

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

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

Analisi di Radiosorgenti diffuse presenti
in Ammassi di Galassie attraverso lo studio di
emissioni non termiche

Relatore:
Prof. Gabriele Giovannini

Presentata da:
Simon Jepson

Sessione I
Anno Accademico 2015/2016

Abstract

In questo lavoro di tesi verrà affrontato uno studio sugli ammassi di galassie che costituiscono le strutture virializzate più grandi dell'Universo. L'analisi delle emissioni provenienti dall'ICM (*Intracluster Medium*) consente di ottenere informazioni su alcuni dei processi che caratterizzano la dinamica degli ammassi di galassie, come *merger* e *cooling flow*, e in particolare di testare le attuali ipotesi sulla formazione ed evoluzione degli ammassi. Le radiazioni provenienti dal gas extragalattico possono essere sia di tipo termico che non termico: le prime causate dal meccanismo di Bremsstrahlung termica e appartenenti alla banda X, le seconde invece dovute prevalentemente dall'emissione di Sincrotrone in banda Radio.

Durante lo studio degli ammassi di galassie verranno approfondite le principali radiosorgenti diffuse: Aloni, mini-Aloni e Relitti, focalizzando lo studio su questi ultimi e analizzando un campione di dati ad essi relativi, con lo scopo di trovare un'eventuale correlazione tra alcune delle loro proprietà.

La ricerca sugli ammassi di galassie risulta importante in quanto, trattandosi delle più grandi strutture dell'Universo che abbiano raggiunto l'equilibrio viriale, il loro studio risulta un valido strumento per la verifica dell'attuale Modello Cosmologico.

Indice

Introduzione	1
1 Ammassi di galassie.....	2
1.1 Classificazione.....	2
1.1.1 Classificazione Morfologica.....	2
1.2 Proprietà Ottiche.....	4
1.2.1 Problema della massa mancante	4
1.2.2 Teorema del Viriale.....	4
1.2.3 Lenti Gravitazionali	5
1.3 Emissioni in Banda X.....	5
1.3.1 Fenomeni di Cooling Flow e Merger	6
1.3.2 Bremsstrahlung Termica	7
1.3.3 Effetto Compton Inverso.....	7
1.4 Emissioni in Banda Radio	8
1.4.1 Emissione di Sincrotrone.....	8
1.4.2 Emissione Radio discreta	10
1.4.3 Emissione diffusa: Aloni, Mini-Aloni e Relitti.....	11
2 Approfondimento sui Relitti Radio	13
2.1 Classificazione Morfologica.....	13
2.2 Spettro radio dei Relitti.....	17
2.3 Studio del Campo Magnetico	18
2.4 Modelli Teorici.....	20
3 Analisi Dati	23
3.1 Scopo della Tesi.....	23
3.2 Analisi dei Relitti Radio	24
4 Conclusioni	30
5 Bibliografia e Sitografia.....	31

Introduzione

Gli ammassi di galassie (o *Galaxy Clusters*) costituiscono i più grandi sistemi virializzati dell'universo.

I superammassi di galassie (Superclusters) sono strutture con dimensioni lineari maggiori, legate alla formazione dell'universo ma non virializzate.

Gli ammassi di galassie sono definiti come agglomerati di galassie, di numero e dimensione variabile, formatisi con il passare del tempo grazie all'effetto della gravità.

La massa di un cluster può essere calcolata sfruttando, quando possibile, il Teorema del Viriale e la dispersione delle velocità, oppure analizzando l'emissione in X prodotta all'interno dell'ammasso, o attraverso il fenomeno di lente gravitazionale, tuttavia molto raro. Con tutti e tre i metodi citati, si riscontra una differenza tra la massa calcolata e quella visibile. Questo ha portato alla conclusione che circa l'80% della massa di un cluster è formata da materia oscura, il 15-17% da gas intergalattico caldo e circa il 3-5% dalle galassie. Il gas intergalattico è detto ICM (*Intracluster Medium*) ed è il responsabile dell'emissione in X attraverso il fenomeno di Bremsstrahlung Termica, grazie alla quale è stato possibile ottenere molte informazioni riguardanti gli ammassi di galassie. Oltre all'emissione termica da parte del gas ci sono anche sorgenti non termiche all'interno del cluster che emettono in banda X e Radio, rispettivamente attraverso i fenomeni di Effetto Compton inverso ed Emissione di Sincrotrone.

All'interno di questa tesi saranno analizzate le proprietà dei clusters in banda X e Radio, e verranno studiate radiosorgenti diffuse come Aloni, mini-Aloni e, in maggiore dettaglio, i Relitti radio.



Figura 1. CL 0024+1654, ammasso di galassie localizzato a 5 milioni di anni luce dalla Terra. È caratterizzato da una grande ricchezza (numero di galassie membro) e da un importante fenomeno di lensing gravitazionale. Questo fenomeno provoca la formazione delle immagini blu sullo sfondo, appartenenti ad una galassia a spirale presente dietro l'ammasso.

1 Ammassi di galassie

Gli ammassi di galassie sono i sistemi più grandi virializzati, con un alta densità di galassie tenute insieme dalla gravità.

Prima di procedere ad un'analisi più dettagliata, elenchiamo le proprietà medie di un ammasso di galassie:

- Contengono da 50 a 10000 galassie;
- Contengono un gas caldo che emette raggi X;
- Hanno una massa totale di circa $10^{14} \div 3 \times 10^{15} M_{\odot}$;
- Hanno tipicamente un diametro inferiore ai 10 Mpc;
- La dispersione delle velocità delle galassie negli ammassi è circa 1000 km/s;
- La distanza media tra gli ammassi è di circa 10 Mpc;
- La temperatura di un ammasso tipico è di 75 milioni di gradi (ma può raggiungere i 200 milioni di gradi).

1.1 Classificazione

Si usa il nome “ammasso” per un'aggregazione gravitazionale di galassie che contenga almeno 50 galassie di alta luminosità. Il problema è la definizione di appartenenza delle galassie all'aggregazione.

1.1.1 Classificazione Morfologica

La classificazione degli ammassi risale a George Abell che, in un catalogo di oltre 2000 ammassi, propose nel 1958 i seguenti parametri caratterizzanti:

- **Ricchezza:** Un ammasso deve contenere almeno 50 galassie con magnitudine compresa nell'intervallo $m_3 \div m_3 + 2$ dal terzo membro più brillante dell'ammasso. Agglomerati con un numero inferiore di galassie sono chiamati gruppi; Abell definì sei “gruppi di ricchezza”:
 - i. gruppo 0: con 30-49 galassie;
 - ii. gruppo 1: con 50-79 galassie;

- iii. gruppo 2: con 80-129 galassie;
- iv. gruppo 3: con 130-199 galassie;
- v. gruppo 4: con 200-299 galassie;
- vi. gruppo 5: con più di 300 galassie;

- **Compattezza:** un ammasso deve contenere almeno 50 membri entro 1-2 Mpc dal suo centro (il preciso valore di questo raggio dipende dal valore della costante di Hubble, più precisamente $1,5 h^{-1} Mpc$).
- **Distanza:** le tipiche distanze degli ammassi sono comprese tra $z = 0,02$ e $z = 0,2$ che corrispondono circa a 30 e 900 Mpc; attualmente tuttavia sono osservati ammassi fino a 1700 Mpc. Le misure di distanza sono soggette a cambiamenti in quanto dipendono dalla costante di Hubble.

Morfologicamente possono essere definite due categorie che dividono gli ammassi in:

- **Regolari:** la maggior parte delle galassie in questi cluster sono ellittiche o irregolari. I cluster regolari possono contenere migliaia di galassie con densità crescente verso il centro, dove sono presenti per lo più galassie ellittiche, mentre sui bordi possono esservi galassie a spirale. Ammassi regolari spesso contengono molto gas. Un esempio di ammasso regolare è il Coma cluster.
- **Irregolari:** gli ammassi irregolari possono essere di diversa forma e densità e normalmente non contengono più di 1000 galassie. Non presentano un nucleo compatto e spesso sono composti da piccoli gruppi, come per esempio subclusters.

1.2 Proprietà Ottiche

1.2.1 Problema della massa mancante

Come già anticipato, la massa di un ammasso è composta per la maggior parte da *dark matter*, circa l'80% della massa totale del cluster. Questo valore può essere ottenuto misurando la massa del cluster attraverso la dispersione di velocità e l'utilizzo del teorema del viriale, o attraverso l'analisi del fenomeno di lente gravitazionale, o mediante lo studio dell'emissione in X da parte dell'ICM.

1.2.2 Teorema del Viriale

Il teorema del viriale è uno strumento molto potente, tuttavia possiede diverse limitazioni: il sistema analizzato deve essere in equilibrio, deve essere contenuto in una regione limitata di spazio, i corpi che compongono il sistema devono avere tutti la stessa massa e la distribuzione di velocità deve essere isotropica; le ultime due condizioni possono però essere soddisfatte apportando modifiche al sistema analizzato.

