

Université de Montréal

**Analyse optique à très haute résolution spectrale de la
galaxie NGC 1275**

par

Benjamin Vigneron

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 Astrophysique et Astronomie

29 Août 2022

Université de Montréal

Faculté des arts et des sciences

Ce mémoire intitulé

Analyse optique à très haute résolution spectrale de la galaxie NGC 1275

présenté par

Benjamin Vigneron

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Yashar Hezaveh

(président-rapporteur)

Julie Hlavacek-Larrondo

(directeur de recherche)

Tracy Webb

(codirecteur)

Nicole St-Louis

(membre du jury)

Résumé

Les galaxies centrales d'amas de galaxies constituent un environnement particulier pouvant parfois être entouré, dans le domaine optique, d'un système filamentaire complexe et étendu. L'étude de ces structures permet de mieux comprendre le phénomène de rétroaction impliqué au sein de ces galaxies et lié à la présence d'un trou noir supermassif en leur centre. La formation de jets et de bulles remplis d'émission radio conduit à réchauffer et sculpter le milieu intra-amas environnant. Ce réchauffement empêche ainsi le refroidissement du gaz intra-amas et donc la formation stellaire.

Les filaments visibles dans le domaine optique ne constituent qu'une partie de la structure multiphasique qui entoure la galaxie centrale d'amas. En effet, plusieurs observations en rayons X du gaz intra-amas et radio du gaz moléculaire montrent clairement des corrélations spatiales entre toutes ces types d'émissions. Néanmoins, plusieurs points restent encore incertains concernant ces nébuleuses filamentaires. Deux modèles principaux s'opposent ainsi pour tenter d'expliquer l'origine de leur formation et le phénomène d'ionisation du gaz n'est toujours pas déterminé avec certitude.

Dès lors, l'étude de la nébuleuse filamentaire entourant la galaxie centrale de l'amas de Persée, NGC 1275, au moyen d'observations à très haute résolution spectrale à l'aide de l'instrument SITELLE (Spectromètre imageur à transformée de Fourier pour l'étude en long et en large de raies d'émission), se révèle fondamentale. Ce spectromètre imageur à transformée de Fourier installé au télescope Canada-France-Hawaï dispose de caractéristiques exceptionnelles nous permettant d'étudier la nébuleuse filamentaire de NGC 1275 dans son entièreté. En effet, le champ de vue extrêmement large de SITELLE ($11' \times 11'$) ainsi que sa capacité d'atteindre de très hautes résolutions spectrales en font un atout de choix pour l'étude de telle structure.

Dans ce mémoire, nous avons analysé de nouvelles observations de NGC 1275 obtenues avec SITELLE, à une très haute résolution spectrale de $R = \lambda/\Delta\lambda = 7000$. L'analyse de ces observations a permis de renouveler les cartes de vitesse, flux et dispersion en vitesse au sein de la nébuleuse filamentaire, démontrant ainsi que la région centrale semble plus dynamique qu'anticipée auparavant. De plus, grâce à la très haute résolution spectrale atteinte au sein de ces données, une analyse détaillée des raies d'émission de [SII] a pu être menée, révélant

dès lors plus d'informations sur la densité du gaz au sein des filaments. L'étude de ratio de raies permet également de mieux cerner le mécanisme d'ionisation ayant lieu au sein de cette structure. Finalement, cette étude de données à très haute résolution spectrale des filaments permettra à terme d'obtenir les diagrammes BPT offrant ainsi une meilleure compréhension du phénomène d'ionisation. Une étude sera également menée sur les multiples composantes en vitesse visible localement dans la région centrale des filaments et pouvant être résolues. Enfin, ces données serviront de base pour les futures observations en rayon X de l'instrument XRISM (*X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission*).

