

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

Proprietà degli ammassi di galassie

Tesi di laurea

Presentata da:

Chiara Benetel

Relatore:

Prof.ssa

Marcella Brusa

Sommario

Gli ammassi di galassie (cluster) sono le più grandi strutture virializzate dell’Universo. Insieme ai filamenti composti da galassie, creano la rete cosmica. I cluster si formano nei nodi di questa rete, come ”ragni” nella loro ragnatela.

In questa tesi di laurea triennale vengono discusse le principali proprietà di queste gigantesche strutture.

Il primo capitolo tratta le caratteristiche morfologiche, i criteri di classificazione e un breve approfondimento è dedicato ai superammassi.

Il secondo capitolo affronta la composizione dei cluster e i metodi utilizzati per la misura della loro massa.

La terza parte discute l’emissione della componente di materia barionica più importante, l’Intracluster Medium, e le proprietà termodinamiche che si possono dedurre dalle osservazioni soprattutto in banda X. Dopo un breve focus sull’effetto di distorsione dello spettro della CMB, si passa ad una discussione dell’emissione radio.

Indice

1	Classificazione e proprietà generali	1
1.1	Classificazione di Abell	1
1.2	Classificazione morfologica	2
1.3	Interazioni negli ammassi	2
1.4	Tempo di rilassamento	3
1.5	Supercluster	4
2	Composizione materiale	5
2.1	Galassie	5
2.1.1	Galassie BCG	5
2.1.2	Distribuzione delle galassie negli ammassi	6
2.2	Mezzo intracluster	7
2.2.1	Metallicità	7
2.3	Materia oscura	8
2.4	La misurazione della massa	9
2.4.1	Massa Viriale	9
2.4.2	Massa idrostatica	9
3	Emissione del mezzo Intracluster	10
3.1	Emissione in banda X	10
3.1.1	Cooling Flow Problem	11
3.1.2	Ammassi cool-core e non-cool-core	11
3.2	Emissione in banda microonde	12
3.3	Emissione radio	13
3.3.1	Aloni Radio	13
3.3.2	Relitti radio	14
3.3.3	Plasma fossile rienergizzato	14
4	Conclusioni	15
	Appendice A: AGN feedback	16

Capitolo 1

Classificazione e proprietà generali

Le galassie nell'Universo tendono naturalmente ad aggregarsi a causa dell'attrazione gravitazionale, e poche possono essere considerate davvero isolate. Le aggregazioni di galassie nell'Universo possono variare notevolmente, da semplici coppie e gruppi, fino ai più grandi ammassi.

I gruppi di galassie, come il Gruppo Locale in cui si trova la Via Lattea, rappresentano le associazioni meno ricche, contenenti fino a circa 50 galassie.

Le aggregazioni più numerose sono invece classificate come ammassi di galassie (cluster), che costituiscono le più grandi strutture collassate e virializzate nell'Universo, come l'ammasso in figura 1.1. Un ammasso tipico contiene tra le 50 e le 1000 galassie, con dimensioni che possono raggiungere i 2 Mpc, masse totali (viriali) maggiori di $10^{14} M_{\odot}$ e dispersioni di velocità dell'ordine di 10^3 km/s.

1.1 Classificazione di Abell

Nel 1958, quando George O. Abell cominciò ad osservare gli ammassi, stabilì tre criteri principali per l'inclusione di tali oggetti nei suoi cataloghi.

- *Ricchezza*: il cluster deve contenere almeno 50 membri la cui magnitudine non supera di più di due magnitudini quella della terza galassia più luminosa (con magnitudine m_3).
A questo punto, i cluster vengono suddivisi in *classi di ricchezza* a seconda del numero di galassie con magnitudine tra m_3 e $m_3 + 2$. Successivi studi hanno mostrato che la ricchezza è proporzionale al numero totale di galassie nel cluster.
- *Compattezza*: le galassie legate gravitazionalmente, e quindi appartenenti all'ammasso, devono essere comprese nel Raggio di Abell ($2Mpc$).
- *Distanza*: i cluster con redshift minore di 0.02 sono troppo vicini, si estendono oltre al limite ottico degli strumenti utilizzati al tempo e quindi non vengono considerati in questo catalogo. Viene determinato anche un limite superiore, imposto dalla sensibilità degli strumenti: le galassie con magnitudini apparenti maggiori di $m_r = 20$ non sono visibili, quindi m_3 dev'essere al massimo 17.5. Tale condizione corrisponde ad un redshift $z \approx 0.2$.

Abell definì un catalogo di 1682 cluster.

Oggi, grazie ai dati delle DESI Legacy Imaging Surveys, è disponibile un catalogo molto



Figura 1.1: **Abell 2218**. Un ammasso ricco di galassie nella costellazione del Drago. Si notino gli archi della lente gravitazionale. *Crediti: NASA, ESA, and Johan Richard (Caltech, USA)*

esteso di 1,58 milioni di ammassi di galassie, identificato e analizzato da Z. L. Wen e J. L. Han (2024).

1.2 Classificazione morfologica

Nella banda del visibile¹ dello spettro eletromagnetico gli ammassi di galassie mostrano due tipi di struttura:

- regolare: se le galassie sono distribuite nell'ammasso con una simmetria quasi sferica.

In generale, le galassie ellittiche e S0 sono molto più comuni delle spirali e sono distribuite in numero crescente verso il centro dell'ammasso.

- irregolare: se presenta sottostrutture come aggregazioni ulteriori di galassie e non ha simmetria.

La frazione di spirali è più elevata rispetto a quella che si trova negli ammassi regolari.

La distribuzione delle galassie negli ammassi verrà affrontata in modo più specifico nel capitolo 2.

1.3 Interazioni negli ammassi

Per comprendere l'evoluzione delle galassie, un necessario ingrediente da considerare è l'interazione tra gli oggetti. Gli ammassi di galassie, grazie alla loro alta densità, sono ambienti estremamente favorevoli a questi incontri. Considerando infatti il numero di galassie, le loro velocità relative e le dimensioni dell'ammasso, è facile aspettarsi che una galassia subisca diverse interazioni con altri membri dell'ammasso in un tempo

¹mediamente tra i 380 e i 750 nm

relativamente ristretto.

