

Université de Montréal

**Nouvelles observations radio de l'amas de galaxies MS
0735.6+7421 avec le Karl G. Jansky Very Large Array**

par

Théophile Bégin

Département de Physique
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en physique

28 juillet 2021

Université de Montréal

Faculté des arts et des sciences

Ce mémoire intitulé

Nouvelles observations radio de l'amas de galaxies MS 0735.6+7421 avec le Karl G. Jansky Very Large Array

présenté par

Théophile Bégin

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

David Lafrenière

(président-rapporteur)

Julie Hlavacek-Larrondo

(directrice de recherche)

Daryl Haggard

(codirectrice)

Patrick Dufour

(membre du jury)

Sommaire

Les amas des galaxies sont l'une des plus grandes structures liées gravitationnellement de l'univers. Leur dynamique est complexe et bien que plusieurs études multi-longueur d'onde ont été effectuées depuis la fin du 20ème siècle, il persiste plusieurs incertitudes sur les subtilités de leur dynamique. À ce jour, le consensus scientifique est que les trous noirs supermassifs actifs au centre des amas ont un impact important sur l'évolution de ces structures. Le trou noir central agit comme centre gravitationnel, mais lorsque ce trou noir est actif, son rôle ne se limite pas seulement à son impact gravitationnel. D'une part, les trous noirs actifs ont un rôle crucial dans l'émission thermique des amas. En effet, les jets radio influencent l'émission rayons-X des amas en poussant mécaniquement le milieu intra-amas qui émet en rayons-X via l'émission Bremsstrahlung. Ce phénomène engendre la formation de cavités rayons-X qui constituent une preuve de la rétroaction énergétique du trou noir sur l'ensemble de l'amas. Un tel phénomène est nécessaire afin d'expliquer les résultats observationnels qui témoignent d'un refroidissement moins important que prédit théoriquement au centre des amas à coeur froid. D'autre part, il existe de plus en plus d'études qui supportent l'hypothèse que les trous noirs actifs ont un rôle dans la (ré-)accélération de particules relativistes responsables de l'émission synchrotron au coeur des amas à coeur froid. Ces structures appelées mini-halos sont typiquement diffuses en radio et donc difficiles à détecter. Dans ce mémoire, nous étudierons en détail l'émission radio de l'amas de galaxies massif à coeur froid MS 0735.6+7421 ($z = 0.216$). Cet amas est unique puisqu'il possède les jets radio les plus énergétiques détectés au centre d'un amas à coeur froid. Il s'agit donc d'un exemple de trou noir actif parmi les plus extrêmes connus. Cet objet constitue ainsi une cible parfaite afin d'étudier le lien qui unit la rétroaction du trou noir actif central et l'émission synchrotron au centre des amas à coeur froid. Pour réaliser cette étude, nous avons effectué une analyse radio exhaustive de MS 0735.6+7421 à l'aide de données acquises sur le Karl G. Jansky Very Large Array. Cette analyse a permis de détecter une nouvelle structure radio diffuse jamais détectée auparavant. Cette nouvelle structure possède une puissance radio à 1.4 GHz qui concorde avec celles des mini-halos les plus lumineux. Le résultat principal de notre étude supporte donc l'hypothèse selon laquelle il existe un lien fondamental entre la rétroaction du trou noir actif central et la formation de mini-halos au centre des amas à coeur froid.

Mots-clés : radio mini-halos - amas de galaxies - rétroaction du noyau actif de galaxie - trous noirs supermassifs - jets - cavités - milieu intra-amas - radio astronomie - astronomie rayons X - cible : MS 0735.6+7421

Summary

Galaxy clusters are one of the largest gravitationally bound structures in the universe. They exhibit complex dynamics and even though several multi-wavelength studies have been conducted since the end of the 20th century, there are still a lot of uncertainties concerning their evolution. To this day, the scientific consensus is that the active supermassive black hole at the center of the cluster has a profound impact on the cluster's evolution. Indeed, the central supermassive black hole has a substantial gravitational impact, but when the black hole actively accretes material, its role goes beyond its gravitational influence. Active supermassive black holes have a crucial role in terms of the thermal emission in clusters. Indeed, the radio jets influence the X-ray emission of clusters by mechanically pushing the intracluster medium which emits in X-ray via Bremsstrahlung emission. This leads to the formation of X-ray cavities which are proof of the energetic feedback of the central supermassive black hole on the cluster. Such a phenomenon is required to reconcile the observational results that report less cooling at the center of cool core clusters than what is theoretically predicted. Moreover, there are more and more studies that support the hypothesis that active supermassive black holes have a crucial role in the (re-)acceleration of seed particles responsible for synchrotron emission at the center of cool core clusters. These structures are named mini-halos and are usually difficult to detect because they are diffuse. In this Master's thesis, we will study the radio emission of the massive cool core galaxy cluster MS 0735.6+7421 ($z = 0.216$). This cluster is unique because it exhibits the most powerful radio jets ever detected at the center of a cool core cluster. It thus contains one of the most powerful active supermassive black holes known. This object is a perfect target to study the link between active black hole feedback and synchrotron emission in cool core clusters. To conduct this study, we performed a radio analysis of MS 0735.6+7421 with new data obtained with the Karl G. Jansky Very Large Array. This analysis led to the discovery of an extended diffuse radio structure. This newly detected structure has a radio power at 1.4 GHz that matches the most luminous mini-halos known in the literature. The principal result of our study argues in favor of the hypothesis that there is a fundamental link between active black hole feedback and the formation of mini-halos at the center of cool core clusters.

Keywords: radio mini-halos - cluster of galaxies - active galactic nuclei feedback - supermassive black holes - jets - cavities - intracluster medium - radio astronomy - X-ray astronomy - target: MS 0735.6+7421

Table des matières

Sommaire	v
Summary	vii
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xv
Liste des sigles et des abréviations	xvii
Remerciements	xxi
Chapitre 1. Mise en contexte théorique	1
1.1. Galaxies, groupes de galaxies et amas de galaxies	1
1.2. Le milieu intra-amas	3
1.2.1. Courant de refroidissement de l'ICM	4
1.3. Les galaxies centrales dans les amas de galaxies	7
1.4. Les noyaux actifs de galaxies	7
1.4.1. Trou noir supermassif	8
1.4.2. Disque d'accrétion	9
1.4.3. Jets	9
1.4.4. Tore de poussière et de gaz	12
1.4.5. Région à raies larges et région à raies étroites	12
1.4.6. Principales classes d'AGNs	13
1.5. La rétroaction des noyaux actifs de galaxies	14
1.5.1. Calcul de la puissance des jets	14
1.5.1.1. Temps de vie des cavités	15
1.5.1.2. Travail nécessaire pour gonfler la cavité	16
1.6. Les perturbations dans les amas de galaxies	16
1.6.1. Perturbations internes	16

1.6.2.	Perturbations externes	17
1.7.	L'émission radio dans les amas de galaxies	18
1.7.1.	Halos radio géants	19
1.7.2.	Mini-halos	20
1.7.3.	Reliques	21
1.7.4.	Sources plasma fossile réanimées	21
1.8.	Le radiotélescope Karl G. Jansky Very Large Array	22
1.9.	Description du mémoire	23
1.10.	Déclaration de l'étudiant	24
	Références bibliographiques	26
Chapitre 2.	Extended radio emission in the galaxy cluster MS0735.6+7421	
	detected with the Karl G. Jansky Very Large Array	35
	Résumé	35
	Abstract	36
2.1.	Introduction	37
2.2.	Observations and data reduction	39
2.2.1.	JVLA observations	39
2.2.2.	Chandra observations	41
2.3.	Results	42
2.4.	Discussion	46
2.4.1.	Previous imaging of MS0735	46
2.4.1.1.	144 MHz LOFAR observations	48
2.4.2.	New extended radio emission detected with the JVLA	49
2.4.3.	The nature of the new extended radio emission	51
2.4.3.1.	Jet-related counterpart to the 144 MHz LOFAR data	52
2.4.3.2.	Mini-halo candidate	52
2.4.4.	Implications for our understanding of mini-halos	54
2.5.	Concluding remarks	55
	Acknowledgements	55

Références bibliographiques	56
Chapitre 3. Conclusions	61
Annexe A. Autres publications à titre de co-auteur	65
A.1. The First High-Contrast Images of X-Ray Binaries: Detection of Candidate Sub-Stellar and Stellar Companions in the γ Cas Analog RX J1744.7–2713..	65
A.2. A Machine Learning Approach to Integral Field Unit Spectroscopy Observations: III. Disentangling Multiple Components in HII regions.....	65
Annexe B. Congrès où l'étudiant a présenté ses résultats	67
B.1. Rencontre annuelle de la Société Canadienne d'Astronomie (CASCA).....	67
B.2. Rencontre annuelle de la Société Américaine d'Astronomie (AAS).....	67
Annexe C. Demandes de temps d'observation	69

Liste des tableaux

C.1	Liste des demandes de temps d'observation	69
-----	---	----

Liste des figures

1.1	Exemples de galaxies elliptiques et spirales	2
1.2	Spectre d'émission rayons-X de l'amas de Persée	5
1.3	Émission rayons-X des amas à coeur froid	6
1.4	Modèle d'unification des AGNs	8
1.5	Spectre d'un AGN typique	10
1.6	Schématisation de l'émission synchrotron	11
1.7	Jet relativiste de la galaxie M87	12
1.8	Émissions radio, rayons-X et visible de l'amas de galaxies MS 0735.6+7421	15
1.9	Chocs dans l'amas de galaxies Abell 2146	17
1.10	Front froid dans l'amas de Persée	18
1.11	Catégories d'émission radio étendue dans les amas de galaxies	22
1.12	Radiotélescope Karl G. Jansky Very Large Array (JVLA)	23
2.1	New composite image of MS 0735.6+7421	43
2.2	P-band and L-band radio images of MS 0735.6+7421 maximizing spatial resolution and flux density sensitivity	44
2.3	Radio image of the point sources in MS 0735.6+7421's vicinity	45
2.4	X-ray, abundance and temperature maps of MS 0735.6+7421 and comparison with our radio imaging	46
2.5	Comparison between the old P-band A configuration and the new P-band C configuration radio images of MS 0735.6+7421	47
2.6	Spectral index map of the vicinity of MS 0735.6+7421	48
2.7	Comparison between MS 0735.6+7421's properties and known mini-halo correlations	54

Liste des sigles et des abréviations

ACIS	Spectromètre avancé à imagerie CCD, de l'anglais <i>Advanced CCD Imaging Spectrometer</i>
ACS	Caméra avancée pour recensements, de l'anglais <i>Advanced Camera for Surveys</i>
AGN	Noyau actif de galaxie, de l'anglais <i>active galactic nucleus</i>
BCG	Galaxie dominante d'un amas de galaxies, de l'anglais <i>brightest cluster galaxy</i>
BLR	Région à raies larges, de l'anglais <i>broad-line region</i>
BLRG	Galaxie radio à raies larges, de l'anglais <i>broad line radio galaxy</i>
CASA	<i>Common Astronomy Software Applications</i>
CCC	Amas de galaxies à coeur froid, de l'anglais <i>cool core cluster</i>
CR	Rayon cosmique, de l'anglais <i>cosmic ray</i>

DR	Intervalle dynamique, de l'anglais <i>dynamic range</i>
GReET	Queues radio tranquillement ré-énergisées, de l'anglais <i>gently re-energized radio tails</i>
HST	Télescope spatial Hubble, de l'anglais <i>Hubble Space Telescope</i>
ICM	Milieu intra-amas, de l'anglais <i>intracluster medium</i>
JVLA	<i>Karl G. Jansky Very Large Array</i>
LAS	Plus grande taille angulaire, de l'anglais <i>largest angular scale</i>
LOFAR	<i>Low-Frequency Array</i>
NCCC	Amas de galaxies n'étant pas à coeur froid, de l'anglais <i>non cool core cluster</i>
ngVLA	<i>next generation Very Large Array</i>
NLR	Région à raies étroites, de l'anglais <i>narrow-line region</i>
NLRG	Galaxie radio à raies étroites, de l'anglais <i>narrow line radio galaxy</i>

NRAO	Observatoire national de radioastronomie, de l'anglais <i>National Radio Astronomy Observatory</i>
NSERC	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, de l'anglais <i>Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada</i>
OMM	Observatoire du Mont-Mégantic
RFI	Interférence radio, de l'anglais <i>radio frequency interference</i>
SKA	<i>Square Kilometre Array</i>
SMBH	Trou noir supermassif, de l'anglais <i>supermassive black hole</i>
TEC	Contenu total en électrons, de l'anglais <i>total electron content</i>

Remerciements

Je tiens à remercier ma superviseuse, Julie, pour m'avoir donné la chance d'intégrer le monde de l'astrophysique. J'ai appris énormément en travaillant à tes côtés, non seulement du point de vue technique et physique, mais aussi sur le plan de l'accomplissement et des efforts nécessaires à la réussite.

Je tiens aussi à remercier les collègues avec qui j'ai eu la chance de travailler dans le cadre de cette maîtrise.

Carter, merci de m'avoir accueilli dès mon arrivée dans le groupe et de m'avoir pris sous ton aile. Merci aussi pour ton aide avec la recherche.

Myriam, merci pour ton support moral et pour ton aide technique précieuse.

Marie-Lou, merci de m'avoir sauvé avec l'apprentissage de la réduction de données radio et pour ton aide en général.

Luc, merci pour l'aide avec vyger5.

Merci finalement à ma famille, ma copine et mes amis qui m'ont supporté dans cette aventure et qui m'aident à atteindre mes objectifs.

Chapitre 1

Mise en contexte théorique

1.1. Galaxies, groupes de galaxies et amas de galaxies

Une galaxie est un regroupement de 10^8 à 10^{14} étoiles qui sont liées gravitationnellement entre elles et qui orbitent autour d'un point central. Les galaxies contiennent du gaz et de la poussière ainsi que de la matière noire¹. La plupart des galaxies possèdent en leur centre un trou noir supermassif (SMBH - *supermassive black hole*, p. ex. Sagittarius A* dans le cas de la Voie lactée) qui est parfois actif (voir section 1.4). Les galaxies ne sont pas distribuées isotropiquement dans l'univers, mais sont plutôt regroupées en des structures de plus grande envergure comme des groupes ou des amas de galaxies.

Il existe des galaxies de différentes morphologies telles que décrit par la séquence de Hubble (Hubble 1926). De manière générale, les galaxies se divisent en deux branches principales : les galaxies elliptiques et les galaxies spirales. La figure 1.1 présente des exemples de ces deux catégories de galaxies. Les galaxies elliptiques sont caractérisées par une structure sphérique et par une densité diminuant progressivement du centre vers l'extérieur. Les étoiles de ces galaxies sont en moyenne plus âgées que celles dans les galaxies spirales et ont un mouvement apparent aléatoire par rapport au centre gravitationnel de la galaxie. Les galaxies elliptiques ont historiquement été appelées des galaxies précoces en raison des explications initiales erronées de l'évolution galactique d'une galaxie elliptique à une galaxie spirale. Les galaxies spirales sont pour leur part caractérisées par une structure en forme de disque aplati, par des bras bien définis où les étoiles sont majoritairement jeunes en raison du haut taux de formation stellaire et par une structure sphérique centrale appelée le bulbe. Certaines galaxies spirales ont aussi une structure en forme de barre en leur centre et sont ainsi appelées les galaxies spirales barrées.

Un groupe de galaxies correspond à un regroupement de quelques dizaines à quelques centaines de galaxies liées gravitationnellement entre elles.

¹Masse non lumineuse dont les effets gravitationnels sont mesurables à l'échelle galactique.



Fig. 1.1. **Gauche** : la galaxie NGC 2865 est un exemple de galaxie elliptique. **Droite** : la galaxie UGC 2885 est un exemple de galaxie spirale barrée. Crédit : NASA.

Un amas de galaxies correspond, pour sa part, à un regroupement de quelques centaines à quelques milliers de galaxies qui forment un énorme puits gravitationnel. À proximité du centre géométrique de ce puits gravitationnel réside une galaxie typiquement elliptique et dominante en terme de masse, appelée la galaxie dominante de l'amas (BCG - *brightest cluster galaxy*), voir section 1.3 pour une description plus détaillée de la BCG. La masse d'un amas de galaxies varie de 10^{13} à $10^{15} M_{\odot}$. Cette masse totale est composée d'approximativement 5% de galaxies, de 15% du milieu intra-amas (ICM - *intracluster medium*) et de 80% de matière noire (Feretti et al. 2012, van Weeren et al. 2019). Les amas ont typiquement des rayons de l'ordre de 1 – 2 Mpc (Abell 1958). Ces structures se forment de manière hiérarchique sous l'effet de la gravité à partir de la fusion de structures de moins grande envergure (Kravtsov and Borgani 2012).

On retrouve des amas dans différents stades dynamiques. Certains sont dits non perturbés lorsqu'ils se trouvent dans un état d'équilibre dynamique en raison de l'absence d'une perturbation majeure dans leur passé récent. Parmi ces amas non perturbés, on retrouve les amas à coeur froid (voir section 1.2.1 pour une définition d'un amas à coeur froid). D'autres sont dans un stade de perturbation en raison de l'interaction gravitationnelle avec d'autres structures. Par exemple, lorsqu'une fusion entre deux amas (communément appelée fusion majeure) se produit, les ICMs des deux amas entrent en collision, ce qui peut produire des ondes de choc.

Finalement, à très grande échelle, l'Univers a une structure isotrope appelée toile cosmique. Cette structure décrit la distribution de matière lumineuse et de matière sombre à l'échelle cosmologique.

Le présent mémoire s'intéresse à l'amas de galaxies MS 0735.6+7421 qui est un amas de galaxies massif contenant un SMBH central actif et qui est dans un stade dynamique non perturbé puisqu'il ne subit pas d'influence due à une fusion majeure avec un autre amas de

galaxies (McNamara et al. 2005, Vantyghem et al. 2014). Il s’agit aussi d’un amas dit à coeur froid, c’est-à-dire qu’il est caractérisé par une émission rayons-X forte en son centre (voir section 1.2.1).

Puisque MS 0735.6+7421 est un amas massif à coeur froid, il constitue une cible de choix pour détecter une structure radio diffuse appelée mini-halo (voir section 1.7 pour la description des émissions radio étendues dans les amas de galaxies). De plus, étant donné que le SMBH actif au centre de MS 0735.6+7421 est particulièrement puissant, il s’agit d’une cible de choix pour étudier le lien entre le SMBH actif et la formation d’un mini-halo.

1.2. Le milieu intra-amas

Le milieu intra-amas (ICM) possède deux composantes principales : des étoiles distribuées de façon diffuse et irrégulière et un plasma chaud distribué de façon diffuse et homogène et composé principalement d’atomes ionisés ainsi que d’un gaz d’électrons libres. Ce plasma contient de l’hydrogène et de l’hélium (complètement ionisés en raison de la température qui dépasse les millions de degré Kelvin), mais aussi des éléments plus lourds comme l’oxygène, le silicium, le soufre et le fer (fortement ionisés). L’ICM est une structure diffuse : sa densité est de l’ordre de 10^{-4} particules par cm^3 en périphérie de l’amas et de l’ordre de 10^{-1} particules par cm^3 à proximité du centre de certains amas. Comme prédit par le théorème du viriel, les énergies potentielle et cinétique dans un système à l’équilibre dynamique respectent la relation :

$$2\langle E_c \rangle + \langle E_p \rangle = 0, \quad (1.2.1)$$

où $\langle \rangle$ correspond à une moyenne temporelle, E_c est l’énergie cinétique des particules de l’ICM et E_p est l’énergie potentielle gravitationnelle de l’amas. On peut réécrire cette égalité comme suit :

$$\langle E_c \rangle = -\frac{\langle E_p \rangle}{2}. \quad (1.2.2)$$

Cette relation est valide pour l’ICM d’un amas de galaxies à l’équilibre et son énergie totale sera décrite par l’égalité suivante :

$$\langle E_{\text{totale}} \rangle = \langle E_c \rangle + \langle E_p \rangle = \frac{\langle E_p \rangle}{2} = -\langle E_c \rangle, \quad (1.2.3)$$

avec $|E_p| \propto \frac{1}{r}$ (la force gravitationnelle étant une force conservative et ayant une dépendance en $\frac{1}{r^2}$, on sait qu’elle correspond au gradient d’un potentiel qui doit avoir une dépendance en $\frac{1}{r}$), on remarque qu’avec l’effondrement gravitationnel de l’ICM (la diminution de son rayon), son énergie potentielle va fortement diminuer (augmenter en valeur

absolue), menant ainsi à une augmentation de l'énergie cinétique globale afin de satisfaire à la conservation de l'énergie totale de l'amas virialisé.

La température moyenne des particules de l'ICM sera directement attribuable à cette augmentation de l'énergie cinétique. Une estimation de la température T de l'ICM à l'équilibre est donc obtenue en égalant l'énergie cinétique d'une particule test à son énergie thermique obtenue via le principe d'équipartition de l'énergie et en considérant les trois degrés de liberté de la particule test :

$$\frac{1}{2}\mu m_H \sigma^2 = \frac{3}{2}k_B T, \text{ avec } \sigma^2 = \left(\frac{3}{5}\frac{GM}{R}\right), \quad (1.2.4)$$

où μ est la masse moléculaire moyenne, m_H est la masse de l'atome d'hydrogène, σ est la dispersion de vitesse des galaxies membres de l'amas, k_B est la constante de Boltzmann et où G est la constante gravitationnelle, M est la masse totale de l'amas et R est le rayon de l'amas.

En isolant la température T , on a :

$$T = \frac{GM\mu m_H}{5k_B R}.$$

Pour des masses ainsi que des rayons inclus respectivement dans les intervalles $M \in [10^{13}M_\odot, 10^{15}M_\odot]$ et $R \in [1 \text{ Mpc}, 2 \text{ Mpc}]$, on obtient $T \in [10^6 \text{ K}, 10^8 \text{ K}]$.

En raison de sa constitution d'ions et d'un gaz d'électrons, l'ICM génère une émission Bremsstrahlung (ou émission libre-libre) qui est une émission continue générée par la déviation des électrons libres par les noyaux chargés. Puisqu'elle résulte de l'interaction des électrons avec les ions présents dans l'ICM, cette émission est proportionnelle au carré de la densité de l'ICM. L'émission Bremsstrahlung est donc plus intense au centre de l'amas, là où la densité est la plus grande. De plus, cette émission génère des photons d'énergie proportionnelle à la température (de l'ordre de $\sim k_B T$). L'énergie des photons générés est donc de l'ordre de 0,1 – 9 keV, ce qui correspond à de l'émission rayons-X. L'ICM est donc fortement lumineux en rayons-X et apparaît comme une source rayons-X étendue avec une émission centrale importante et avec des luminosités de l'ordre de 10^{43} erg/s à 10^{45} erg/s (Fabian 1994).

L'émission des amas de galaxies comprend aussi des raies d'émission associées à des transitions électroniques dans les atomes lourds présents dans l'ICM (par exemple certaines transitions électroniques du fer qui sont dans la gamme des rayons-X). Cela mène à une superposition de raies d'émission à l'émission Bremsstrahlung continue dans le domaine des rayons-X (voir figure 1.2 pour un exemple de spectre d'émission, Aharonian et al. 2018).