Mots-clés : amas de galaxies - galaxies - noyaux actifs de galaxies - nébuleuse filamentaire
- trou noir supermassif - astronomie optique - spectro-imagerie à transformée de Fourier

Abstract

The central cluster galaxies constitute a particular environment that can sometimes be surrounded, in the optical domain, by a complex and extended filamentary system. The study of these structures makes it possible to better understand the feedback phenomenon involved within these galaxies and linked to the presence of a supermassive black hole in their center. The formation of jets, streams and bubbles filled with radio emissions that it entails leads to heating and sculpting the surrounding intra-cluster medium. This heating thus prevents the cooling of the gas by emission and therefore the formation of stars. Thus, the filaments visible in the optical domain are only part of the multiphase structure that surrounds the central cluster galaxy. Indeed, several X-ray and radio observations clearly show spatial correlations between all these types of emissions. Nevertheless, several points still remain uncertain concerning filamentary nebulae. Two main models thus oppose each other in an attempt to explain the origin of their formation, either through precipitation or lifted up in the wake of radio bubbles, and the phenomenon of gas ionization is still not determined with certainty.

Therefore, the study of the filamentary nebula surrounding the central cluster galaxy of the Perseus cluster, NGC 1275, by means of very high spectral resolution observations using the SITELLE instrument (Spectromètre imageur à transformée de Fourier pour l'étude en long et en large de raies d'émission), can yield fundamental results that will shed light on the origin and evolution of these filamentary nebulae. SITELLE is a Fourier transform imaging spectrometer installed at the Canada-France-Hawaii telescope that has exceptional characteristics allowing us to study the filamentary nebula of NGC 1275 in its entirety. Indeed, the extremely wide field of view of SITELLE ($11' \times 11'$) as well as its capacity to reach very high spectral resolutions make it an instrument of choice for the study of such structures.

Here, we present the analysis of new observations of NGC 1275 taken with SITELLE at very high spectral resolution of $R = \lambda/\Delta\lambda = 7000$. The analysis of these observations has thus made it possible to produce new maps of velocity, flux and velocity dispersion within the filamentary nebula, thus demonstrating that the central region seems more dynamic than previously anticipated. In addition, thanks to the very high spectral resolution achieved

within these data, a detailed analysis of the emission lines of [SII] could be carried out, revealing more information on the density of the gas within the filaments. The study of line ratios also makes it possible to better understand the ionization mechanism taking place within this structure. Finally, this study of very high spectral resolution data from the filaments will ultimately make it possible to obtain BPT diagrams, thus offering a better understanding of the ionization phenomenon. The multiple velocity components, locally visible and resolved in the central region of the filaments, will also be studied. Finally, these data will serve as a basis for future X-ray observations from the XRISM (*X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission*) instrument.

Keywords: galaxy clusters - galaxies - active galactic nuclei - filamentary nebula - super-massive black hole - optical astronomy - Fourier transform spectro-imaging

Table des matières

Résumé	v
Abstract	ix
Table des figures	xvii
Liste des sigles et des abréviations	xix
Remerciements	xxiii
Chapitre 1. Mise en contexte théorique	1
1.1. Les amas de galaxies	1
1.2. Les galaxies centrales d'amas de galaxies	2
1.3. Le milieu intra-amas	4
1.3.1. Refroidissement du milieu intra-amas	5
1.3.2. Précipitation du milieu intra-amas	6
1.4. Les noyaux actifs de galaxies	8
1.4.1. Trou noir supermassif	9
1.4.2. Disque d'accrétion	11
1.4.3. Jets	13
1.4.4. Région de raies larges	13
1.4.5. Tore moléculaire	14
1.4.6. Région de raies minces	14
1.4.7. Problèmes liés à Urry & Padovani (1995)	14
1.5. Rétroaction des noyaux actifs de galaxies	15
1.5.1. Mode cinétique	16
1.6. La nébuleuse multiphasique entourant NGC 1275	17
1.6.1. Structure	18
1.6.2. Modèles de formation	18