L’interazione più influente sulla struttura delle galassie coinvolte è il *merging*, in quanto è un processo lento, che risulta nella fusione di due o più galassie in una unica, ellittica. Ci sono poi quattro ”trasformazioni” che possono avvenire nei cluster e che modificano in modo più o meno marcato la struttura delle galassie che le subiscono:

- *Harassment*: interazione tra galassie dovuta agli effetti cumulativi di diversi incontri ad alta velocità che modificano in modo più o meno evidente la loro struttura.
- *Ram Pressure Stripping*: avviene con la privazione di una galassia della sua intera riserva di gas freddo. La *ram pressure*, pressione di ariete, è un tipo di pressione dinamica esercitata dall’ambiente e dovuta al moto di avanzamento o espansione di un oggetto. Nel caso degli ammassi, il mezzo Intracluster esercita sul disco delle galassie che si muovono con una velocità v una pressione $P \approx \rho_{ICM} v^2$ privandole del loro gas freddo.
- Cannibalismo galattico: avviene nel momento in cui le BCG (delle quali si parlerà nel capitolo 2) inglobano altre galassie a causa della frizione dinamica² che fa ”cadere” le galassie minori all’interno di quelle più massicce. Tale fenomeno può spiegare le grandi masse delle BCG, che a volte presentano più nuclei.
- Strangolamento: fenomeno che rimuove lentamente il gas tramite *ram pressure* e interazioni mareali³, in maniera più lenta rispetto al *Ram Pressure Stripping* e contribuisce al declino della formazione stellare nelle galassie.

I cluster stessi si originano attraverso il processo di formazione gerarchica delle strutture: in questo scenario, unità più piccole (come galassie e gruppi), si sono formate per prime e fuse insieme in strutture sempre più larghe.

Questi *mergers* sono tra gli eventi più energetici nell’Universo a partire dal Big Bang, continuano ancora oggi e possono spiegare l’abbondanza di sottostruzzure e gradienti di temperatura rilevabili nelle osservazioni.

1.4 Tempo di rilassamento

Gli ammassi di galassie sono strutture virializzate (rilassate).

Il tempo di rilassamento è il tempo in cui un sistema raggiunge l’equilibrio dinamico: i sistemi per i quali t_{relax} è molto maggiore dell’età si dicono *sistemi non collisionali*, quelli con un’età minore sono *sistemi collisionali*.

$$t_{relax} = \left(\frac{N}{10 \ln N} \right) t_{cross} = \left(\frac{N}{10 \ln N} \right) \left(\frac{R_{cluster}}{\sigma_{vel}} \right) \quad (1.1)$$

²fenomeno che porta alla perdita di energia cinetica degli oggetti in movimento a causa dell’interazione gravitazionale con la materia circostante.

³effetti gravitazionali differenziali che un corpo esteso sperimenta a causa del campo gravitazionale di un altro corpo massiccio vicino. Poiché la forza di gravità diminuisce con la distanza, un oggetto esteso subisce una maggiore attrazione gravitazionale sul lato rivolto verso il corpo disturbante e una minore attrazione sul lato opposto, causando una distorsione o un’alterazione della sua struttura interna.

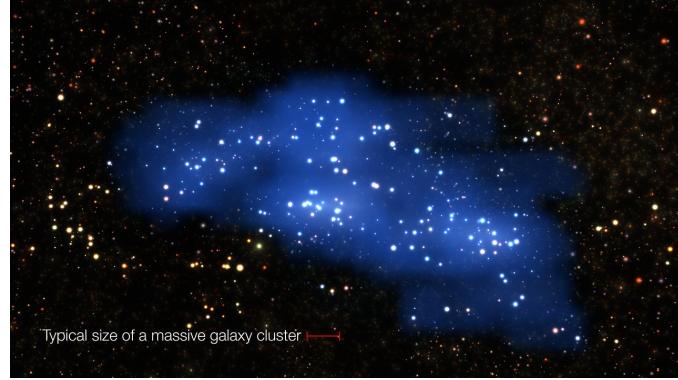


Figura 1.2: **Supercluster Hyperion**: È la struttura più grande e più massiccia ($M \sim 10^{15} M_{\odot}$) mai trovata in un'ubicazione così lontana nel tempo e nello spazio - a soli 2 miliardi di anni dopo il Big Bang. *Crediti: ESO/L. Calçada e Olga Cucciati et al.*

dove t_{cross} è il *crossing time*, ovvero il tempo minimo per l'alterazione della struttura di un sistema dinamico.

$$t_{cross} \approx \frac{R_{cluster}}{\sigma_{vel}} = \frac{3.1 \times 10^{24} \text{ cm}}{10^8 \text{ cm s}^{-1}} \approx 10^9 \text{ yr}$$

per i cluster, $N \sim 100 - 1000$

$$t_{relax} \sim 10^9 - 10^{10} \text{ yr}$$

per i cluster più massivi si trova $t_{relax} \approx$ età dell'Universo \approx età degli ammassi, quindi si può dire che anche gli ammassi più grandi hanno avuto tempo di virializzarsi e quindi di raggiungere uno stato di rilassamento.

1.5 Supercluster

Il termine supercluster viene usato per descrivere strutture su scale maggiori rispetto agli ammassi, che possono essere formate da aggregazioni di cluster, oppure da un ammasso ricco con ulteriori gruppi associati.

La distinzione principale tra ammassi e superammassi si basa sul loro stato di legame gravitazionale: gli ammassi, in particolare quelli regolari, sono considerati sistemi vincolati autogravitanti: hanno avuto tempo sufficiente per rilassarsi in uno stato di equilibrio. Al contrario, sulle scale più grandi dei superammassi, c'è stato appena il tempo perché i sistemi diventassero gravitazionalmente legati, in altre parole, la scala temporale dell'Universo non è stata sufficiente per permettere a queste vaste strutture di raggiungere l'equilibrio dinamico.

La nostra Galassia, e quindi il Gruppo Locale, sono membri di quello che è conosciuto come il Superammasso Locale. Questa struttura è una vasta distribuzione di galassie centrata sull'ammasso della Vergine, che si trova ad una distanza di circa 15 Mpc dalla Via Lattea.

Capitolo 2

Composizione materiale

Un ammasso di galassie ($M \approx 10^{14-15} M_{\odot}$) ha una componente di massa così distribuita: per l'80% circa è Materia Oscura, la massa del gas è il 15 – 17% e solamente il 3 – 5% è la massa di materia luminosa delle galassie.

numero di galassie	50 – 1000
massa stellare (M_{\odot})	$10^{12} – 10^{13}$
dispersione di velocità (km/s)	500 – 2000
massa del gas (M_{\odot})	$10^{13} – 10^{14}$
massa viriale (M_{\odot})	$10^{14} – 10^{15}$
raggio viriale (Mpc)	1 – 3

Tabella 2.1: **Principali proprietà degli ammassi.** *Crediti: C. Nipoti A. Cimatti, F. Fraternali. Introduction to Galaxy Formation and Evolution.*

2.1 Galassie

Le galassie rappresentano la parte visibile in banda ottica negli ammassi.