1.2.1. Courant de refroidissement de l'ICM

Les amas de galaxies possèdent donc une émission rayons-X prépondérante en raison de leur champ gravitationnel important. Ce champ gravitationnel contribue à augmenter

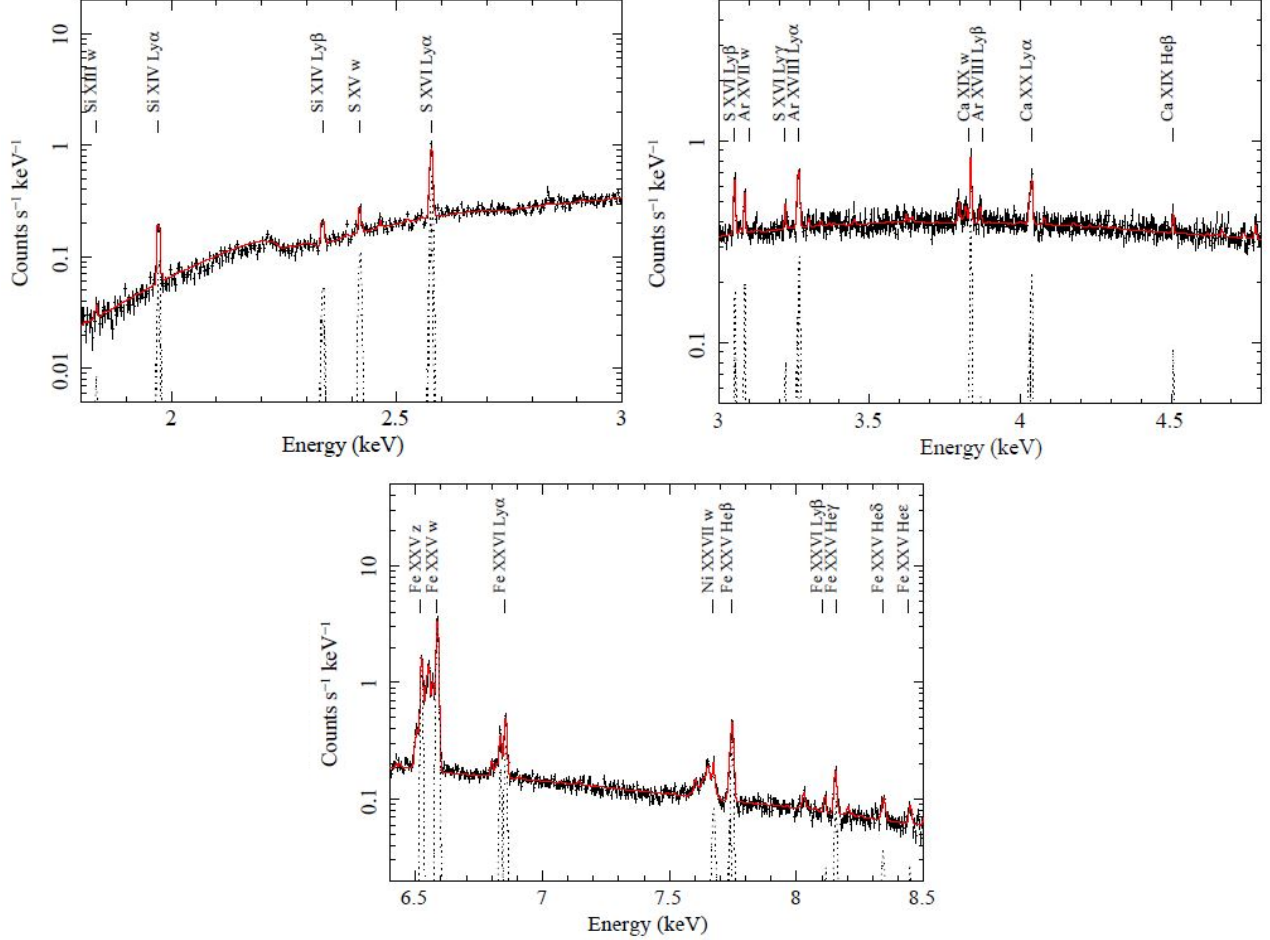


Fig. 1.2. Spectre d'émission rayons-X entre 1,5 et 8,5 keV du coeur de l'amas de Persée pris par le télescope spatial Hitomi (voir Aharonian et al. 2018). Les raies d'émission associées aux transitions électroniques des éléments lourds sont ajustées par des fonctions gaussiennes tracées en pointillé noir. Le trait rouge représente l'ajustement paramétrique obtenu à l'aide d'un modèle CIE plasma qui prend en compte les raies d'émission et l'émission continue.

l'énergie cinétique moyenne des particules de l'ICM qui rayonnent alors fortement en rayons-X via l'émission Bremsstrahlung. L'émission Bremsstrahlung est le mécanisme de perte énergétique le plus important au sein de l'ICM (Fabian 1994) et il est possible de quantifier le temps que prendrait un plasma comme l'ICM afin de perdre la totalité de son énergie par cette émission rayons-X. Pour ce faire, on divise l'enthalpie du gaz par l'énergie perdue par unité de volume du plasma (Peterson and Fabian 2006). L'enthalpie du gaz est donnée par $H = U + pV$ où U correspond à l'énergie thermique $U = \frac{3}{2}Nk_B T$, où N est le nombre de particules tel que prescrit par le principe d'équipartition et pV est le produit de la pression et du volume pour le gaz et est donné par $pV = Nk_B T$. On a donc $H = \frac{5}{2}Nk_B T$. L'enthalpie par unité de volume est alors $h = \frac{H}{V} = \frac{5}{2}nk_B T$, où n est la densité du gaz. L'énergie perdue peut être écrite comme $n^2 \Lambda$ où Λ correspond à la fonction de refroidissement (Peterson and

Fabian 2006). On obtient alors l'expression suivante pour estimer le temps de refroidissement de l'ICM :

$$t_{cool} = \frac{\frac{5}{2}nk_B T}{n^2\Lambda} = \frac{5k_B T}{2n\Lambda}. \quad (1.2.5)$$

Cette estimation du temps de refroidissement est utile afin de catégoriser les amas de galaxies. En effet, les amas de galaxies se divisent en amas à coeur froid (CCC - *cool-core cluster*) et ceux n'étant pas à coeur froid (NCCC - *non cool-core cluster*). Les CCCs possèdent une densité centrale très grande ce qui mène à une émission rayons-X centrale très forte. Dans le cas des NCCCs, l'émission rayons-X centrale est moins forte (voir figure 1.3).

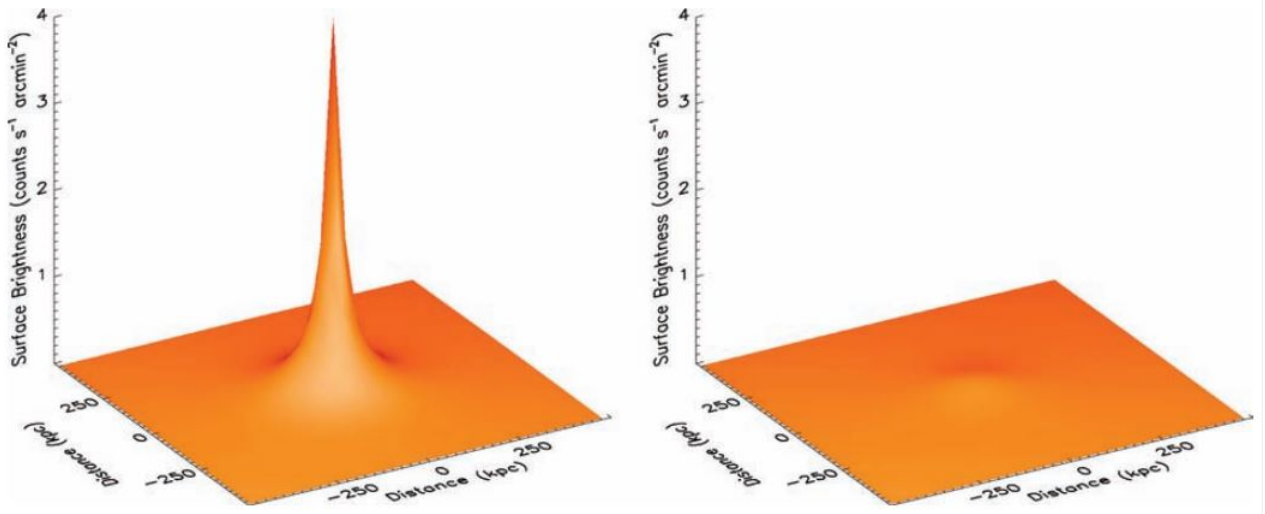


Fig. 1.3. Émission rayons-X de deux amas de galaxies. **Gauche** : émission rayons-X dans l'amas de galaxies Abell 229 qui est un CCC. **Droite** : émission rayons-X dans l'amas de galaxies Abell 2319 qui est un NCCC. Il est à noter que la brillance des deux amas a été mise à l'échelle afin de montrer l'émission telle qu'elle serait vue si les deux amas étaient situés à une même distance de nous. Crédit : Million and Allen 2009.

Ainsi, dans un CCC, la température centrale diminue en raison de la perte énergétique attribuable à la forte émission rayons-X. Cette diminution de température engendre une augmentation de la densité qui contribue du même coup à augmenter l'émission rayons-X. Cette augmentation de l'émission rayons-X va alors contribuer à faire diminuer encore plus la température centrale. Un courant de refroidissement devrait donc théoriquement être créé vers le centre de l'amas. Ce courant de refroidissement contribue à former des nuages de gaz moléculaire froid et on s'attendrait donc à pouvoir mesurer un haut taux de formation stellaire au centre des CCCs. Toutefois, les observations ne confirment pas ce haut taux de formation d'étoiles (Peterson and Fabian 2006, McDonald et al. 2018). Ce problème a été baptisé le problème du courant de refroidissement (voir McDonald et al. 2018). En effet, ces résultats observationnels ont mis en évidence un problème avec les modèles théoriques

: il doit exister un mécanisme de réchauffement de l'ICM, au centre des CCCs, afin que la température centrale de ces amas soit maintenue et ne mène pas à un écoulement de refroidissement central. Le principal candidat pour résoudre le problème du courant de refroidissement est la rétroaction du SMBH actif central (voir section 1.4).

1.3. Les galaxies centrales dans les amas de galaxies

Les amas de galaxies possèdent normalement en leur centre gravitationnel une galaxie plus massive et plus lumineuse que les autres, la BCG. Cette dernière a une position correspondant approximativement avec le pic d'émission en rayons-X de l'amas. Il s'agit le plus souvent d'une galaxie elliptique géante. Il existe différentes hypothèses pour le scénario de formation des BCGs. Les deux principales hypothèses de formation sont : la fusion galactique et le cannibalisme galactique. L'hypothèse de la fusion galactique stipule que la BCG est formée par la fusion par collision de plusieurs galaxies lors de la formation de l'amas. L'hypothèse du cannibalisme galactique stipule pour sa part que la friction ainsi que l'interaction gravitationnelle entre les galaxies présentes dans l'amas amènent les galaxies à tomber progressivement vers le centre de l'amas. Le scénario le plus communément accepté est celui de la fusion galactique puisque le scénario du cannibalisme ne pourrait pas mener à la formation de galaxies centrales aussi massives simplement par l'entremise de l'évolution orbitale d'un amas non perturbé (Merritt 1985).

En raison de leur magnitude absolue qui est fortement contrainte (les BCGs les plus rapprochées de nous présentent une faible dispersion en magnitude absolue), les BCGs sont utilisées comme chandelles standards et permettent de déterminer des distances à l'échelle cosmologique.

Les BCGs ont des masses d'approximativement 10^{11} à $10^{12} M_{\odot}$ et des rayons de l'ordre de 20-50 kpc (Dubinski 1998; Haarsma et al. 2010). Dans approximativement 20% des cas, les BCGs sont de type cDs (Matthews et al. 1964) ce qui signifie qu'elles possèdent un très large halo stellaire (Oemler 1976). Approximativement 30% des BCGs sont entourées de nébuleuses qui prennent la forme de filaments émettant des raies $H\alpha$ à des luminosités comprises entre 10^{40} à 10^{42} erg/s (Crawford et al. 1999).

1.4. Les noyaux actifs de galaxies

Certaines BCGs possèdent en leur centre un SMBH actif nommé noyau actif de galaxie (AGN - *active galactic nucleus*). La luminosité de ces structures résulte de l'accrétion de matière par le SMBH central. Dans cette section, les différentes composantes des AGNs sont présentées. Ces composantes sont aussi représentées à la figure 1.4 avec le modèle d'unification des AGNs de Urry and Padovani (1995).

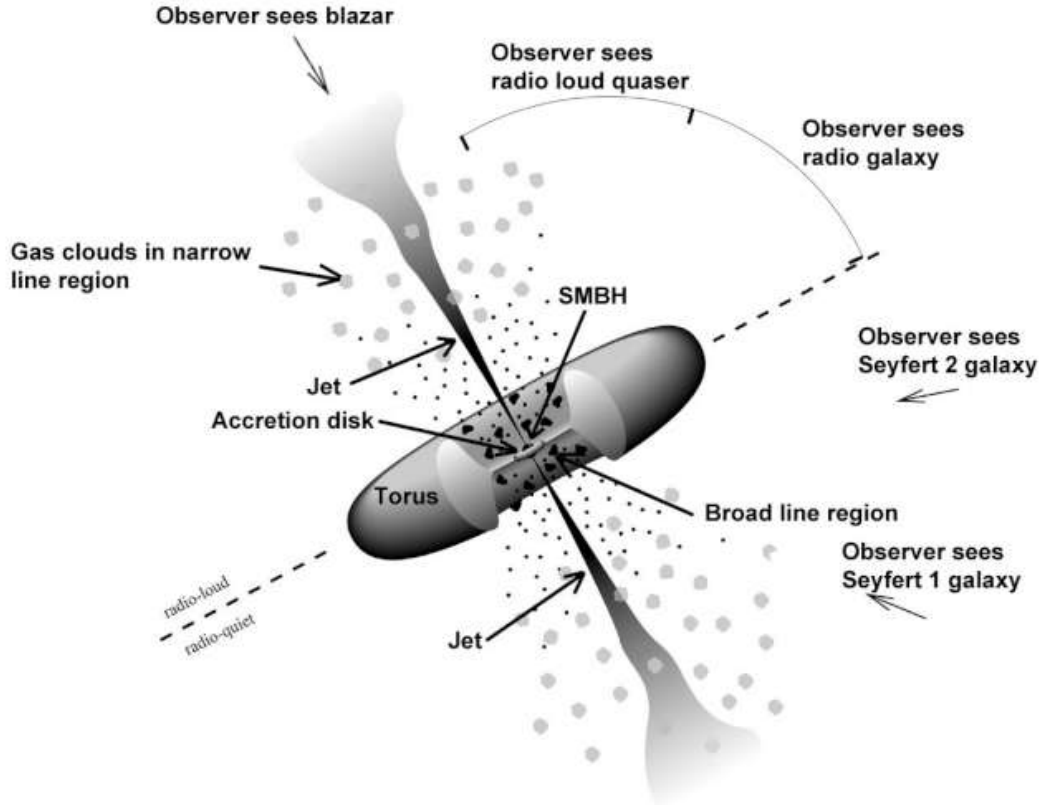


Fig. 1.4. Modèle d'unification des AGNs présenté par Urry and Padovani (1995) et qui se base sur l'hypothèse que les différents types d'AGNs (Seyfert type 1, type 2, blazar, quasar, galaxie radio) sont un effet résultant de l'angle de visée de l'observateur par rapport à l'AGN.

1.4.1. Trou noir supermassif

Un trou noir est un objet suffisamment dense pour que son influence gravitationnelle empêche la lumière de s'échapper de son environnement rapproché. Dans le cas d'un trou noir sphérique sans charge et sans spin, la courbure de l'espace engendrée par le trou noir est, telle que prédit par la théorie de la relativité générale, décrite par la métrique de Schwarzschild (Schwarzschild 1916). Dans ce cas, le rayon de Schwarzschild, qui correspond au rayon en dessous duquel aucune particule, ni même les photons, ne peuvent s'échapper de l'attraction gravitationnelle du trou noir est donné par :

$$R_s = \frac{2GM}{c^2},$$

où R_s correspond au rayon de Schwarzschild, G est la constante gravitationnelle, M est la masse du trou noir et c est la vitesse de la lumière dans le vide.

Un autre type est le trou noir de Kerr (Kerr 1963) qui correspond à un trou noir sans charge, mais possédant un spin. En raison de sa rotation, il est prédit que ce type de trou noir engendre le phénomène de précession de Lense-Thirring caractérisé par l'apparition d'une

région de l'espace appelée l'ergosphère et dans laquelle l'influence gravitationnelle du trou noir en rotation entraîne avec elle l'espace-temps. Un trou noir de Kerr possède aussi un horizon des événements dont la limite se situe à l'intérieur de l'ergosphère. La précession de Lense-Thirring engendrerait une série de phénomènes contre-intuitifs pour les objets ou photons se trouvant dans cette région de l'espace (Hartle 2002).

Ces deux exemples de trous noirs sont en fait deux des quatre types de trous noirs théoriques prédits en astrophysique par le théorème de calvitie (Ruffini and Wheeler 1971). Ce théorème prédit que seules trois quantités physiques sont nécessaires pour caractériser un trou noir : sa masse, sa charge ainsi que son moment cinétique. Les deux autres types de trous noirs prédits sont le trou noir de Reissner-Nordström (charge non nulle et moment cinétique nul, Reissner 1916, Nordström 1918) et le trou noir de Kerr-Newman (charge non nulle et moment cinétique non nul, Newman et al. 1965).

Les trous noirs sont normalement catégorisés en fonction de leur masse. Il existe ainsi quatre catégories de trous noirs : le trou noir primordial, le trou noir stellaire, le trou noir intermédiaire et le SMBH. Un SMBH est un trou noir dont la masse est supérieure à $10^6 M_{\odot}$ et qui se retrouve le plus souvent au centre de galaxies massives. Un exemple de SMBH est le trou noir situé au centre de la Voie lactée (Sagittarius A*) ou encore le trou noir au centre de l'amas de galaxies MS 0735.6+7421.

1.4.2. Disque d'accrétion

Un disque d'accrétion est une structure en forme de disque résultant de la mise en orbite de matière autour d'un objet central massif (voir la structure appelée *accretion disk* à la figure 1.4). La viscosité présente dans le disque ainsi que la turbulence magnétohydrodynamique mènent à la chute progressive de la matière vers l'objet central. Les forces de friction contribuent ainsi à augmenter la température du disque en faisant diminuer l'énergie potentielle gravitationnelle de la matière qui est en orbite. Le disque se réchauffe alors et émet des ondes électromagnétiques en raison de sa température. Les objets massifs comme les trous noirs ont un disque d'accrétion qui émet majoritairement en ultraviolet en raison de sa température. Cette émission thermique est responsable du maximum d'émission en ultraviolet dans le spectre d'émission des galaxies actives (voir la figure 1.5 reprise du manuel Carroll and Ostlie 2006). Le disque d'accrétion émet aussi fortement en rayons-X par l'entremise de l'effet Compton inverse.

1.4.3. Jets

Les noyaux actifs sont le plus souvent accompagnés de jets radio qui sont des structures pouvant aller jusqu'à des grandeurs de l'ordre de ~ 100 kpc (voir à la figure 1.4). Ces structures sont significativement plus grandes que les AGNs. À titre d'exemple, un des plus

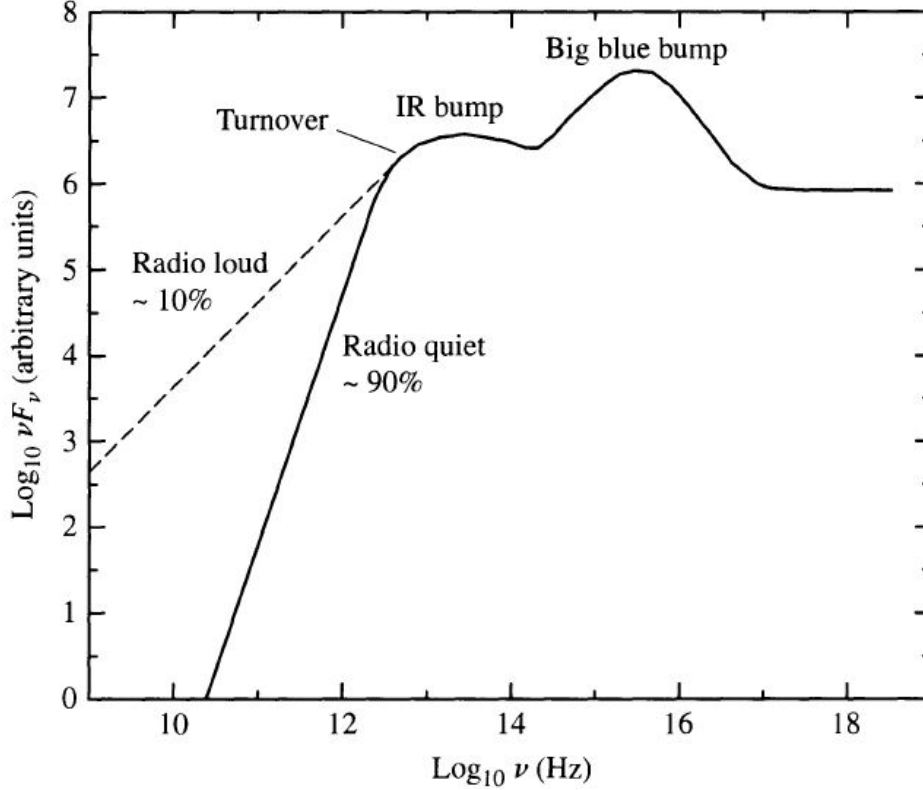


Fig. 1.5. Spectre d'émission électromagnétique d'un AGN (Carroll and Ostlie 2006).

grands trous noirs connus à ce jour, M87, a un rayon de l'ordre du dixième de pc, alors que ses jets couvrent une taille totale de l'ordre de 80 kpc (Owen et al. 2000). Les jets radio sont composés de plasma et de particules ultra-relativistes qui émettent en radio (\sim GHz) via l'émission synchrotron. L'émission synchrotron est un phénomène d'émission provenant de l'accélération radiale d'une particule chargée dans un milieu où règne un champ magnétique (voir figure 1.6 pour une schématisation de cette émission prépondérante dans les amas de galaxies).

Il existe plusieurs modèles théoriques expliquant la formation des jets. Deux classes de modèles se distinguent par la source de l'énergie des jets : le modèle d'accrétion et le modèle spin (Meier 2003). Selon le modèle d'accrétion, l'énergie alimentant les jets provient de l'énergie gravitationnelle libérée par le gaz qui tombe vers le trou noir central. Selon ce modèle, le gaz qui converge vers le trou noir s'accumule sur le disque d'accrétion et son moment angulaire est transporté vers l'extérieur par l'entremise de forces de cisaillement fort probablement dominées par de la turbulence magnétohydrodynamique. C'est alors l'énergie de liaison gravitationnelle qui diminue à mesure que la matière tombe vers le disque qui alimente les jets. Selon le modèle de spin, c'est l'énergie de rotation d'un trou noir en forte rotation qui est canalisée vers l'extérieur par la formation d'un jet magnétohydrodynamique. Selon que cette énergie provient de la rotation du disque ou de la rotation du trou noir ainsi

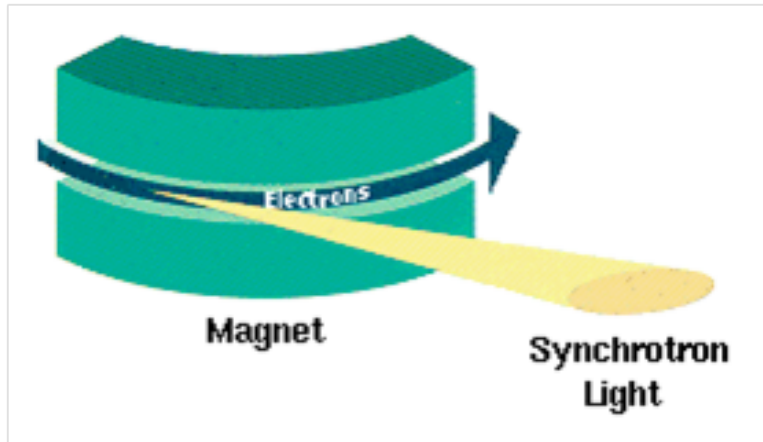


Fig. 1.6. Schématisation du phénomène d'émission synchrotron qui génère l'émission radio des jets relativistes des AGNs. Lorsqu'un électron est accéléré radialement dans une région où règne un champ magnétique, il en résulte une émission synchrotron. Dans le cas des jets relativistes des AGNs, les particules ont des vitesses ultra-relativistes (très proches de la vitesse de la lumière). Crédit : R. Bartolini, John Adams Institute.

que de son ergosphère, on parle respectivement du modèle de Blandford and Payne (1982) ou du modèle de Blandford and Znajek (1977). Selon le modèle de spin, il existe aussi une quantité de matière accrétée sur le trou noir central qui contribue à fournir de l'énergie aux jets comme dans le modèle d'accrétion. La puissance générée par unité de masse est toutefois supérieure que dans le modèle d'accrétion (McNamara et al. 2009).

Dans ces deux modèles, des champs magnétiques sont prérequis à la formation des jets radio. De fait, des champs magnétiques préférentiels s'établissent dans la direction de l'axe de rotation du trou noir actif. La figure 1.7 présente une image en visible prise par le télescope spatial Hubble (HST - *Hubble Space Telescope*) de la galaxie active M87 avec en bleu l'émission synchrotron superposée. On remarque la morphologie allongée du jet. Il est à noter que les jets relativistes sont typiquement doubles et situés de manière symétrique par rapport à l'AGN. De plus, à mesure que le jet se heurte au gaz qui occupe l'espace entre les galaxies de l'amas, l'extrémité du jet perd sa forme allongée au profit d'une forme plus arrondie en raison de la résistance mécanique qu'offre l'ICM (Heinz 2014). Les jets sont la principale source d'émission radio dans les galaxies actives. Certaines galaxies actives sont dites radio bruyantes et d'autres sont dites radio silencieuses. Ces deux classifications réfèrent à l'intensité de l'émission radio détectée. La cause de cette différence pourrait être le phénomène appelé *synchrotron self-absorption* qui résulte du fait que le plasma des électrons en rotation devient opaque à sa propre émission synchrotron (Carroll and Ostlie 2006).