1.6.3.	Mécanismes d'ionisation	19
1.6.4.	Formation stellaire	21
1.7.	Spectromètre imageur à transformée de Fourier	22
1.7.1.	Fonctionnement général d'un interféromètre	22
1.7.2.	Historique des instruments à intégrale de champ	23
1.7.3.	SITELLE	24
1.8.	Description de ce mémoire	27
1.8.1.	Objectifs	27
1.9.	Déclaration de l'étudiant	27
	Bibliographie	28
Chapter 2.	Expanding on the Nature and Kinematics of the Optical Filamentary Nebula of NGC 1275 with High Spectral Resolution Observations	35
	Abstract	36
2.1.	Introduction	37
2.2.	Data Analysis	40
2.2.1.	Observations with SITELLE	40
2.2.2.	Background Subtraction	41
2.2.3.	Weighted Voronoi Tessellation	41
2.2.4.	Masking Procedure	43
2.2.5.	Emission Line Fitting Procedure	44
2.2.6.	Multiple Emission Components	45
2.2.7.	[SII] Emission Lines Fitting	46
2.3.	Results and discussion	46
2.3.1.	Ionization Process	46
2.3.2.	High versus Low Spectral Resolution Comparison	49
2.3.3.	Central Disk	50
2.3.4.	Velocity Dispersion	52
2.3.5.	Kinematic Structure	54
2.3.6.	Regions and Knots with Multiple Components Emission Lines	56
2.3.7.	Electronic Density	58

2.4. Conclusion.....	60
Acknowledgements.....	61
Software.....	61
Appendix A. Background Variability.....	63
Appendix B. Multiple Emission Line Components Spectra.....	65
Bibliography.....	67
Chapitre 3. Conclusions.....	73
3.1. Recherche à venir.....	74
Bibliographie.....	76
Annexe A. Autres Publications À Titre de Co-Auteur.....	77
A.1. The First High-contrast Images of X-Ray Binaries : Detection of Candidate Companions in the γ Cas Analog RX J1744.7-2713.....	77
A.2. A Machine-learning Approach to Integral Field Unit Spectroscopy Observations. III. Disentangling Multiple Components in H II Regions.....	77
A.3. LUCI : A Python Package for SITELLE Spectral Analysis.....	77
Annexe B. Congrès où l'étudiant a présenté ses résultats.....	78
B.1. Rencontre annuelle de la Société Canadienne d'Astronomie (CASCA).....	78
B.2. Rencontre annuelle du Centre de Recherche en Astrophysique du Québec (CRAQ).....	78
B.3. Poster Symposium Targeting Early-career Researchers (PoSTER).....	78
B.4. Symposium Annuel de Physique pour un Avenir en Recherche et en Industrie (SAPHARI).....	79
B.5. Centenaire du Département de Physique de l'Université de Montréal.....	79
B.6. Galaxy Cluster Formation II (GCF-II).....	79
B.7. Rencontre annuelle de la Société Canadienne d'Astronomie (CASCA).....	80
B.8. Symposium Annuel de Physique pour un Avenir en Recherche et en Industrie (SAPHARI).....	80

Table des figures

1.1	Image de l'amas de galaxies Abell 1689.....	2
1.2	Image de filaments de gaz ionisés dans l'optique.....	3
1.3	Comparaison entre les représentations de brillances de surface en rayons X de deux amas de galaxies.....	6
1.4	Représentation schématisée du modèle de précipitation de l'ICM.....	8
1.5	Représentation schématisée du modèle d'unification des AGNs.....	9
1.6	Image du trou noir supermassif au centre de la galaxie M87.....	10
1.7	Relation M- σ	12
1.8	Comparaison entre la puissance des jets et la luminosité en rayons X.....	17
1.9	Structure multiphasique autour de NGC 1275.....	20
1.10	Représentation schématisée de SITELLE.....	26
2.1	Champs de vue complet de SITELLE sur une image composite de NGC 1275....	40
2.2	Carte des régions utilisées pour l'analyse de données.....	42
2.3	Exemple de tessellation de Voronoï.....	43
2.4	Masque utilisé pour les données SITELLE.....	44
2.5	Carte de flux, ratio des raies H α et [SII], ratio des raies H α et [NII] et ses valeurs moyennes et calculées au sein d'anneaux de 1500 pixels.....	47
2.6	Comparaison entre les spectres à haute et basse résolution.....	49
2.7	Comparaison spatiale entre émissions optiques, radios et rayons X.....	51
2.8	Carte de la dispersion en vitesse et ses valeurs moyennes et mesurées au sein d'anneaux de 1500 pixels.....	53
2.9	Carte de la vitesse et ses valeurs moyennes et mesurées au sein d'anneaux de 1500 pixels.....	54
2.10	Carte de vitesse comparée entre optique et radio.....	55
2.11	Profils de vitesses des filaments.....	57