Il teorema afferma che in un sistema di N corpi che verifica le condizioni descritte e la cui energia cinetica totale sia T , vale la relazione:

$$2T = - \sum_{k=1}^N \vec{F}_k \cdot \vec{r}_k$$

Dove \vec{F}_k è la forza che agisce sulla k -esima particella, situata nella posizione \vec{r}_k . Se la forza \vec{F} è una forza centrale conservativa possiamo riscrivere la relazione tra T ed \vec{F} come una relazione tra T ed $U(r)$, energia potenziale totale, ed otteniamo:

$$2T = -U(r)$$

Che estesa sugli N corpi diventa:

$$2 \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} m_k v_k^2 = - \sum_{i \neq j}^N G \frac{m_i m_j}{r_{ij}}$$

Dalla quale si può ricavare una formula generale per la massa M di un cluster entro un raggio R fissato:

$$M = \frac{R\sigma_v^2}{G}$$

Dove σ_v è la dispersione di velocità radiale. Per eseguire questo calcolo occorrono quindi il raggio dell'ammasso e la dispersione di velocità.

Un volta ottenuta la massa M si può confrontare il valore del rapporto massa-luminosità ottenuto dallo studio dell'ammasso con quello di un sistema di cui si conoscono massa e luminosità (e.g. Zwicky paragonò il fattore di conversione γ da luminosità a massa per una nebulosa nel Coma cluster pari a $\gamma = 500$ con quello del sistema stellare Kapteyn pari a $\gamma' = 3$) e notare che questi due rapporti appaiono molto diversi tra loro, il che fa pensare alla presenza di materia oscura che non emette luce.

1.2.3 Lenti Gravitazionali

Lo studio della massa attraverso il fenomeno di lente gravitazionale, a differenza del metodo precedente, non presenta limitazioni.

Il fenomeno di *Gravitational Lensing* consiste nella deflessione e distorsione della luce da parte di un corpo massivo che con il suo forte campo gravitazionale funge da lente. Nel caso in cui un ammasso di galassie giochi il ruolo di lente è possibile, attraverso lo studio della deformazione e della posizione delle immagini generate, calcolare la massa totale del cluster e ottenere un risultato simile a quello che si otterrebbe con il teorema del viriale, senza tuttavia richiedere che l'ammasso sia in equilibrio.

1.3 Emissioni in Banda X

Un grande passo avanti nello studio degli ammassi di galassie è stato fatto grazie allo studio dell'*Intracluster Medium* (ICM), un gas extragalattico denso e caldo, nello stato di plasma, presente all'interno dei cluster. L'ICM è formato perlopiù da idrogeno ed elio ionizzati, arricchito da metalli più pesanti come il ferro o elementi derivanti da esplosioni di

supernovae. La prevalenza di ioni è dovuta alle alte temperature raggiunte nel gas a causa dei processi di merger e cooling flow che generano a loro volta processi di emissione in X. Questi ultimi avvengono prevalentemente attraverso il fenomeno di Bremsstrahlung Termica ma ci sono anche fenomeni di emissioni non termica come l'effetto Compton inverso.

1.3.1 Fenomeni di Cooling Flow e Merger

Con il tempo gli ammassi di galassie raggiungono uno stato rilassato, caratterizzato da una grande galassia al centro, e un picco di luminosità X nel nucleo. Il gas caldo al centro possiede un'alta densità, che implica un breve tempo di raffreddamento per emissione. In questo caso le perdite di energia causate dall'emissione in X sono drammatiche e producono un calo di temperatura presso il centro. A questo punto la densità e la pressione a cui è sottoposto il plasma dell'ICM nel nucleo del cluster diminuisce, il che porta il plasma delle regioni periferiche a fluire verso il centro, generando così un flusso continuo, chiamato appunto *Cooling Flow*. Poiché questo fenomeno è associato ad una galassia al centro del cluster, quest'ultimo è solitamente chiamato *Cooling Core*. Nel nucleo dei clusters il tempo di raffreddamento, detto *Cooling time*, è dell'ordine dei $10^9 \div 10^{10}y$.

La presenza di picchi di emissione nelle regioni esterne del cluster è invece da ricondurre ai fenomeni di *Merger* tra ammassi di galassie. Questi fenomeni sono tra gli eventi più energetici nell'Universo dal Big Bang. Data l'enorme distanza tra le stelle, non ci sono vere e proprie collisioni. Le due principali componenti di massa nel cluster si comportano in maniera molto diversa durante il merger: la *dark matter* interagisce solo gravitazionalmente senza collisioni, mentre il gas è soggetto a variazioni di pressione, onde d'urto (*shock waves*) e turbolenze durante il merger. Questi eventi all'interno dell'ICM generano gradienti di temperatura e forti campi magnetici, questi ultimi saranno poi la causa della formazione di radiosorgenti diffuse.

C'è da notare che i fenomeni di merger e *Cooling flow* sono incompatibili tra loro, infatti il *Cooling flow* è strettamente legato all'equilibrio del cluster.

1.3.2 Bremsstrahlung Termica

La Bremsstrahlung (o radiazione di frenamento) termica è la principale causa di emissione in banda X da parte dell'ICM. L'Intracluster Medium infatti, con la sua elevata temperatura $T \approx 10^8 K$ e densità atomica $n \approx 10^{-3} cm^{-3}$, presenta le condizioni ideali per l'attivazione questo meccanismo. Il fenomeno consiste nell'emissione di fotoni da parte di elettroni liberi quando questi vengono rallentati dal campo elettrico degli ioni presenti nell'ICM infatti è chiamata anche *free-free emission* in quanto, gli elettroni presenti nel plasma sono liberi sia prima che dopo il fenomeno di emissione.

Attraverso l'analisi dello spettro della Bremsstrahlung del cluster è possibile studiare la massa dell'ammasso, assumendo che questo si trovi in equilibrio idrostatico e che possieda una simmetria sferica. La luminosità in X presenta infatti una forte correlazione con la temperatura e la densità del gas.

1.3.3 Effetto Compton Inverso

L'effetto Compton Inverso consiste nell'interazione tra un elettrone ultra-relativistico e un fotone poco energetico, il quale acquisisce energia e si porta nella banda X.

Nel caso in cui i fotoni provengano dalla radiazione cosmica di fondo (CMB) e interagiscano con il gas caldo presente nei clusters, questo effetto è chiamato *effetto Sunyaev-Zel'dovich*, il quale produce un incremento della luminosità della radiazione cosmica di fondo nei pressi di un cluster. Gli elettroni con alte energie e tempi di vita molto brevi deflettono i fotoni provenienti dalla CMB, trasmettendo loro quantità di moto. Nel caso questi elettroni siano ultra-relativistici, con energia $E_e = \gamma m_e c^2$, per $\gamma \gg 1$, e la frequenza iniziale dei fotoni della CMB sia ν_b , in media la frequenza dei fotoni dopo lo scattering sarà:

$$\nu_x = \frac{4\gamma^2 \nu_b}{3}$$

Si può notare che quindi un fotone proveniente dalla CMB può aumentare la sua energia fino ad un fattore pari a γ^2 . Considerando per

esempio fotoni con frequenza nell'infrarosso $\nu_b \approx 3 \times 10^{12} Hz$, la frequenza dopo lo scattering sarà $\nu_x \approx 3 \times 10^{18} Hz$, che corrisponde alla banda X.

1.4 Emissioni in Banda Radio

Oltre all'emissione in banda X, all'interno degli ammassi di galassie sono presenti anche fenomeni di emissione in banda radio, prevalentemente di tipo non termico. Le radiosorgenti possono essere sia discrete che diffuse e, sebbene i meccanismi descritti precedentemente possano emettere in piccola parte in radio, il principale meccanismo di emissione è quello di sincrotrone.

Di seguito saranno descritti l'emissione di sincrotrone e i tipi di radiosorgenti.