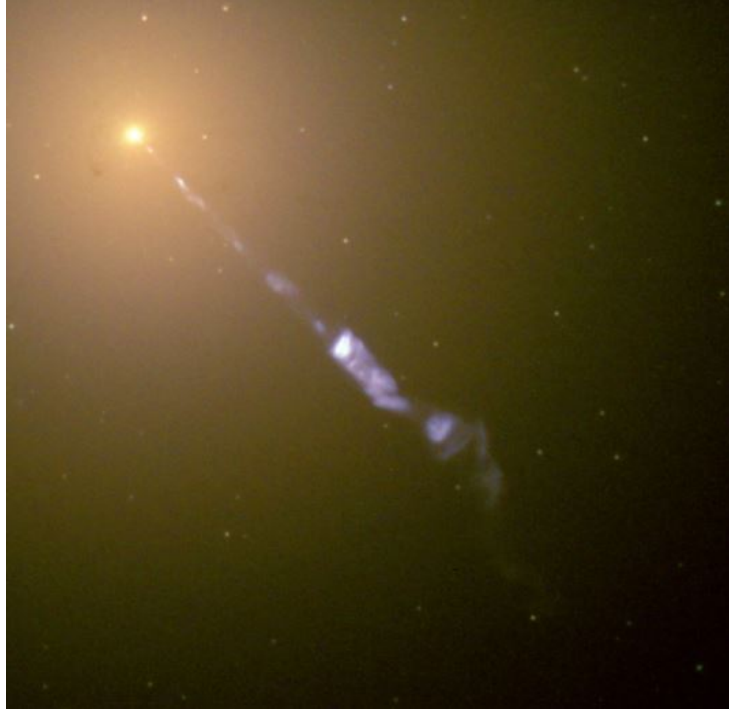


Fig. 1.7. **En jaune** : image de la galaxie active M87 prise en longueur d'onde visible par le HST. **En bleu** : jet relativiste émettant en radio en raison du phénomène d'émission synchrotron. Crédit : NASA.

1.4.4. Tore de poussière et de gaz

Une structure en forme de beigne entoure normalement le disque d'accrétion du trou noir (voir la structure appelée *torus* à la figure 1.4). Cette structure, composée entre autres de poussière et de gaz (Raban et al. 2009), absorbe une partie de la radiation émise par le disque d'accrétion, ce qui contribue à augmenter sa température jusqu'à des températures de l'ordre de $T = 1500$ K (Barvainis 1987). Le tore ré-émet par la suite de la radiation principalement en infrarouge, tel que déterminé par la loi de Wien :

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T}.$$

En effet, pour une température de $T = 1500$ K, le maximum d'émission se situe autour de $\lambda_{\max} = 2\mu\text{m}$. Cette émission est responsable de la bosse infrarouge dans le spectre d'émission des galaxies actives (voir la structure appelée *IR bump* à la figure 1.5).

1.4.5. Région à raies larges et région à raies étroites

Ces régions sont responsables de la plus grande partie des raies d'émission de l'AGN. La région à raies larges (BLR - *broad-line region*, voir figure 1.4) est composée de nuages de gaz moléculaire en orbite autour du trou noir central à grande vitesse. Cette grande vitesse est

responsable du fort élargissement des raies via l'effet Doppler (Czerny and Hryniewicz 2011). La région à raies étroites (NLR - *narrow-line region*, voir figure 1.4) est composée de nuages de gaz de faible densité en orbite autour du trou noir central à un rayon orbital plus grand que les nuages de la BLR. Ces nuages ont donc une vitesse orbitale plus faible que les nuages de la BLR, ce qui mène à un élargissement Doppler plus faible. La NLR est responsable de la majorité de l'émission de raies étroites de l'AGN (voir Groves 2006).

1.4.6. Principales classes d'AGNs

Les AGNs sont majoritairement classifiés selon les caractéristiques suivantes (voir la revue de Tadhunter 2008) :

- **Seyfert type 1** : sont caractérisés par des raies d'émission larges et étroites, une faible émission radio, de l'émission rayons-X, il s'agit le plus souvent de galaxies spirales et sont variables.
- **Seyfert type 2** : sont caractérisés par des raies d'émission étroites uniquement, une faible émission radio, une faible émission rayons-X, il s'agit le plus souvent de galaxies spirales et ne sont pas variables.
- **Quasars radio bruyants** : ont des raies d'émission étroites et larges, une forte émission radio, une émission polarisée, sont catégorisés comme FR II (c'est-à-dire que la distance entre le point le plus lumineux en radio et le centre est plus que 50% de l'étendue totale de l'émission radio de l'objet) et sont variables.
- **Quasars radio silencieux** : ont des raies d'émission étroites et larges, une faible émission radio, une faible polarisation et sont variables.
- **Galaxies radio à raies larges (BLRG - *Broad Line Radio Galaxies*)** : ont des raies d'émission étroites et larges, une forte émission radio, sont catégorisés comme FR II, ont une faible polarisation, sont le plus souvent des galaxies elliptiques et sont variables.
- **Galaxies radio à raies étroites (NLRG - *Narrow Line Radio Galaxies*)** : ont uniquement des raies d'émission étroites, ont une forte émission radio, sont des sources de type FR I (c'est-à-dire que la distance entre le point le plus lumineux en radio et le centre est moins que 50% de l'étendue totale de l'émission radio de l'objet) ou parfois FR II, n'ont pas de polarisation, sont souvent des galaxies elliptiques et ne sont pas variables.
- **Blazars** : ont une forte émission radio, une forte polarisation et une très rapide variabilité.

Le modèle d'unification des AGNs qui est présenté à la figure 1.4 explique ces différents types d'AGNs comme résultants de la ligne de visée entre l'AGN et l'observateur. Par exemple, selon ce modèle, la présence du tore de poussière combinée à la ligne de visée de

l'observateur seraient responsables de la différence entre les galaxies Seyfert de type 1 et de type 2. Le tore de poussière bloquerait les raies larges pour un observateur orienté face au tore et mènerait ainsi à la classification de l'AGN comme Seyfert de type 2. Toutefois, il a été établi que ce modèle n'est pas suffisant pour expliquer l'ensemble des différences entre toutes les catégories d'AGNs connus (Spinoglio and Fernández-Ontiveros 2019).

1.5. La rétroaction des noyaux actifs de galaxies

Comme mentionné à la section 1.2.1, il doit exister un processus de rétroaction énergétique permettant de limiter le refroidissement de l'ICM par émission rayons-X. Parmi les explications plausibles, la mieux acceptée à ce jour est que l'AGN central compense les pertes énergétiques de l'amas via une injection d'énergie dans l'amas (Birzan et al. 2004, Dunn and Fabian 2006).

Il existe deux modes de rétroaction principaux : le mode cinétique et le mode radiatif. Le mode cinétique est dominant à des bas taux d'accrétion alors que le mode radiatif est dominant dans les systèmes où le taux d'accrétion approche de la limite d'Eddington (Churazov et al. 2005).

Dans le mode cinétique, c'est principalement par l'entremise des jets que l'énergie de l'AGN est injectée dans l'amas. Dans le mode radiatif, c'est plutôt principalement par l'entremise de la radiation. Dans chaque mode, il existe toutefois une partie du transfert énergétique qui résulte des jets et une partie qui résulte de la radiation.

Selon Hlavacek-Larrondo et al. (2015), le mode cinétique pourrait avoir opéré dans les amas massifs pour plus de 7 milliards d'années. Le mécanisme de rétroaction principal dans MS 0735.6+7421 est le mode cinétique. Dans ce mode, le mécanisme selon lequel l'énergie est transmise des jets vers l'amas n'est pas parfaitement compris, mais le transfert se fait probablement par une combinaison de la turbulence (Zhuravleva et al. 2014), des ondes de choc (Fabian et al. 2003) et des ondes sonores (Fabian et al. 2017). La poussée des jets crée ainsi des régions ténues en gaz correspondant à des zones d'émission rayons-X atténuée appelées cavités rayons-X. Les cavités rayons-X sont des structures de taille variant entre quelques kpc à des centaines de kpc. MS 0735.6+7421 est un exemple d'amas où les cavités sont particulièrement grandes avec des cavités dont la taille est de l'ordre ~ 200 kpc. La figure 1.8 présente un exemple de cavités rayons-X dans le cas de l'amas de galaxies MS 0735.6+7421 (McNamara et al. 2009).

1.5.1. Calcul de la puissance des jets

Deux mesures importantes relatives aux cavités rayons-X sont l'estimation de leur âge ainsi que de l'énergie nécessaire à leur formation. Ces deux estimations s'avèrent cruciales afin de déduire la puissance de l'AGN. En effet, en estimant l'énergie nécessaire afin de

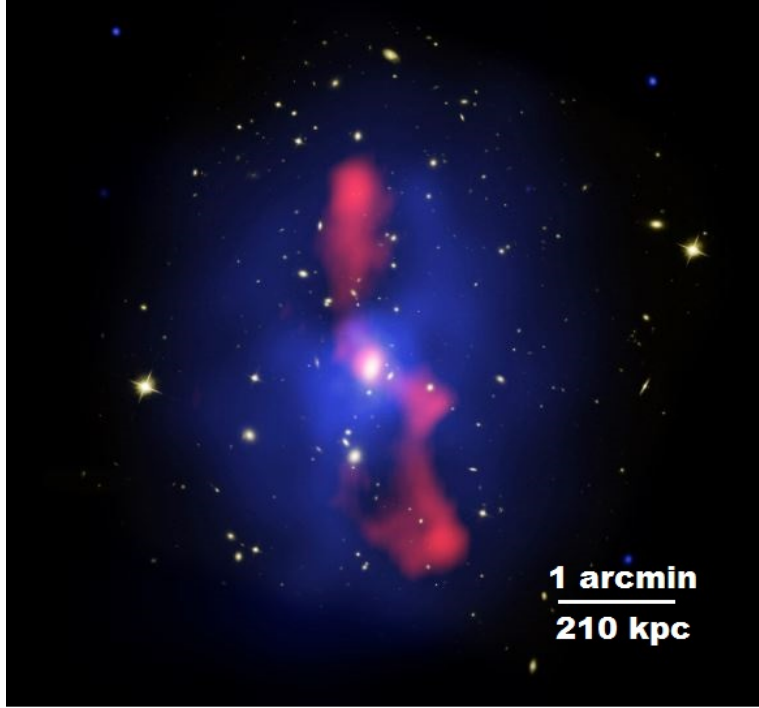


Fig. 1.8. Image de synthèse présentant l’amas de galaxies MS 0735.6+7421 dans plusieurs longueurs d’onde. **Bleu** : émission rayons-X mettant en évidence les cavités rayons-X. **Rose** : émission radio mettant en évidence les jets relativistes qui contribuent à la rétroaction énergétique de l’AGN central. **Blanc** : émission visible mettant en évidence les galaxies et les étoiles. Crédit : McNamara et al. 2009.

gonfler une cavité d’une certaine taille et en obtenant une approximation du temps qu’a pris la cavité pour se gonfler, on obtient directement une approximation de la puissance des jets de l’AGN central.

1.5.1.1. Temps de vie des cavités

Il existe trois approximations de l’âge des cavités : le temps de remontée t_{buoyancy} , le temps de remplissage t_{refill} ainsi que le temps de traversée des ondes sonores t_{cs} (voir Birzan et al. 2004).

Le temps de remontée correspond au temps pris par la bulle (cavité rayons-X) pour atteindre sa vitesse de remontée finale. Cette estimation du temps de vie de la bulle est donnée par la formule suivante :

$$t_{\text{buoyancy}} = R \sqrt{\frac{SC}{2gV}}, \quad (1.5.1)$$

où R est la distance du centre de la bulle jusqu’à l’AGN, S est l’aire de la section transversale de la bulle, C est le coefficient de trainée, g est l’accélération gravitationnelle locale

et V est le volume de la cavité. Cette estimation du temps de vie de la cavité prend en considération les forces de trainée et de flottabilité.

Une autre estimation est le temps de remplissage qui correspond au temps que prend la bulle pour parcourir une distance égale à son diamètre à partir du repos :

$$t_{\text{refill}} = 2\sqrt{\frac{r}{g}}, \quad (1.5.2)$$

où r est le rayon de la cavité.

La dernière estimation du temps de vie de la cavité est le temps de traversée des ondes sonores qui correspond au temps pris par la bulle pour atteindre sa position actuelle à partir de l'AGN en se déplaçant à la vitesse du son dans l'ICM :

$$t_{\text{cs}} = R\sqrt{\frac{\mu m_H}{\gamma k_B T}}, \quad (1.5.3)$$

où μ est la masse moléculaire moyenne, m_H est la masse de l'atome d'hydrogène et γ est le ratio des chaleurs spécifiques.

1.5.1.2. Travail nécessaire pour gonfler la cavité

Il est possible d'estimer le travail effectué afin de gonfler une cavité rayons-X dans l'ICM à l'aide de l'expression suivante (voir Churazov et al. 2002, Vantyghem et al. 2014) :

$$E_{\text{cav}} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} pV, \quad (1.5.4)$$

et dans le cas d'un gaz relativiste, on a $\gamma = 4/3$ et donc :

$$E_{\text{cav}} = 4pV, \quad (1.5.5)$$

où le volume des cavités est typiquement estimé à l'aide d'ellipsoïdes.

1.6. Les perturbations dans les amas de galaxies

Les amas de galaxies sont des systèmes en constante évolution. Il existe de multiples perturbations : internes dues à l'activité de l'AGN central ou externes dues à la dynamique gravitationnelle des galaxies membres de l'amas ou dues à l'interaction de l'amas avec d'autres amas.

1.6.1. Perturbations internes

La première forme de perturbation provient de l'AGN dans le cas des amas possédant un trou noir actif. La perturbation provient alors des jets relativistes de l'AGN et a été décrite en détail dans le cadre des sections précédentes. Il est cependant utile d'ajouter que

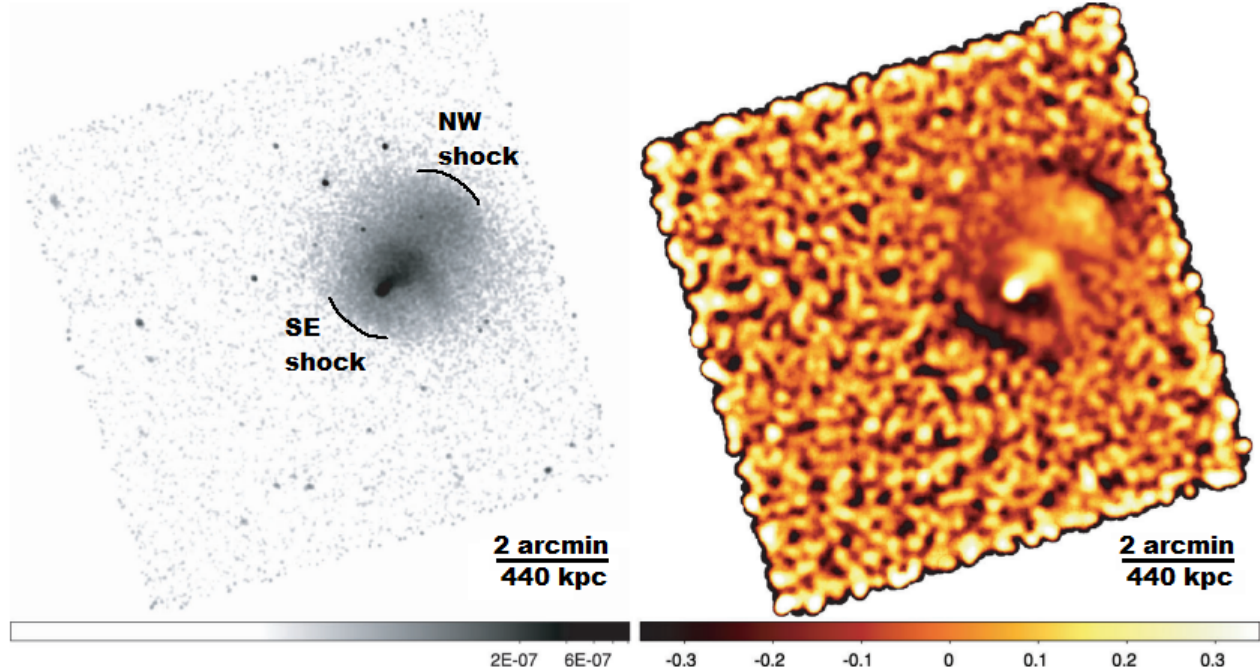


Fig. 1.9. Gauche : Image rayons-X (0,3-5,0 keV) de l’amas de galaxies Abell 2146 qui est un exemple d’amas expérimentant une fusion majeure. **Droite :** Même image rayons-X, mais après avoir appliqué une différence de gaussiennes permettant de mettre en évidence la présence de chocs. Crédit : Russell et al. 2010.

la formation des cavités rayons-X est séparée en trois phases distinctes. Dans un premier temps, les jets radio percent l’ICM. Ensuite, les cavités commencent à se former en expansion supersonique. Finalement, lorsque la vitesse d’expansion de la cavité devient sous-sonique, la bulle se détache de l’AGN et remonte vers les extrémités de l’amas (Heinz 2014).

1.6.2. Perturbations externes

La seconde forme de perturbation est la collision d’amas de galaxies lors de fusion majeure. Lorsqu’une telle collision se produit, les ICMs des deux amas se heurtent et engendrent la formation de chocs. Ces chocs sont détectables en rayons-X et correspondent à des régions circulaires caractérisées par une discontinuité en terme de brillance rayons-X, de pression, de température et de densité. Le côté du choc le plus proche du centre de l’amas est plus chaud et plus dense. Ces chocs sont caractérisés par des nombres de Mach faibles (Markevitch and Vikhlinin 2007). Un exemple d’amas où des chocs sont visibles est présenté à la figure 1.9.

La troisième forme de perturbation est l’interaction gravitationnelle entre l’amas et des galaxies individuelles (ou groupes de galaxies) et qui engendre un déplacement du centre gravitationnel de l’amas. À mesure que les galaxies individuelles se déplacent, le centre gravitationnel de l’amas se déplace aussi et engendre un mouvement de l’ICM qui subit une attraction gravitationnelle orientée vers ce centre gravitationnel. L’ICM acquiert donc

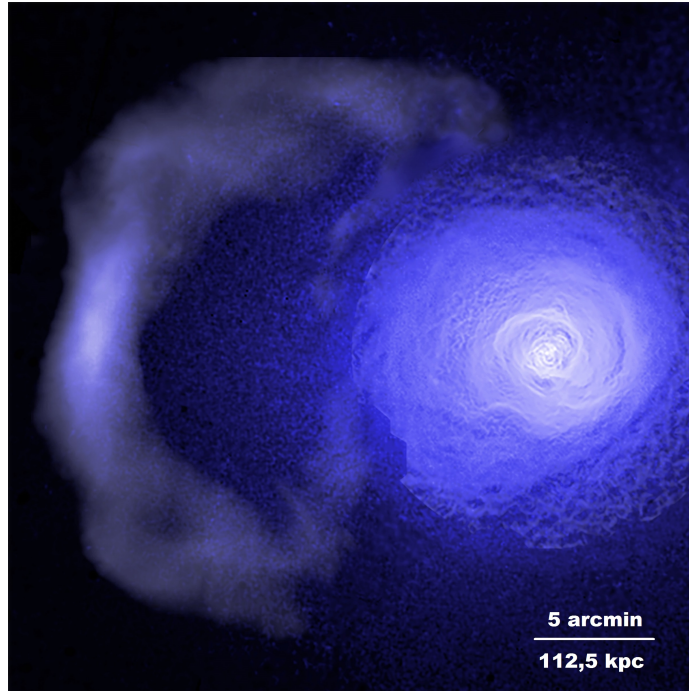


Fig. 1.10. Image rayons-X mettant en évidence un front froid dans l'amas de Persée. Les données ont été prises à l'aide des télescopes Chandra et XMM-Newton. Crédit : Walker et al. 2018.

un moment angulaire et amorce un mouvement d'oscillation autour du centre de l'amas. Ce mouvement est appelé oscillation subsonique et engendre la formation des fronts froids (Churazov et al. 2003, ZuHone et al. 2018). Ces fronts froids sont caractérisés par un changement d'intensité de l'émission rayons-X de forme circulaire ainsi qu'un changement de densité et de température de part et d'autre du front. Le côté interne (vers le centre de l'amas) est le plus dense et aussi le plus froid. La pression est toutefois normalement stable de part et d'autre du choc. Ces fronts froids sont observés dans les amas subissant une fusion (c'est-à-dire dans des systèmes d'amas en collision), mais aussi dans les CCCs qui sont caractérisés par l'absence de fusion avec un autre amas. Ces structures sont interprétées comme une masse de gaz plus froide se déplaçant dans une masse plus chaude (Markevitch and Vikhlinin 2007). Un exemple de front froid dans l'amas de Persée est présenté à la figure 1.10.

1.7. L'émission radio dans les amas de galaxies

L'émission radio des amas de galaxies résulte du phénomène d'émission synchrotron (voir figure 1.6) générée par la déviation d'une particule chargée relativiste soumise à un champ magnétique (en l'occurrence des électrons). Dans les amas de galaxies, des champs magnétiques de l'ordre de $0,1 - 10 \mu\text{G}$ sont présents (Bruggen et al. 2012) et permettent ainsi

cette émission synchrotron. L'énergie émise sous forme de radiation synchrotron contribue à réduire l'énergie cinétique des électrons émetteurs. En raison de cette perte radiative, les électrons auraient typiquement un temps de vie de l'ordre de 0,1 milliard d'années (Brunetti and Jones 2014).

Dans les sections précédentes, il a été question des jets radio qu'émettent les AGNs. Il existe de nombreuses autres classifications d'émission radio à l'échelle de l'amas. Ces structures sont souvent diffuses et étendues. Parmi les structures diffuses émettant en radio, on retrouve les halos qui se divisent en halos géants, en mini-halos et en halo de taille intermédiaire, les reliques radio ainsi que les sources de plasma fossile réanimées. Ces structures peuvent atteindre des tailles de l'ordre du Mpc (van Weeren et al. 2019). De plus, certaines de ces structures peuvent se retrouver à de très grandes distances de l'AGN central.

En raison de la taille de ces structures et du temps de vie moyen des électrons, il doit exister un mécanisme de (ré-)accélération permettant aux électrons de rester relativistes. Un tel mécanisme permettrait aux populations d'électrons d'émettre de la radiation synchrotron à des grandes distances de l'AGN central (van Weeren et al. 2019).

L'amélioration des algorithmes d'imagerie radio ainsi que l'amélioration de la sensibilité des instruments utilisés ont grandement amélioré la capacité de détection des structures radio diffuses présentes dans les amas. La figure 1.11 présente des exemples des différentes catégories d'émission radio présentées dans cette section.

1.7.1. Halos radio géants

Les halos radio géants sont des structures radio diffuses situées au centre des amas de galaxies massifs qui expérimentent une fusion majeure (Cassano et al. 2010). Leur morphologie est régulière et suit la distribution du ICM comme le rapportent certaines études présentant une corrélation directe entre leurs luminosités radio et rayons-X (Feretti et al. 2001; Govoni et al. 2001; Giacintucci et al. 2005; Brown and Rudnick 2011; Rajpurohit et al. 2018). L'origine des halos radio géants est un sujet de débat dans la littérature et historiquement, deux mécanismes principaux ont été considérés pour l'expliquer : le modèle hadronique et le modèle de (ré-)accélération turbulente. Pour le modèle hadronique, les électrons relativistes responsables de l'émission synchrotron sont produits lors de l'interaction hadronique entre un proton d'un rayon cosmique et un proton du ICM (Pfrommer and Enßlin 2004, Fujita et al. 2007, Zandanel et al. 2014, Ignesti et al. 2020). Pour le modèle de (ré-)accélération, une population d'électrons fossiles est (ré-)accélérée par des cycles de forte turbulence dans l'ICM (Brunetti et al. 2001, Petrosian 2001, Donnert et al. 2013, Donnert and Brunetti 2014). À ce jour, c'est le modèle de (ré-)accélération qui est globalement accepté, bien que la source des électrons fossiles ne soit pas bien identifiée. Parmi les hypothèses pour la source

des électrons fossiles, on retrouve l’hypothèse des électrons secondaires provenant des interactions proton-proton (Brunetti and Lazarian 2011), des électrons ayant été précédemment accélérés par des fusions majeures ou par des chocs ou encore des électrons liés à l’activité de l’AGN central (Gitti et al. 2004).

Les halos radio géants sont d’une taille approximative de 1 – 2 Mpc (van Weeren et al. 2019) et ont des puissances radio à 1.4 GHz de l’ordre de $10^{23} - 10^{26}$ W/Hz (Bonafede et al. 2009; Cuciti et al. 2018). Il s’agit de structures à faible densité de flux ou structures diffuses. Les halos sont caractérisés par l’absence de polarisation de leur signal lumineux (Govoni et al. 2013) et leur indice spectral, α , appartient approximativement à l’intervalle $1 < \alpha < 2$ le plus souvent dans l’intervalle $1,1 < \alpha < 1,4$, où l’indice spectral est défini comme $S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ et où S_ν est la densité de flux et ν est la fréquence (Giovannini et al. 2009). La quantité de halos confirmés était de 65 en 2019 (van Weeren et al. 2019).

