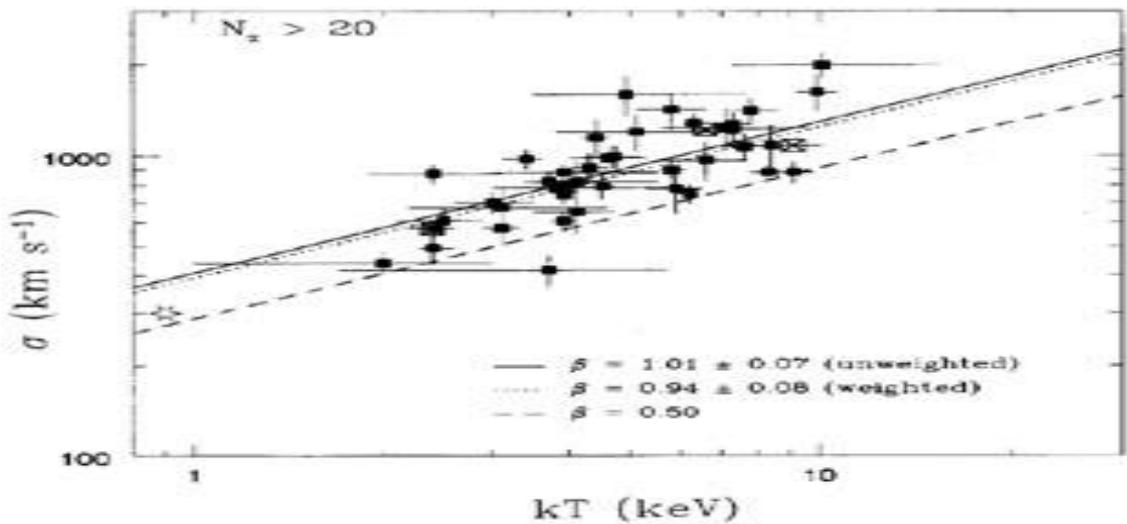


Figura 4: stima di  $\beta_{\text{spec}}$  mediante fit (pesato e non) basata su misure di velocità di dispersione delle galassie e temperatura del gas, Lubin e Bahcall, 1993.

Un'altra questione di grande rilievo (soprattutto per le indicazioni che può fornire sull'evoluzione dell'universo) riguarda la percentuale di metalli presente nel gas degli ammassi. L'abbondanza di ferro stimata nel gas che popola gli ammassi è circa 0.3 volte quella stimata nel sole,

con qualche variazione ( $\pm 0.1$ ) da un ammasso all'altro, si riscontra inoltre negli ammassi di tipo E+S0 una forte correlazione tra la massa di ferro totale posseduta dall'ammasso e la sua luminosità. Si suppone che l'arricchimento metallico del gas di un ammasso sia dovuto al gas proveniente dalle galassie ellittiche dell'ammasso stesso.

Il profilo di abbondanza del ferro concepito come funzione del raggio di un ammasso risulta approssimativamente costante, tranne che per ammassi poveri, dotati di piccola massa e dominati da un'unica galassia centrale.

### 3.4 Frazione barionica

Gli ammassi ricchi di galassie si configurano come le strutture ideali da analizzare per ricavare informazioni sulla cosiddetta frazione barionica (ovvero sul rapporto tra massa barionica e massa totale) su scale dell'ordine dei Mpc. La massa barionica di un ammasso di galassie comprende la materia galattica luminosa nonché il gas che popola l'ammasso stesso. Tenendo conto di questi due contributi la frazione barionica stimata risulta insufficiente ad arrestare l'espansione dell'universo.

Immediata conseguenza di questo risultato (di fondamentale importanza cosmologica) è un universo "aperto", destinato ad espandersi senza fine, in quanto l'attrazione gravitazionale non sarà mai in grado di arrestare il moto di recessione delle galassie. Al fine di esplorare scenari alternativi per l'evoluzione ed il destino dell'universo risulta quindi necessario accertare l'esistenza di un contributo alla massa di quest'ultimo non rilevabile tramite radiazione luminosa, di qui la cruciale importanza del problema della materia oscura.

### 3.5 Materia oscura

Strettamente legata alla frazione barionica è la questione della materia oscura che costituisce ai nostri giorni uno di problemi di maggior interesse e rilievo cosmologico. Con l'espressione "materia oscura" si indica un'ipotetica componente della materia che non emette radiazione luminosa e pertanto rilevabile unicamente grazie agli effetti gravitazionali che produce. Essa dovrebbe costituire circa il 90% della materia presente nell'universo. Il concetto di materia oscura risulta essenziale nella cosmologia moderna, dal momento che l'ipotesi dell'esistenza di questa componente "invisibile" della materia è l'unica che, alla luce del modello cosmologico attuale, consente di spiegare la formazione di galassie ed ammassi ed il carattere stabile di strutture come le galassie che tenendo conto unicamente del contributo gravitazionale della materia visibile non potrebbero preservare la propria integrità. Evidenze a sostegno dell'esistenza della materia oscura possono essere rilevate studiando il lensing gravitazionale, verificantesi anche in regioni in cui la massa visibile non sembrerebbe sufficiente a costituire una lente gravitazionale.



Figura 4 Lente gravitazionale nell'ammasso di galassie Abell 1698.

Un'altra questione di notevole importanza riguarda la localizzazione della materia oscura ed in particolare la determinazione della sua posizione in aggregati quali galassie ed ammassi. A livello galattico la materia oscura sembra occupare prevalentemente gli aloni oscuri che circondano le galassie, mentre in aggregati quali gruppi ed ammassi non si rilevano quantità significative di materia oscura non appartenente alle galassie costituenti. Quanto detto è supportato dall'andamento del rapporto massa-luminosità che, per le galassie, aumenta ad un raggio di circa  $0.1-0.2h$  Mpc grazie al contributo dei vasti aloni oscuri galattici, risultando invece costante per gruppi ed ammassi ricchi su scale dell'ordine di 1.5 Mpc.