1.4.1 Emissione di Sincrotrone

Come già detto il meccanismo principale di emissione in banda Radio negli ammassi di galassie è quello di Sincrotrone. Esso è originato da elettroni relativistici che interagiscono con un campo magnetico, compiendo un moto elicoidale attorno alle sue linee di campo, la cui equazione del moto è:

$$\frac{d}{dt}(\gamma m \vec{v}) = \frac{q}{c} \vec{v} \times \vec{B}$$

Spiraleggiando attorno alle linee di campo magnetico, l'elettrone emette radiazioni, la cui lunghezza d'onda dipende dall'intensità del campo magnetico e dal vettore velocità dell'elettrone. La particolarità dell'emissione di Sincrotrone consiste nel fatto che essa è focalizzata in un cono con angolo di apertura dipendente dal fattore relativistico dell'elettrone come $1/\gamma$, e nel fatto che la potenza dipende dall'angolo tra il vettore velocità dell'elettrone e la direzione del campo magnetico come $P(\theta) = P(0) \sin^2 \theta$. Questo effetto di focalizzazione ha conseguenze molto importanti sull'osservazione dello spettro emesso dall'elettrone. Durante il suo moto spiraleggiante attorno alle linee del campo magnetico, ogni emissione diretta verso un osservatore lon-

tano è vista solo quando il fascio è focalizzato in modo tale da allinearsi con l'osservatore. Per un elettrone di energia $E = \gamma m_e c^2$ la frequenza caratteristica dell'emissione di sincrotrone ha un valore critico in:

$$\nu_c = \frac{3e}{4\pi m_e^3 c^5} (B \sin \theta) E^2$$

e un picco di emissione in $\nu = 0.29 \cdot \nu_c$. La potenza emessa invece risulterà:

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^4}{m_e^4 c^7} (B \sin \theta)^2 E^2$$

Il caso di interesse astrofisico è quello di una popolazione omogenea e isotropica di elettroni con una distribuzione energetica a legge di potenza con indice δ . In questo caso, se il plasma è otticamente sottile, come nelle sorgenti radio diffuse presenti nei clusters, le peculiarità dell'emissione di sincrotrone sono le seguenti:

- L'emissività è collegata alla densità numerica degli elettroni relativistici e all'intensità del campo magnetico, e l'emissività monocromatica segue una distribuzione a legge di potenza con indice spettrale legato all'indice della distribuzione dell'energia dell'elettrone, ossia $J(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$ con $\alpha = (\delta - 1)/2$.
- La perdita di energia delle particelle che emettono in radio, col passare del tempo causa un cambiamento nella distribuzione energetica delle particelle, che a sua volta produce una modifica nello spettro radio emesso. In particolare, lo spettro mostra un *cut-off* a frequenze maggiori di una frequenza critica, legata alla vita media delle particelle. Infatti radiosorgenti più anziane hanno uno spettro curvo o più pendente delle altre.
- La radiazione di sincrotrone da una popolazione di elettroni relativistici in un campo magnetico uniforme è polarizzata linearmente, con il vettore elettrico perpendicolare alla proiezione del campo magnetico sul piano del cielo. Se il campo

magnetico è disordinato o complesso l'effetto di polarizzazione osservato è diverso.

- Il contenuto totale dell'energia in una sorgente radio di sincrotrone dipende dal contributo delle particelle relativistiche (elettroni e protoni) e dal campo magnetico (considerando la frazione di volume della sorgente occupata dal campo magnetico).

L'importanza dell'emissione di sincrotrone consiste nello studio della potenza emessa, attraverso la quale è possibile stimare la vita media degli elettroni e quindi l'epoca di formazione di una popolazione di elettroni.

Impostando come valori quelli ipotizzati essere presenti in un ammasso di galassie ($B \sim 1 \mu G$ e $\gamma \sim 10^4$) si ottengono frequenze della banda Radio come quelle rilevate dalle osservazioni.

1.4.2 Emissione Radio discreta

Una radiogalassia consiste in una galassia ottica il cui nucleo attivo è associato ad una sorgente radio compatta; parte dell'emissione radio è osservata nella forma di *radio lobes*, regioni estese di emissione, diametralmente opposte dalla radiosorgente compatta e molto distanti da essa. Dei *jet* collimati si originano nel centro della sorgente compatta e si estendono verso l'esterno fino ai lobi e sono i condotti attraverso i quali l'energia è trasportata dalla regione attiva presente nel centro del nucleo fino ai lobi. L'energia è trasportata da un misto di gas relativistico e termico che delinea i *jet*.

Negli ammassi di galassie, si ipotizza che il rapido moto della sorgente centrale e l'interazione della fuoriuscita del gas con l'ICM, siano i responsabili del fatto che i lobi radio non sono sempre allineati. Con la variazione dell'angolo che si forma tra i due lobi allontanandosi da 180° , la terminologia che descrive la morfologia delle sorgenti radio varia da *wide-angle tails* (WATs) a *narrow-angle tail* (NATs) a *head-tail sources*.

1.4.3 Emissione diffusa: Aloni, Mini-Aloni e Relitti

Negli ammassi di galassie, oltre alle radiosorgenti discrete, esistono anche delle sorgenti diffuse che emettono in radio con meccanismi non termici, dovuti all'interazione di elettroni relativistici con i campi magnetici presenti nell'ICM, attraverso quindi la radiazione di sincrotrone. Le radiosorgenti diffuse possono essere collocate sia al centro di un ammasso che nella periferia e occupano una regione estesa del cluster. Tuttavia le radiosorgenti diffuse non sono presenti in tutti gli ammassi ma solo in quelli con particolari caratteristiche. Le sorgenti diffuse si dividono in tre tipologie:

- **Aloni:**

Gli aloni radio sono radio sorgenti diffuse con bassa brillantezza superficiale (circa $1 \div 0,1 \mu\text{Jy arcsec}^{-2}$ a 1,4 GHz) che permeano il volume centrale di un cluster. Normalmente occupano una regione estesa di dimensioni $\gtrsim 1$ Mpc, con morfologia regolare, e hanno una percentuale di polarizzazione molto bassa e uno spettro molto ripido ($\alpha \gtrsim 1$). Gli aloni non sono presenti in tutti gli ammassi di galassie: solo nel 25-30% degli ammassi con luminosità in X superiore ai $5 \times 10^{44} \text{erg/s}$ è stata rilevata la presenza di aloni. Si suppone inoltre che vi sia una relazione tra l'emissione in radio degli aloni e la luminosità in X degli ammassi che li ospitano. È stato poi osservato che gli aloni sono presenti solo in cluster che non hanno ancora raggiunto l'equilibrio dinamico, in cui quindi i processi di cooling flow sono deboli o assenti, ma vi sono presenti attività di merging che potrebbero essere la causa della riaccelerazione degli elettroni relativistici. Tuttavia non in tutti i cluster che presentano fenomeni di merger si è riscontrata presenza di aloni radio.

Recentemente grazie allo sviluppo tecnologico nel campo dell'osservazione astronomica si è riusciti ad osservare in ammassi ricchi aloni radio più piccoli e di forma irregolare.

- **Mini-Aloni:**

I mini-aloni sono sorgenti radio diffuse di estensione ridotta ($\sim 500kpc$) situate nelle regioni interne degli ammassi. Come gli aloni, anche i mini-aloni presentano uno spettro ripido e una bassa brillantezza superficiale. Sono generalmente collocati nei pressi di una potente radio-galassia e a differenza delle altre radiosorgenti diffuse, i mini-aloni non sono collegati a fenomeni di merger, ma sono spesso osservati nei pressi di un cooling core cluster. Tuttavia anche i mini-aloni emettono radiazione di sincrotrone, ed è ipotizzato che gli elettroni relativistici siano forniti da una vicina radio-galassia e riaccelerati da turbolenze magneto-idrodinamiche (MHD).

- **Relitti:**

I relitti radio sono radiosorgenti diffuse tipicamente collocate nelle zone più esterne di un cluster. A differenza degli aloni, presentano forme allungate o irregolari, con asse maggiore perpendicolare al raggio congiungente la radiosorgente e il centro dell'ammasso, e sono fortemente polarizzati (20-30%). Tuttavia hanno anche caratteristiche in comune con gli aloni radio, come bassa brillantezza superficiale, estensione dell'ordine del Mpc e spettro ripido con $\alpha \gtrsim 1$. Le osservazioni di relitti radio suggeriscono la presenza di un campo magnetico dell'ordine del μG e di particelle relativistiche nelle regioni esterne del cluster.

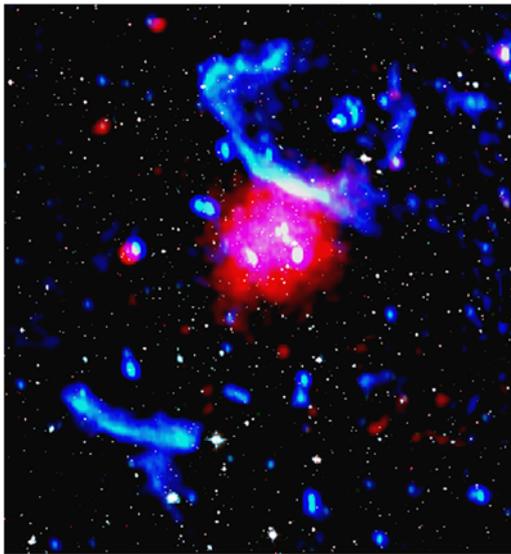


Figura 2. Immagine composite di PLCKG287.0+32.9 che mostra le emissioni in banda X (rosso) e in banda radio (blu e verde). I relitti sono localizzati in alto a destra e in basso a sinistra, mentre l'alone coincide con l'emissione in X.