1.7.2. Mini-halos

Les mini-halos sont des structures diffuses situées au centre des amas de galaxies à coeur froid (Giacintucci et al. 2017). Leur morphologie est complexe, présentant entre autres des filaments fins dus à la variation dans le champ magnétique de l’ICM, à des régions de (ré-)accélération des électrons plus intenses ou à une distribution non uniforme des électrons (ré-)accélérés (Gendron-Marsolais et al. 2017). La plupart des mini-halos sont contenus à l’intérieur des fronts froids détectés au centre de l’amas, ce qui milite en faveur du scénario de la (ré-)accélération des électrons fossiles par la turbulence engendrée par l’oscillation subsonique de l’ICM (Mazzotta and Giacintucci 2008, ZuHone et al. 2013, ZuHone et al. 2015). L’AGN central est un candidat probable comme source des électrons fossiles (Fujita et al. 2007).

Ces structures sont d’une taille totale d’approximativement 100 – 500 kpc (Gitti et al. 2014) et ont des puissances radio à 1.4 GHz de l’ordre de $10^{23} - 10^{25}$ W/Hz (Gitti et al. 2007). Comme les halos radio géants, il s’agit de structures diffuses. Les mini-halos sont aussi caractérisés par l’absence de polarisation de leur signal lumineux et leur indice spectral est semblable à celui des halos, c’est-à-dire dans l’intervalle $1 < \alpha < 2$. La quantité de mini-halos confirmés est relativement faible et était de 23 mini-halos en 2019 (Giacintucci et al. 2019), en raison de la difficulté à détecter ces structures faibles à l’aide de la sensibilité des télescopes actuels. Entre autres choses, il est parfois difficile de détecter cette émission étendue et diffuse parce que les sources centrales des CCCs ont de fortes luminosités radio qui nuisent à la détection de structures à faible densité de flux. Les observations qui réussissent à détecter des mini-halos requièrent un haut intervalle dynamique (DR - *dynamic range*) qui correspond à l’intervalle de densité de flux couvert par une observation radio : le DR est

donné par le rapport entre le maximum et le bruit de fond d’une image radio en terme de densité de flux (van Weeren et al. 2019).

1.7.3. Reliques

Les reliques radio sont des structures diffuses allongées souvent en forme d’arc (van Weeren et al. 2010) et qui sont situées en périphérie des amas de galaxies qui subissent une fusion majeure (Benson et al. 2017). Leur morphologie contient des structures filamenteuses fines pouvant tracer les variations de champ magnétique ou encore la forme complexe de la surface du choc. En raison de leur forme, de leur position, ainsi que de leurs propriétés (spectrale et de polarisation), les reliques sont considérées comme traçant la (ré-)accélération d’électrons aux chocs induits par la fusion majeure d’amas (van Weeren et al. 2010). Cette (ré-)accélération résulterait d’un processus de Fermi de premier ordre (accélération diffuse aux chocs par les inhomogénéités magnétiques).

Ces structures sont d’une taille approximative de $0,5 - 2$ Mpc (van Weeren et al. 2019) et sont caractérisées par un haut taux de polarisation $> 20\%$ à des fréquences > 1 GHz (Ensslin et al. 1998). Leur indice spectral appartient approximativement à l’intervalle $-1,5 < \alpha < -1$ (Bonafede et al. 2012; Feretti et al. 2012; de Gasperin et al. 2014). Un gradient important de l’indice spectral est souvent observé à travers la structure de la relique : la région avec un indice plus élevé est localisée typiquement à l’opposé du centre de l’amas (p. ex. de Gasperin et al. 2015). Ce gradient est expliqué par les pertes par diffusion Compton inverse. La quantité de reliques radio recensées était de 49 en 2019 (van Weeren et al. 2019).

1.7.4. Sources plasma fossile réanimées

Les sources plasma fossile réanimées sont des sources d’émission radio comprenant les phoenix radio et les queues radio tranquillement ré-énergisées (GReET - *gently re-energized tail*).

Les phoenix radio tracent des populations de plasma résultant de l’activité passée de l’AGN central. Lorsqu’un choc traverse le plasma âgé, les électrons qu’il contient sont (ré-)accélérés et génèrent par le fait même de l’émission synchrotron qui est caractérisée par un spectre fortement abrupt et courbé (Enßlin and Gopal-Krishna 2001). Les phoenix radio ont le plus souvent des morphologies complexes (Ensslin and Bruggen 2002). Comparés aux reliques, les phoenix radio sont souvent plus rapprochés du centre de l’amas (Feretti et al. 2012). Ces structures ont des plus petites tailles que les reliques ($< 300 - 400$ kpc, van Weeren et al. 2019).

Les GReETs sont des queues de galaxies radio qui subissent une (ré-)accélération par l’entremise d’instabilités de Kelvin-Helmholtz responsables de phénomènes de turbulence (van Weeren et al. 2019).

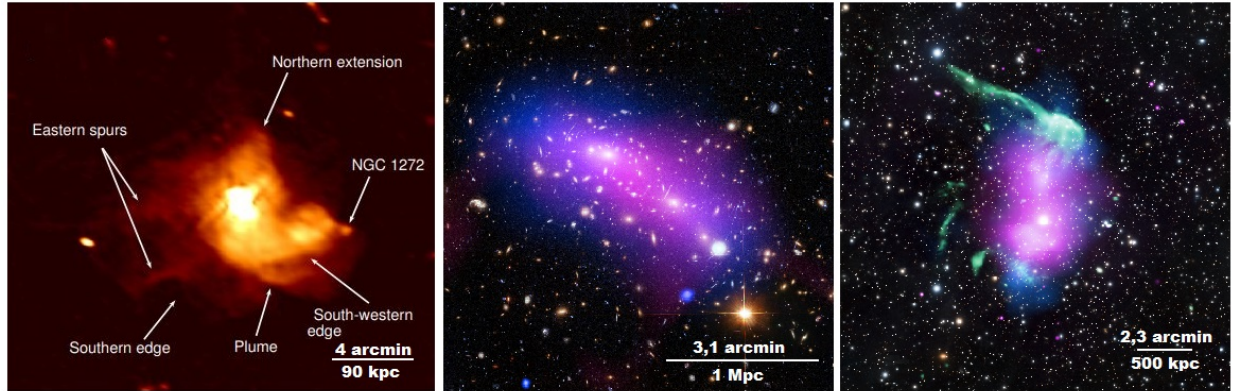


Fig. 1.11. Gauche : Exemple d'un mini-halo dans l'amas de Persée ($z = 0.0183$, Gendron-Marsolais et al. 2017). Les détails de la structure du mini-halo sont identifiés. **Centre :** Exemple d'un halo dans l'amas de galaxies MACS J0416.1-2403 ($z = 0.396$). L'émission radio est en rose, alors que l'émission rayons-X est en bleu. **Droite :** Exemple de trois reliques radio dans l'amas de galaxies RX J0603.3+4214 ($z = 0.225$). L'émission radio est en vert, l'émission rayons-X en rose et la couleur bleue montre la distribution de masse de l'amas. Crédit : NASA, ESA, CXC, NRAO/AUI/NSF, STScI, R. van Weeren (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) et G. Ogrean (Stanford University). Crédit : NASA/CXC/SAO/R. van Weeren et al. 2016/ LOFAR/ASTRON/ NAOJ/Subaru

1.8. Le radiotélescope Karl G. Jansky Very Large Array

Le Karl G. Jansky Very Large Array (JVLA, voir figure 1.12) est un radiotélescope oeuvrant dans les fréquences entre 58 MHz et 50 GHz et situé dans la plaine de San Augustin au Nouveau-Mexique (États-Unis). Il s'agit d'un télescope administré par l'observatoire national de radioastronomie (NRAO - *National Radio Astronomy Observatory*). Il est composé de 28 antennes paraboliques d'un diamètre de 25 mètres chacune et qui peuvent être déplacées sur des rails afin de modifier les propriétés de résolution du télescope qui exploite le principe de l'interférométrie. Le télescope utilise en pratique 27 antennes, puisqu'à tout moment, il y a du travail de maintenance qui est effectué sur l'une des 28 antennes. Les antennes sont distribuées en forme de "Y" avec deux bras d'une longueur maximale de 21 km chacun et un autre d'une longueur maximale de 19 km. Par interférométrie, il est possible de reconstruire une image dont la résolution spatiale est équivalente à une image qui aurait été obtenue avec un télescope aussi grand que la distance entre les antennes les plus éloignées. La résolution angulaire maximale que le télescope peut atteindre est de l'ordre de 0,04 arcsecondes.

Le JVLA possède quatre configurations principales qui sont communément nommées A, B, C et D. La configuration A est celle où les antennes sont le plus éloignées. Ceci permet d'obtenir la meilleure résolution angulaire possible. En contrepartie, la configuration A possède la moins grande sensibilité aux structures étendues ayant des tailles s'approchant de la plus grande taille angulaire (LAS - *largest angular scale*) qui peut être imagée par le télescope. La configuration D, pour sa part, est celle où les antennes sont le plus rapprochées.



Fig. 1.12. Radiotélescope Karl G. Jansky Very Large Array. Crédit : NRAO.

Ceci permet d'obtenir une meilleure détection des structures les plus étendues, mais qui en contrepartie, diminue la résolution spatiale des observations. Les configurations B et C présentent des caractéristiques intermédiaires aux configurations A et D.

En 2011, le télescope a bénéficié d'une amélioration technique importante : l'ensemble de son instrumentation électronique qui datait des années 1970 a été remplacé par des composants électroniques à la fine pointe de la technologie. Cette modification a permis d'améliorer la sensibilité au flux des sources ponctuelles émettant en radio d'un facteur 10 pour une observation type de 12 heures (Gustaaf van Moorsel 2012). Cette amélioration du télescope est un évènement clé précurseur de mon travail de maîtrise. En effet, elle a permis d'atteindre une sensibilité aux structures diffuses qui n'avait pas pu être atteinte par les observations précédentes de l'amas de galaxies MS 0735.6+7421 (voir McNamara et al. 2009).

1.9. Description du mémoire

L'objectif de ce mémoire est d'améliorer la compréhension du lien entre l'AGN et la formation de mini-halos dans les amas de galaxies à coeur froid. Selon le consensus actuel de la littérature, les mini-halos sont le résultat de la (ré-)accélération d'une population d'électrons fossiles par la turbulence de l'ICM engendrée par l'oscillation subsonique. La source des populations d'électrons fossiles n'a pas encore été établie hors de tout doute, mais l'hypothèse d'électrons résultant de l'activité de l'AGN central est la plus plausible. Face à cette hypothèse, nous avons décidé d'étudier l'émission radio diffuse située au centre de l'amas de galaxies MS 0735.6+7421. Cet amas est un amas massif à coeur froid ce qui en fait une cible de choix pour détecter un mini-halo. De plus, il s'agit d'un amas unique puisqu'il possède un AGN parmi les plus puissants connus. Pour ces deux raisons, MS 0735.6+7421 était le candidat idéal pour étudier le lien entre l'AGN central et le mini-halo.

Afin d'étudier cet amas, nous avons acquis 10 heures de données radio provenant du JVLA : 5 heures en bande P (230-470 MHz) configuration C et 5 heures en bande L (1-2 GHz)

configuration C (investigatrice principale : Julie Hlavacek-Larrondo). L'article présenté au chapitre 2 consiste en l'imagerie radio de l'amas et la comparaison de son émission radio avec son émission rayons-X. Nous présentons aussi des cartes de température et d'abondance ainsi qu'une carte de l'indice spectral grâce aux données radio provenant des deux bandes de fréquence P et L. Cet article sera soumis au journal *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* au courant des prochains mois.

Finalement, à la section 3, nous présentons les conclusions de l'étude.

1.10. Déclaration de l'étudiant

Je, Théophile Bégin, déclare que le travail présenté dans ce mémoire est mien. J'ai effectué l'ensemble de la revue de littérature présentée à la section 1. Lorsque j'ai utilisé des figures provenant de sources externes, je l'ai clairement identifié dans le titre de la figure avec la source associée.

Pour l'article présenté à la section 2, j'ai effectué l'ensemble de la réduction de données radio à l'aide du logiciel CASA. J'ai identifié moi-même les données affectées par de l'interférence radio et j'ai déterminé et appliqué les calibrations aux données obtenues (délais, passe-bande, gain). J'ai aussi créé les masques utilisés lors de l'étape de déconvolution afin de produire les images radio qui sont présentées dans l'article.

J'ai reçu l'aide de Carter Rhea pour la réduction de données rayons-X provenant de Chandra et pour la production des cartes de température et d'abondance. J'ai écrit la totalité de l'article, mis à part la section 2.2 qui portait sur l'explication de la réduction des données rayons-X de Chandra. Cette section a été écrite par Carter Rhea.

J'ai produit l'ensemble des figures présentées dans l'article, mis à part la figure 1 qui a été réalisée par Louis-Simon Guité à partir d'images que je lui avais préalablement fournies.

Les données radio utilisées dans l'article ont été obtenues par Julie Hlavacek-Larrondo. C'est aussi elle qui a eu l'idée de base de l'article et qui m'a guidé tout au long de la rédaction de l'article dans l'analyse et l'interprétation des résultats.

Ma contribution à des articles à titre de co-auteur est présentée à l'annexe A. J'ai participé à des congrès et conférences et les présentations qui sont présentées à l'annexe B sont le fruit de mon travail.

J'ai écrit une demande de temps à titre d'investigateur principal afin d'observer le complexe de Lyra avec le JVLA et j'ai obtenu 12 heures d'observation (6 heures à 1-2 GHz en configuration C et 6 heures à 1-2 GHz en configuration D). J'ai participé à une demande de temps d'observation sur l'Observatoire du Mont-Mégantic (OMM) afin d'observer le complexe de Lyra. J'ai également été responsable de préparer la phase II de certaines observations sur le JVLA dans le cadre d'autres demandes de temps, par exemple, pour l'observation de l'amas de galaxies Coma. Pour ces dernières observations, j'ai déterminé les

cibles de calibration et la durée des différents scans individuels sur chaque cible à observer. Un tableau résumant ces demandes de temps est présenté à l'annexe C.

Références bibliographiques

- Abell, G. O. (1958). The Distribution of Rich Clusters of Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 3:211.
- Aharonian, F., Akamatsu, H., Akimoto, F., Allen, S. W., Angelini, L., Audard, M., Awaki, H., Axelsson, M., Bamba, A., Bautz, M. W., Blandford, R., Brenneman, L. W., Brown, G. V., Bulbul, E., Cackett, E. M., Chernyakova, M., Chiao, M. P., Coppi, P. S., Costantini, E., de Plaa, J., de Vries, C. P., Herder, J.-W. d., Done, C., Dotani, T., Ebisawa, K., Eckart, M. E., Enoto, T., Ezoe, Y., Fabian, A. C., Ferrigno, C., Foster, A. R., Fujimoto, R., Fukazawa, Y., Furukawa, M., Furuzawa, A., Galeazzi, M., Gallo, L. C., Gandhi, P., Giustini, M., Goldwurm, A., Gu, L., Guainazzi, M., Haba, Y., Hagino, K., Hamaguchi, K., Harrus, I. M., Hatsukade, I., Hayashi, K., Hayashi, T., Hayashida, K., Hiraga, J. S., Hornschemeier, A., Hoshino, A., Hughes, J. P., Ichinohe, Y., Iizuka, R., Inoue, H., Inoue, Y., Ishida, M., Ishikawa, K., Ishisaki, Y., Iwai, M., Kaastra, J., Kallman, T., Kamae, T., Kataoka, J., Kato, Y., Katsuda, S., Kawai, N., Kelley, R. L., Kilbourne, C. A., Kitaguchi, T., Kitamoto, S., Kitayama, T., Kohmura, T., Kokubun, M., Koyama, K., Koyama, S., Kretschmar, P., Krimm, H. A., Kubota, A., Kunieda, H., Laurent, P., Lee, S.-H., Leutenegger, M. A., Limousin, O., Loewenstein, M., Long, K. S., Lumb, D., Madejski, G., Maeda, Y., Maier, D., Makishima, K., Markevitch, M., Matsumoto, H., Matsushita, K., McCammon, D., McNamara, B. R., Mehdipour, M., Miller, E. D., Miller, J. M., Mineshige, S., Mitsuda, K., Mitsuishi, I., Miyazawa, T., Mizuno, T., Mori, H., Mori, K., Mukai, K., Murakami, H., Mushotzky, R. F., Nakagawa, T., Nakajima, H., Nakamori, T., Nakashima, S., Nakazawa, K., Nobukawa, K. K., Nobukawa, M., Noda, H., Odaka, H., Ohashi, T., Ohno, M., Okajima, T., Ota, N., Ozaki, M., Paerels, F., Paltani, S., Petre, R., Pinto, C., Porter, F. S., Pottschmidt, K., Reynolds, C. S., Safi-Harb, S., Saito, S., Sakai, K., Sasaki, T., Sato, G., Sato, K., Sato, R., Sawada, M., Schartel, N., Serlemitsos, P. J., Seta, H., Shidatsu, M., Simionescu, A., Smith, R. K., Soong, Y., Stawarz, , Sugawara, Y., Sugita, S., Szymkowiak, A., Tajima, H., Takahashi, H., Takahashi, T., Takeda, S., Takei, Y., Tamagawa, T., Tamura, T., Tanaka, T., Tanaka, Y., Tanaka, Y. T., Tashiro, M. S., Tawara, Y., Terada, Y., Terashima, Y., Tombesi, F., Tomida, H., Tsuboi, Y., Tsujimoto, M., Tsunemi, H., Tsuru, T. G., Uchida, H., Uchiyama, H., Uchiyama, Y., Ueda, S., Ueda, Y., Uno, S., Urry, C. M., Ursino, E., Watanabe, S., Werner, N., Wilkins, D. R., Williams, B. J., Yamada, S., Yamaguchi, H., Yamaoka, K., Yamasaki, N. Y., Yamauchi, M., Yamauchi, S., Yaqoob, T., Yatsu, Y., Yonetoku, D., Zhuravleva, I., and Zoghbi, A. (2018). Temperature Structure in the Perseus Cluster Core Observed with Hitomi. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70(2). arXiv: 1712.06612.
- Barvainis, R. (1987). Hot dust and the near-infrared bump in the continuum spectra of quasars and active galactic nuclei.

- Benson, B., Wittman, D. M., Golovich, N., Jee, M. J., van Weeren, R. J., and Dawson, W. A. (2017). MC² : A Deeper Look at ZwCl 2341.1+0000 with Bayesian Galaxy Clustering and Weak Lensing Analyses. *The Astrophysical Journal*, 841(1):7.
- Birzan, L., Rafferty, D. A., McNamara, B. R., Wise, M. W., and Nulsen, P. E. J. (2004). A Systematic Study of Radio-Induced X-ray Cavities in Clusters, Groups, and Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 607(2):800–809. arXiv: astro-ph/0402348.
- Blandford, R. D. and Payne, D. G. (1982). Hydromagnetic flows from accretion disks and the production of radio jets.
- Blandford, R. D. and Znajek, R. L. (1977). Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes.
- Bonafede, A., Brueggen, M., van Weeren, R., Vazza, F., Giovannini, G., Ebeling, H., Edge, A. C., Hoeft, M., and Klein, U. (2012). Discovery of radio halos and double-relics in distant MACS galaxy clusters: clues to the efficiency of particle acceleration. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426(1):40–56. arXiv: 1206.6102.
- Bonafede, A., Feretti, L., Giovannini, G., Govoni, F., Murgia, M., Taylor, G. B., Ebeling, H., Allen, S., Gentile, G., and Pihlstrom, Y. (2009). Revealing the magnetic field in a distant galaxy cluster: discovery of the complex radio emission from MACS J0717.5+3745. *Astronomy & Astrophysics*, 503(3):707–720. arXiv: 0905.3552.
- Brown, S. and Rudnick, L. (2011). Diffuse Radio Emission in/around the Coma Cluster: Beyond Simple Accretion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412(1):2–12. arXiv: 1009.4258.
- Bruggen, M., Bykov, A., Ryu, D., and Rottgering, H. (2012). Magnetic Fields, Relativistic Particles, and Shock Waves in Cluster Outskirts. *Space Science Reviews*, 166(1-4):187–213. arXiv: 1107.5223.
- Brunetti, G. and Jones, T. W. (2014). Cosmic rays in galaxy clusters and their non-thermal emission. *arXiv:1401.7519 [astro-ph]*. arXiv: 1401.7519.
- Brunetti, G. and Lazarian, A. (2011). Acceleration of primary and secondary particles in galaxy clusters by compressible MHD turbulence: from radio haloes to gamma-rays: Turbulent acceleration in galaxy clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 410(1):127–142.
- Brunetti, G., Setti, G., Feretti, L., and Giovannini, G. (2001). Particle reacceleration in the Coma cluster: radio properties and hard X-ray emission. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 320(3):365–378.
- Carroll, B. W. and Ostlie (2006). *An Introduction to Modern Astrophysics*. 2ème edition.
- Cassano, R., Etti, S., Giacintucci, S., Brunetti, G., Markevitch, M., Venturi, T., and Gitti, M. (2010). On the connection between giant radio halos and cluster mergers. *The Astrophysical Journal*, 721(2):L82–L85.

- Churazov, E., Forman, W., Jones, C., and Böhringer, H. (2003). XMM-Newton observations of the Perseus Cluster I: The temperature and surface brightness structure. *The Astrophysical Journal*, 590(1):225–237. arXiv: astro-ph/0301482.
- Churazov, E., Sazonov, S., Sunyaev, R., Forman, W., Jones, C., and Böhringer, H. (2005). Supermassive black holes in elliptical galaxies: switching from very bright to very dim. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 363(1):L91–L95.
- Churazov, E., Sunyaev, R., Forman, W., and Böhringer, H. (2002). Cooling flows as a calorimeter of active galactic nucleus mechanical power. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 332(3):729–734.
- Crawford, C. S., Allen, S. W., Ebeling, H., Edge, A. C., and Fabian, A. C. (1999). The ROSAT Brightest Cluster Sample – III. Optical spectra of the central cluster galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 306(4):857–896.
- Cuciti, V., Brunetti, G., van Weeren, R., Bonafede, A., Dallacasa, D., Cassano, R., Venturi, T., and Kale, R. (2018). New giant radio sources and underluminous radio halos in two galaxy clusters. *Astronomy & Astrophysics*, 609:A61. arXiv: 1709.06364.
- Czerny, B. and Hryniewicz, K. (2011). The origin of the Broad Line Region in Active Galactic Nuclei. *Astronomy & Astrophysics*, 525:L8. arXiv: 1010.6201.
- de Gasperin, F., Intema, H. T., van Weeren, R. J., Dawson, W. A., Golovich, N., Wittman, D., Bonafede, A., and Bruggen, M. (2015). A powerful double radio relic system discovered in PSZ1 G108.18-11.53: evidence for a shock with non-uniform Mach number? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 453(4):3484–3499. arXiv: 1508.02901.
- de Gasperin, F., van Weeren, R. J., Bruggen, M., Vazza, F., Bonafede, A., and Intema, H. T. (2014). A new double radio relic in PSZ1 G096.89+24.17 and a radio relic mass-luminosity relation. *arXiv:1408.2677 [astro-ph]*. arXiv: 1408.2677.
- Donnert, J. and Brunetti, G. (2014). An efficient Fokker–Planck solver and its application to stochastic particle acceleration in galaxy clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 443(4):3564–3577.
- Donnert, J., Dolag, K., Brunetti, G., and Cassano, R. (2013). Rise and fall of radio haloes in simulated merging galaxy clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 429(4):3564–3569.
- Dubinski, J. (1998). The Origin of the Brightest Cluster Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 502(1):141–149.
- Dunn, R. J. H. and Fabian, A. C. (2006). Investigating AGN Heating in a Sample of Nearby Clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 373(3):959–971. arXiv: astro-ph/0609537.
- Ensslin, T. A., Biermann, P. L., Klein, U., and Kohle, S. (1998). Shock Waves of the Large-Scale Structure Formation in the Universe. *arXiv:astro-ph/9805367*. arXiv: astro-ph/9805367.