Sono sistemi legati gravitazionalmente composti da stelle, materia interstellare e una grande quantità di materia oscura, con luminosità che vanno da circa $10^5 L_{\odot}$ delle *Ultra Faint Dwarfs*, scoperte solo recentemente, alle più luminose dell'Universo, come le BCG, con luminosità che arrivano alle $10^{12} L_{\odot}$.

Vennero classificate da Hubble per la prima volta nel 1926 in base alla loro morfologia, che è la combinazione della loro struttura tridimensionale e la proiezione rispetto alla linea di vista. La classificazione rimane sostanzialmente invariata, ma viene modernizzata con i nuovi parametri e la scoperta delle galassie irregolari, come si può vedere in figura 2.1.

2.1.1 Galassie BCG

Una galassia BCG, *Brightest Cluster Galaxy*, è definita come la galassia più luminosa all'interno di un ammasso.

È sempre una galassia ellittica gigante e si trova tipicamente al centro del cluster.

Sono galassie con luminosità molto elevate, tra le più grandi nell'Universo per dimensioni, a volte ulteriormente ingrandite da un alone diffuso di stelle meno luminose (in questo caso vengono chiamate galassie cD), con estensione che arriva anche ai 300kpc.

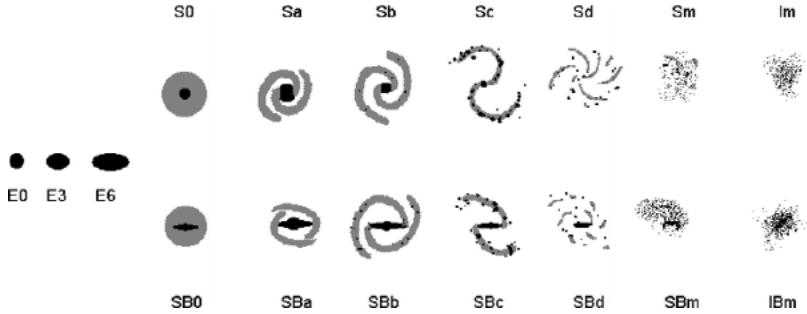


Figura 2.1: **Classificazione di Hubble moderna** *Crediti: Buta, EAA*

Sono oggetti estremamente massivi, fino alle $10^{13} M_{\odot}$, e spesso presentano molteplici nuclei, a riconferma del fatto che si sono molto probabilmente formate tramite il fenomeno discusso in precedenza del cannibalismo galattico. Vengono spesso identificate come potenti radio sorgenti, al cui interno si trova un Buco Nero Supermassiccio responsabile del meccanismo di Feedback che verrà discusso in appendice.



Figura 2.2: **BCG del cluster Abell 2261**, il cui diametro è almeno 20 volte quello della nostra Via Lattea. *Crediti: NASA, ESA, M. Postman (Space Telescope Science Institute, USA), T. Lauer (National Optical Astronomy Observatory, USA), e CLASH team*

2.1.2 Distribuzione delle galassie negli ammassi

Nel 1974 Oemler, studiando un catalogo di ammassi di Abell, ne distingue tre tipi principali a seconda del loro contenuto in termini di galassie:

- ammassi cD: presentano al centro un'unica e dominante galassia cD, sono inoltre molto ricchi di galassie ellittiche e S0.
La densità di galassie cresce verso il centro, ma le spirali diminuiscono radialmente, quasi a creare un alone attorno al nucleo centrale di lenticolari ed ellittiche.
- ammassi *Spiral-rich*: composti al 50% da spirali, la distribuzione radiale di ellittiche, lenticolari e spirali è più o meno la stessa, e non presentano la caratteristica densità crescente verso il centro.
- ammassi *Spiral-poor*: non hanno una galassia centrale dominante, il numero di ellittiche e spirali è simile, leggermente più alto il numero di lenticolari. Hanno una distribuzione intermedia tra le due precedenti e anche in esse le spirali tendono a diminuire in numero verso il centro.

Proprietà	Regolare	Intermedio	Irregolare
Galassie contenute	Ellittiche, S0	Spiral-poor	Spiral-rich
Rapporto E:S0:S	3:4:2	1:4:2	1:2:3
Simmetria	Sferica	Intermedia	Irregolare
Concentrazione centrale	Alta	Moderata	Bassa
Segregazione della massa	Evidente	Evidente	Assente

Tabella 2.2: **Proprietà della distribuzione spaziale degli ammassi di galassie.**

Crediti: Bahcall, 1977

Oemler trovò inoltre una certa segregazione di massa delle galassie membro: soprattutto negli ammassi cD e *Spiral-poor*, le galassie più massicce tendono a trovarsi più vicine al centro rispetto a quelle meno massicce.

Negli ammassi regolari la densità spaziale di galassie cresce verso le regioni centrali, che compongono il *core* dell'ammasso. Fuori da questa regione, la densità spaziale di galassie decresce fino a sfumare nel background. Tale struttura regolare permette di determinare, come visto in sezione 1.4, che gli ammassi di questo tipo hanno raggiunto il tempo di rilassamento e quindi uno stato dinamico stazionario simile a quello degli ammassi globulari di stelle.

2.2 Mezzo intracluster

Il **mezzo intracluster** è un plasma¹ magnetizzato che emette principalmente con il meccanismo della Bremsstrahlung termica in banda X (si veda il capitolo 3 per la trattazione completa dell'emissione del mezzo), si trova a temperature di $10^7 - 10^8 K$, con una densità molto bassa, di circa 10^3 particelle/cm³, e permea l'intero volume dell'ammasso.

Si stima che nei cluster più grandi l'*intracluster medium*, ICM, contenga più materia barionica che tutte le galassie appartenenti al cluster messe insieme. La sua presenza indica il confinamento dell'ammasso in una profonda buca di potenziale².

2.2.1 Metallicità

La metallicità di un ammasso, che permette di ricavare informazioni sull'età della struttura, può essere stimata dallo spettro in banda X grazie alla presenza di numerose linee di emissione riconducibili a metalli altamente ionizzati, in particolare il complesso di linee del Fe a 7 KeV, dovute alle transizioni degli elettroni nei livelli energetici più interni.

Grazie all'analisi dello spettro, in particolare tramite la misura dell'*equivalent width* delle linee di emissione, è quindi possibile stimare l'abbondanza di metalli nel mezzo Intracluster, che risulta essere circa un terzo del valore di metallicità solare. Vengono inoltre rilevati gradienti di metallicità quindi si può affermare che l'abbondanza di elementi pesanti aumenta nelle zone centrali degli ammassi.

È difficile determinare con precisione la provenienza di tali metalli, che sembrerebbero

¹Un fluido completamente ionizzato ma neutro nel complesso.

²Concetto di meccanica che rappresenta idealmente un sistema in cui l'energia potenziale tiene "legate" le particelle.

di origine primordiale, in quanto la massa dell'ICM è molto maggiore rispetto a quella delle galassie, ma una parte deriva sicuramente dall'evoluzione stellare che influisce sulla composizione del gas circostante.