2.12	Cartes de flux, vitesse et dispersion des raies [SII].	58
2.13	Carte de ratio des raies de [SII] et sa moyenne au travers des filaments	59
A.1	Comparaison de spectres de fond.	63
B.1	Spectre à composantes d'émission multiples.	66

Liste des sigles et des abréviations

AGN: Noyaux centraux actifs de galaxies, de l'anglais *Active Galactic Nuclei*.

ALMA: *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*.

AURA: *Association of Universities for Research in Astronomy*.

BCG: Galaxies les plus dominantes d'amas, de l'anglais *Brightest Cluster Galaxy*.

CCC: Amas à cœur froid, de l'anglais *Cool Core Cluster*.

CFHT: *Canada-France-Hawaii Telescope*.

CGM: Milieu circum-galactique, de l'anglais *Circumgalactic Medium*.

DEC: Déclinaison, de l'anglais *Declination*.

ESA: *European Space Agency*.

HV: Haute vitesse, de l'anglais *High Velocity*.

ICM: Milieu intra-amas, de l'anglais *Intra Cluster Medium*.

IR: Infrarouge.

ISF: Fonction spectrale instrumentale, de l'anglais *Instrumental Spectra Function*.

JHU: *John-Hopkins University*.

KPNO: *Kitt Peak National Observatory*.

LUCI: Pas de signification particulière, pipeline à usage général construit spécifiquement pour l'analyse de cubes de données SITELLE.

LV: Basse vitesse, de l'anglais *Low Velocity*.

MUSE: *Multi-Unit Spectroscopic Explorer*.

NASA: *National Aeronautics and Space Agency*.

NCC: Amas à cœur non-froid, de l'anglais *Non-Cool core Cluster*.

NGC: *New General Catalog*.

NRC: *National Research Center*.

RA: Ascension droite, de l'anglais *Right Ascension*.

SBH: Trou noir supermassif, de l'anglais *Supermassive Black Hole*.

SINFONI: *Spectrograph for Integral Field Observations in the Near Infrared*.

SITELLE: Spectromètre imageur à transformée de Fourier pour l'étude en long et en large de raies d'émission.

SMA: *Submillimeter Array*.

SNR: Rapport signal sur bruit, de l'anglais *Signal-to-Noise Ratio*.

STScI: *Space Telescope Science Institute*.

UV: Ultraviolet.

VLA: *Very Large Array*.

WIYN: Acronyme provenant du consortium regroupant les universités et organismes suivants : *University of Wisconsin-Madison, Indiana University, Yale University* et le *National Optical Astronomy Observatory*.

WVT: Tessellation de Voronoï pondérée, de l'anglais *Weighted Voronoi Tessellation*.

XRISM: *X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission*.

Remerciements

Je souhaite remercier tout particulièrement ma superviseuse, Julie Hlavacek-Larrondo. Tu m'as permis de réaliser une maîtrise en astrophysique malgré toutes les difficultés et tu m'as guidé dans la complexité du monde académique. Tes conseils et les opportunités que tu m'as offertes m'ont profondément appris et j'en suis réellement reconnaissant. Merci de m'avoir soutenu, répondu à mes questions et inquiétudes et de m'offrir la possibilité de poursuivre ma passion en réalisant un doctorat à tes côtés. Je me sens réellement privilégié de t'avoir comme superviseuse.