- Ensslin, T. A. and Bruggen, M. (2002). On the formation of cluster radio relics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 331(4):1011–1019.
- Enßlin, T. A. and Gopal-Krishna (2001). Reviving fossil radio plasma in clusters of galaxies by adiabatic compression in environmental shock waves. *Astronomy & Astrophysics*, 366(1):26–34.
- Fabian (1994). Cooling flows in clusters of galaxies.
- Fabian, A. C., Sanders, J. S., Allen, S. W., Crawford, C. S., Iwasawa, K., Johnstone, R. M., Schmidt, R. W., and Taylor, G. B. (2003). A deep Chandra observation of the Perseus cluster: shocks and ripples. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344(3):L43–L47.
- Fabian, A. C., Walker, S. A., Russell, H. R., Pinto, C., Sanders, J. S., and Reynolds, C. S. (2017). Do sound waves transport the AGN energy in the Perseus cluster? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 464(1):L1–L5.
- Feretti, L., Fusco-Femiano, R., Giovannini, G., and Govoni, F. (2001). The giant radio halo in Abell 2163. *Astronomy & Astrophysics*, 373(1):106–112. arXiv: astro-ph/0104451.
- Feretti, L., Giovannini, G., Govoni, F., and Murgia, M. (2012). Clusters of galaxies : observational properties of the diffuse radio emission. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 20(1):54. arXiv: 1205.1919.
- Fujita, Y., Kohri, K., Yamazaki, R., and Kino, M. (2007). Nonthermal Emission Associated with Strong AGN Outbursts at the Centers of Galaxy Clusters. *The Astrophysical Journal*, 663(2):L61–L64. arXiv: 0705.4284.
- Gendron-Marsolais, M., Hlavacek-Larrondo, J., van Weeren, R. J., Clarke, T., Fabian, A. C., Intema, H. T., Taylor, G. B., Blundell, K. M., and Sanders, J. S. (2017). Deep 230-470 MHz VLA Observations of the mini-halo in the Perseus Cluster. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469(4):3872–3880. arXiv: 1701.03791.
- Giacintucci, S., Markevitch, M., Cassano, R., Venturi, T., Clarke, T. E., and Brunetti, G. (2017). Occurrence of radio minihalos in a mass-limited sample of galaxy clusters. *The Astrophysical Journal*, 841(2):71. arXiv: 1701.01364.
- Giacintucci, S., Markevitch, M., Cassano, R., Venturi, T., Clarke, T. E., Kale, R., and Cuciti, V. (2019). Expanding the sample of radio minihalos in galaxy clusters. *The Astrophysical Journal*, 880(2):70. arXiv: 1906.07087.
- Giacintucci, S., Venturi, T., Brunetti, G., Bardelli, S., Dallacasa, D., Ettori, S., Finoguenov, A., Rao, A. P., and Zucca, E. (2005). Spectral properties and origin of the radio halo in A3562. *Astronomy & Astrophysics*, 440(3):867–879. arXiv: astro-ph/0505614.
- Giovannini, G., Bonafede, A., Feretti, L., Govoni, F., Murgia, M., Ferrari, F., and Monti, G. (2009). Radio halos in nearby ($z < 0.4$) clusters of galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 507(3):1257–1270. arXiv: 0909.0911.

- Gitti, M., Brunetti, G., Feretti, L., and Setti, G. (2004). Particle acceleration in cooling flow clusters of galaxies: the case of Abell 2626. page 12.
- Gitti, M., Ferrari, C., Domainko, W., Feretti, L., and Schindler, S. (2007). Discovery of diffuse radio emission at the center of the most X-ray-luminous cluster RX J1347.5-1145. *Astronomy & Astrophysics*, 470(3):L25–L28. arXiv: 0706.3000.
- Gitti, M., Tozzi, P., Brunetti, G., Cassano, R., Dallacasa, D., Edge, A., Ettori, S., Feretti, L., Ferrari, C., Giacintucci, S., Giovannini, G., Hogan, M., and Venturi, T. (2014). The SKA view of cool-core clusters: evolution of radio mini-halos and AGN feedback. *arXiv:1412.5664 [astro-ph]*. arXiv: 1412.5664.
- Govoni, F., Feretti, L., Giovannini, G., Bohringer, H., Reiprich, T. H., and Murgia, M. (2001). Radio and X-ray diffuse emission in six clusters of galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 376(3):803–819. arXiv: astro-ph/0107275.
- Govoni, F., Murgia, M., Xu, H., Li, H., Norman, M. L., Feretti, L., Giovannini, G., and Vacca, V. (2013). Polarization of cluster radio halos with upcoming radio interferometers. *Astronomy & Astrophysics*, 554:A102. arXiv: 1304.6260.
- Groves, B. (2006). The Narrow Line Region: Current Models and Future Questions. *arXiv:astro-ph/0612309*. arXiv: astro-ph/0612309.
- Gustaaf van Moorsel (2012). The Expanded Very Large Array Project.
- Haarsma, D. B., Leisman, L., Donahue, M., Bruch, S., Böhringer, H., Croston, J. H., Pratt, G. W., Voit, G. M., Arnaud, M., and Pierini, D. (2010). Brightest cluster galaxies and core gas density in REXCESS clusters. *The Astrophysical Journal*, 713(2):1037–1047.
- Hartle, J. (2002). *Gravity: An Introduction to Einstein’s General Relativity*.
- Heinz, S. (2014). Jet–Environment Interactions as Diagnostics of Jet Physics. *Space Science Reviews*, 183(1-4):405–425.
- Hlavacek-Larrondo, J., McDonald, M., Benson, B. A., Forman, W. R., Allen, S. W., Bleem, L. E., Ashby, M. L. N., Bocquet, S., Brodwin, M., Dietrich, J. P., Jones, C., Liu, J., Reichardt, C. L., Saliwanchik, B. R., Saro, A., Schrabback, T., Song, J., Stalder, B., Vikhlinin, A., and Zenteno, A. (2015). X-ray cavities in a sample of 83 SPT-selected clusters of galaxies: tracing the evolution of AGN feedback in clusters of galaxies out to $z = 1.2$. *The Astrophysical Journal*, 805(1):35.
- Hubble, E. (1926). Extra-galactic nebulae.
- Ignesti, A., Brunetti, G., Gitti, M., and Giacintucci, S. (2020). Radio and X-ray connection in radio mini-halos: implications for hadronic models. *Astronomy & Astrophysics*, 640:A37. arXiv: 2006.09254.
- Kerr, R. P. (1963). Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics. *Physical Review Letters*, 11(5):237–238.
- Kravtsov, A. and Borgani, S. (2012). Formation of Galaxy Clusters. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50(1):353–409. arXiv: 1205.5556.

- Markevitch, M. and Vikhlinin, A. (2007). Shocks and cold fronts in galaxy clusters. *Physics Reports*, 443(1):1–53. arXiv: astro-ph/0701821.
- Matthews, T. A., Morgan, W. W., and Observatory, Y. (1964). A discussion of galaxies identified with radio sources. *ApJ*. . . , page 32.
- Mazzotta, P. and Giacintucci, S. (2008). Do radio core-halos and cold fronts in non major merging clusters originate from the same gas sloshing? *The Astrophysical Journal*, 675(1):L9–L12. arXiv: 0801.1905.
- McDonald, M., Gaspari, M., McNamara, B. R., and Tremblay, G. R. (2018). Revisiting the Cooling Flow Problem in Galaxies, Groups, and Clusters of Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 858(1):45. arXiv: 1803.04972.
- McNamara, B. R., Kazemzadeh, F., Rafferty, D. A., Birzan, L., Nulsen, P. E. J., Kirkpatrick, C. C., and Wise, M. W. (2009). An Energetic AGN Outburst Powered by a Rapidly Spinning Supermassive Black Hole or an Accreting Ultramassive Black Hole. *The Astrophysical Journal*, 698(1):594–605. arXiv: 0811.3020.
- McNamara, B. R., Nulsen, P. E. J., Wise, M. W., Rafferty, D. A., Carilli, C., Sarazin, C. L., and Blanton, E. L. (2005). The heating of gas in a galaxy cluster by X-ray cavities and large-scale shock fronts. *Nature*, 433(7021):45–47.
- Meier, D. L. (2003). The Theory and Simulation of Relativistic Jet Formation: Towards a Unified Model For Micro- and Macroquasars. *New Astronomy Reviews*, 47(6-7):667–672. arXiv: astro-ph/0312048.
- Merritt, D. (1985). Relaxation and tidal stripping in rich clusters of galaxies. III - Growth of a massive central galaxy. *The Astrophysical Journal*, 289:18.
- Million, E. T. and Allen, S. W. (2009). *Chandra* measurements of non-thermal-like X-ray emission from massive, merging, radio halo clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399(3):1307–1327.
- Newman, E. T., Couch, E., Chinnapared, K., Exton, A., Prakash, A., and Torrence, R. (1965). Metric of a Rotating, Charged Mass. *Journal of Mathematical Physics*, 6(6):918–919.
- Nordström, G. (1918). On the Energy of the Gravitation field in Einstein’s Theory.
- Oemler, Jr., A. (1976). The structure of elliptical and cD galaxies. *The Astrophysical Journal*, 209:693.
- Owen, F. N., Eilek, J. a., and Kassim, N. E. (2000). M87 at 90cm: A Different Picture. *The Astrophysical Journal*, 543(2):611–619. arXiv: astro-ph/0006150.
- Peterson, J. R. and Fabian, A. C. (2006). X-ray Spectroscopy of Cooling Clusters. *Physics Reports*, 427(1):1–39. arXiv: astro-ph/0512549.
- Petrosian, V. (2001). On the Nonthermal Emission and Acceleration of Electrons in Coma and Other Clusters of Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 557(2):560–572.

- Pfrommer, C. and Enßlin, T. A. (2004). Constraining the population of cosmic ray protons in cooling flow clusters with γ -ray and radio observations: Are radio mini-halos of hadronic origin? *Astronomy & Astrophysics*, 413(1):17–36.
- Raban, D., Jaffe, W., Röttgering, H., Meisenheimer, K., and Tristram, K. R. W. (2009). Resolving the obscuring torus in NGC 1068 with the power of infrared interferometry: revealing the inner funnel of dust. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 394(3):1325–1337.
- Rajpurohit, K., Hoeft, M., van Weeren, R. J., Rudnick, L., Röttgering, H. J. A., Forman, W. R., Brügggen, M., Croston, J. H., Andrade-Santos, F., Dawson, W. A., Intema, H. T., Kraft, R. P., Jones, C., and Jee, M. J. (2018). Deep VLA observations of the cluster 1RXS J0603.3+4214 in the frequency range 1-2 GHz. *The Astrophysical Journal*, 852(2):65. arXiv: 1712.01327.
- Reissner, H. (1916). Über die Eigengravitation des elektrischen Feldes nach der Einsteinschen Theorie.
- Ruffini, R. and Wheeler, J. A. (1971). Introducing the black hole. *PHYSICS TODAY*, page 13.
- Russell, H. R., Sanders, J. S., Fabian, A. C., Baum, S. A., Donahue, M., Edge, A. C., McNamara, B. R., and O’Dea, C. P. (2010). Chandra observation of two shock fronts in the merging galaxy cluster Abell 2146: The merging cluster Abell 2146. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, pages no–no.
- Schwarzschild, K. (1916). On the Gravitational Field of a Mass Point According to Einstein’s Theory.
- Spinoglio, L. and Fernández-Ontiveros, J. A. (2019). AGN types and unification model. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 15(S356):29–43. arXiv: 1911.12176.
- Tadhunter, C. (2008). An introduction to active galactic nuclei: Classification and unification.
- Urry, C. M. and Padovani, P. (1995). Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 107:803.
- van Weeren, R. J., de Gasperin, F., Akamatsu, H., Brügggen, M., Feretti, L., Kang, H., Stroe, A., and Zandanel, F. (2019). Diffuse Radio Emission from Galaxy Clusters. *Space Science Reviews*, 215(1):16. arXiv: 1901.04496.
- van Weeren, R. J., Röttgering, H. J. A., Brügggen, M., and Hoeft, M. (2010). Particle Acceleration on Megaparsec Scales in a Merging Galaxy Cluster. *Science*, 330(6002):347–349. arXiv: 1010.4306.
- Vantyghem, A. N., McNamara, B. R., Russell, H. R., Main, R. A., Nulsen, P. E. J., Wise, M. W., Hoekstra, H., and Gitti, M. (2014). Cycling of the powerful AGN in MS 0735.6+7421 and the duty cycle of radio AGN in Clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442(4):3192–3205. arXiv: 1405.6208.

- Walker, S. A., ZuHone, J., Fabian, A., and Sanders, J. (2018). The split in the ancient cold front in the Perseus cluster. *Nature Astronomy*, 2(4):292–296. arXiv: 1803.00898.
- Zandanel, F., Pfrommer, C., and Prada, F. (2014). On the physics of radio haloes in galaxy clusters: scaling relations and luminosity functions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 438(1):124–144.
- Zhuravleva, I., Churazov, E., Schekochihin, A. A., Allen, S. W., Arévalo, P., Fabian, A. C., Forman, W. R., Sanders, J. S., Simionescu, A., Sunyaev, R., Vikhlinin, A., and Werner, N. (2014). Turbulent heating in galaxy clusters brightest in X-rays. *Nature*, 515(7525):85–87.
- ZuHone, J. A., Brunetti, G., Giacintucci, S., and Markevitch, M. (2015). TESTING SECONDARY MODELS FOR THE ORIGIN OF RADIO MINI-HALOS IN GALAXY CLUSTERS. *The Astrophysical Journal*, 801(2):146.
- ZuHone, J. A., Kowalik, K., Öhman, E., Lau, E., and Nagai, D. (2018). The Galaxy Cluster Merger Catalog: An Online Repository of Mock Observations from Simulated Galaxy Cluster Mergers. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 234(1):4.
- ZuHone, J. A., Markevitch, M., Brunetti, G., and Giacintucci, S. (2013). Turbulence and radio mini-halos in the sloshing cores of galaxy clusters. *The Astrophysical Journal*, 762(2):78.

Chapitre 2

Extended radio emission in the galaxy cluster MS0735.6+7421 detected with the Karl G. Jansky Very Large Array

T. Bégin,¹ J. Hlavacek-Larrondo,¹ C.L. Rhea,¹ B. McNamara,^{2,3} L.-S. Guité,¹ M.
Prasow-Émond,¹ M.-L. Gendron-Marsolais,⁴ R.J. van Weeren⁵

¹*Département de physique, Université de Montréal, Montréal, QC, Canada, H3C 3J7*

²*Department of Physics and Astronomy, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada,
N2L 3G1*

³*Perimeter Institute for Theoretical Physics, Waterloo, ON, Canada, N2L 2Y5*

⁴*European Southern Observatory, Alonso de Córdova 3107, Vitacura, Santiago, Chile,
Casilla 19001*

⁵*Leiden Observatory, Leiden University, 2300 RA Leiden, The Netherlands, PO Box 9513*

Cet article sera soumis à la revue *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*
(MNRAS) au cours des prochains mois.

Résumé

MS 0735.6+7421 ($z = 0.216$) est un amas de galaxies massif à coeur froid qui possède l'un des plus puissants trous noirs supermassifs actifs (AGN) connus. Les jets radio de l'AGN ont tracé dans l'ICM une paire de cavités rayons-X d'une taille inhabituellement grande. En effet, chaque cavité atteint un diamètre de 200 kpc. Cela fait de MS 0735.6+7421 une cible idéale afin d'étudier les processus de rétroaction de l'AGN et l'astrophysique des amas aux

longueurs d’onde radio. Dans cet article, nous présentons de nouvelles observations basses fréquences de MS 0735.6+7421 qui ont été prises avec le Karl G. Jansky Very Large Array (JVLA). Nos observations à 1 – 2 GHz et 230 – 470 MHz révèlent la présence d’une nouvelle structure radio diffuse qui atteint une taille de ≈ 910 kpc. Cette structure est centrée sur le coeur de l’amas et a une puissance radio à 1.4 GHz de $P_{1.4\text{GHz}} = (5 \pm 3) \cdot 10^{24}$ W/Hz. Les propriétés de cette structure sont compatibles avec les propriétés attendues pour un mini-halo tel que détecté dans d’autres amas massifs à coeur froid. Toutefois, des observations à plus haute résolution spatiale sont requises afin de caractériser en détail les propriétés et afin de confirmer la nature de cette structure. Les observations présentées témoignent des images de qualité qui peuvent être obtenues avec le JVLA et démontrent la nécessité d’obtenir des observations radio plus profondes et à meilleure résolution spatiale d’amas afin de mieux comprendre l’origine des mini-halos radio dans les amas de galaxies.

Mots-clés : Continuum radio : galaxies – galaxies : amas de galaxies : individuel : MS 0735.6+7421 – galaxies : amas de galaxies : milieu intra-amas – galaxies : active – galaxies : jets – physique des trous noirs

Abstract

MS 0735.6+7421 ($z = 0.216$) is a massive cool core galaxy cluster hosting one of the most powerful active galactic nuclei (AGN) outbursts known. The radio jets of the AGN have carved out an unusually large pair of X-ray cavities, each reaching a diameter of 200 kpc. This makes MS 0735.6+7421 an ideal target to investigate active galactic nuclei feedback processes, as well as cluster astrophysics at radio wavelengths. We present new low-frequency observations of MS 0735.6+7421 taken with the Karl G. Jansky Very Large Array (JVLA). Our observations at 1 – 2 GHz and 230 – 470 MHz both reveal the presence of a new, previously undetected diffuse radio component that reaches a scale of ≈ 910 kpc. This component is centered on the cluster core and has a radio power at 1.4 GHz of $P_{1.4\text{GHz}} = (5 \pm 3) \cdot 10^{24}$ W/Hz. Its properties are fully consistent with those expected from a radio mini-halo as seen in other massive cool core clusters, although observations at higher spatial resolution are needed to fully characterize the properties and nature of this component. These observations illustrate the high-quality images that can be obtained with the new JVLA, as well as the necessity to obtain deeper, higher-fidelity radio images of clusters to further understand the origin of radio mini-halos.

Keywords: Radio continuum: galaxies – galaxies: clusters: individual: MS 0735.6+7421 – galaxies: clusters: intracluster medium – galaxies: active – galaxies: jets – black hole physics

2.1. Introduction

Active Galactic Nucleus (AGN) feedback is widely regarded as the main source preventing cooling at the center of cool core clusters of galaxies (e.g. McNamara and Nulsen 2012). This mechanism is powered by accretion onto the central supermassive black hole (SMBH) that then generates relativistic jets emitting strongly at \sim GHz frequencies. These jets push the intracluster medium (ICM), inflating bubble-like structures identified as X-ray cavities. The precise mechanism of how the energy is transferred from these jets to the ambient ICM remains unclear, although it may be most likely related to turbulence, shock waves, or sound waves (Zhuravleva et al. 2014, Fabian et al. 2003, Fabian et al. 2017).

MS 0735.6+7421 (hereafter MS0735) is one of the most well-studied examples of extreme AGN feedback in a cluster of galaxies (Donahue et al. 1992; M. Donahue and J. T. Stocke 1995; McNamara et al. 2005; Cohen et al. 2005; McNamara et al. 2009; Birzan et al. 2010; Vantyghem et al. 2014; Biava et al. 2021 and references therein). It exhibits two giant X-ray cavities of approximately 200 kpc in diameter each, that have been inflated by a pair of relativistic jets among the largest known to date in any cluster core. This AGN feedback places MS0735 among the clusters with the most powerful known AGN with a total jet power of $1.7_{-0.5}^{+0.6} \times 10^{46}$ erg s $^{-1}$ (Vantyghem et al. 2014). Apart from this specificity, MS0735 is also a massive strong cool core cluster: $M_{500} = (4.5 \pm 1.2) \times 10^{14} M_{\odot}$ (Hofmann et al. 2016) and $K_0 = (12.6 \pm 0.6)$ keV cm 2 (Vantyghem et al. 2014). It was first identified by Donahue et al. (1992) and was subsequently imaged in X-rays by McNamara et al. (2005). McNamara et al. (2005) identified a shock front and was the first to emphasize the spatial correspondence between the radio jets identified at 1.4 GHz and the X-ray cavities: the radio jets fill out the cavities, suggesting that the ICM gas was displaced by the jets. MS0735 was also imaged by Cohen et al. (2005) who presented VLA observations at 1.425 GHz and 325 MHz allowing to compute integrated spectral indexes for the main components of the cluster.

Using new Chandra observations (cumulative exposure time of 477 ks), Vantyghem et al. (2014) estimated the required power to inflate the cavities and concluded that the total power exceeds the bolometric luminosity thus compensating for the radiative losses of the ICM. They also further studied the shock front that delimits the two large cavity regions and estimated its Mach number to be $M = 1.26_{-0.09}^{+0.04}$. The energy required to inflate these bubbles and to generate the shock front is on the order of 10^{62} erg. Moreover, as part of this work, a second pair of smaller X-ray cavities was identified with power significantly smaller than the largest cavities' power (around 30 times smaller) suggesting that the AGN power varies over time. The timescale on which these two generations of cavities occurred is short enough to prevent the ICM from cooling (i.e. shorter than the cooling time) and thus supports the AGN feedback hypothesis.

More recently, Biava et al. (2021) presented results of an in-depth spatial radio analysis of MS0735 using new 144 MHz Low-Frequency Array (LOFAR) data and archival radio data. In this work, they identified an intermediate X-ray cavity. This intermediate cavity is located at the southwest of the core and is of intermediate size and age compared to the two generations of cavities identified in Vantyghem et al. (2014). They also produced high spatial resolution spectral index maps between 144 MHz and 610 MHz, between 144 MHz and 235 MHz, and between 610 MHz and 1.42 GHz. Their results show very steep spectral indexes across the extent of the cluster. Their results also suggest that the central AGN is active most of the time and is only going through quiescent phases for brief periods. This AGN activity is thus ensuring continuous heating to the central gas.

Besides its powerful central AGN, MS0735 is a great candidate to harbor a radio mini-halo because it is a massive cool core cluster (see Giacintucci et al. 2017). A radio mini-halo is a faint diffuse radio structure that surrounds the central BCG and is typically found in cool core clusters. They have a scale on the order of 100-500 kpc (e.g. Gitti et al. 2007, Giacintucci et al. 2013, Prasow-Émond et al. 2020). They are smaller than galaxy clusters but are larger than the relativistic jets from the AGN, which are typically on the scale of 30 kpc (von der Linden et al. 2007). Mini-halos have steep radio spectra with typical spectral indexes of $\alpha > 1$, where the spectral index is defined as $S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ (Giacintucci et al. 2013). We use the same convention for the spectral index for the rest of this paper.

Because the radiative time scale of relativistic particles is shorter than the time required to reach the extent of mini-halos, mini-halos have previously been attributed to a population of relativistic particles (re-)accelerated in situ. The (re-)acceleration mechanisms of particles responsible for mini-halos have been historically debated between the hadronic model and the turbulent model. In the hadronic model, the electrons emitting in radio are produced as a result of the hadronic interaction between cosmic ray (CR) protons and ICM protons (Pfrommer and Enßlin 2004; Fujita et al. 2007; Zandanel et al. 2014; Ignesti et al. 2020). However, this model would imply extended emission of γ -rays which have not been detected up to this day (see Ahnen et al. 2016). In the turbulent model, a population of seed electrons is (re-)accelerated during states of ICM turbulence induced most likely by gas sloshing (see ZuHone et al. 2013 for simulation results). This hypothesis is the most accepted, partly because radio mini-halos are bounded by cold fronts (Giacintucci et al. 2011) which are a typical sign of gas sloshing (see Markevitch and Vikhlinin 2007).

Some studies have previously suggested that relativistic seed particles responsible for radio emission of mini-halos could originate from the central AGN (Fujita et al. 2007). Moreover, other studies suggested that the central AGN might be the source of the turbulence that drives the (re-)acceleration of particles in mini-halos (Bravi et al. 2016). Recent Karl G. Jansky Very Large Array (JVLA) observations of the mini-halo in the Perseus cluster supported this hypothesis (Gendron-Marsolais et al. 2017). This result was further supported

by the discovery of strong correlations between the mini-halo radio power and the BCG steep radio power component, and between the mini-halo radio power and the X-ray cavity power which suggests a link between the feedback processes of the central AGN and mini-halos (Richard-Laferrière et al. 2020). High spatial resolution and high flux density sensitivity radio data of clusters exhibiting mini-halos and hosting extreme AGN feedback are required to test these hypotheses. As previously pointed out, MS0735 is a target of choice for such an investigation because it exhibits uniquely large relativistic jets characteristic of an extreme central AGN feedback.

In this paper, we present a new radio analysis of MS0735 combined with X-ray analysis. New radio data were acquired using the JVLA in P-band (230-470 MHz) and L-band (1-2 GHz) both in C configuration, with the goal of producing deep enough observations to detect a mini-halo, if present. The X-ray data were obtained using the Chandra observatory archival dataset. Section 2 presents the radio and X-ray observations and the data reduction process. Section 3 presents the resulting images and their analysis. In section 4, we discuss the results and their implications. Finally, in section 5, we present our main conclusions and present the objectives for future papers related to MS0735.

Throughout the paper, we use $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0.3$ and $\Omega_\Lambda = 0.7$ assuming a Λ CDM cosmological model and $z = 0.216$ as the cluster's redshift ($1'' = 3.5 \text{ kpc}$). Errors are 1σ unless otherwise stated.

2.2. Observations and data reduction

2.2.1. JVLA observations

We obtained a total of 5 hours in L-band (1-2 GHz) and 5 hours in P-band (230-470 MHz) using the JVLA (project number 18B-171, principal investigator J. Hlavacek-Larrondo). Both of these observations were taken in C configuration, on December 5th and December 6th of 2018 respectively.