2.3 Materia oscura

La componente principale della massa di un cluster è quella data dalla materia oscura, infatti gli ammassi di galassie rappresentano uno dei sistemi che conferma la presenza di materia non interagente nell'Universo.

Già nel 1933 infatti, studiando l'effetto Doppler in un ammasso di galassie (Coma), Fritz Zwicky rileva delle anomalie gravitazionali in quanto, per ottenere il risultato osservato, la densità del cluster, per quanto riguarda la materia luminosa, dovrebbe essere 400 volte tanto. Si ha la prima evidenza della presenza elevata di una materia non interagente con la materia ordinaria e appunto, non luminosa: la materia oscura. Poichè i cluster di galassie sono ottimi esempi di **lensing gravitazionale**³ (come si può vedere molto bene anche nell'immagine 1.1, dove si notano degli "archetti" che altro non sono che la proiezione distorta di galassie che si trovano dietro all'ammasso rispetto alla linea di vista), è possibile misurare la loro massa servendosi di tale fenomeno, come predisse Einstein nel 1915.

Poichè la Materia Oscura, come suggerisce il suo nome, non si può osservare, può essere studiata tramite simulazioni numeriche, come quella in figura 2.3, della Collaborazione Illustris, che mostra entrambe la distribuzione di materia oscura e di densità del gas dell'universo. In figura 2.4, invece, si vede una ricostruzione della distribuzione di massa totale di un cluster.

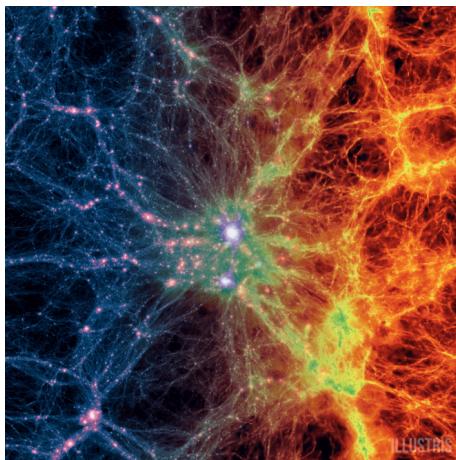


Figura 2.3: **Simulazione Illustris per la formazione delle galassie**, centrata in un ammasso di galassie massiccio che mostra la distribuzione di materia oscura (sinistra) e quella di densità del gas (destra). *Crediti: Illustris Collaboration*

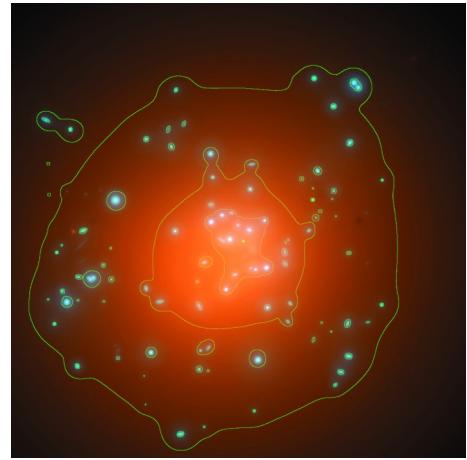


Figura 2.4: **Ricostruzione della massa totale del cluster CL 0024**: La materia oscura viene mostrata in arancione, la massa associata alle galassie viene mostrata in blu. I contorni sono associati all'entità del lensing gravitazionale. *Crediti: Tyson et al., 1998*

³fenomeno di distorsione della luce dovuto ad una distribuzione di materia che funge da lente e che provoca una distorsione dello spazio-tempo

2.4 La misurazione della massa

La misurazione della massa degli ammassi potrebbe sembrare immediata: grazie al teorema del viriale, ad esempio, la risoluzione è molto semplice da sviluppare.

Il problema si crea nel momento in cui bisogna capire se una galassia visibile nell'immagine sia veramente appartenente all'ammasso e non sia solo una coincidenza di oggetti in primo piano e sullo sfondo. Studi sempre più accurati, tra cui SDSS, riescono a risolvere tali dubbi.

In seguito vengono trattati i due metodi principali per il calcolo della massa di un cluster di galassie. La massa viriale è la massa di un sistema gravitazionalmente legato, deriva dall'applicazione del teorema del viriale, e viene calcolata utilizzando le proprietà cinematiche del sistema. La massa idrostatica viene stimata utilizzando l'emissione in banda X del mezzo Intracluster, e si basa sull'assunzione di un sistema all'equilibrio idrostatico.

La discrepanza che le simulazioni numeriche mostrano tra massa idrostatica e teorica è dovuta alle deviazioni dall'equilibrio idrostatico del sistema. È quindi necessario calcolare entrambe le masse, viriale e idrostatica, per una maggiore comprensione dello stato fisico all'interno dell'ammasso e per affinare la comprensione della massa complessiva.

2.4.1 Massa Viriale

Il teorema del viriale lega fra loro informazioni strutturali e dinamiche sul sistema studiato. Consente di stimare la massa totale del sistema a partire da misure di velocità tipiche e dalla scala di grandezza nel seguente modo:

$$2K + U = 0 \quad \text{teorema del viriale} \quad (2.1)$$

dove K è l'energia cinetica interna del sistema e U l'energia potenziale del sistema.

$$2 \times \frac{1}{2}M\langle v^2 \rangle = \frac{GM^2}{R}$$

dove $\langle v^2 \rangle = 3\sigma_r^2$ per sistemi sferici con una distribuzione di velocità isotropica, σ_r è la dispersione di velocità radiale. Per cui

$$M_{vir} \approx \frac{3\sigma_r^2 R}{G}. \quad (2.2)$$

2.4.2 Massa idrostatica

L'equilibrio in un sistema sferico, come ad esempio le stelle o in prima approssimazione gli ammassi, si chiama equilibrio idrostatico: la forza di gravità e la pressione di radiazione si devono bilanciare.

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2}\rho(r) \quad \text{equazione dell'equilibrio idrostatico} \quad (2.3)$$

La pressione per un gas ideale è

$$P = \frac{\rho}{\mu m_H} kT$$

si può allora ricavare

$$M(r) = \frac{k}{G\mu m_H} \frac{r^2}{\rho} \left(-T \frac{d\rho}{dr} - \rho \frac{dT}{dr} \right).$$

$T(r)$ e $\rho(r)$ possono essere derivate dalle osservazioni in banda X, e da questi dati è quindi possibile ricavare la massa dei cluster.