Je voudrais ensuite remercier les différents membres du groupe X-TRA qui m'ont accompagné et guidé dans cette aventure. Merci à Carter d'avoir toujours été là pour me soutenir dans l'analyse des données et dans les difficultés de la maîtrise. Merci à Myriam et Théo de m'avoir accueilli et aidé à mon arrivée dans le tumulte de la pandémie. Merci à David et Maria, mes fidèles compagnons de bureau, de me faire rire chaque jour. Un remerciement tout particulier à Marie-Lou pour m'avoir guidé au travers du système particulier qu'est NGC 1275.

Je remercie également les différents professeurs et chercheurs m'ayant permis d'effectuer des stages en astrophysique et de développer mes compétences d'analyse des données. Merci à Laurie Rousseau-Nepton de m'avoir fait découvrir la magie du fonctionnement du CFHT et d'avoir répondu à tout mes questionnements sur les données de SITELLE. Merci à Laurent Drissen de m'avoir pris sous son aile lors de mon baccalauréat et de m'avoir présenté Julie et ses recherches. Merci à Hélène Courtois de s'être souvenu de moi après tant d'années, lorsqu'un jeune collégien souhaitait découvrir le monde de la recherche en astrophysique.

Merci à Lucas, Boris et Amélie de m'avoir aidé durant le bac et de m'avoir permis de m'accepter et de grandir en tant qu'être humain. Merci à Rym-Jeanne, Emma, Mélaine, Astrid, Kévin et Valentin pour votre amitié constante et votre soutien même si la distance

rend cela difficile.

Je remercie tout particulièrement ma famille pour m'avoir soutenu inconditionnellement dans mes choix et dans mon parcours. Merci Maman pour ta gentillesse et ton écoute. Merci Papa pour ta passion des sciences et l'assiduité que tu m'as transmises. Merci à mes soeurs, Lucie et Sophie, de m'avoir toujours accepté et guidé dans les épreuves de la vie.

Merci à toi Guillaume. Pour ton amour, ton soutien inconditionnel et ton écoute dans les moments difficiles. Merci d'être entré dans ma vie et de me rendre heureux chaque jour. Le chaos de l'Univers fait vraiment bien les choses.

Finalement, un merci spécial à Voltaire, le chat de ma jeunesse, qui redeviendra poussière d'étoiles et à Amos, le chat de mon futur, qui commence tout juste à supporter ma présence.

Chapitre 1

Mise en contexte théorique

1.1. Les amas de galaxies

Un amas de galaxies (voir Figure 1.1) est un ensemble composé de plusieurs centaines, voire milliers, de galaxies toutes liées gravitationnellement entre elles. Nous parlerons plutôt de groupe de galaxies dans le cas d'un nombre plus réduit de galaxies liées. Ces ensembles peuvent également s'associer pour former des superamas, structures particulièrement larges, mais qui, au contraire des amas et des groupes, subissent davantage l'effet de l'expansion de l'Univers dans leur dynamique (Araya-Melo et al. 2009). Par conséquent, les amas sont les structures gravitationnellement liées les plus massives avec une masse variant entre 10^{13} et $10^{15} M_{\odot}$ (Girardi et al. 1998) et peuvent s'étendre sur des distances de quelques mégaparsecs.

Le processus menant à leur formation s'effectue selon un phénomène hiérarchique où plusieurs accrétions successives de groupes vont conduire à leur mise en place (e.g., Kravtsov & Borgani 2012). Du gaz ionisé, aussi appelé milieu intra-amas (ICM - "*intracluster medium*") compose une partie importante des amas de galaxies, soit entre 10 et 13% de leur masse totale. La matière sombre constitue cependant la composante majeure d'un amas, avec environ 80% de sa masse totale. Finalement, les galaxies ne contribuent que faiblement à la masse totale d'un amas, de l'ordre de 3 à 5%. Il est généralement possible d'observer au centre du puits de potentiel de l'amas une galaxie elliptique beaucoup plus massive et présentant notamment une forte luminosité. Ces galaxies centrales sont ainsi nommées galaxies les plus dominantes de l'amas (BCG - "*brightest cluster galaxy*").