The observations were taken with 27 operational antennas. Within the observation periods, no anomaly was reported by the operator log. The L-band (1-2 GHz) dataset consists of 45 scans, from which three scans are of 3C147, one at the beginning, one in the middle, and one at the end (for flux and bandpass calibration), ten scans are of J0841+7053 (for phase calibration) and the rest of the scans are of MS0735. The L-band receiver has 16 spectral windows (bandwidth of 64 MHz), each subdivided into 64 channels (bandwidth of 1 MHz). The P-band (230-470 MHz) dataset consists of 45 scans, from which three scans are of 3C147, one at the beginning, one in the middle, and one at the end (for flux and bandpass calibration), ten scans are of J0939+8315 (for phase calibration) and the rest of the scans

are of MS0735. The P-band receiver has 16 spectral windows (bandwidth of 16 MHz), each subdivided into 128 channels (bandwidth of 125 kHz).

The data reduction of both of the datasets was realized using the Common Astronomy Software Applications - CASA (McMullin et al. 2007) version 5.6.2-2 following the procedure described in the low-frequency P-band tutorial found on the NRAO website¹. A pipeline was specifically developed to account for the strong presence of radio frequency interference (RFI) at low-frequency. The steps of the data reduction process are detailed in the following paragraphs.

First, malfunctioning antennas and scans impacted by evident RFI were flagged according to the visual inspection of the dataset. Calibrations for the antenna position, for the ionospheric total electron content (TEC), and for the requantizer gains at the inputs of the WIDAR correlator were derived and applied. The data were then Hanning smoothed utilizing the HANNINGSMOOTH task. Initial automatic flagging was then conducted on the calibrators and on the target to remove the most apparent RFI using the FLAGDATA task in TFCROP mode. A preliminary bandpass calibration was conducted and applied to the data using the FLAGDATA task in RFLAG mode to reduce even more the missed RFI. After these initial flagging steps, calibration was conducted. For both L-band and P-band datasets, 3C147 was used as the bandpass and flux calibrator while the phase calibrators were respectively J0841+7053 and J0939+8315. The data were calibrated using the standard calibration tasks (SETJY, GAINCAL, BANDPASS, SMOOTHCAL) and we proceeded to visually inspect each calibration table produced with the PLOTMS task, thus allowing us to identify and flag any obvious outliers. After applying the derived calibrations using the APPLYCAL task, the corrected data were split using the SPLIT task and a final weight down of the RFI was applied using the STATWT task. The deconvolution was performed with a self-calibration method using the task TCLEAN and two subsequent iterative cycles of self-calibration were applied in order to produce incremental gain phase corrections. The self-calibration step used the main target MS0735 instead of a calibration source to refine the final calibration of the image. For both bands, the deconvolution was done in interactive mode to build a mask interactively.

The parameters for the deconvolution by the TCLEAN task were carefully chosen: a multi-term and multi-frequency synthesis-imaging algorithm (MS-MFS, Rau and Cornwell 2011) was used. The different scales used were chosen to account for the point sources, the jets and a mini-halo typical size. We used 2 Taylor's coefficients assuming a linear spectrum for the source. The gridder input was chosen to use the W-projection algorithm to correct for the widefield non-coplanar baselines effect (Cornwell et al. 2008). We used a Briggs weighting algorithm and set the pblimit parameter to -0.02 to prevent masking the edges of the image. The number of iterations for the TCLEAN tasks was set to 100 000.

¹https://casaguides.nrao.edu/index.php?title=VLA_Radio_galaxy_3C_129:_P-band_continuum_tutorial-CASA5.5.0

For L-band data reduction, we used 128 as the number of w-planes while for P-band data reduction, we used 256. These values allowed to get rid of artifacts resulting from the effect of the non-coplanar baselines while minimizing computing costs. For both bands, we tested the three main Briggs’ robustness parameters of -2.0, 0.5, and 2.0. As expected, a robust parameter of -2.0 allowed to maximize the spatial resolution and thus, we used this parameter to produce the images presented in the top panels of figure 2.2 to show the most spatially accurate images of the jets. Also, as expected, a robust parameter of 2.0 allowed to maximize the diffuse emission detection. The images maximizing the diffuse faint emission (robust parameter of 2.0) are presented in the bottom panels of figure 2.2.

We also produced a point source image in L-band by applying a uvrange cutoff ($> 10k\lambda$) in the `TCLEAN` task. This uvrange cutoff corresponds to angular scales of $20''$ which is approximately twice the synthesized beam size. This allowed producing an image utilizing only the longest baselines of the interferometer, thus allowing to image point sources. This image is presented in figure 2.3.

The size of the L-band images ($1260 \text{ pixels} \times 1260 \text{ pixels} \sim 1.4^\circ \times 1.4^\circ$, while the full width at half power of the field of view is around 0.5°) and of the P-band images ($1260 \text{ pixels} \times 1260 \text{ pixels} \sim 5.6^\circ \times 5.6^\circ$, while the full width at half power of the field of view is around 2.4°) were chosen to be large enough to include all bright sources in the vicinity of MS0735. The sizes were also chosen to be larger than the respective primary beam in both bands. The images presented in figure 2.2 were cropped to show the central part of interest of the cluster.

For the L-band data reduction, even after testing all of the antennas for the calibration, we ended up flagging approximately 60% of the data due to the large amount of RFI. For the P-band data reduction, we flagged approximately 65% of the data. For both bands, we reached the theoretical rms noise computed using the online VLA Exposure Calculator².

2.2.2. Chandra observations

Chandra observations were taken using the Advanced CCD Imaging Spectrometer (ACIS) in VFAINT mode. The observations were taken in June 2009. There are 7 observations in total: 10468 (46ks), 10469 (97ks), 10470 (150ks), 10471 (20ks), 10822 (79ks), 10918 (68ks), 10922 (38ks). Each ObsID was cleaned in the following manner using the CIAO software (CIAO v4.10 and CALDB v4.7.8). First, the level one event files were processed for background flare events using the standard `lc_sigma_clip` routine with σ set to 3. Then, `chandra_repro` was applied to the unprocessed data with `vfaint` set to `true`. Afterward, we created blanksky background files for each observation with the `blanksky`. Using

²<https://obs.vla.nrao.edu/ect/>

`blanksky_image`, we created background-subtracted, exposure-corrected images of each observation. Finally, the `merge_obs` command was used to merge the observations. Five point sources were visually noted and removed from the final image. We used the `dmfilth` command and a `Poisson` distribution to fill in the regions.

The data were spectroscopically fit using `Xspec v12.10.1`, `Sherpa v1`, and `python v3.5`; moreover, the observations were fit simultaneously over 0.7-8.0 keV. We employed an absorbed thermal model to describe the ICM emission: `PHABS*APEC`. We adopted a column density of $3.29 \times 10^{20} \text{cm}^{-2}$ (Kalberla et al. 2005). The background spectrum was subtracted from the region’s extracted spectrum prior to applying the fit. We used a standard reduced χ^2 fit statistic and Levenberg-Marquardt optimization algorithm as implemented in `Sherpa`. The regions were created using a Weighted Voronoi Tessellation (WVT) algorithm implemented in `python` applied to the 0.5-7.0 keV background-subtracted merged X-ray image; the implementation can be found at <https://github.com/XtraAstronomy/AstronomyTools>. The WVT algorithm bins regions in geometrically unbiased groups meeting a pre-determined signal-to-noise requirement. We set the target signal-to-noise to 80. The fitting process was completed in three stages:

- (1) Freeze the metallicity to $0.3Z_{\odot}$ and fit the normalization and temperature.
- (2) Freeze the temperature and thaw the metallicity. Redo the fit.
- (3) Thaw the temperature and fit with both metallicity and temperature free.

In this manner, the fits were able to first constrain the temperature, the metallicity, and then ensure that the estimates are stable. We then calculated the luminosity in the 0.1-2.4 keV band using `Sherpa`’s `sample_flux` command.

2.3. Results

Figure 2.1 shows a combination of the Chandra soft-band (0.5-2.0 keV) X-ray (blue) after an unsharp-mask was applied, of the optical taken with the Hubble Space Telescope’s Advanced Camera for Surveys (ACS) through the F850LP filter (white) and of the L-band image of the bottom right panel of figure 2.2 (orange).

The top panels of figure 2.2 show the L-band and P-band images maximizing the spatial resolution (robust parameter of -2.0 in the `TCLEAN` task) as well as an optical image that was taken with the Samuel Oschin Telescope in the red filter. In the L-band image, we can identify two bright point sources located at the northwest and at the south of the jets of MS0735. We respectively call these sources S1 and S2 (see yellow identification in right panels of figure 2.2). These sources are also noticeable in the P-band images. The L-band image in the top right panel shows the structure of the jets while the P-band image in the top middle panel only shows the general large-scale structures of the jets due to its poor spatial resolution in comparison with the L-band.

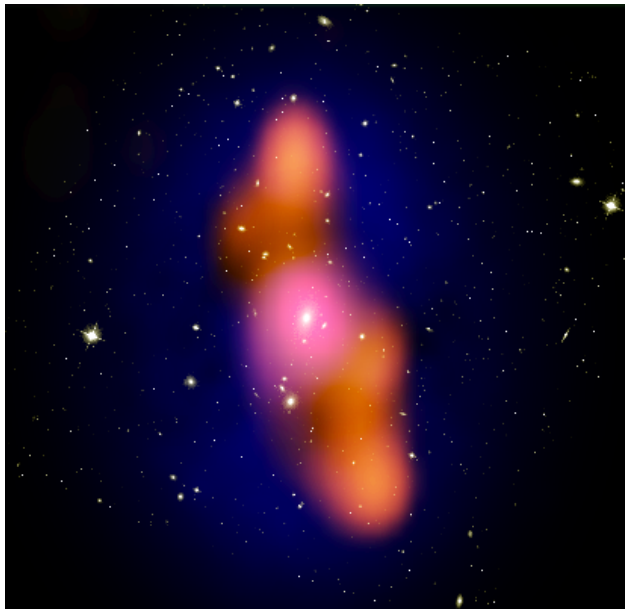


Fig. 2.1. Composite image of the cluster’s central 3.7×3.7 arcmin. The image shows a combination of the unsharp-masked X-ray soft-band emission (blue), the optical (white), and the L-band (1-2 GHz) radio emission (orange).

The bottom panels of figure 2.2 show the L-band and P-band maximizing the diffuse emission detection (robust parameter of 2.0 in the TCLEAN task) as well as the same optical image. The bottom right L-band image has a rms of 0.017 mJy/beam, a peak value of 7.92 mJy/beam, and a beam size of $13.5'' \times 19.2''$ (minor and major axis full width respectively), while the bottom middle P-band image has a rms of 0.5 mJy/beam, a peak value of 314 mJy/beam, and a beam size of $59'' \times 75''$ (minor and major axis full width respectively).

In Figure 2.3, we show a radio point source image in the vicinity of MS0735 (uvrange cutoff $>10k\lambda$ in the TCLEAN task). The objective of producing this point source image was to realize a point source subtracted image of the extended emission. We attempted to do so by utilizing the UVSUB task and subtracting the L-band point source image from the initial dataset and then proceeded to image the point source subtracted dataset to produce an image of only the extended emission. However, the rms of the final image was insufficient to infer the requisite physical information.

In Figure 2.4, we compare the L-band radio contours to the Chandra soft-band X-ray (0.5 – 2.0 keV) unsharp-masked image. As expected, the image demonstrates a spatial correlation between the radio jets and the ICM emission. We also present an abundance map and a temperature map both with the L-band radio contours overlaid. The temperature map shows an increase from a temperature of $T_{\text{center}} = 3$ keV at the center to a temperature of $T_{\text{edge}} = 11$ keV at the edge. The cooler gas in the central regions of the cluster is oriented in the direction of the jets as was pointed out in Vantyghe et al. (2014). This effect is

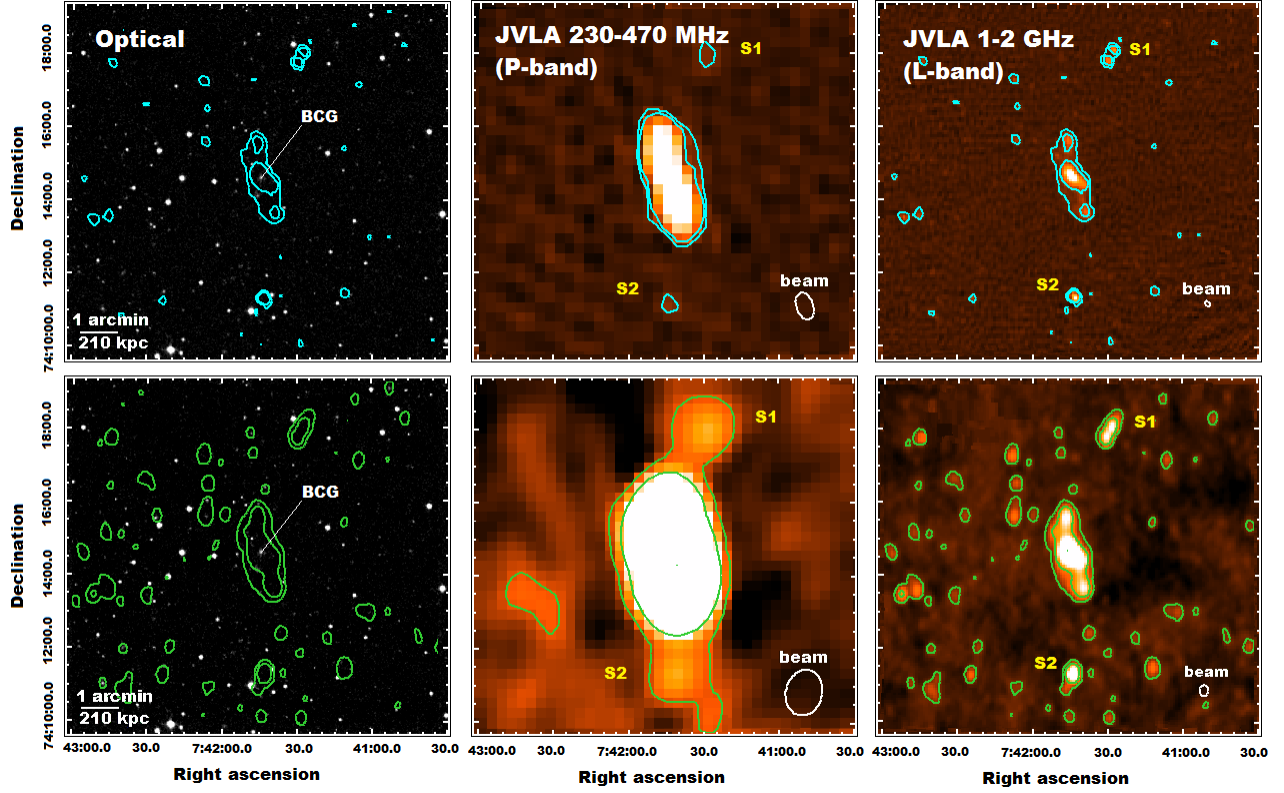


Fig. 2.2. All images are on the same scale and cover a region of approximately 10×10 arcmin. **Top left:** Samuel Oschin Telescope optical image of the cluster in red filter with 1-2 GHz (L-band) contours for a TCLEAN robust parameter of -2.0. **Top middle:** 230-470 MHz (P-band) JVLA C configuration image obtained with a robust parameter of -2.0. We identified two luminous point sources that we called S1 and S2 (see in yellow). These sources are most likely responsible for the elongated form of the second-level contours in the P-band image (see bottom middle panel). The noise level in the vicinity of the cluster is $\sigma_{\text{rms}} = 0.70$ mJy/beam, the peak value is 176 mJy/beam and the beam size is $27'' \times 45''$. Contour levels are drawn at $[1, 3, 60] \times 4\sigma_{\text{rms}}$ (3 levels in total). **Top right:** 1-2 GHz (L-band) JVLA C configuration image obtained with a robust parameter of -2.0. Sources S1 and S2 are identified in yellow. The noise level in the vicinity of the cluster is $\sigma_{\text{rms}} = 1.65 \cdot 10^{-2}$ mJy/beam, the peak value is 5.00 mJy/beam and the beam size is $6.6'' \times 11.4''$. Contour levels are drawn at $[1, 4, 101] \times 3\sigma_{\text{rms}}$ (3 levels in total). **Bottom left:** Same image as top-left but with L-band contours for a TCLEAN robust parameter of 2.0. **Bottom middle:** 230-470 MHz (P-band) JVLA C configuration image obtained with a robust parameter of 2.0. Sources S1 and S2 are identified in yellow. The noise level in the vicinity of the cluster is $\sigma_{\text{rms}} = 0.50$ mJy/beam, the peak value is 314 mJy/beam and the beam size is $59'' \times 75''$. Contour levels are drawn at $[1, 9, 262] \times 3\sigma_{\text{rms}}$ (3 levels in total). **Bottom right:** 1-2 GHz (L-band) JVLA C configuration image obtained with a robust parameter of 2.0. Sources S1 and S2 are identified in yellow. The noise level in the vicinity of the cluster is $\sigma_{\text{rms}} = 0.017$ mJy/beam, the peak value is 7.92 mJy/beam and the beam size is $13.5'' \times 19.2''$. Contour levels are drawn at $[1, 6, 155] \times 3\sigma_{\text{rms}}$ (3 levels in total).

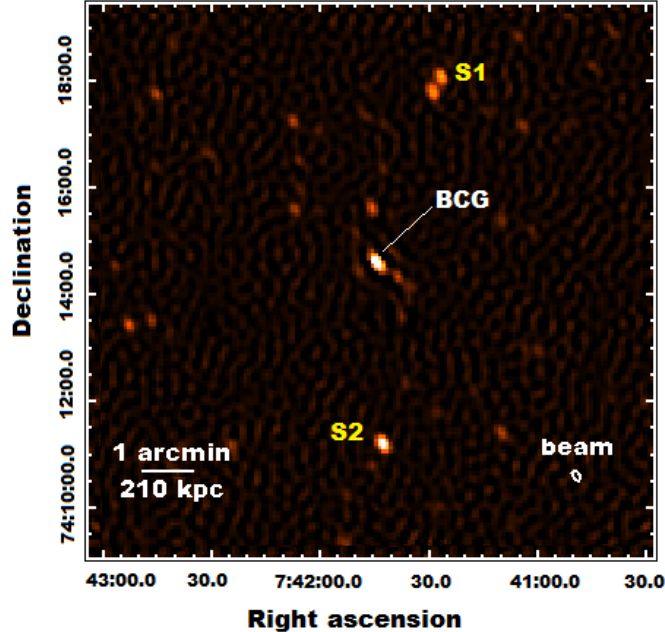


Fig. 2.3. Point source L-band (1-2 GHz) image of MS0735. The total covered region is approximately 10×10 arcmin. The noise level in the vicinity of the cluster is $\sigma_{\text{rms}} = 0.025$ mJy/beam, the peak value is 3.40 mJy/beam and the beam size is $3.7'' \times 6.2''$.

most likely due to the centralized cold gas being dragged out by the jets. The abundance map shows a central value of $Z_{\text{central}} = 0.8 Z_{\odot}$. Along the axis of the jets, the abundance decreases from the center until it reaches a value of approximately $0.35 Z_{\odot}$. This is consistent with work from Grandi and Molendi (2009) that presents this central enrichment as a result of supernovae in the BCG. The abundances then increase back to values of approximately $Z_{\text{edge}} = 1.2 Z_{\odot}$ at about 300 kpc from the center of the cluster. This is consistent with results presented in Vantyghem et al. (2014) and with the work done by Kirkpatrick et al. (2009) and Simionescu et al. (2009) which argue that this increase in abundance at a large radius from the center is due to uplifting of the metals by the jets.

Figure 2.5 shows the comparison between the old VLA P-band A configuration image from Birzan et al. (2010) and our new JVLA P-band C configuration image taken from figure 2.2 bottom middle panel. The old P-band image shows a good spatial resolution with its beam size of $5.7'' \times 7.6''$. This allows computing precisely the flux density associated with the jets and the central point source (see section 2.4.2 for the flux density comparison between this old P-band image and our new P-band image).

Figure 2.6 shows the spectral index map that was produced by comparing the L-band (1-2 GHz) and P-band (230-470 MHz) image's flux densities pixel by pixel. To produce the map, the L-band image had to be scaled to the spatial resolution of the P-band image. The scaling of spatial resolution was realized by re-imaging the L-band dataset with the `TCLEAN` task, but this time by forcing the beam size and the pixel size to match the P-band image. We

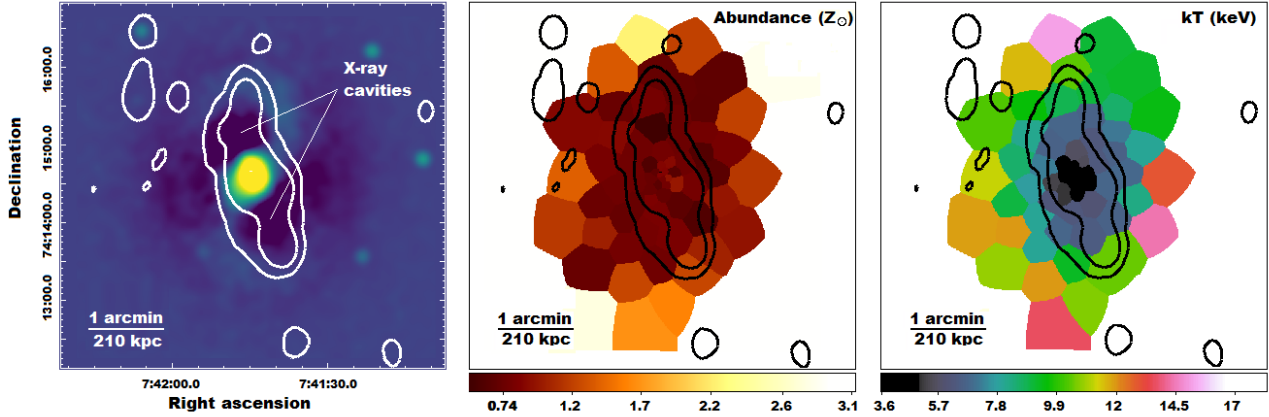


Fig. 2.4. All images are on the same scale and cover a region of approximately 5×5 arcmin. **Left:** Unsharp-masked Chandra soft-band ($0.5 - 2.0$ keV) X-ray image. A difference of Gaussians was applied (standard deviations of 6 and 60 pixels respectively) in order to improve the contrast to better emphasize the X-ray cavities. The X-ray image is overlaid with C configuration L-band (1-2 GHz) radio contours (taken from the bottom right panel of figure 2.2). **Middle:** Abundance map in units of Z_{\odot} (linear scale) with the same L-band (1-2 GHz) radio contours overlaid. **Right:** Temperature map in units of keV (linear scale) with the same L-band (1-2 GHz) radio contours overlaid.

then used the task `IMREGRID` to regrid the L-band image onto the P-band one. The spatial resolution of the map is thus limited by the P-band resolution. The colored regions are the regions where the flux density was significant (3 times the average rms noise in the vicinity of the cluster) in both the L-band and P-band images. The map has 3 main components: the sources S1 and S2 (as identified in figure 2.2) and MS0735 which is composed of its central AGN emission, jet emission, and extended diffuse emission. Point sources S1 and S2 have spectral indexes contained in the interval 0.5-1.0. The emission of MS0735 has a central spectral index of $\alpha_{\text{center}} = 2.0$ with a steepening gradient towards the outskirts. The outskirts has a spectral index of $\alpha_{\text{outskirt}} = 3.0$.

2.4. Discussion

2.4.1. Previous imaging of MS0735

Previous VLA observations of MS0735 were presented in McNamara et al. (2005). These data were taken in L-band C configuration on the non-upgraded VLA (before the 2011 electronic hardware upgrade). The detected radio emission is attributable to the radio jets generated by the AGN and is enclosed in the X-ray cavities. No diffuse radio emission was detected as part of this first radio investigation of MS0735.