2 Approfondimento sui Relitti Radio

In questo capitolo saranno approfonditi gli aspetti riguardanti i relitti radio in previsione di una successiva analisi di dati. Gli aspetti che analizzeremo sono le loro caratteristiche morfologiche, il loro spettro, il campo magnetico presente al loro interno e i modelli teorici per la loro formazione.

2.1 Classificazione Morfologica

I relitti radio come già detto sono sorgenti diffuse di sincrotrone osservate solo in sistemi che presentano meccanismi di merger, e attualmente se ne conoscono $\gtrsim 50$. I relitti radio appaiono come sorgenti di sincrotrone di dimensioni estese, dell'ordine del Mpc, e forme allungate e irregolari. Esistono inoltre due categorie per classificare i relitti in base alle loro caratteristiche: *radio gischt*, e *AGN relics*. La prima categoria è collegata all'emissione diffusa dell'ICM e verrà approfondita successivamente. La seconda è associata ad attività precedenti di AGN, e si pensa che il plasma residuo da tali attività venga compresso dagli *shocks* creati durante processi di merger che amplificano il campo magnetico e il momento delle particelle relativistiche, portando il gas a emettere radiazione di sincrotrone. Gli *AGN relics* non verranno approfonditi poiché non sono legati all'ICM.

I relitti radio come già detto hanno forme irregolari, ma possono essere divisi a loro volta in tre categorie:

- **Relitti allungati:**

I relitti allungati sono i classici oggetti estesi, localizzati nelle periferie dei cluster, caratterizzati da una forma allungata e perpendicolare alla direzione congiungente il centro del cluster. L'emissione radio è normalmente altamente polarizzata. Non mostrano sottostrutture evidenti, e in alcuni casi la loro dimensione trasversale è molto piccola. Quando osservati con una risoluzione angolare molto alta, mostrano un'asimmetria trasversale, con in genere un bordo definito sul lato verso l'esterno del cluster. Questa morfologia è in forte accordo con i modelli che predicono che queste sor-

genti sono collegate a *shocks* su larga scala generati durante i cluster merger. Questi *shocks* si espandono con alta velocità e possono accelerare gli elettroni ad alte energie, e comprimere campi magnetici, generando grandi regioni che emettono radiazione di sincrotrone. Le particelle accelerate avranno una distribuzione energetica a legge di potenza, e campi magnetici allineati parallelamente al fronte dello *shock*. Ciò è anche consistente con l'indice spettrale e la polarizzazione osservati, e spiega la forma e la posizione di tali sorgenti.

- **Relitti tondeggianti:**

Oltre ai relitti allungati, sono state osservate nelle regioni periferiche dei clusters radio sorgenti diffuse estese con una forma più regolare e tondeggianti. Nonostante la struttura differente, questi relitti condividono con quelli allungati la posizione e la mancanza di un corrispettivo ottico. Le proprietà principali dei relitti tondeggianti sono la morfologia diffusa con sottostrutture filamentose e uno spettro ripido.

Le osservazioni di relitti tondeggianti potrebbero portare all'ipotesi che tali sorgenti siano in realtà relitti allungati visti da un'altra angolazione. Ciò tuttavia è molto improbabile poiché il numero di relitti con forma allungata è troppo alta per essere consistente con semplici problemi di angolazione.

La classe dei relitti tondeggianti include anche le sorgenti chiamate *Radio Phoenix* o sorgenti vicino alla *First Ranked Galaxy* (FRG). Queste sorgenti sono collocate vicino alla FRG centrale ma non coincidono con essa. Le loro dimensioni variano in genere da $\lesssim 100$ kpc a ~ 350 kpc. Quando osservate a risoluzioni più alte mostrano sottostrutture filamentose. A causa della vicinanza di queste sorgenti a un AGN, un'ovvia interpretazione è che queste sorgenti consistano in vecchi lobi radio originatisi da attività di AGN precedenti, non più visibili a causa delle forti perdite di energia tramite radiazione, e ravvivati dall'energia fornita dalle onde

d'urto. Un'altra possibile spiegazione della natura di queste sorgenti è che bolle radio, spinte nel gas del cluster da una radio galassia, crescano ed eventualmente si espandano verso la periferia del cluster, dove i raggi cosmici impattano nel mezzo circostante, dando origine a piccoli relitti localizzati vicino agli AGN.

Tra i relitti con forme tondeggianti, ci sono anche alcuni oggetti che sono collocati molto distanti dalla FRG o da una qualsiasi galassia luminosa, che sono quindi difficili da conciliare con qualsiasi modello che implichi una precedente attività radio. Per determinare le origini e la natura di queste sorgenti sono necessari più dati.

- **Cluster con relitti doppi:**

Nel quadro teorico in cui i relitti testimoniano la presenza di *shock waves* che si originano dai merger tra cluster con masse simili e parametro di impatto basso, ci si aspetta che spesso i relitti debbano apparire in coppia ed essere disposti sui lati opposti del cluster lungo l'asse del merger, con la struttura radio allungata perpendicolarmente a quest'asse. Il primo cluster osservato con due relitti quasi simmetrici disposti sui lati opposti rispetto al centro del cluster è stato A3667. Recentemente sono stati trovati altri oggetti simili: nel caso di CIZA J2242.8+5301, da simulazioni idrodinamiche e confronti con i dati, si ipotizza che la morfologia del relitto sorga naturalmente dalle *shock waves* prodotte dal merger dei clusters. Nel caso di A3667 invece, si pensa che vi sia la possibilità che i due relitti siano il calco di *shocks* indotti dal flusso di accrescimento del mezzo intergalattico durante processi di formazione su larga scala.

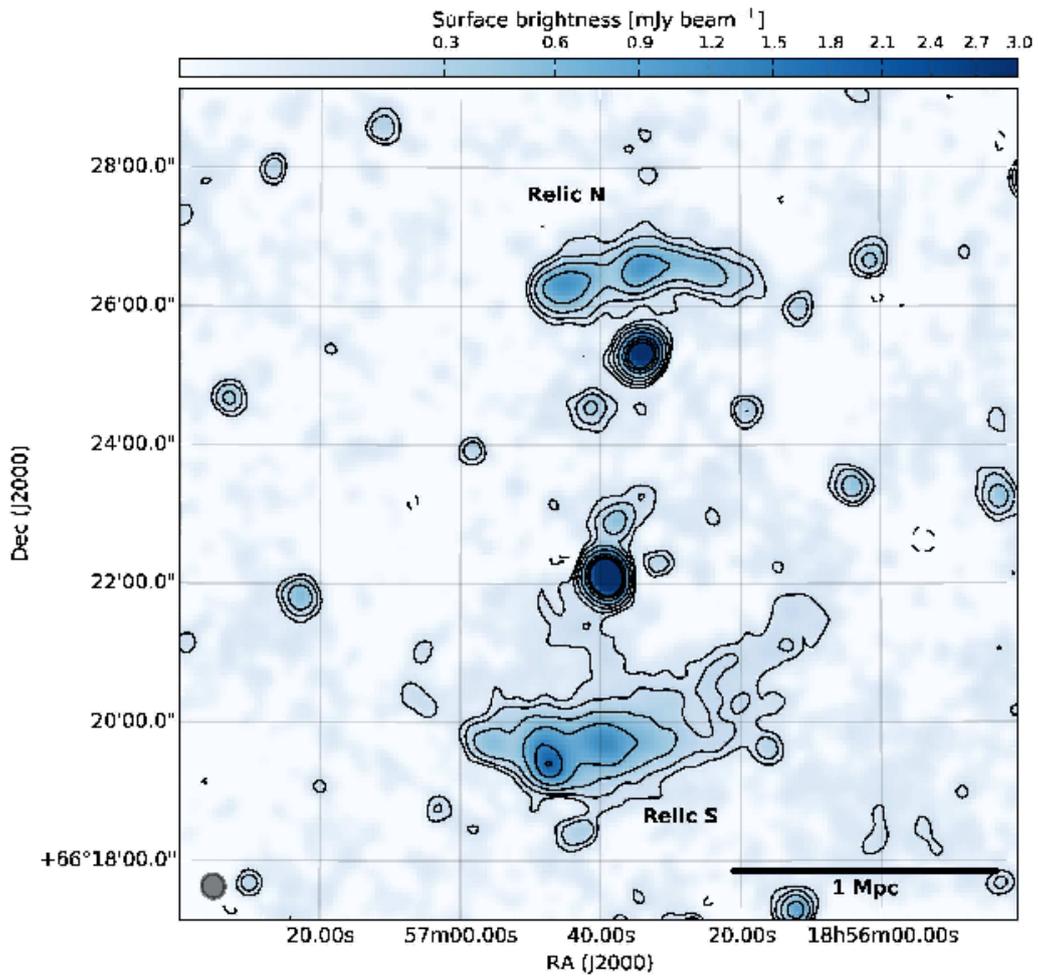


Figura 3. Relitto doppio in PSZ1 G096.89+24.17, mappa a bassa risoluzione a 1,4 GHz.