Au sein de ce chapitre, nous allons étudier les diverses composantes et interactions se produisant dans les amas de galaxies. Dans un premier temps, une description des BCG sera réalisée à la section 1.2. Par la suite, une discussion sera faite à la section 1.3 sur l'ICM et les différents processus s'y produisant. La section 1.4 décrira chacun des éléments composant les noyaux actifs de galaxies (AGN - *Active Galactic Nuclei*). De plus, le phénomène de rétroaction des AGN sera exploré en détail à la section 1.5. Ensuite, la section 1.6 viendra présenter le cas particulier de la nébuleuse filamentaire entourant la galaxie NGC 1275.



Figure 1.1. Image du télescope spatial Hubble de l'amas de galaxies Abell 1689. Credits : NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), J. Blakeslee (NRC Herzberg Astrophysics Program, Dominion Astrophysical Observatory), and H. Ford (JHU).

Finalemment, une description approfondie des spectromètres imageurs à transformée de Fourier sera présentée en section 1.7, afin de mieux comprendre, entre autres, le fonctionnement de l'instrument SITELLE (Spectromètre imageur à transformée de Fourier pour l'étude en long et en large de raies d'émission) ayant permis l'obtention des données décrites dans le second chapitre de ce mémoire. Enfin, une description des objectifs de ce mémoire sera présentée à la section 1.8, tout comme la déclaration de l'étudiant à la section 1.9.

1.2. Les galaxies centrales d'amas de galaxies

Bien qu'appartenant à la catégorie des galaxies elliptiques, les BCGs possèdent des caractéristiques particulières, comme leur masse et leur luminosité élevées (Collins et al. 2003), les différenciant également des autres galaxies de l'amas. Se trouvant à une position généralement centrale de celui-ci, elles subissent donc l'effet gravitationnel des autres galaxies de l'amas.

Trois processus de formation sont proposés dans la littérature pour expliquer la formation de telles galaxies (Dressler 1994). Tout d'abord, l'acquisition d'une masse stellaire aussi élevée pourrait se faire par accréation de galaxies plus petites dans leur environnement proche sous l'effet de forces de marée (Ostriker & Hausman 1977). Un autre modèle expliquerait leurs caractéristiques physiques extrêmes par fusion de plusieurs galaxies au commencement