Ancora da chiarire è inoltre la natura della materia oscura, si ipotizza che essa possa essere costituita dalle cosiddette particelle WIMP (Weakly Interacting Massive Particles), molto massicce e caratterizzate da scarsa interattività con la materia ordinaria. Tali particelle non sono però mai state osservate e tutt'oggi si cerca di produrle tramite gli acceleratori di particelle o di osservare l'energia caratteristica della loro, seppur debole, interazione con la materia ordinaria. Una classica distinzione che si è soliti operare nella materia oscura porta a definire la materia oscura calda, composta in massima parte dai super veloci neutrini, e la materia oscura fredda che sarebbe costituita dalle sopracitate particelle WIMP.

A conclusione di questo paragrafo risulta necessario sottolineare che l'ipotesi dell'esistenza della materia oscura non è l'unica avanzata per spiegare le discrepanze tra teoria ed osservazioni, in tal senso sono degne di nota le teorie di gravità estesa che prevedono modifiche della dipendenza del campo gravitazionale della distanza che, qualora si rivelassero valide, consentirebbero di giustificare l'assetto dell'universo da noi osservato senza ricorrere alla materia oscura.



## Appendice

Si riportano come appendice le definizioni di alcuni concetti astronomici fondamentali dei quali si è fatto diffusamente uso in tutto il lavoro di tesi.

**h:** il termine  $h$ , che compare molto spesso nel testo come fattore moltiplicativo di risultati di misure di distanze, è un parametro adimensionale che può variare da 0.5 a 0.75 il cui scopo è rendere conto dell'incertezza sulla misura della costante di Hubble.

**Magnitudine apparente:** la magnitudine apparente  $m_x$  nella banda  $x$  può essere definita dalla relazione :  
 $m_x - m_{x,0} = -2.5 \log_{10}(F_x / F_{x,0})$  (in cui  $m_{x,0}$  ed  $F_{x,0}$  rappresentano rispettivamente la magnitudine ed il flusso di un oggetto di riferimento), essa fornisce una misura della luminosità di un corpo celeste in una certa banda rilevabile da un determinato punto di osservazione, quindi dipende oltre che dalla luminosità intrinseca del corpo anche dal punto di osservazione scelto (spesso la terra).

**Magnitudine assoluta:** magnitudine apparente che un oggetto possederebbe se fosse osservato da una distanza di 10 Pc.

**Velocità di dispersione:** variabilità statistica (solitamente espressa nei termini dello scarto quadratico medio) delle velocità degli oggetti associati in un sistema rispetto alla velocità media del sistema di cui fanno parte.

**Ricchezza:** la ricchezza di un ammasso fornisce una misura statistica della sua popolazione galattica. Zwicky definisce la ricchezza come il numero totale delle galassie visibili nel contorno (concepito come l'isopleta in cui la densità galattica superficiale è doppia rispetto alla densità locale del fondo) dell'ammasso considerato meno il numero di

galassie di background. Secondo Abell, invece, la ricchezza è il numero di galassie contenute in un cerchio di raggio  $R_A = 1.7/z$  arcominuti.

**Redshift:** fenomeno per il quale una radiazione elettromagnetica emessa da una sorgente presenta una lunghezza d'onda superiore rispetto a quella posseduta all'emissione, in ambito astronomico il redshift è una diretta conseguenza dell'effetto doppler a sua volta determinato dal moto di recessione delle galassie.

**Luminosità:** la luminosità di un'entità astronomica è la quantità di energia elettromagnetica che essa emette nell'unità di tempo.

**Modello di Lane-Emden:** il modello di Lane-Emden (usato per descrivere galassie ed ammassi di galassie) descrive un fluido newtoniano, poliprotico ed autogravitante, dotato di simmetria sferica.

**Approssimazione di King:** correzione al modello di Lane-Emden che tiene conto della finitezza dei sistemi analizzati (mediante l'introduzione di un raggio mareale) nonché dell'assenza di equilibrio termodinamico.

**Profili di densità:** i profili di densità di un ammasso rappresentano la densità numerica di galassie in funzione della posizione, è possibile distinguere profili spaziali (esprimenti una densità volumica) e proiettati, scaturenti dalla proiezione dei primi, che invece indicano una densità superficiale.

**Lensing gravitazionale:** con lensing gravitazionale si indica il fenomeno (previsto dalla Relatività Generale) per il quale una distribuzione di materia è in grado di deviare la traiettoria della radiazione luminosa transitante in sua prossimità.

**Radiazione cosmica di fondo:** radiazione elettromagnetica permeante tutto l'universo, residuo delle fasi iniziali della nascita dello stesso.

**Teorema del viriale:** teorema che lega l'energia cinetica media e l'energia potenziale media di un sistema stabile di  $N$  particelle.

**Funzione di correlazione:** funzione che valuta la probabilità di trovare due oggetti in una determinata posizione reciproca nell'ipotesi di una distribuzione casuale, usata per valutare se due entità risultano indipendenti o legati da mutua interazione.

## Bibliografia:

Clusters and superclusters of galaxies, Neta A. Bahcall, 1995.

A. Biviano, From Messier to Abell: 200 Years of Science with Galaxy Clusters, 2000, arXiv:astro-ph/0010409v1.

M.F. Struble, H.J. Rood, Morphological classification (revised RS) of Abell clusters in  $D \leq 4$  and an analysis of observed correlations.

C.L. Sarazin, X-ray Emission from Clusters of Galaxies, 1988, Cambridge University Press.

M. Harwit, Astrophysical concepts, 1973.