Infine è da notare che esistono cluster con sia relitti che aloni, il che sottolinea la connessione tra gli aloni e i cluster merger. Infatti il merger che genera l'alone radio, può anche dare origini a *shock waves* che poi generano i relitti.

2.2 Spettro radio dei Relitti

Dati sullo spettro dei relitti sono disponibili per diversi oggetti. Infatti, la struttura allungata della maggior parte dei relitti favorisce la loro osservazione interferometrica, e la loro posizione nella periferia dei cluster, dove il numero di sorgenti che interferiscono è minore, facilita le osservazioni a diverse frequenze.

I relitti possiedono uno spettro particolarmente ripido. I relitti allungati possiedono un indice spettrale α nell'intervallo 1-1,6 con un valore medio di 1,3. L'indice spettrale dei relitti tondeggianti invece varia in un intervallo molto più ampio: $\alpha = 1,1-2,9$, con un valore medio di 2,0. Ci sono quindi grandi differenze tra le proprietà dell'indice spettrale dei relitti allungati e quelle dei relitti tondeggianti, infatti gli ultimi hanno uno spettro molto più ripido. Considerando oggetti con misure a più di due frequenze, lo spettro radio delle strutture allungate risulta a pendenza costante, mentre per le strutture tondeggianti mostra un aumento di pendenza alle alte frequenze. È stato osservato che i relitti con spettro più ripido sono a piccole distanze dal centro del cluster mentre i relitti più potenti e più estesi sono caratterizzati da uno spettro meno ripido ($\alpha < 1,6$). Relitti più piccoli e meno potenti hanno indice spettrale nell'intervallo 1,0-2,8.

I grafici di indice spettrale finora sono stati ottenuti solo per alcuni relitti. Relitti allungati mostrano una distribuzione di indice spettrale ben definita, con un aumento di pendenza trasversale verso il centro del cluster. Questa tendenza è in accordo con il profilo di brillantezza del relitto e favorisce il modello a *shock*.

Come già detto i relitti tondeggianti possono mostrare uno spettro estremamente ripido ($\alpha \gtrsim 2$), il quale mostra anche un *cut-off* ad alte frequenze. Questi oggetti hanno proprietà diverse dagli enormi relitti allungati, essendo in media più piccoli e meno potenti. Il numero di queste sorgenti è molto piccolo. Un possibile motivo di questo fatto è che siano solo una piccola parte di una popolazione di relitti con spettro ultra ripido che potrebbero essere rilevati a basse frequenze, o alternatively, si possono considerare effetti di selezione, infatti relitti di piccole dimensioni che sono parzialmente risolti potrebbero essere spesso classificati come radiogalassie sullo sfondo.

Possiamo quindi affermare che la natura dei relitti tondeggianti con spettro ultra ripido sia diversa da quella degli altri relitti, allungati o tondeggianti, e che l'indice spettrale costituisca un parametro chiave per la classificazione dei relitti.

2.3 Studio del Campo Magnetico

Grazie allo sviluppo delle osservazioni radio e al miglioramento di modelli interpretativi, la comprensione dei campi magnetici associati con l'ICM negli ammassi di galassie è migliorata significativamente negli ultimi anni, e la presenza di campi magnetici dell'ordine del μG nei cluster è stata confermata.

La maggior parte delle nostre conoscenze sui campi magnetici dell'intracluster deriva dallo studio di radiosorgenti diffuse e da misure della Rotazione di Faraday di radiogalassie polarizzate localizzate all'interno o dietro l'ammasso di galassie. Campi magnetici su larga scala, ad esempio, sono studiati tramite gli aloni radio, che rivelano campi magnetici distesi su volumi estremamente grandi, che possono risultare a volte ordinati su scale di centinaia di kpc. Le fluttuazioni di brillantezza e i livelli di polarizzazione degli aloni radio sono strettamente collegati alla struttura del campo magnetico dell'intracluster. Per esempio, una mancanza di polarizzazione e una brillantezza superficiale regolare potrebbero indicare che il campo magnetico è ordinato su scale più piccole, mentre una morfologia radio irregolare e la presenza di polarizzazione potrebbero essere collegati a un campo magnetico ordinato su una scala più grande. Il metodo migliore per studiare il campo magnetico su piccole scale spaziali è l'analisi della rotazione di Faraday di radiogalassie dentro e oltre i clusters. L'effetto Faraday consiste nella rotazione di una radiazione linearmente polarizzata mentre attraversa un plasma magnetizzato. L'angolo di polarizzazione intrinseco Ψ_0 è ruotato di:

$$\Delta\Psi = \Psi - \Psi_0 = \lambda^2 RM$$

Dove λ è la lunghezza d'onda della radiazione, mentre RM è la Misura di Rotazione, definita come:

$$RM = 812 \int_0^L n_e B_z dl \quad (\text{rad m}^{-2})$$

Dove n_e è la densità termica di elettroni in cm^{-3} , B_z è la componente del campo magnetico in μG lungo direzione congiungente la sorgente e l'osservatore, e L è la lunghezza del cammino attraverso il plasma in kpc. Se si effettuano osservazioni a più frequenze di una radiosorgente in un ammasso di galassie (o dietro), facendo un fit lineare della variazione $\Delta\Psi$ in funzione di λ^2 , è possibile stimare RM lungo quella direzione. Conoscendo RM e un dato modello per la distribuzione degli elettroni termici (per esempio dalle osservazioni in X) è possibile interpretare i campi magnetici dell'intracluster. Tuttavia a causa della natura casuale e turbolenta dei campi magnetici dell'intracluster, la misura di RM non è immediata, anche nei casi di una semplice distribuzione di densità elettronica.

Markevitch et al. (2005) proposero un metodo per isolare la forza del campo magnetico nei relitti radio, indipendentemente dai meccanismi responsabili per l'accelerazione degli elettroni che emettono. Dopo essere stati accelerati/ri-accelerati a causa degli *shocks* associati ai relitti, gli elettroni relativistici sono trasportati lungo la corrente con velocità v_d e si raffreddano a causa dell'effetto Compton inverso o per sincrotrone. Come prima approssimazione, la combinazione di trasporto e invecchiamento degli elettroni emittenti determina lo spessore del relitto radio misurato a diverse frequenze. Gli elettroni possono viaggiare fino ad una distanza massima dallo *shock*, pari a $v_d\tau_\nu$, dove τ_ν è il tempo di vita radioattivo, che dipende dal campo magnetico B , dal campo magnetico equivalente a causa del Compton inverso con la CMB a redshift z ($B_{CMB} = 3.25(1+z)^2$), e dalla frequenza ν a cui si osserva:

$$\tau_\nu = 1.6 \times 10^3 \frac{B^{1/2}}{B^2 + B_{CMB}^2} \times [\nu(1+z)]^{-1/2} \quad [\text{Myr}]$$

Dove i campi magnetici sono espressi in μG e la frequenza in GHz. Poiché l'equazione non è una funzione monotona di B , la soluzione fornisce due diversi valori per il campo magnetico responsabile della perdita di energia delle particelle che emettono, nel primo caso $B_{CMB} > B$ e nel secondo $B_{CMB} < B$. Il tempo di vita massimo delle particelle si ottiene quando $B = B_{CMB}/\sqrt{3}$.

2.4 Modelli Teorici

La connessione tra radiosorgenti diffuse ed evoluzione dei clusters (in particolare quella tra i processi di merger con aloni e i relitti) e la relazione tra mini-aloni e cluster rilassati sono accertate.

Poiché è stato osservato che i campi magnetici sono presenti in tutto il cluster, l'elemento fondamentale per l'esistenza di radiosorgenti di sincrotrone diffuse è la presenza di particelle relativistiche. I merger tra clusters possono fornire energia alle particelle che emettono in radio così come amplificare campi magnetici. Vi sono due modelli principali per descrivere l'origine di elettroni relativistici nel volume del cluster, responsabili per la radioemissione diffusa: il modello ad elettroni primari, che prevede che le particelle relativistiche siano continuamente riaccelerate nel volume del cluster, e il modello adronico o ad elettroni secondari, secondo il quale gli elettroni relativistici nel volume del cluster sono prodotti attraverso collisioni protone-protone.

Di seguito descriviamo questi modelli per analizzare lo scenario della formazione delle radiosorgenti, in particolare dei relitti.