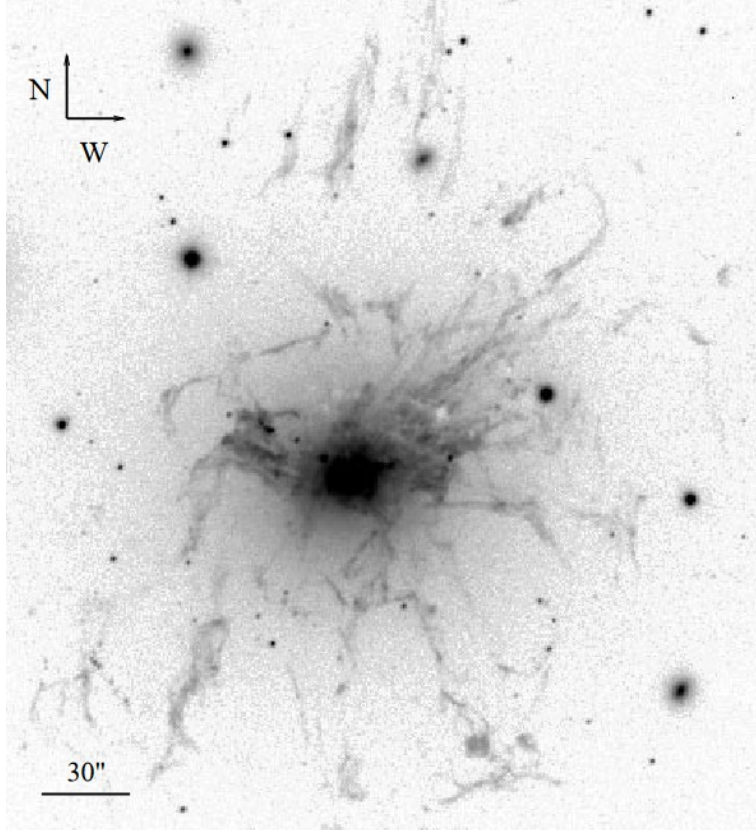


Figure 1.2. Image des filaments de gaz ionisé entourant la BCG NGC 1275, visible selon la raie d'émission $H\alpha$ (Conselice et al. 2001).

de la formation de l'amas (Merritt, 1985). Finalement, un dernier modèle propose qu'une formation stellaire intense et continue soit à l'origine de la masse aussi élevée de ce type de galaxie sous l'influence de flux de refroidissement issus de l'ICM (Fabian 1994). Comme nous le montrerons plus loin, ce dernier modèle ne semble pas en accord avec les observations montrant plutôt une formation stellaire réduite au sein de ces galaxies.

En plus de leur masse importante, de l'ordre de $10^{13}M_{\odot}$ (Von der Linden et al. 2007), il est possible d'observer de façon récurrente des nébuleuses filamentaires de gaz ionisé (voir Figure 1.2) entourant environ 30% des BCGs. En revanche, ce nombre augmente à $\sim 65\%$ pour les BCGs se trouvant au sein d'amas de galaxies à cœur froid (McDonald et al. 2010) que nous présenterons plus loin dans ce mémoire. Ces structures filamentaires généralement étendues jusqu'à 100 kpc du centre de la galaxie (Crawford et al. 1999) présentent une émission optique dominée par la raie $H\alpha$ (McDonald et al. 2010) mais peu ou pas de formation stellaire (Canning et al. 2014). Des traces d'émission de gaz moléculaires sont aussi observées (Salomé et al. 2011, Castignani et al. 2020) et une émission de rayons X de basse énergie est parfois associée spatialement avec ces nébuleuses (Sanders & Fabian 2007).

Les phénomènes à l'origine de l'ionisation du gaz composant ces filaments sont encore incertains. En effet, ceux-ci ne présentent pas de spectres pouvant être associés à des régions H II, par conséquent, la photoionisation due à la formation stellaire ne peut pas être considérée comme un processus potentiel d'ionisation (Heckman et al. 1987). Une source énergétique alternative capable de produire un tel processus pourrait provenir de collisions avec des particules ionisantes (Ferland et al. 2009) qui proviendraient du gaz chaud environnant (Fabian et al. 2011a).

De façon similaire, les mécanismes à l'origine de la formation de ces filaments sont également incertains. D'une part, un phénomène de précipitation de l'ICM pourrait avoir entraîné la formation de ces nébuleuses filamentaires (Voit et al. 2017). D'autre part, le phénomène de rétroaction induit par le trou noir supermassif (SBH - *Supermassive Black Hole*) central de la BCG peut être en mesure de mener à la formation de tels filaments et à leur stabilisation sous l'effet de champs magnétiques (Fabian et al. 2008).