Capitolo 3

Emissione del mezzo Intracluster

Gli ammassi di galassie possono essere identificati come picchi di densità nella distribuzione di galassie nelle immagini ottiche o infrarosse (Abell, 1958), ma anche dell'emissione a raggi X dell'Intracluster medium (Cavaliere, Fusco-Femiano, 1976), o tramite l'effetto di distorsione sulla CMB, detto di Sunyaev-Zeldovich.

3.1 Emissione in banda X

Gli ammassi sono alcune tra le sorgenti più luminose nella banda X dello spettro eletromagnetico, con luminosità dell'ordine di $10^{43} - 10^{46} \text{ erg/s}$. Date le alte temperature dell'ICM, l'emissione nei raggi X è dominata dalla **bremsstrahlung termica**¹.

Sotto diverse condizioni, tra cui l'assunzione che la temperatura delle particelle libere sia descritta da una distribuzione di Maxwell-Boltzmann², si può considerare l'ICM come un plasma caldo, diffuso e totalmente ionizzato.

Sapendo che il continuo in banda X in un plasma di questo genere è dovuto principalmente alla bremsstrahlung termica, è possibile trovare l'emissività a frequenza ν del gas a temperatura T , densità di elettroni n_e e densità di ioni n_i

$$J_{br}(\nu, T) = 6.8 \times 10^{-38} Z^2 n_e n_i T^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{h\nu}{kT}} \bar{g}(\nu, T) \quad (3.1)$$

dove $\bar{g}(\nu, T)$ è il fattore di Gaunt, che corregge il risultato per effetti quantistici. Si può ottenere, integrando l'equazione 3.1 su tutto lo spettro di frequenze, la potenza totale emessa:

$$J_{br}(T) = 1.4 \times 10^{-27} Z^2 n_e n_i T^{\frac{1}{2}} \bar{g}(T) \quad (3.2)$$

Dal profilo di brillanza superficiale in banda X, è possibile allora ottenere il profilo di densità del gas.

¹ Radiazione dovuta all'accelerazione di una carica nel campo Coulombiano di un'altra carica

² Distribuzione teorica assunta dalle particelle di un gas all'equilibrio termodinamico, che rende il mezzo trattabile come fluido che soddisfa le equazioni idrodinamiche

3.1.1 Cooling Flow Problem

Una teoria ormai superata per quanto riguarda gli ammassi è quella che tratta uno dei principali meccanismi nei gas astrofisici: il **raffreddamento radiativo**.

Si può ben capire che l'Intracluster medium perde continuamente energia per via dell'emissione X: nelle regioni centrali, dove l'emissione, e quindi la perdita di energia, è più elevata, il peso degli strati più esterni crea un flusso subsonico verso l'interno.

Infatti se si considera il tempo di raffreddamento radiativo, $t_{cool} \propto T^\alpha/n$ (dove $-1/2 \lesssim \alpha \lesssim 1/2$ e n la densità del gas), un *cooling flow* si forma nel momento in cui t_{cool} è inferiore all'età del sistema, per cui il gas al centro a causa delle perdite radiative, perde il supporto della pressione e comincia a fluire verso l'interno: il risultato netto è quello di avere un continuo e lento incremento di materia fredda depositata sul volume del nucleo del cluster e ci si aspetta di vedere elevata formazione stellare (in quanto uno dei principali requisiti per andare incontro a questo fenomeno è quello di avere gas molecolare a basse temperature).

Le vecchie osservazioni X a bassa risoluzione erano in accordo con tale predizione, ma con i nuovi satelliti a raggi X, *Chandra* e *XMM-Newton*, la comprensione del fenomeno è stata radicalmente cambiata, tanto da essere ora chiamato *"Cooling Flow Problem"*: le osservazioni spettrali rivelano una presenza di gas freddo molto minore rispetto alla quantità prevista.

Due approcci vengono adottati per risolvere questo problema: poichè il gas irradia pur non raffreddandosi, o le normali caratteristiche che ci si aspetta di vedere vengono in qualche modo soppresse, o dev'esserci per forza un meccanismo che tramite l'iniezione di energia previene il raffreddamento del gas Intracluster: la soluzione più promettente sembrerebbe essere proprio la seconda, relativa all'azione dell'AGN feedback, trattato in modo più approfondito in appendice, e confermata da osservazioni come quella nell'immagine 3.1, dove si vede come l'emissione radio dell'AGN ha spazzato il gas che emette in banda X, creando delle cavità.

Gli studi relativi al *cooling-flow problem* hanno portato inoltre ad un vero e proprio cambiamento di terminologia e gli ammassi che in precedenza venivano chiamati *cooling-flow cluster* sono attualmente classificati come ammassi *cool-core*.

3.1.2 Ammassi cool-core e non-cool-core

Sebbene in prima approssimazione il gas intracluster possa essere considerato isotermitico, la misura dei profili di temperatura tramite le osservazioni della sua emissione rivela la presenza di gradienti di temperatura.

Se la temperatura nelle parti interne cresce verso l'esterno, l'ammasso si dice essere **cool-core**. Questi ammassi sono principalmente regolari, simmetrici e presentano in genere una radiogalassia centrale.

Gli ammassi che presentano un profilo di temperatura più piatto vengono chiamati **non-cool-core**. Si parla di ammassi più irregolari e ricchi di sottostrutture, privi di una radiogalassia centrale.

L'origine di tale dicotomia deriva probabilmente dalla storia evolutiva degli ammassi trattati: si crede che gli ammassi cool-core non abbiano subito merging recenti, avvenuti invece negli ammassi non-cool-core.

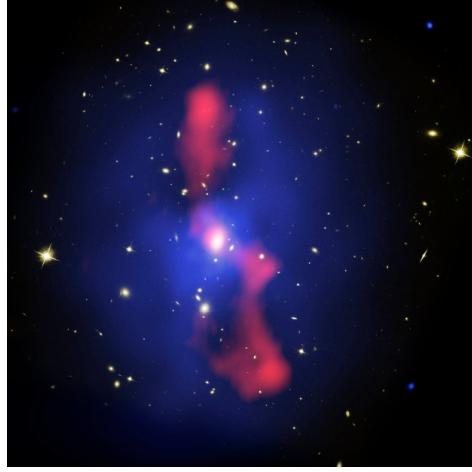


Figura 3.1: **Immagine composita del cluster MS 0735+7412** La parte ottica, fotografata da Hubble, mostra le galassie che compongono l’ammasso. La componente X, captata da Chandra, viene mostrata in blu e la componente radio, presa con VLA, in rosso. Si noti come le cavità nel gas blu vengano riempite dai lobi rossi. *Crediti: NASA, ESA, CXC, STScI, and B. McNamara (University of Waterloo), NRAO, and L. Birzan and team (Ohio University)*

3.2 Emissione in banda microonde

Il mezzo intracluster è responsabile di un effetto di distorsione dello spettro della CMB³ chiamato effetto Sunyaev-Zeldovich, visibile nella banda delle microonde. Poichè i fotoni della CMB hanno energie molto minori di quelli del cluster, il risultato dell’interazione è uno scattering di Compton inverso, ovvero un trasferimento di energia dagli elettroni ai fotoni, con una conseguente distorsione dello spettro della CMB nella posizione del cluster sul piano del cielo.