- **Modello ad elettroni primari:**

Elettroni relativistici primari sono presenti nel volume del cluster, dopo essere stati iniettati da attività AGN (quasar, radiogalassie, ecc.), o da formazioni stellari in galassie normali (supernovae, vento galattico, ecc.) durante l'evoluzione dinamica del cluster. Questa popolazione di elettroni è sottoposta a grandi perdite di energia per radiazione di sincrotrone ed emissione Compton inversa, è quindi necessaria una riaccelerazione per mantenere il livello di energia necessario per produrre l'emissione di sincrotrone radio osservata in campi magnetici relativamente deboli. È stata anche considerata la possibilità che gli elettroni siano accelerati da elettroni sub-relativistici.

Per i motivi descritti sopra, i modelli ad elettroni primari sono anche detti modelli di riaccelerazione. Ci sono due meccanismi principali che racchiudono il trasferimento di energia dall'ICM del cluster alle particelle radioattive: turbolenza e shocks.

La riaccelerazione per turbolenza è il meccanismo prevalentemente legato alla formazione degli aloni, quindi verrà qui solo accennato. Durante i cluster merger, è generata una turbolenza su scale di Mpc. L'energia può quindi essere trasferita dall'ICM nella componente non termale attraverso interazione risonante o non risonante degli elettroni con le turbolenze magneto-idrodinamiche.

La riaccelerazione per shocks invece è accreditata come la causa principale per la formazione dei relitti. L'accelerazione per shock è un processo di grande importanza nella radioastronomia, poiché è riconosciuto come il meccanismo responsabile per l'accelerazione delle particelle nei resti di supernova. L'accelerazione avviene in maniera diffusa, le particelle si disperdono avanti e indietro attraverso lo shock, guadagnando ad ogni passaggio una quantità di energia proporzionale all'energia stessa. L'efficienza dell'accelerazione è perlopiù determinata dal numero di Mach dello shock.

La produzione di onde d'urto uscenti nella periferia del cluster con numero di Mach $\sim 2 - 3$ è osservata in simulazioni numeriche di cluster merger e più in generale nella formazione di strutture su larga scala. Si ipotizza che gli elettroni accelerati siano o elettroni termici dell'ICM, o elettroni relativistici emessi da una radiogalassia attiva.

A causa dei tempi di vita brevi degli elettroni radioattivi, l'emissione radio è prodotta vicino alla posizione delle *shock waves*. Questi modelli predicono inoltre che il campo magnetico nei relitti debba essere allineato con il fronte dello shock, e che lo spettro radio sia più piatto al bordo dello shock, dove ci si aspetta che la brillantezza cali rapidamente. Queste ipotesi sono consistenti con la struttura allungata classica dei relitti, quasi perpendicolari all'asse del merger, e con le loro proprietà di polarizzazione.

L'osservazione di shocks nella periferia dei cluster è difficile con la corrente attrezzatura, a causa della bassa densità del gas e della luminosità X in queste regioni.

- **Modello ad elettroni secondari:**

Nel modello adronico, elettroni secondari sono iniettati come particelle secondarie in seguito ad una collisione inelastica nucleare tra i protoni relativistici e i nuclei dell'ambiente termico dell'intracluster medium. I protoni si diffondono su larga scala poiché le loro perdite di energia sono trascurabili. Secondo questo modello essi possono portare alla formazione continua di elettroni in situ, distribuiti attraverso il volume del cluster.

Questo modello è stato proposto per l'emissione di aloni radio e mini-aloni, ma non può funzionare per i relitti, in quanto le regioni periferiche del cluster non ospitano una popolazione di protoni termici abbastanza densa per la produzione di elettroni secondari, e quindi non sarà approfondito.

3 Analisi Dati

In questo lavoro di tesi sono stati analizzati dati selezionati dall'articolo "*Clusters of galaxies: observational properties of the diffuse radio emission*" di L. Ferretti, G. Giovannini, F. Govoni e M. Murgia, pubblicato nel 2012, confrontandoli con 18 dati (di cui 6 Relitti singoli e 6 Relitti doppi) provenienti da articoli più recenti, ottenuti utilizzando il portale *SAO/NASA ADS (Astrophysics Data System)*.

I dati raccolti si limitano all'analisi dei Relitti radio e ad alcune loro caratteristiche principali: *redshift* (z), *Largest Linear Size* (LLS), luminosità in X (L_X) e potenza radio a 1,4 GHz ($P_{1,4\text{ GHz}}$). In seguito è stata ricercata una correlazione tra le seguenti coppie di grandezze: $LLS - P_{1,4\text{ GHz}}$ e $L_X - P_{1,4\text{ GHz}}$. Mentre invece il redshift è stato utilizzato per fornire una distribuzione della lontananza degli oggetti studiati.

3.1 Scopo della Tesi

Lo scopo di questo lavoro di tesi consiste nello studio degli ammassi di galassie, in particolare nell'analisi dei Relitti radio, radiosorgenti diffuse localizzate nelle periferie di alcuni clusters. Essendo infatti gli ammassi di galassie le strutture virializzate più grandi dell'Universo, il loro studio consente quindi di ottenere informazioni importanti per lo sviluppo di un Modello Cosmologico. Conoscendo la relazione che lega potenza radio, luminosità in X e massima dimensione lineare sarà infatti possibile ricavare dati utili al calcolo della percentuale di materia barionica e materia oscura presente. Grazie all'analisi delle legge di tendenza che dominano le relazioni di scala tra le proprietà dei Relitti radio sarà inoltre possibile testare le attuali ipotesi di formazione di queste radiosorgenti diffuse, probabilmente legata a processi dinamici come *shocks* e *merger* tra gli ammassi ospitanti.

3.2 Analisi dei Relitti Radio

Nelle tabelle seguenti sono riportati i dati analizzati in questo lavoro di tesi e per il loro studio sono stati impostati come parametri cosmologici i seguenti valori:

$$H_0 = 69,6 \text{ Km/Mpc} \cdot s \quad \Omega_M = 0,286 \quad \Omega_{VAC} = 0,714$$

Quando la dimensione del Relitto non fosse presente nell'articolo, è stata ricavata convertendo la dimensione di distanza angolare D_A , misurabile attraverso la mappa del cielo in frequenza Radio del Relitto selezionato. Nel caso in cui invece non fossero presenti i valori della potenza alla frequenza $1,4 \text{ GHz}$ sono stati convertiti i dati nella frequenza richiesta oppure calcolati tramite il valore del flusso S_ν , sfruttando le formule:

$$\alpha = \frac{\log(S_{\nu_1}/S_{\nu_2})}{\log(\nu_1/\nu_2)}$$

$$\log\left(\frac{S_{\nu_1}}{S_{\nu_2}}\right) = \log\left(\frac{P_{\nu_1}}{P_{\nu_2}}\right)$$

dove α è l'indice spettrale e S_ν e P_ν sono rispettivamente il flusso e la potenza ad una frequenza ν fissata.

Per rappresentare l'andamento dei dati analizzati è stato effettuato un fit di questi valori, ottenendo una retta di tendenza rappresentante un'equazione con legge potenziale. Aggiungendo i dati appartenenti ad articoli più recenti si ottiene un andamento dello stesso tipo, ma che si discosta da quello dei dati originali.

Gli errori da associare ai valori della potenza radio sono legati a possibili incertezze sulla scala di flusso e risultano inferiori al 5%. Le incertezze sulla luminosità in X sono invece trascurabili (< 2%) e lo stesso vale per la massima dimensione lineare, grandezza che varia in base alle aree scelte per misurare il flusso. Le incertezze da associare a questi dati non sono state quindi rappresentate nei grafici in quanto non sarebbero state visibili data la scala scelta.

Tabella 1. Dati dell'articolo *"Clusters of galaxies: observational properties of the diffuse radio emission"* (fino al 2011).