Cohen et al. (2005) presented VLA observations of MS0735 at 1.425 GHz and 325 MHz. In this study, they computed an integrated spectral index of $\alpha_{325}^{1400} = 1.54 \pm 0.04$ for the core

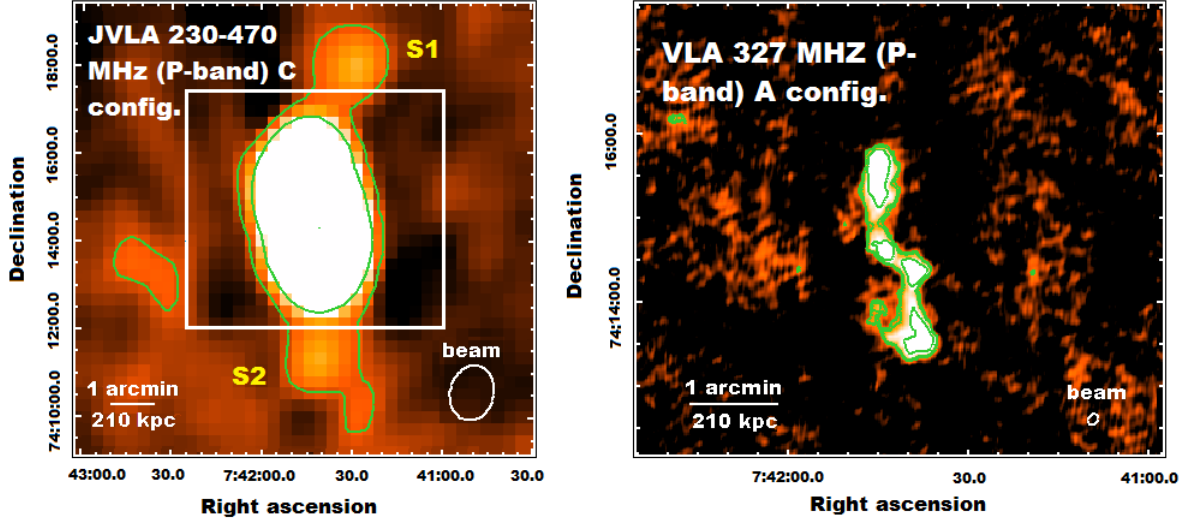


Fig. 2.5. Comparison between the old VLA P-band A configuration image and the new P-band C configuration image. **Left:** 230-470 MHz (P-band) JVLA C configuration image obtained with a robust parameter of 2.0 in the TCLEAN task to maximize diffuse emission detection (same image as the bottom middle panel of figure 2.2). The white square region corresponds to the field of view covered in the right panel. **Right:** 327 MHz (P-band) old VLA A configuration image obtained from McNamara et al. (2009) that used the same P-band A configuration data obtained from the VLA as part of the Birzan et al. (2010) study. The noise level in the vicinity of the cluster is $\sigma_{\text{rms}} = 1.4$ mJy/beam, the peak value is 46.4 mJy/beam and the beam size is $5.7'' \times 7.6''$. Contour levels are drawn at $[1, 1.3, 2.8, 11] \times 3\sigma_{\text{rms}}$ (4 levels in total).

(stating this value can be contaminated by radio lobes) and integrated spectral indexes of $\alpha_{325}^{1400} = 3.17 \pm 0.05$ and $\alpha_{325}^{1400} = 3.13 \pm 0.05$ for the north and south lobes respectively. They also computed a spectral index with the total flux of the structure (core and lobes) between 325 MHz and 1425 MHz and found a value of $\alpha_{325}^{1425} = 2.45 \pm 0.04$.

VLA observations were also presented in McNamara et al. (2009). These data were taken in P-band A configuration (thus allowing to reach a higher spatial resolution) and are shown in figure 2.5 along with our new P-band C configuration image. This 327 MHz observation shows that the jets are emerging from the nucleus at an angle of approximately 45 degrees oriented to the northeast and the southwest. The jets are then redirected respectively to the north and the south and they expand in lobe structures due to the resistance offered by the ICM. The jets are enclosed in the X-ray cavities but don't completely fill them. No diffuse extended radio emission was detected as part of this investigation.

Birzan et al. (2010) presented an in-depth analysis of multiple radio galaxies at the cores of cooling clusters. For MS0735, they computed a total spectral index (core and lobes) of $\alpha_{327}^{1400} = 2.48 \pm 0.04$ which is supported by the results presented in Cohen et al. (2005).

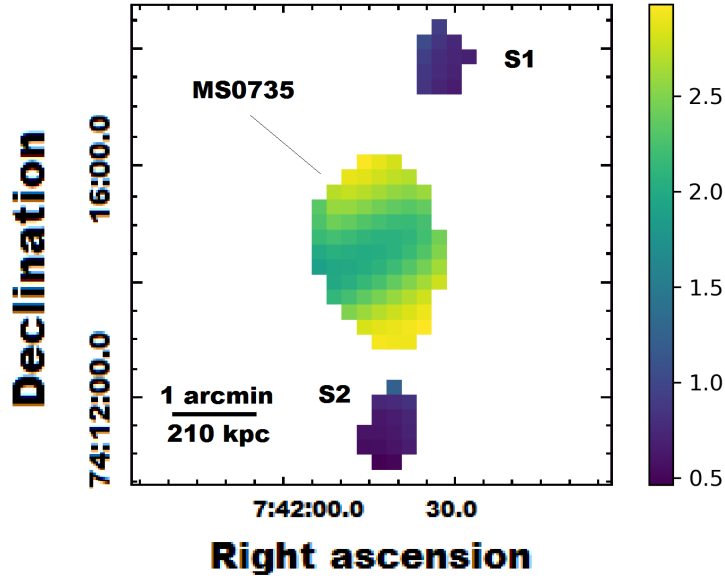


Fig. 2.6. Spectral index map of the radio emission of MS0735 and its surroundings between L-band (1-2 GHz) and P-band (230-470 MHz). Both islets located at the northwest and the south of MS0735 corresponds to the position of the sources S1 and S2 that were identified in figure 2.2.

Vantyghem et al. (2014) used pV as an estimate of the energy required to inflate the cavities and a mean age for the cavities by averaging the sound crossing time, the refill time, and the buoyancy time. The power required to inflate the cavities is $9_{-4}^{+5} \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ and $(8 \pm 4) \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ for the north and south cavities respectively. This corresponds to a total power of $1.7_{-0.5}^{+0.6} \times 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$ which exceeds the bolometric luminosity of $2.6 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ thus compensating for the radiative losses. They also identified a second pair of smaller cavities and the power required to inflate these rejuvenated cavities is $2.8_{-1.3}^{+1.6} \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ and $2.4_{-1.3}^{+2.0} \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ for the north and south cavities respectively. This corresponds to a total power of $5.2_{-1.8}^{+2.6} \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$.

2.4.1.1. 144 MHz LOFAR observations

More recently, Biava et al. (2021) presented new LOFAR data at 144 MHz which helped to catch wider radio emission of the jetted structure. This new radio imaging shows a greater correspondence between morphologies of the jets and the X-ray cavities. Moreover, this study provided detailed spectral index maps and analysis: they computed a spectral index of $\alpha_{144}^{610} = 1.5 \pm 0.1$ for the core which confirms that the central emission corresponds to a superposition between the core and the lobes' emission. Their high spatial resolution spectral index maps allowed to discover a gradient of spectral index: in the extreme edge of the lobes, they found a spectral index of $\alpha_{144}^{610} = 2.3 \pm 0.1$, this spectral index then steepens

going toward the core, reaching a value of $\alpha_{144}^{610} = 2.9 \pm 0.3$ in the outer lobes and flattens again until it reaches a value of $\alpha_{144}^{610} = 2.1 \pm 0.1$ in the intermediate lobe. If there was only one phase of jet activity, the flatter spectral index should have been at the extreme edge of the jets, where the particles are last accelerated. This supports the understanding that the radio emission is the result of multiple generations of AGN activity. They also presented a spectral index map between 610 MHz and 1.42 GHz which showed spectral steepening at high frequencies compared to low frequencies. They found a spectral index of $\alpha_{610}^{1420} = 3.4 \pm 0.6$ in the outer lobes, a value of $\alpha_{144}^{610} = 2.8 \pm 0.3$ in the intermediate lobe and a value of $\alpha_{144}^{610} = 1.4 \pm 0.1$ in the core. The observed spectral curvature (steepening of spectral indexes at higher frequencies) is characteristic of an aged population of electrons. They also provided spectral ageing maps allowing to investigate the rejuvenation timescales of the central AGN. As part of this high spatial resolution study, they identified a wider than previously detected radio emission that they attributed to the jets. This result is well supported by the correspondence between the 144 MHz radio emission morphology and the X-ray cavities, by the spectral index maps they derived, and by their re-imaging of their data at lower spatial resolution. The flux density they measured for the total structure (lobes and central core) at 144 MHz is $S_{144\text{MHz}} = (4.7 \pm 0.5)$ Jy. The high spatial resolution of their observations allowed to unambiguously identify the new extended emission they found to be an extension to the jets.

2.4.2. New extended radio emission detected with the JVLA

Our L-band C configuration image shows evidence of extended diffuse emission surrounding the jetted structures (see the 3σ contours in the bottom right panel of figure 2.2). This structure has a full extent of 570 kpc, and its width extends beyond the original jetted emission reported in McNamara et al. (2005), Cohen et al. (2005) and McNamara et al. (2009). However, it is not yet clear if this emission is wider than the emission presented in Biava et al. (2021) which showed wider radio emission than these previous studies. The extended emission that we detected could thus either be the 1.5 GHz counterpart of the jet-related emission detected in Biava et al. (2021) or could be related to a mini-halo structure that was never detected before and that is expected to be present in MS0735. We note that the structure we detected seems to be spatially linked to the jets (its extent being much larger along the direction of the jets compared to the orthogonal direction). The 570 kpc extent should be considered as a minimum value due to the limited sensitivity of the L-band observations ($\sigma_{\text{rms}} = 0.017$ mJy/beam). The size of the structure is consistent with the size of a radio mini-halo which should typically be on the order of ~ 100 -500 kpc (Gitti 2016), however, it also fits well with the possibility of a diffuse extension to the jets, because the jets are also approximately 500 kpc in size. We explore these two possibilities further in section 2.4.3.

We note an important quantity of point sources in our L-band C configuration image (see figure 2.2 bottom right panel) as is expected due to the good spatial resolution (beam size of $13.5'' \times 19.2''$). Utilizing the point source image presented in figure 2.3, we computed the total number of point sources with a flux density above $3\sigma_{\text{rms}}$ in a region of radius equal to 1 Mpc (4.76 arcmin at the cluster’s redshift) from the central source and identified a total of 34 point sources. This amount of point sources is typical for regions of radius equal to 1 Mpc outside of the cluster (surrounding regions had between 25 and 35 point sources). We thus argue that we can detect an AGN population within the cluster’s region which could contribute to enhancing the computed radio power (see the following computation for the radio power of P-band data).

In the new P-band C configuration image, we detect an extended emission with a full extent of 2000 kpc (see the 3σ contours of the bottom middle panel of figure 2.2). This is much larger than the diffuse structure detected in L-band. However, we suspect that the two sources S1 and S2 that we detect in the L-band image (see right panels of figure 2.2 where we identified S1 and S2 in yellow) are contributing to this extended emission. We thus infer that the largest extended emission in the P-band image is the result of the poor spatial resolution of the P-band image and mainly corresponds with these two sources. The full extent of the extended structure related to MS0735 would then be better delimited by the 27σ contour which has an extent of 910 kpc. We note that since the P-band is at lower frequency than the L-band, it could also detect emission from an older population of electrons that are not detected in the L-band.

To establish if new diffuse emission is contained within the P-band C configuration data, compared to the old P-band A configuration data, we computed their radio power. We present the two images in figure 2.5 for visual comparison. To compute the radio power, we proceeded as follows: first, we computed the total flux density included in the $3\sigma_{\text{rms}}$ contour region (where $\sigma_{\text{rms}} = 1.3$ mJy/beam is rms noise in the vicinity of the jets) for the old P-band A configuration image to have an estimate of the flux density attributable to the central compact source and the jets. We find a total flux density of $S_{330\text{MHz, A}} = (0.60 \pm 0.05)$ Jy.

We used the CASA task `IMSTAT` to compute the flux density and we used the following expression to estimate σ_S the uncertainty on the flux density (see Cassano et al. 2013):

$$\sigma_S = \sqrt{(\sigma_{\text{cal}} \cdot S)^2 + (\sigma_{\text{rms}} \cdot \sqrt{N_{\text{beam}}})^2 + \sigma_{\text{sub}}^2} \quad (2.4.1)$$

where σ_{cal} is the uncertainty in the calibration of the absolute flux density scale which is typically between 5-8% (we used 8% as a conservative value), S is the flux density (we note that approximately 7% of the computed flux density is attributable to the central point source), σ_{rms} is the noise of the image, N_{beam} is the number of beams covering the region

where the flux density is computed and σ_{sub} is the uncertainty due to the error in the source subtraction (not applicable here – no point source subtraction was performed).

From the flux density measurement, we computed the associated k-corrected radio power P using the following expression (see van Weeren et al. 2014):

$$P = 4\pi S D_L^2 (1+z)^{-(\alpha+1)} \quad (2.4.2)$$

where D_L is the luminosity distance, z is the redshift and α is the spectral index. Using a typical spectral index for mini-halos of $\alpha = (1 \pm 0.2)$, we find a total radio power of $P_{330\text{MHz, A}} = (0.99 \pm 0.09) \cdot 10^{26}$ W/Hz for the old P-band A configuration image.

We then proceeded to compute the flux density and the k-corrected radio power for our new P-band C configuration image using a region including the emission above $27\sigma_{\text{rms}}$ (where $\sigma_{\text{rms}} = 0.5$ mJy/beam is the rms noise in the vicinity of the cluster). This corresponds to the smaller contour shown in figure 2.5 left panel and we decided to use this region to compute the flux to ensure that the flux density computation is not contaminated by the sources S1 and S2. We find that the total flux density is $S_{330\text{MHz, C}} = (0.70 \pm 0.06)$ Jy. Using the same typical spectral index of $\alpha = (1 \pm 0.2)$, the computed k-corrected radio power is $P_{330\text{MHz, C}} = (1.2 \pm 0.1) \cdot 10^{26}$ W/Hz.

By computing the difference between these radio powers, we find an excess radio power of $P_{\text{excess, 330 MHz}} = (0.2 \pm 0.1) \cdot 10^{26}$ W/Hz. We note that this radio power difference has a very large relative uncertainty of 50%. Nonetheless, this value confirms that the new JVLA images detect a diffuse radio structure centered on the cluster that was not detected as part of the McNamara et al. (2009) study. We note that a new diffuse emission is expected due to the improved radio flux sensitivity of the new JVLA (our new P-band C configuration image reaches a rms noise of $\sigma_{\text{rms}} = 0.5$ mJy/beam, while the old P-band A configuration image reaches a rms noise of $\sigma_{\text{rms}} = 1.4$ mJy/beam) and due to the use of the C configuration instead of the A configuration. The C configuration can detect structures on scales on the order of $4150''$ (or 14 525 kpc at the cluster’s redshift) instead of on the order of $155''$ (or 542.5 kpc at the cluster’s redshift) for the A configuration.

2.4.3. The nature of the new extended radio emission

As was pointed out in the previous section, we discovered a new extended emission surrounding the jetted emission previously detected in McNamara et al. (2009). However, it is not yet clear if this newly detected emission is a counterpart to the newly detected emission from the jets presented in Biava et al. (2021) or if it’s related to a mini-halo structure. In the next two subsections, we investigate these two hypotheses.

2.4.3.1. *Jet-related counterpart to the 144 MHz LOFAR data*

To test the hypothesis of a jet-related counterpart to the 144 MHz LOFAR data, we scaled the flux density of the jet-related emission detected by LOFAR (see Biava et al. 2021). We scaled it to 330 MHz to be able to compare its flux density to the flux density of our detection. The total flux density of the lobes plus core at 144 MHz is $S_{144\text{MHz}} = (4.7 \pm 0.5)$ Jy. By scaling this value to 330 MHz with a spectral index of $\alpha = (2.1 \pm 0.3)$ (value based on the spectral index maps provided in Biava et al. 2021), we find a flux density of $S_{330\text{MHz}} = (0.8 \pm 0.2)$ Jy, which is comparable to our P-band C configuration flux density.

Moreover, the spectral index map that we derived between 350 MHz and 1.5 GHz (see figure 2.6) shows values comparable to the spectral index maps presented in Biava et al. (2021). Our spectral index map shows a gradient going from a value of $\alpha_{\text{center}} = 2.0$ at the center to a value of approximately $\alpha_{\text{outskirt}} = 3.0$ in the outskirts. The central value of $\alpha_{\text{center}} = 2.0$ is most likely the result of the superposition of jet-related emission with the AGN emission due to the poor spatial resolution (as pointed out in Biava et al. 2021). The outskirts' steep spectral index agrees with the spectral index map between 610 MHz and 1.42 GHz presented in Biava et al. (2021) for which the outskirts spectral index was $\alpha_{610}^{1.420} = 3.4 \pm 0.6$. Given that our map is between 350 MHz and 1.5 GHz, a slightly flatter spectral index was to be expected. This result strengthens the hypothesis that the outskirts emission is associated with an older population of accelerated electrons. Moreover, as was previously pointed out in Vantyghem et al. (2014) and Biava et al. (2021), MS0735 hosts multiple generations of outbursts. It was thus expected that the central part of the cluster should exhibit flatter spectral indexes than the outer parts due to a more recent (re-)acceleration of the electron population by a second or third generation of outburst from the central AGN. We however argue that, due to the poor spatial resolution of the map, we can't distinguish the complex gradient in spectral index associated with the multiple generations of outbursts.

Given the comparison between the P-band C configuration flux density and the scaled LOFAR 144 MHz flux density and combined with our spectral index map between 350 MHz and 1.5 GHz, we argue that our detection of new extended emission could well be a counterpart to the new jet-related emission detection made by Biava et al. (2021).

2.4.3.2. *Mini-halo candidate*

To test the hypothesis of a mini-halo candidate detection, we scaled the radio power in excess of our P-band C configuration image in comparison with the P-band A configuration of McNamara et al. (2009) to 1.4 GHz. To do that scaling, we used a typical spectral index for mini-halos of $\alpha = (1 \pm 0.2)$. We find a radio power of $P_{\text{excess}, 1.4 \text{ GHz}} = (5 \pm 3) \cdot 10^{24}$ W/Hz.

By comparing this radio power to the radio mini-halo detections reported in Giacintucci et al. (2019), we see that this radio power is fully consistent with typical radio mini-halos

associated with massive cool core clusters. In Giacintucci et al. (2019), the reported mini-halos have 1.4 GHz radio powers ranging between $(0.06 \pm 0.01) \cdot 10^{24}$ W/Hz for 2A 0335+096 and $(27 \pm 2) \cdot 10^{24}$ W/Hz for RX J1347.5–1145. We note that the reported radio power for RX J1347.5–1145 is much larger than the second most luminous mini-halo for which the radio power isn't extrapolated from a flux measurement: RX J1720.1+2638 has a radio power of $(5.3 \pm 0.3) \cdot 10^{24}$ W/Hz. This radio power is comparable to the value we find for MS0735. If the newly detected emission is indeed a mini-halo, it would rank among the most luminous radio mini-halos discovered.

In figure 2.7, we present two mini-halo correlations that were previously established: the correlation between the mini-halo radio power ($P_{1.4\text{GHz}}$) and the X-ray cavity power, and the correlation between the mini-halo radio power ($P_{1.4\text{GHz}}$) and the X-ray luminosity inside a radius of 600 kpc ($L_{X\text{-ray}}$) (see Richard-Laferrière et al. 2020). The linear fits in log-log space were realized using the BCES-bisector and BCES-orthogonal regression algorithms (Akritas and Bershady 1996; see Nemmen et al. 2012 for one example of application of the BCES method) on the mini-halos listed in Richard-Laferrière et al. (2020). As identified in Richard-Laferrière et al. (2020), the candidate and uncertain mini-halos (in blue in figure 2.7) are mini-halos for which the morphology is unusual or for which previous measurements were not deep enough to conclude confidently on their nature. We added to the correlations a purple star corresponding to the properties of the extended radio emission detected in MS0735 in the current paper. Its radio power is among the upper part of the listed mini-halos, like its cavity power while its X-ray luminosity is among the lower part of the listed mini-halos.

We argue that this high radio power could be partly resulting from the poor spatial resolution of our P-band C configuration image. This might lead to an increase in flux density due to unresolved AGNs in the vicinity of the cluster. We note that MS0735 is fitting well on these previously derived mini-halo correlations. Moreover, we note that MS0735 had a good fit with the radio power - cluster's mass correlation presented in Richard-Laferrière et al. (2020) as well. We didn't include this last correlation because of its high uncertainty.

Moreover, as can be seen on the temperature map (see figure 2.4 right panel), the $3\sigma_{\text{rms}}$ L-band contours spatially correspond with an increase in temperature (going from the center to the outskirts). This increase could be understood as a cold front linked to the sloshing motion in the cool core cluster (Mazzotta and Giacintucci 2008).

Given the location of the newly discovered emission, its position in the correlations presented in figure 2.7, and the expected presence of a mini-halo in MS0735, we argue that this newly detected diffuse emission could well be related to a mini-halo. However, due to the limited spatial resolution of our observations and due to the flux density comparable to the jet-related emission reported in Biava et al. (2021), we cannot confidently argue that

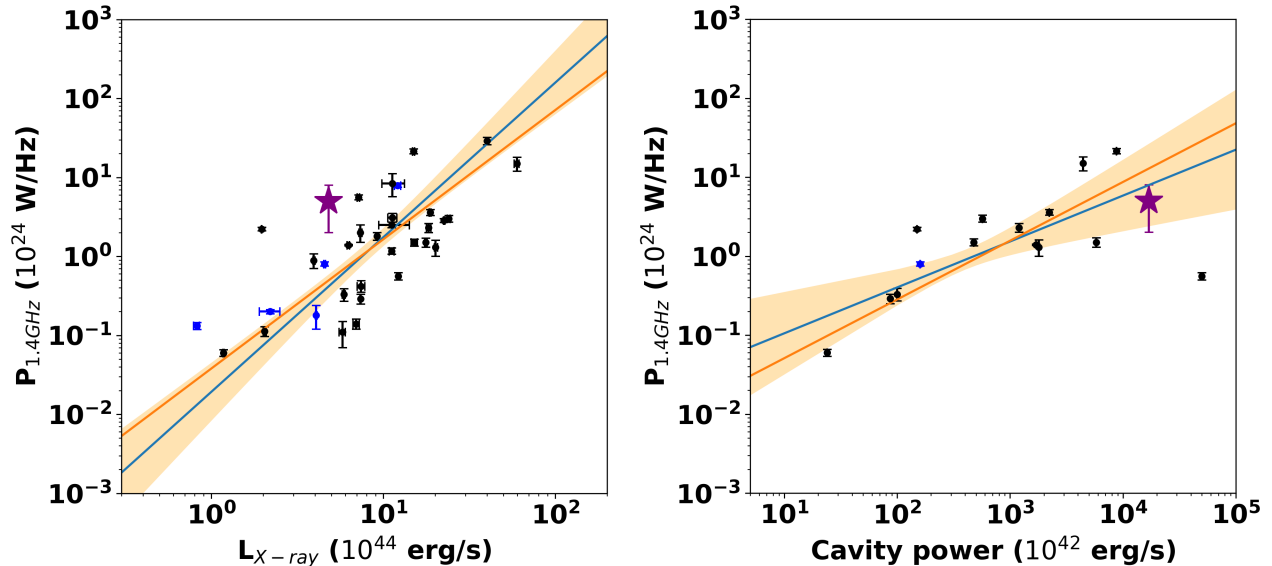


Fig. 2.7. Comparison between the properties of 33 mini-halos listed in Richard-Laferrrière et al. (2020) (blue are candidate or uncertain mini-halos and black are confirmed mini-halos as identified in the publication) and the properties of the diffuse emission detected in the current study in the MS0735 system (purple star). The best-fit lines using the BCES-orthogonal (blue lines) and the BCES-bisector (orange lines) methods are displayed. The 95% confidence regions of the best-fit relation for the BCES-orthogonal method are also shown as the orange regions in both panels. In both panels, the best-fit lines, as well as the 95% confidence regions, were fitted using the 33 mini-halos presented in Richard-Laferrrière et al. (2020) (excluding the purple point for MS0735). **Left:** radio power ($P_{1.4\text{GHz}}$) and X-ray luminosity inside a radius of 600 kpc ($L_{X\text{-ray}}$) plane. **Right:** radio power ($P_{1.4\text{GHz}}$) and X-ray cavity power plane.

this structure is related to a mini-halo. For now, we propose to classify it as a candidate mini-halo.

2.4.4. Implications for our understanding of mini-halos

MS0735 is a cluster with extremely powerful central AGN that offers a unique opportunity to investigate the relationship between AGN feedback and mini-halos in cool core clusters.

The result of our study argues in favor of the hypothesis that there is a direct connection between AGN feedback and mini-halo formation (Richard-Laferrrière et al. 2020). This is well supported by the high radio power of $P_{\text{excess}, 1.4 \text{ GHz}} = (5 \pm 3) \cdot 10^{24} \text{ W/Hz}$ (see figure 2.7) and the large-scale (see bottom middle panel P-band image of figure 2.2) of the discovered structure. Indeed, because MS0735 hosts an extremely powerful central AGN, the mini-halo in this system would be expected to be large and powerful under the hypothesis of a link between AGN feedback and mini-halo formation.

Moreover, there is a seemingly good correspondence between the radio jets and the overall shape of the mini-halo candidate which is more extended towards the axis of the jets. This also supports the hypothesis that AGN feedback is directly related to mini-halo formation (Giacintucci et al. 2019).

However, we argue that higher spatial resolution combined with similar or better flux density sensitivity observations are required to properly confirm our result. The Next Generation Very Large Array (ngVLA) or the Square Kilometre Array (SKA) will be ideal instruments to conduct such follow-up investigation (Gitti et al. 2014).