Un fotone di frequenza originale ν , dopo lo scattering avrà frequenza $\nu + \Delta\nu$, con $\Delta\nu/\nu \approx k_B T_e / (m_e c^2)$, con T_e la temperatura degli elettroni (dell’ICM). Per cui lo spettro distorto non sarà uno spettro di corpo nero perché la distorsione dipende dalla frequenza ad una data T_e , come si può vedere in figura 3.2.

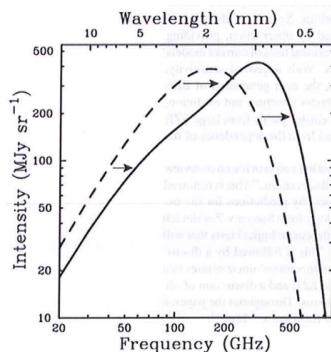


Figura 3.2: **Effetto Sunyaev-Zeldovich.** Spettro della CMB non distorto (linea tratteggiata) e distorto da SZE (linea continua). L’effetto causa un decremento dell’intensità dello spettro a frequenze $\lesssim 218$ GHz e un aumento a frequenze superiori.

³La Radiazione Cosmica di Fondo (CMB) è il residuo raffreddato della prima luce che abbia mai potuto viaggiare liberamente attraverso l’Universo.

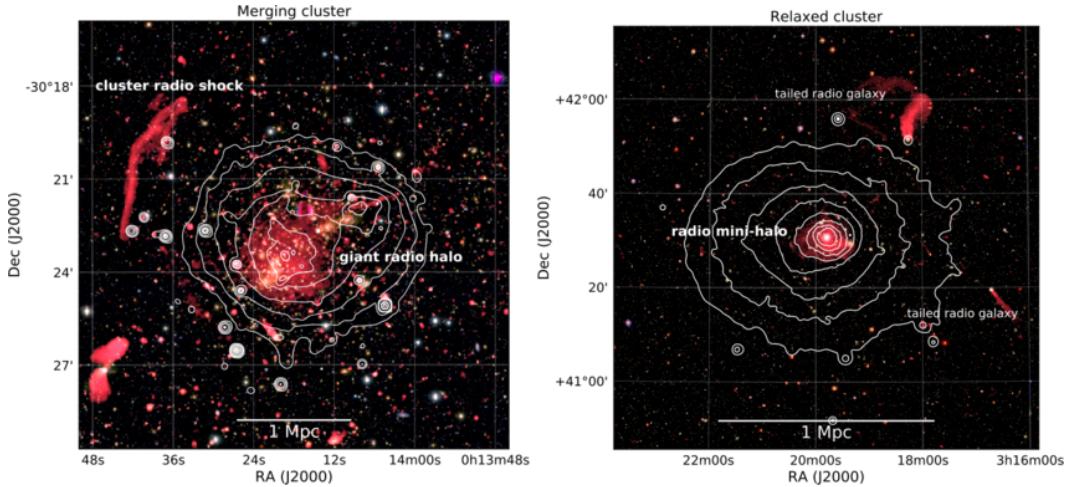


Figura 3.3: *Sinistra:* **Abell 2744 (merging cluster)**: si noti il grande alone radio e lo shock. *Destra:* **Cluster di Perseo (relaxed cluster)**: è presente un mini alone. I contorni bianchi in entrambe le figure sono le isofote dell'emissione X. *Crediti:* R. J. van Weeren et al.

3.3 Emissione radio

In un numero crescente di ammassi di galassie vengono trovate sempre più radiosorgenti. Gli ammassi di galassie spesso infatti ospitano degli AGN che emettono in banda radio tramite sincrotrone⁴, e interagiscono in questo modo con il mezzo Intracluster, estendendosi ben oltre i confini ottici delle galassie, fino a centinaia di kiloparsec. Come si può infatti notare in figura 3.1, questa interazione con l'ICM è osservata in sorgenti radio che riempiono cavità a raggi X nei centri degli ammassi *cool-core*.

Le osservazioni radio dimostrano che l'ICM non è costituito solo da plasma termico, ma contiene anche componenti non termiche: campi magnetici su larga scala e particelle altamente relativistiche (raggi cosmici, CR). L'emissione di sincrotrone è, infatti, il risultato dell'interazione fisica di questi elettroni CR con i campi magnetici ICM dell'ordine del $\sim \mu\text{Gauss}$.

Si distinguono tre principali tipi di sorgenti radio, gli **aloni radio**, i **relitti radio** e il **plasma fossile rienergizzato**.

3.3.1 Aloni Radio

Gli aloni radio sono sorgenti estese di emissione di sincrotrone che seguono la distribuzione della massa barionica dell'ICM, e nella classe vengono inclusi i **radio aloni giganti** e i **mini aloni**, la cui distinzione viene fatta principalmente sulla morfologia dell'emissione, come si può ben notare in figura 3.3. Sono sorgenti non localizzate: non è possibile cioè definire una posizione fissa in cui le particelle vengono accelerate, in quanto l'emissione è visibile in una porzione significativa del volume dell'ammasso.

⁴Radiazione emessa da una carica ultra-relativistica che spiraleggia attorno alle linee di campo magnetico.

Aloni Radio Giganti

I Radio Aloni Giganti hanno grandezze di circa 1-2 Mpc e la potenza dell'emissione a 1.4 GHz è di $10^{23} - 10^{26} \text{ W/Hz}$.

Hanno una morfologia liscia e regolare, che segue approssimativamente la distribuzione del mezzo Intracluster, permeando il volume centrale dell'ammasso. La probabilità di rilevare questi aloni aumenta con la luminosità X dell'ammasso.

Un risultato molto importante dalle osservazioni è che questi sistemi vengono trovati principalmente negli ammassi più dinamici, ad esempio nei *non-cool core*, e studi recenti rivelano una certa correlazione tra la presenza di tali oggetti e gli eventi di merging tra cluster.

L'origine degli aloni radio viene al giorno d'oggi attribuita alla riaccelerazione degli elettroni "seed" durante stati particolarmente turbolenti del mezzo intracluster.

Mini aloni

Con dimensioni di circa $100 - 500 \text{ kpc}$, i mini aloni vengono trovati principalmente in cluster "rilassati", cioè i *cool core*, generalmente localizzati attorno alla BCG, pur non sembrando essere correlati all'emissione del AGN centrale, ed hanno potenze di $10^{23} - 10^{25} \text{ W/Hz}$.