Nome	z	LLS (Mpc)	Lx (10^{44} erg/s)	$P_{1,4 \text{ GHz}}$ (W/Hz)
A13	0,0943	0,25	1,18	6,30957E+23
A85	0,0551	0,35	4,1	2,75423E+23
A115	0,1971	2,44	8,91	1,51356E+25
A521	0,2533	1	8,47	2,5704E+24
A548b-NW	0,0424	0,26	0,15	2,39883E+23
A548b-N		0,31	0,15	2,34423E+23
A610	0,0954	0,33		
A746	0,232	1,1	3,68	6,76083E+24
AS753	0,014	0,35		
A754	0,0542	0,8	2,21	4,67735E+23
A781	0,3004	0,44	4,6	4,46684E+24
A1240-N	0,159	0,65	1	3,89045E+23
A1240-S		1,25	1	6,45654E+23
A1300	0,3072	0,7	13,73	5,7544E+24
A1367	0,022	0,22	0,64	3,89045E+22
A1612	0,179	0,75	2,41	7,94328E+24
A1656	0,0231	0,85	3,99	3,0903E+23
A1664	0,1283	1,07	3,09	4,36516E+24
A2034	0,113	0,22	3,81	8,91251E+23
A2048	0,0972	0,31	1,91	4,2658E+23
A2061	0,0784	0,68	3,95	4,46684E+23
A2063	0,0349	0,04	0,98	1,8197E+23
A2163	0,203	0,48	22,73	2,0893E+24
A2255	0,0806	0,7	2,64	1,77828E+23
A2256	0,0581	1,13	3,75	3,63078E+24
A2345-W	0,1765	1,15	5,9	2,39883E+24
A2345-E		1,5	5,9	2,29087E+24
A2443	0,108	0,43	1,9	1,77828E+23
A2744	0,308	1,62	12,86	5,12861E+24
A3365-E	0,0926	0,56	0,86	1,09648E+24
A3365-W		0,24	0,86	1,41254E+23

A3376-W	0,0456	0,8	1,08	7,58578E+23
A3376-E		0,95	1,08	6,16595E+23
A3667-NW	0,0556	1,86	4,73	1,62181E+25
A4038	0,03	0,13	1,97	8,70964E+22
ZwCl0008.8+5215-W	0,1032	0,29	0,5	2,75423E+23
ZwCl0008.8+5215-E		1,4	0,5	1,41254E+24
S1081	0,22	0,28		
CIZAJ0649.3+1801	0,064	0,8	2,38	1,20226E+24
RXCJ1053.7+5452	0,0704	0,6	3,69	1,99526E+23
RXCJ1314.4-2515-E	0,2474	0,56	10,75	1,86209E+24
RXCJ1314.4-2515-W		1,01		
CL1446+26	0,37	0,36	3,42	4,0738E+24
PLCKG287.0+32.9-N	0,39	1,4	17,2	1,7378E+25

Tabella 2. Dati raccolti da articoli più recenti (2011-2015).

Nome	z	LLS (Mpc)	Lx (10^{44} erg/s)	$P_{1,4 \text{ GHz}}$ (W/Hz)
MACSJ1149.5+2223E	0,54	0,82	14	5,40E+024
MACSJ1149.5+2223W	0,54	0,76	14	9,00E+024
MACSJ1752.0+4440NE	0,366	1,34	8,2	3,20E+025
MACSJ1752.0+4440SW	0,366	0,86	8,2	1,40E+025
ZwCl2341.1+0000N	0,27	0,25		3,80E+024
ZwCl2341.1+0000S	0,27	1,2		1,70E+024
A0548W	0,0424		0,1	5,00E+023
A133	0,0569		1,4	1,10E+024
A1758	0,2799		10,9	4,10E+024
Z2547	0,229	0,69	6,32	4,92E+23
A3411	0,1687	1,9	2,8	5,00E+24
ACT-CLJ0102-4915 NW	0,87	0,5	35	2,96E+25
ACT-CLJ0102-4915 SE	0,87	0,249	35	4,48E+24
PSZ1G096.89+24.17 N	0,3	0,88	3,7	1,52E+24
PSZ1G096.89+24.17 S	0,3	1,419	3,7	3,12E+24
A910	0,2055	1		2,82E+25
PSZ1 G108.18-11.53 N	0,335	1,5		2,66E+25
PSZ1 G108.18-11.53 S	0,335	1,3		1,80E+25

Di seguito viene riportato un istogramma contenente la distribuzione del redshift degli oggetti analizzati. Da esso si può notare che lo studio sui relitti è stato condotto solamente su sorgenti relativamente “vicine”, infatti tutti i dati risalenti al 2011 possiedono $z < 0,4$ e i relitti appartenenti ad una catalogazione più recente possiedono $z < 0,5$. Un’eccezione è data dal relitto doppio presente nel cluster ACT-CLJ0102-4915 (*El Gordo*) che ha un redshift pari a $z \approx 0,87$. *El Gordo* infatti è il cluster con il redshift più alto a ospitare un relitto e un alone ad essere stato osservato. Dal grafico emerge inoltre che, grazie al miglioramento degli strumenti utilizzati, è stato recentemente possibile analizzare sorgenti aventi un redshift maggiore rispetto agli oggetti studiati nel 2011.

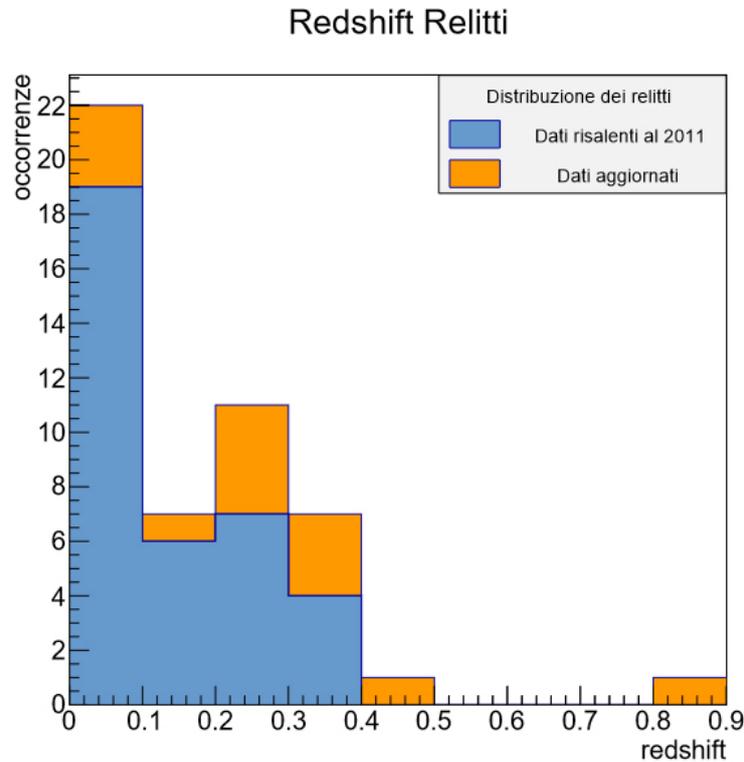


Figura 4. Distribuzione del redshift dei relitti radio studiati. In blu quelli risalenti al 2011, in arancione quelli più recenti.

Vengono ora riportati i grafici rappresentanti, in scala logaritmica, l’andamento di $P_{1,4\text{ GHz}}$ in funzione di LLS e di $P_{1,4\text{ GHz}}$ in funzione di Lx . È possibile notare che i dati aggiunti rispettano in parte l’andamento dei dati risalenti al 2011, e che la linea di tendenza che meglio approssima l’andamento di questi dati è di tipo potenziale.

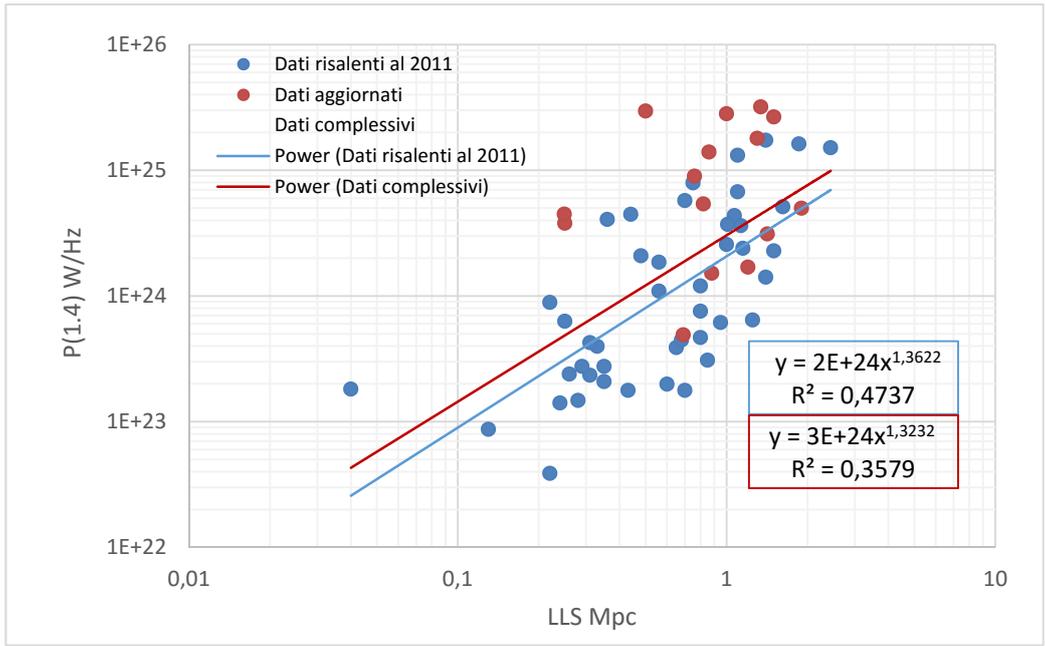


Grafico 1. Grafico di $P_{1,4\text{ GHz}}$ in funzione di LLS. In blu quelli risalenti al 2011, in rosso quelli più recenti. La linea azzurra rappresenta un fit con legge potenziale dei dati risalenti al 2011, mentre la linea rossa rappresenta un fit con legge potenziale dei dati complessivi (dati del 2011 e dati successivi).