2.5. Concluding remarks

We have detected a diffuse extended radio structure associated with the strong cool core massive galaxy cluster MS0735 using 5 hours of JVLA P-band (230-470 MHz) and 5 hours of JVLA L-band (1-2 GHz) radio data. The detected structure has a radio power scaled at 1.4 GHz of $P_{\text{excess}, 1.4 \text{ GHz}} = (5 \pm 3) \cdot 10^{24} \text{ W/Hz}$. It has a total extent of 910 kpc along the direction of the radio jets. Both these values are high for radio mini-halos. Moreover, the cluster exhibits mass, cavity power, X-ray luminosity, and radio power at 1.4 GHz consistent with previously derived mini-halo correlations.

Our spectral index map between 1.5 GHz and 350 MHz is consistent with the spectral index maps derived in Biava et al. (2021) and thus point out to a jet-related emission. Finally, the jet-related emission detected in Biava et al. (2021) has a flux density scaled at 330 MHz consistent with our newly detected emission, which further reinforces the hypothesis that our detection could be a 1.5 GHz counterpart to their jet-related emission. We thus aren't able to conclude with certainty on the nature of the structure that was detected and propose to classify this source as a candidate mini-halo.

Our study showcase the importance of having a good combination of deep observations and high spatial resolution, especially when investigating a cluster with such large radio jets. We however point out that LOFAR didn't have the required flux density sensitivity to detect the expected mini-halo structure in MS0735 and that our observations with the JVLA didn't have the required spatial resolution to confidently conclude on the nature of the detected emission. As previously stated, instruments like the ngVLA or the SKA will be ideal to probe systems like MS0735 by combining very high sensitivity to flux density and spatial resolution. The SKA phase 2 is expected to be able to detect up to ~ 1900 mini-halos at redshifts $z < 0.6$ (Gitti et al. 2014).

Acknowledgements

We thank Laura Birzan and Brian McNamara for supplying the 327 MHz A configuration VLA image that was presented in McNamara et al. (2009) and was processed as part of Birzan

et al. (2010). We also thank the editors and the anonymous referee for providing helpful comments.

T.B. acknowledges financial support from the physics department of the Université de Montréal. J.H.-L. acknowledges support from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) via the Discovery grant program, as well as the Canada Research Chair program.

Références bibliographiques

Ahnen, M. L., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Antoranz, P., Babic, A., Banerjee, B., Bangale, P., de Almeida, U. B., Barrio, J. A., González, J. B., Bednarek, W., Bernardini, E., Biasuzzi, B., Biland, A., Blanch, O., Bonnefoy, S., Bonnoli, G., Borracci, F., Bretz, T., Buson, S., Carmona, E., Carosi, A., Chatterjee, A., Clavero, R., Colin, P., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., Da Vela, P., Dazzi, F., De Angelis, A., De Lotto, B., Wilhelmi, E. d. O., Mendez, C. D., Di Pierro, F., Domínguez, A., Prester, D. D., Dorner, D., Doro, M., Einecke, S., Glawion, D. E., Elsaesser, D., Fernández-Barral, A., Fidalgo, D., Fonseca, M. V., Font, L., Frantzen, K., Fruck, C., Galindo, D., López, R. J. G., Garczarczyk, M., Terrats, D. G., Gaug, M., Giammaria, P., Godinović, N., Muñoz, A. G., Gora, D., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Hanabata, Y., Hayashida, M., Herrera, J., Hose, J., Hrupec, D., Hughes, G., Idec, W., Kodani, K., Konno, Y., Kubo, H., Kushida, J., La Barbera, A., Lelas, D., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., Lorenz, E., Majumdar, P., Makariev, M., Mallot, K., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Marcote, B., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Menzel, U., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Moralejo, A., Moretti, E., Nakajima, D., Neustroev, V., Niedzwiecki, A., Rosillo, M. N., Nilsson, K., Nishijima, K., Noda, K., Orito, R., Overkemping, A., Paiano, S., Palacio, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Paredes-Fortuny, X., Pedalletti, G., Persic, M., Poutanen, J., Moroni, P. G. P., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Garcia, J. R., Saito, T., Satalecka, K., Schultz, C., Schweizer, T., Sillanpää, A., Sitarek, J., Snidarić, I., Sobczynska, D., Stamerra, A., Steinbring, T., Strzys, M., Takalo, L., Takami, H., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Tesaro, D., Teshima, M., Thaele, J., Torres, D. F., Toyama, T., Treves, A., Acosta, M. V., Verguilov, V., Vovk, I., Ward, J. E., Will, M., Wu, M. H., Zanin, R., , , Pfrommer, C., Pinzke, A., and Zandanel, F. (2016). Deep observation of the NGC 1275 region with MAGIC: search of diffuse gamma-ray emission from cosmic rays in the Perseus cluster. *Astronomy & Astrophysics*, 589:A33. arXiv: 1602.03099.

- Akritas, M. G. and Bershad, M. A. (1996). Linear Regression for Astronomical Data with Measurement Errors and Intrinsic Scatter. *The Astrophysical Journal*, 470:706. arXiv: astro-ph/9605002.
- Biava, N., Brienza, M., Bonafede, A., Gitti, M., Bonnassieux, E., Harwood, J., Edge, A. C., Riseley, C. J., and Vantyghem, A. (2021). Constraining AGN duty cycle in the cool-core cluster MS 0735.6+7421 with LOFAR data. *arXiv:2104.08294 [astro-ph]*. arXiv: 2104.08294.
- Birzan, L., McNamara, B. R., Nulsen, P. E. J., Carilli, C. L., and Wise, M. W. (2010). Radiative Efficiency and Content of Extragalactic Radio Sources: Toward a Universal Scaling Relation Between Jet Power and Radio Power. *The Astrophysical Journal*, 709(1):546–546. arXiv: 0806.1929.
- Bravi, L., Gitti, M., and Brunetti, G. (2016). Do radio mini-halos and gas heating in cool-core clusters have a common origin? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 455(1):L41–L45.
- Cassano, R., Ettori, S., Brunetti, G., Giacintucci, S., Pratt, G. W., Venturi, T., Kale, R., Dolag, K., and Markevitch, M. (2013). Revisiting scaling relations for giant radio halos in galaxy clusters. *The Astrophysical Journal*, 777(2):141. arXiv: 1306.4379.
- Cohen, A. S., Clarke, T. E., Feretti, L., and Kassim, N. E. (2005). Resolving the Steep Spectrum Emission in the Central Radio Source in ZwCl 0735.7+7421. *The Astrophysical Journal*, 620(1):L5–L8. arXiv: astro-ph/0501564.
- Cornwell, T. J., Golap, K., and Bhatnagar, S. (2008). The non-coplanar baselines effect in radio interferometry: The W-Projection algorithm. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2(5):647–657. arXiv: 0807.4161.
- Donahue, M., Stocke, J. T., and Gioia, I. M. (1992). Distant cooling flows. *The Astrophysical Journal*, 385:49.
- Fabian, A. C., Sanders, J. S., Allen, S. W., Crawford, C. S., Iwasawa, K., Johnstone, R. M., Schmidt, R. W., and Taylor, G. B. (2003). A deep Chandra observation of the Perseus cluster: shocks and ripples. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344(3):L43–L47.
- Fabian, A. C., Walker, S. A., Russell, H. R., Pinto, C., Sanders, J. S., and Reynolds, C. S. (2017). Do sound waves transport the AGN energy in the Perseus cluster? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 464(1):L1–L5.
- Fujita, Y., Kohri, K., Yamazaki, R., and Kino, M. (2007). Nonthermal Emission Associated with Strong AGN Outbursts at the Centers of Galaxy Clusters. *The Astrophysical Journal*, 663(2):L61–L64. arXiv: 0705.4284.
- Gendron-Marsolais, M., Hlavacek-Larrondo, J., van Weeren, R. J., Clarke, T., Fabian, A. C., Intema, H. T., Taylor, G. B., Blundell, K. M., and Sanders, J. S. (2017). Deep 230-470 MHz VLA Observations of the mini-halo in the Perseus Cluster. *Monthly Notices of the*

- Royal Astronomical Society*, 469(4):3872–3880. arXiv: 1701.03791.
- Giacintucci, S., Markevitch, M., Brunetti, G., Cassano, R., and Venturi, T. (2011). A radio minihalo in the extreme cool-core galaxy cluster RXCJ1504.1-0248. *Astronomy & Astrophysics*, 525:L10. arXiv: 1011.3141.
- Giacintucci, S., Markevitch, M., Cassano, R., Venturi, T., Clarke, T. E., and Brunetti, G. (2017). Occurrence of radio minihalos in a mass-limited sample of galaxy clusters. *The Astrophysical Journal*, 841(2):71. arXiv: 1701.01364.
- Giacintucci, S., Markevitch, M., Cassano, R., Venturi, T., Clarke, T. E., Kale, R., and Cuciti, V. (2019). Expanding the sample of radio minihalos in galaxy clusters. *The Astrophysical Journal*, 880(2):70. arXiv: 1906.07087.
- Giacintucci, S., Markevitch, M., Venturi, T., Clarke, T., Cassano, R., and Mazzotta, P. (2013). New detections of radio minihalos in cool cores of galaxy clusters. *The Astrophysical Journal*, 781(1):9. arXiv: 1311.5248.
- Gitti, M. (2016). Radio mini-halos and AGN heating in cool core clusters of galaxies. *arXiv:1602.08312 [astro-ph]*. arXiv: 1602.08312.
- Gitti, M., Ferrari, C., Domainko, W., Feretti, L., and Schindler, S. (2007). Discovery of diffuse radio emission at the center of the most X-ray-luminous cluster RX J1347.5-1145. *Astronomy & Astrophysics*, 470(3):L25–L28. arXiv: 0706.3000.
- Gitti, M., Tozzi, P., Brunetti, G., Cassano, R., Dallacasa, D., Edge, A., Ettori, S., Feretti, L., Ferrari, C., Giacintucci, S., Giovannini, G., Hogan, M., and Venturi, T. (2014). The SKA view of cool-core clusters: evolution of radio mini-halos and AGN feedback. *arXiv:1412.5664 [astro-ph]*. arXiv: 1412.5664.
- Grandi, S. D. and Molendi, S. (2009). Metal Abundances in the Cool-Cores of Galaxy Clusters. page 14.
- Hofmann, F., Sanders, J. S., Nandra, K., Clerc, N., and Gaspari, M. (2016). Thermodynamic perturbations in the X-ray halo of 33 clusters of galaxies observed with *Chandra* ACIS. *Astronomy & Astrophysics*, 585:A130.
- Ignesti, A., Brunetti, G., Gitti, M., and Giacintucci, S. (2020). Radio and X-ray connection in radio mini-halos: implications for hadronic models. *Astronomy & Astrophysics*, 640:A37. arXiv: 2006.09254.
- Kalberla, P. M. W., Burton, W. B., Hartmann, D., Arnal, E. M., Bajaja, E., Morras, R., and Pöppel, W. G. L. (2005). The Leiden/Argentine/Bonn (LAB) Survey of Galactic HI: Final data release of the combined LDS and IAR surveys with improved stray-radiation corrections. *Astronomy & Astrophysics*, 440(2):775–782.
- Kirkpatrick, C. C., Gitti, M., Cavagnolo, K. W., McNamara, B. R., David, L. P., Nulsen, P. E. J., and Wise, M. W. (2009). Direct evidence for outflow of metal-enriched gas along the radio jets of Hydra A. *The Astrophysical Journal*, 707(1):L69–L72.

- M. Donahue and J. T. Stocke (1995). ROSAT observations of distant clusters of galaxies. *The Astrophysical Journal*.
- Markevitch, M. and Vikhlinin, A. (2007). Shocks and cold fronts in galaxy clusters. *Physics Reports*, 443(1):1–53. arXiv: astro-ph/0701821.
- Mazzotta, P. and Giacintucci, S. (2008). Do radio core-halos and cold fronts in non major merging clusters originate from the same gas sloshing? *The Astrophysical Journal*, 675(1):L9–L12. arXiv: 0801.1905.
- McMullin, J. P., Waters, B., Schiebel, D., Young, W., and Golap, K. (2007). CASA Architecture and Applications. page 4.
- McNamara, B. R., Kazemzadeh, F., Rafferty, D. A., Birzan, L., Nulsen, P. E. J., Kirkpatrick, C. C., and Wise, M. W. (2009). An Energetic AGN Outburst Powered by a Rapidly Spinning Supermassive Black Hole or an Accreting Ultramassive Black Hole. *The Astrophysical Journal*, 698(1):594–605. arXiv: 0811.3020.
- McNamara, B. R. and Nulsen, P. E. J. (2012). Mechanical feedback from active galactic nuclei in galaxies, groups and clusters. *New Journal of Physics*, 14(5):055023.
- McNamara, B. R., Nulsen, P. E. J., Wise, M. W., Rafferty, D. A., Carilli, C., Sarazin, C. L., and Blanton, E. L. (2005). The heating of gas in a galaxy cluster by X-ray cavities and large-scale shock fronts. *Nature*, 433(7021):45–47.
- Nemmen, R. S., Georganopoulos, M., Guiriec, S., Meyer, E. T., Gehrels, N., and Sambruna, R. M. (2012). A Universal Scaling for the Energetics of Relativistic Jets From Black Hole Systems. *Science*, 338(6113):1445–1448. arXiv: 1212.3343.
- Pfrommer, C. and Enßlin, T. A. (2004). Constraining the population of cosmic ray protons in cooling flow clusters with γ -ray and radio observations: Are radio mini-halos of hadronic origin? *Astronomy & Astrophysics*, 413(1):17–36.
- Prasow-Émond, M., Hlavacek-Larrondo, J., Rhea, C. L., Latulippe, M., Gendron-Marsolais, M., Richard-Laferrrière, A., Sanders, J. S., Edge, A. C., Allen, S. W., Mantz, A., and von der Linden, A. (2020). A multiwavelength study of the massive cool core cluster MACS J1447.4+0827.
- Rau, U. and Cornwell, T. J. (2011). A multi-scale multi-frequency deconvolution algorithm for synthesis imaging in radio interferometry. *Astronomy & Astrophysics*, 532:A71. arXiv: 1106.2745.
- Richard-Laferrrière, A., Hlavacek-Larrondo, J., Nemmen, R. S., Rhea, C. L., Taylor, G. B., Prasow-Émond, M., Gendron-Marsolais, M., Latulippe, M., Edge, A. C., Fabian, A. C., Sanders, J. S., Hogan, M. T., and Demontigny, G. (2020). On the relation between mini-halos and AGN feedback in clusters of galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 499(2):2934–2958. arXiv: 2007.01306.
- Simionescu, A., Werner, N., Böhringer, H., Kaastra, J. S., Finoguenov, A., Brüggén, M., and Nulsen, P. E. J. (2009). Chemical enrichment in the cluster of galaxies Hydra A.

Astronomy & Astrophysics, 493(2):409–424.

- van Weeren, R. J., Intema, H. T., Lal, D. V., Andrade-Santos, F., Brüggen, M., de Gasperin, F., Forman, W. R., Hoeft, M., Jones, C., Nuza, S. E., Röttgering, H. J. A., and Stroe, A. (2014). A distant radio mini-halo in the Phoenix galaxy cluster. *The Astrophysical Journal*, 786(2):L17.
- Vantyghem, A. N., McNamara, B. R., Russell, H. R., Main, R. A., Nulsen, P. E. J., Wise, M. W., Hoekstra, H., and Gitti, M. (2014). Cycling of the powerful AGN in MS 0735.6+7421 and the duty cycle of radio AGN in Clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 442(4):3192–3205. arXiv: 1405.6208.
- von der Linden, A., Best, P. N., Kauffmann, G., and White, S. D. M. (2007). How special are Brightest Group and Cluster Galaxies? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 379(3):867–893. arXiv: astro-ph/0611196.
- Zandanel, F., Pfrommer, C., and Prada, F. (2014). On the physics of radio haloes in galaxy clusters: scaling relations and luminosity functions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 438(1):124–144.
- Zhuravleva, I., Churazov, E., Schekochihin, A. A., Allen, S. W., Arévalo, P., Fabian, A. C., Forman, W. R., Sanders, J. S., Simionescu, A., Sunyaev, R., Vikhlinin, A., and Werner, N. (2014). Turbulent heating in galaxy clusters brightest in X-rays. *Nature*, 515(7525):85–87.
- ZuHone, J. A., Markevitch, M., Brunetti, G., and Giacintucci, S. (2013). Turbulence and radio mini-halos in the sloshing cores of galaxy clusters. *The Astrophysical Journal*, 762(2):78.

Chapitre 3

Conclusions

Les amas de galaxies sont des systèmes possédant des dynamiques complexes. L'étude multi-longueur d'onde de ces objets, notamment en rayons-X et en radio, permet de dresser un portrait exhaustif des phénomènes qui se produisent dans leur environnement. Parmi les différentes catégories d'émission radio, les mini-halos ont une origine qui reste encore incertaine. Deux hypothèses principales sont présentées dans la littérature pour expliquer la (ré-)accélération des particules responsables de l'émission synchrotron des mini-halos. La première est la (ré-)accélération hadronique causée par les collisions entre des protons cosmiques et les protons du ICM. La deuxième est la (ré-)accélération turbulente d'une population de particules fossiles. La deuxième hypothèse est celle qui est la mieux acceptée dans la littérature. Il reste toutefois à déterminer quelle est la source des particules fossiles qui sont (ré-)accélérées via la turbulence, bien que le AGN central semble être un choix logique. Aussi, la source de la turbulence n'est pas déterminée hors de tout doute. En effet, plusieurs études supportent l'idée d'une turbulence engendrée par les fusions mineures au sein de l'amas (p. ex. Mazzotta and Giacintucci 2008), alors que d'autres études pointent vers l'AGN central comme engendrant directement la (ré-)accélération des particules fossiles (p. ex. Richard-Laferrrière et al. 2020). Si tel est le cas, alors la rétroaction de l'AGN central a un impact encore plus grand sur la dynamique des amas que ce qui a été compris jusqu'à ce jour.

L'objectif de ce mémoire était d'explorer l'hypothèse du lien direct entre l'AGN central et la formation du mini-halo. Pour ce faire, nous devons choisir un amas de galaxies possédant un AGN central extrêmement puissant (cas limite en terme de rétroaction énergétique) et qui est un amas à coeur froid massif (cible idéale pour découvrir un mini-halo). Notre choix s'est arrêté sur MS 0735.6+7421 qui a été étudié en profondeur à de multiples reprises. Toutefois, cet amas n'avait pas été imagé en radio depuis l'amélioration de l'électronique sur le JVLA en 2011 qui a permis d'améliorer la sensibilité du télescope aux structures radio

diffuses ¹. Cette amélioration était susceptible de permettre la découverte d'un mini-halo qui devrait, selon la compréhension actuelle, être présent dans cet amas. Nous avons donc obtenu 10 heures d'observation sur le JVLA (5 heures en bande P configuration C et 5 heures en bande L configuration C) et avons effectué une étude radio complète de l'amas. Dans un premier temps, nous avons produit quatre images radio (en bandes P et L et en maximisant la détection d'émission diffuse ou la résolution spatiale) permettant d'imager une nouvelle structure diffuse dans l'amas. Nous avons par la suite comparé le flux radio de notre observation en bande P configuration C avec une vieille image de l'amas en bande P et configuration A (voir McNamara et al. 2009). Cette comparaison avait pour objectif de déterminer le flux radio supplémentaire contenu dans notre image comparé à la plus vieille image de l'amas. Cette comparaison a permis de quantifier la puissance radio à 1.4 GHz de l'émission supplémentaire que nous avons détectée : $P_{\text{excess}, 1.4 \text{ GHz}} = (5 \pm 3) \cdot 10^{24} \text{ W/Hz}$. Nous avons par la suite comparé les propriétés de cette nouvelle structure diffuse avec les propriétés des mini-halos connus. Cette comparaison a permis de mettre en évidence que la nouvelle structure détectée a des propriétés comparables aux plus lumineux des mini-halos. Toutefois, en raison du manque de résolution spatiale de nos données en bande P, il n'est pas possible de conclure hors de tout doute que la nouvelle émission détectée correspond à un mini-halo. Nous proposons donc de catégoriser cette émission comme étant un candidat mini-halo. Dans le cadre de l'article que nous publierons, nous avons aussi produit une carte de l'indice spectral de l'amas qui est en accord avec les cartes d'indice spectral publiées dans Biava et al. (2021). Nous avons aussi comparé l'émission rayons-X de l'amas, une carte de son abondance ainsi qu'une carte de sa température avec l'image radio à plus haute résolution spatiale que nous avons produite. Nos résultats correspondent avec le portrait qui avait été dressé de MS 0735.6+7421 dans la littérature, mais nous détectons en plus une nouvelle émission diffuse dont les propriétés sont typiques pour un mini-halo puissant. Notre étude supporte donc l'hypothèse qu'il existe un lien fondamental entre la rétroaction énergétique de l'AGN central ainsi que la formation du mini-halo. En effet, MS 0735.6+7421 possède l'un des AGNs les plus puissants et la structure radio diffuse que nous détectons est comparable aux plus grands et aux plus lumineux mini-halos connus.

De plus, Biava et al. (2021) ont récemment présenté des images de MS 0735.6+7421 à haute résolution spatiale à l'aide de données LOFAR à 144 MHz, mais leurs observations n'avaient pas une suffisamment grande sensibilité au flux ou une capacité d'imager des structures assez larges pour détecter une structure diffuse s'apparentant à un mini-halo. Pour le futur de l'investigation du lien entre la rétroaction centrale des AGNs et la formation de mini-halos, il faudra utiliser des données combinant résolution spatiale et sensibilité aux structures diffuses larges. Le SKA, dont la mise en service est prévue après 2024, sera un outil crucial pour observer des systèmes comme MS 0735.6+7421. Le SKA permettra de

¹<http://www.aoc.nrao.edu/evla/>

confirmer la présence d'un mini-halo dans cet amas et d'améliorer la compréhension de sa distribution spatiale. Le SKA permettra aussi de détecter de nouveaux mini-halos dans des amas possédant un AGN central puissant. En fait, selon Gitti et al. (2014), le SKA phase 2 permettra de découvrir approximativement 1900 mini-halos à des redshift $z < 0,6$ ce qui permettra de mettre au clair la source de turbulence permettant la (ré-)accélération des populations de particules responsables de l'émission radio des mini-halos.

Annexe A

Autres publications à titre de co-auteur

A.1. The First High-Contrast Images of X-Ray Binaries: Detection of Candidate Sub-Stellar and Stellar Companions in the γ Cas Analog RX J1744.7–2713

Auteurs : Prasow-Émond M., Hlavacek-Larrondo J., Fogarty K., Rameau J., Guité L.-S., Mawet D., Gandhi P., Rao A., Steiner J. F., Lafrenière D., Fabian A., Walton D. J., Weiss L. M., Doyon R., Artigau É., Rhea C. L., Cardinal O., Bégin T., Vigneron B., Naud M.-E.

Contribution de Théophile Bégin :

Suggestions et commentaires relatifs à l'analyse et à la discussion.

A.2. A Machine Learning Approach to Integral Field Unit Spectroscopy Observations: III. Disentangling Multiple Components in HII regions

Auteurs : Rhea C., Rousseau-Nepton L., Prunet S., Hlavacek-Larrondo J., Martin R.-P., Grasha K., Asari N. V., Bégin T., Vigneron B.

Contribution de Théophile Bégin :

Suggestions et commentaires relatifs à l'analyse et à la discussion.

Annexe B

Congrès où l'étudiant a présenté ses résultats

B.1. Rencontre annuelle de la Société Canadienne d'Astronomie (CASCA)

Médium: Présentation et affiche

Titre: Discovery of extended radio emission in the galaxy cluster MS 0735.6+7421

Lieu: En ligne en raison de la pandémie de Covid-19

Année: 2020 et 2021

Auteurs: T. Bégin, J. Hlavacek-Larrondo, M.L Gendron-Marsollais, B. McNamara, R. van Weeren

B.2. Rencontre annuelle de la Société Américaine d'Astronomie (AAS)

Médium: Affiche

Titre: Discovery of extended radio emission in the galaxy cluster MS 0735.6+7421

Lieu: En ligne en raison de la pandémie de Covid-19

Année: 2021

Auteurs: T. Bégin, J. Hlavacek-Larrondo, M.L Gendron-Marsollais, B. McNamara, R. van Weeren

Annexe C

Demandes de temps d'observation

Télescope (Instrument)	Identifiant	Temps	Cible	Rôle	Investigateur principal (PI)	Année
JVLA	21A-255	20 heures	Lyra Complex	P.I.	Théophile Bégin	2020
OMM	2020A	5 heures	Lyra Complex	Co-I	Carter Rhea	2020
JVLA	20A-198	20 heures	Coma Cluster	Phase 2	Julie Hlavacek-Larrondo	2019

Tableau C.1. Liste des demandes de temps d'observation