Si nota che vengono spesso confinati dai fronti freddi degli ammassi e presentano strutture filamentarie che si estendono in varie direzioni.

A differenza degli aloni giganti, non sembra esserci una correlazione tra la loro potenza e la massa del cluster, quanto più con la luminosità in banda X.

3.3.2 Relitti radio

Sono sorgenti estese ($\sim 1 \text{ Mpc}$) diffuse in cui le particelle sono state riaccelerate da onde d'urto dell'ICM.

Rispetto ai radio aloni, possono essere associate ad una regione specifica del cluster dove sta passando, o è passata, un'onda d'urto.

Si presentano con forme allungate e si trovano principalmente nelle regioni più esterne dei cluster, come si può notare nell'ammasso della Salsiccia, in figura 3.4. Mostrano tipicamente strutture allungate, con asse maggiore orientato solitamente in modo perpendicolare alla direzione del centro dell'ammasso, morfologia prevista per sorgenti che tracciano onde d'urto.

In alcuni cluster l'emissione dagli shock si sovrappone a quella degli aloni, ma l'origine del legame tra questi due fenomeni è ancora poco chiara.

Una sottoclasse particolarmente interessante è quella degli "shock doppi", che vengono trovati diametralmente opposti al nucleo del cluster. Si suppone che siano shock creati allo stesso tempo. Un esempio lo si trova di nuovo in figura 3.4: anche se meno visibile, in basso a destra si possono notare dei contorni che sembrerebbero appartenere ad uno shock opposto a quello che dà nome all'ammasso.

3.3.3 Plasma fossile rienergizzato

L'ultima categoria di emissione radio negli ammassi viene anche chiamata con il fantasioso nome di "fenice", in quanto sembrerebbe tracciare una rienergizzazione di un

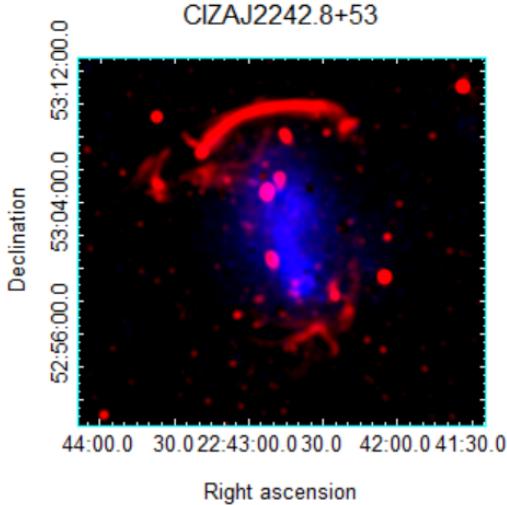


Figura 3.4: **Sausage Cluster**: si noti la forma ”a salsiccia” dello shock radio in alto. In blu, l’emissione X (XMM-Newton), in rosso, l’emissione Radio (VLA). *Adattamento personale dei dati, svolto durante l’attività di laboratorio.*

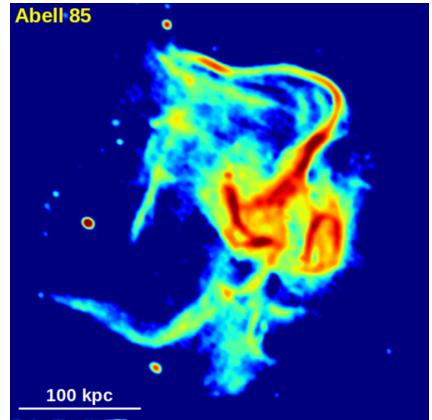


Figura 3.5: **Fenice radio dell’ammasso Abell 85**: la maggior parte delle componenti sono filamentarie. *Crediti: R. Raja et al., 2023*

vecchio plasma radio riconducibile a passati episodi di attività dei nuclei galattici attivi.

Rispetto ai relitti radio, le fenici sono in genere trovate più vicine alle regioni centrali degli ammassi, sono più piccole e hanno potenze radio minori.

Morfologicamente possono essere molto diverse: da più tondeggianti a più filamentose, come ad esempio quella visibile in figura 3.5. Rispetto ai relitti radio, sono mediamente più piccole e meno potenti, a distanze inferiori dal centro dell’ammasso.

Capitolo 4

Conclusioni

Con l’avvento delle nuove tecnologie, tra cui simulazioni numeriche progressivamente più accurate (ad esempio il progetto Colibre) e telescopi ogni giorno più avanzati (come SKA per la banda radio, e NewAthena per la banda X), sarà possibile comprendere i fenomeni in modo sempre più accurato e completo.

Nell’arco di un centinaio di anni, l’astronomia ha fatto passi da gigante: da un’epoca in cui si pensava che la nostra galassia fosse l’intero universo, siamo arrivati ad indagare con dettagli sempre maggiori strutture immense come gli ammassi, e ancora di più, come i supercluster.

Lo studio degli ammassi di galassie è fondamentale per la comprensione dei meccanismi di formazione ed evoluzione delle galassie, necessario per comprendere, oltre alla storia su larga scala dell’Universo, anche l’evoluzione della nostra casa, la Via Lattea, che, alla luce delle dimensioni trattate in questa tesi, appare improvvisamente più piccola.

Appendice A: AGN feedback

Lo studio del feedback degli AGN¹, un fenomeno ampiamente studiato soprattutto negli ammassi e gruppi di galassie, è fondamentale per comprendere appieno l’evoluzione delle galassie, dei loro buchi neri centrali supermassicci e la storia della formazione stellare.

Con le osservazioni più recenti, come quelle con il satellite *Chandra*, si è notato infatti, tramite le osservazioni in X, la quantità di gas termico che si raffredda per irraggiamento è molto inferiore a quanto previsto: il gas al centro deve quindi essere sottoposto ad una sorta di riscaldamento dovuto ad un meccanismo di feedback².

Lo studio di tali fenomeni può dare risposte ai maggiori problemi della cosmologia attuale, come la ragione per cui così pochi barioni si sono effettivamente convertiti in stelle (inefficienza della formazione stellare).

In quanto gli ammassi sono gli unici ambienti nell’universo in cui si possono quantificare quasi completamente i barioni, il loro stato termodinamico e la loro metallicità, l’osservazione dell’AGN feedback può aiutare a comprendere meglio la formazione ed evoluzione delle galassie.

Come già citato, l’Intracluster Medium (ICM) ha una fortissima componente di emissione in X. Le osservazioni ad alta risoluzione in questa banda, in particolare con i satelliti *Chandra* e *XMM-Newton*, hanno radicalmente cambiato la comprensione dei sistemi cosiddetti cool-core. Tali osservazioni hanno dimostrato che la quantità di gas termico che si raffredda per irraggiamento a basse temperature è molto inferiore a quanto previsto dal modello standard del *cooling flow problem*. Ciò implica che il gas centrale deve essere sottoposto a una forma di riscaldamento.