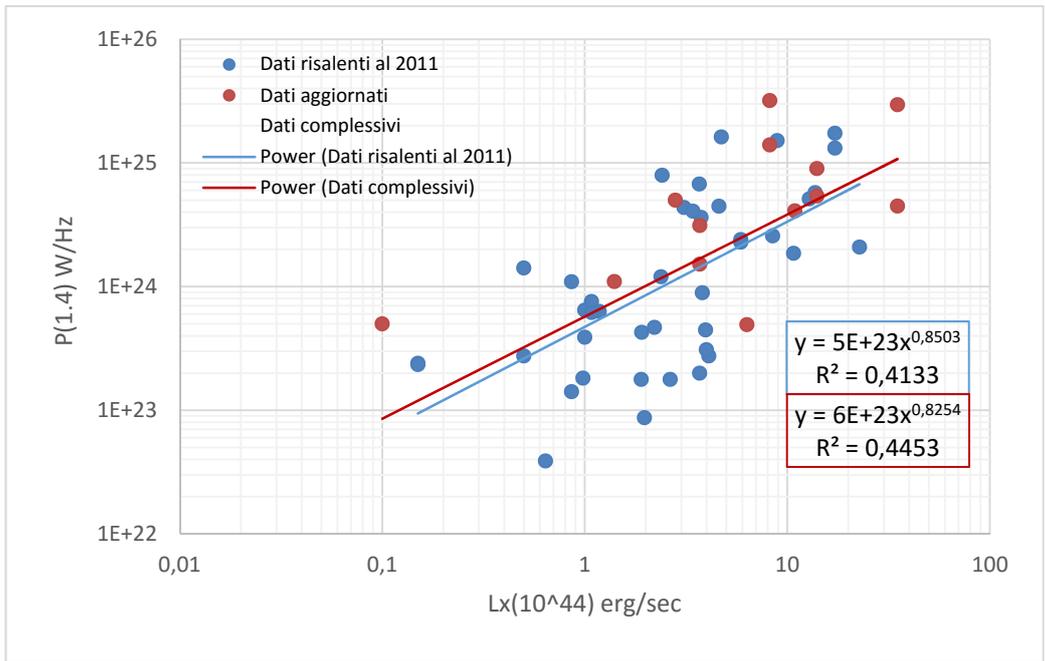


Grafico 2. Grafico di $P_{1,4\text{ GHz}}$ in funzione di L_x . In blu quelli risalenti al 2011, in rosso quelli più recenti. La linea azzurra rappresenta un fit con legge potenziale dei dati risalenti al 2011, mentre la linea rossa rappresenta un fit con legge potenziale dei dati complessivi (dati del 2011 e dati successivi).

Dal *Grafico 1* è possibile notare che i relitti con LLS maggiore emettono anche in misura maggiore, è quindi possibile ipotizzare che la capacità degli shocks di riaccelerare gli elettroni dell'ICM dipenda in maniera proporzionale dalle dimensione degli shocks.

Nel *Grafico 2* invece, nonostante una grande dispersione dei dati, è possibile affermare l'esistenza una correlazione tra $P_{1.4 \text{ GHz}}$ e luminosità in X. L_x risulta a sua volta collegata ai processi di merger tra clusters e perciò anche alla massa di questi ultimi, di conseguenza anche la potenza risulterà correlata alla massa dell'ammasso.

4 Conclusioni

Durante lo studio degli ammassi di galassie effettuato in questo lavoro di tesi sono state analizzate le principali radiosorgenti diffuse: aloni, mini-aloni e relitti radio, con particolare approfondimento su questi ultimi. Grazie alla ricerca e all'analisi di dati riguardanti alcune delle caratteristiche fondamentali dei relitti, è stato inoltre possibile verificare l'esistenza di una correlazione tra potenza radio e luminosità in X e tra potenza radio e massima dimensione lineare. La legge che domina queste grandezze è stata verificata essere, in entrambi i casi, di tipo potenziale, e grazie al recente miglioramento nella statistica dei dati su queste radiosorgenti sarà possibile testare le attuali teorie sulla formazione di queste strutture, probabilmente legate ai fenomeni di merger tra ammassi di galassie.

La presenza dei Relitti evidenzia l'esistenza di campi magnetici estesi su larga scala anche nelle periferie degli ammassi, dove la densità dell'ICM risulta inferiore e dove perciò gli shocks sono più efficienti, favorendo quindi la formazione di Relitti.

Grazie all'analisi dei Relitti effettuata è stato possibile concludere che i Relitti che possiedono dimensioni maggiori mostrano anche una maggiore potenza radio, poiché gli elettroni presenti in quella regione risultano accelerati con più efficienza da shocks più estesi. Da questa ricerca è emersa inoltre l'esistenza di una correlazione tra luminosità in X e potenza radio che suggerisce un ulteriore collegamento tra quest'ultima e la massa del cluster, essendo luminosità in X, massa del cluster e fenomeni di merger tra loro legati.

Lo studio approfondito delle emissioni non termiche provenienti da ammassi di galassie consentirà inoltre di indagare sull'origine delle strutture a larga scala e di ottenere importanti indizi per lo sviluppo dell'attuale Modello Cosmologico.

5 Bibliografia e Sitografia

Ferrari A., “*Stelle, Galassie e Universo*”

L. Ferretti, G. Giovannini, F. Govoni, M. Murgia “*Clusters of galaxies: observational properties of the diffuse radio emission*”

A. Bonafede, M. Brüggen, R. van Weeren, F. Vazza, G. Giovannini, H. Ebeling, A. C. Edge, M. Hoeft, U. Klein “*Discovery of radio halos and double-relics in distant MACS galaxy clusters: clues to the efficiency of particle acceleration*”

R. J. van Weeren, M. Brüggen, H. J. A. Röttgering, M. Hoeft, S. E. Nuza, H. T. Intema “*Radio continuum observation of new radio halos and relics from the NVSS and WENSS surveys*”

R. J. van Weeren, H. T. Intema, D. V. Lal, A. Bonafede, C. Jones, W. R. Forman, H. J. A. Röttgering, M. Brüggen, A. Stroe, M. Hoeft, S. E. Nuza, F. de Gasperin “*The discovery of a radio halo in PLCK G147.3–16.6 at $z = 0.65$* ”

R. J. van Weeren, K. Fogarty, C. Jones, W. R. Forman, T. E. Clarke, M. Brüggen, R. P. Kraft, D. V. Lal, S. S. Murray, and H. J. A. Röttgering “*Complex diffuse radio emission in the merging PLANCK ESZ cluster A3411*”

F. de Gasperin, R. J. van Weeren, M. Brüggen, F. Vazza, A. Bonafede, H.T. Intema “*A new double radio relic in PSZ1 G096.89+24.17 and a radio relic mass-luminosity relation*”

F. Govoni, C. Ferrari, L. Ferretti, V. Vacca, M. Murgia, G. Giovannini, R. Perley, C. Benoist “*Detection of diffuse radio emission in the galaxy clusters A800, A910, A1550, and CL1446+26*”

F. de Gasperin, H. T. Intema, R. J. van Weeren, W. A. Dawson, N. Golovich, D. Wittman, A. Bonafede, M. Brüggen “*A powerful double radio relic system discovered in PSZ1 G108.18-11.53: evidence for a shock with non-uniform Mach Number?*”

Robert R. Lindner, Andrew J. Baker, John P. Hughes, Nick Battaglia, Neeraj Gupta, Kenda Knowles, Tobias A. Marriage, Felipe Menanteau, Kavilan Moodley, Erik D. Reese, Raghunathan Srianand
“The Radio Relics and Halo of El Gordo, a Massive $z=0.870$ Cluster Merger”

<https://ned.ipac.caltech.edu/level5/>

<http://www.astro.cornell.edu/academics/courses/astro201/galaxies/clus.htm>

<http://www2.astro.psu.edu/~caryl/a480/lecture15.pdf>

http://spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/gal_clus/gal_clus.html

http://www.ira.inaf.it/~ggiovann/astrofisica/astrofisica_1.pdf

https://www.astro.umd.edu/~richard/ASTR480/Clusters_lecture2.pdf

<http://libra.virginia.edu/catalog/libra-oa:6037>

http://eud.gsfc.nasa.gov/Volker.Beckmann/school/download/Longair_Radiation3.pdf

<http://www.astro.utu.fi/~cflynn/astroII/14.html>

<http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/SynchrotronSpectrum.html>

<http://inspirehep.net/record/1310637/plots>

<https://astrobites.org/2014/02/11/finding-the-origin-of-radio-emission-in-galaxy-clusters/>

<http://casswww.ucsd.edu/archive/public/tutorial/Clusters.html>