La fonte primaria di questo riscaldamento è stata identificata negli outburst dell’AGN della galassia dominante centrale. L’emissione Radio, tipica delle radiosorgenti centrali nei cool-core, ha una profonda e persistente influenza sull’ICM. Osservando in banda X, si notano chiare strutture disturbate nei nuclei, incluse vere e proprie ”cavità” nella distribuzione della brillanza X, come quelle che si possono vedere in figura 1 (in appendice), spesso coincidenti spazialmente con i lobi del plasma relativistico della radiogalassia, come nel cluster MS 0735 in figura 3.1. Queste osservazioni forniscono l’evidenza diretta del feedback AGN in azione (spesso chiamato radio mode feedback), dove il plasma radio ha spinto indietro il gas che emette raggi X.

Le cavità sono strumenti estremamente utili perché consentono di quantificare l’energia meccanica trasferita dal jet all’ambiente circostante.

¹I Nuclei Galattici Attivi sono alimentati dal rilascio di energia gravitazionale dall’accrescimento sui buchi neri supermassicci. Quando l’accrescimento si avvicina al limite di Eddington, viene rilasciata l’energia sottoforma di energia meccanica associata ad un jet radio.

²Interazione tra il Nucleo Galattico Attivo, alimentato dal Buco Nero Supermassiccio, e il gas circostante, in questo caso l’interazione con l’Intracluster Medium.

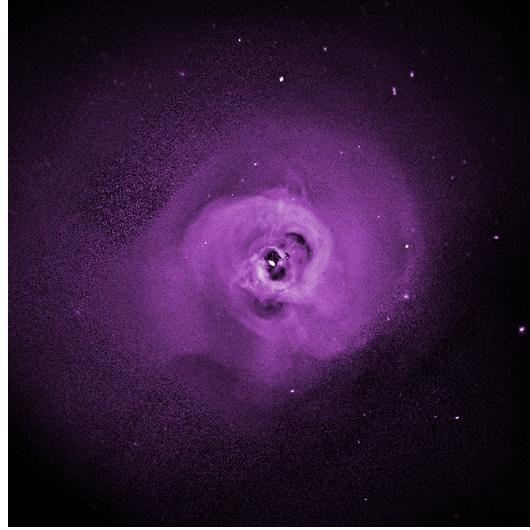


Figura 1: **Cluster di Perseo (banda X)**: si può notare la forte turbolenza del gas, che fornisce la prova del meccanismo di feedback. *Crediti: NASA/CXC/Stanford/I.Zhuravleva et al*

L’energia richiesta per creare una cavità di pressione p e volume V è la somma del lavoro fatto dal jet per muovere il gas che emette nei raggi X mentre gonfia la ”bolla” radio, con l’energia interna dei lobi:

$$E_{cav} = E_{int} + pV = \frac{\gamma}{\gamma - 1} pV \quad (1)$$

con $\gamma = 4/3$ in quanto si considera la composizione interna della cavità dominata dal plasma relativistico, mentre il prodotto pV può essere misurato tramite le osservazioni a raggi X.

In generale si osservano le cavità riempite da plasma che emette a 1.4GHz, se tale emissione non viene rilevata le cavità vengono chiamate *ghost cavities* (cavità fantasma).

L’analisi di campioni estesi di cavità ha dimostrato che è plausibile che il feedback AGN, mediato nel tempo, bilanci le perdite radiative dell’ICM. In particolare, è stato stimato che la potenza media di riscaldamento delle cavità è molto vicina a eguagliare la potenza di raffreddamento del gas centrale su tempi scala estesi. Questo quadro implica un equilibrio auto-regolato: il gas che si raffredda alimenta l’AGN, che a sua volta riscalda il gas, regolando così il raffreddamento stesso.

Per comprendere appieno la crescita ed evoluzione delle galassie e dei loro buchi neri centrali, ma anche la storia di strutture molto più grandi, come appunto gli ammassi, in cui si trova la principale manifestazione di tale fenomeno, si rende allora indispensabile il meccanismo di feedback degli AGN, che si manifesta attraverso un flusso di energia che si propaga dalle BCG, interagisce con il mezzo Intracluster e induce un continuo rimescolamento di gas e metalli in una scala di centinaia di kiloparsec.

Bibliografia

- [1] A. Cimatti, F. Frernali, and C. Nipoti. *Introduction to Galaxy Formation and Evolution*. Cambridge University Press, 2019.
- [2] L. Ciotti. Appunti del corso di Astrofisica Extragalattica.
- [3] D. Dallacasa. Appunti e dispense del corso di Processi di Radiazione e MHD.
- [4] A. C. Fabian. Cooling Flows in Cluster of Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1994.
- [5] G. Fasano. The Shapes of BCGs and Normal Ellipticals in Nearby Clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 404(3):1490–1504, May 2010.
- [6] L. Feretti, G. Giovannini, F. Govoni, and M. Murgia. Clusters of galaxies: observational properties of the diffuse radio emission. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2012.
- [7] F. R. Ferraro. Appunti e dispense del corso di Astrofisica Stellare.
- [8] F. Franchi. Appunti e dispense del corso di Istituzioni di Fisica Matematica.
- [9] M. Gitti, F. Brighenti, and B. R. McNamara. Evidence for AGN Feedback in Galaxy Clusters and Groups. *Advances in Astronomy*, 2012.
- [10] M. Longair. *Galaxy Formation*. Springer, 2008.
- [11] J. Christopher Mihos. Interactions and Mergers of Cluster Galaxies. In J. S. Mulchaey, A. Dressler, and A. Oemler, editors, *Clusters of Galaxies: Probes of Cosmological Structure and Galaxy Evolution*, page 277, January 2004.
- [12] John L. Tonry. Properties of CD Galaxies. In Pieter Timotheus de Zeeuw, editor, *Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*, volume 127 of *IAU Symposium*, pages 89–98, January 1987.
- [13] J. A. Tyson, G. P. Kochanski, and I. P. Dell’Antonio. Detailed Mass Map of CL 0024+1654 from Strong Lensing. *The Astrophysical Journal*, 1998.
- [14] R. J. Van Weeren, F. de Gasperin, H. Akamatsu, M. Bruggen, L. Feretti, H. Kang, A. Stroe, and F. Zandanel. Diffuse Radio Emission from Galaxy Clusters. *Space Science Reviews*, 2019.
- [15] Z. L. Wen and J. L. Han. A catalog of 1.58 million clusters of galaxies identified from the DESI Legacy Imaging Surveys. *arXiv e-prints*, 2024.