1.3. Le milieu intra-amas

Une des composantes principales des amas de galaxies est l'ICM. Ce plasma ionisé possède une très faible densité, de l'ordre de 10^{-4} cm^{-3} aux bordures de l'amas et de 10^{-1} cm^{-3} en son centre (Molendi 2004), en comparaison de sa très haute température ($\sim 10^7 \text{ K}$, see Matsushita et al. 2002) et est généralement composé d'hydrogène et d'hélium mais également de métaux, tous ionisés (Werner et al. 2008). De plus, ce milieu contient la très grande majorité de la matière baryonique de l'amas ($\sim 90\%$, see Lin, Mohr & Stanford 2003). Les observations montrent que l'ICM émet fortement dans le domaine des rayons X et le processus impliqué est ce qu'on appelle l'émission bremsstrahlung (Sarazin 1986). Lors de ce processus, un électron libre passant à proximité d'un atome ou d'un ion plus lourd va être dévié et émettra un photon dont l'énergie sera de l'ordre de kT où k représente la constante de Boltzmann et T la température du gaz. Or, afin d'émettre dans ce domaine du spectre électromagnétique, le gaz ionisé doit posséder une température comprise entre 10 à 100 millions de degrés Kelvin (McNamara & Nulsen 2007).

Cette émission en rayon X est particulièrement utile d'un point de vue théorique, car elle permet de déterminer la densité électronique de l'ICM. En effet, puisque l'émission bremsstrahlung se produit sous l'effet d'une déviation d'électrons, alors la puissance irradiée par unité de volume sera proportionnelle au produit de la densité électronique et de la densité du gaz ambiant, soit :

$$P \propto \rho^2 ,$$

où P est tel que :

$$P = n_e n_{ion} T^{-1/2} e^{-h\nu/kT} .$$

Nous avons ainsi que l'énergie produite par émission bremsstrahlung est de $h\nu$ tandis que les nombres d'électrons et d'ions par unité de volume sont donnés par n_e et n_{ion} .

Finalement, la température de l'ICM peut être évaluée au moyen du théorème du viriel. En effet, ce théorème implique que l'énergie potentielle sera égale à deux fois l'énergie cinétique, soit :

$$U = -2K$$

Or, un amas de galaxies pourra être assimilé à un système virialisé puisque l'énergie potentielle gravitationnelle est en équilibre quasi statique. Dès lors, l'énergie totale sera telle que :

$$E = U + K = \frac{1}{2}U = -K$$

L'amas de galaxies dans une telle situation présente donc une énergie totale négative ce qui implique que sous l'effet de l'énergie gravitationnelle, le gaz composant l'ICM va se contracter ce qui va entraîner un échange d'énergie potentielle vers de l'énergie cinétique réchauffant par conséquent le gaz. Ainsi, la température de l'ICM peut donc être évaluée en posant que l'énergie cinétique d'une particule de l'ICM est égale à son énergie thermique en assumant trois degrés de liberté, soit :

$$\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}\mu m_H \sigma^2$$

d'où :

$$T = \frac{\mu m_H \sigma^2}{3k},$$

où σ correspond à la dispersion de vitesse du gaz des galaxies de l'amas, μ représente la masse moléculaire moyenne et m_H est la masse de l'atome d'hydrogène.

1.3.1. Refroidissement du milieu intra-amas

De façon générale, les amas de galaxies sont séparés en deux catégories selon leur profil d'émission de rayons X. D'une part les amas dits "à cœur froid" (CCC - *cool core cluster*) présentant une émission de rayons X fortement piquée en leur centre, et d'autre part, des amas possédant une distribution d'émission de rayons X plus uniforme (voir Figure 1.3). Or, les modèles décrivant le refroidissement du gaz proche du centre de l'amas vont varier selon la catégorie auquel il appartient, car il n'est pas possible de concilier les modes de réchauffement gravitationnel et radiatif en un modèle uniforme à ces distances. Ainsi, pour les amas sans cœur froid (NCC - *non cool core cluster*), le gaz doit être chauffé antérieurement afin d'expliquer l'absence de gaz froid. De fait, un mécanisme supplémentaire doit être considéré afin de permettre au gaz de ne pas se refroidir par émission, c'est le mécanisme de rétroaction de l'AGN (McCarthy et al 2008).

Il est aussi possible d'obtenir une estimation du temps de refroidissement d'un gaz ionisé comme l'ICM en utilisant le rapport de son enthalpie avec sa perte d'énergie par unité de

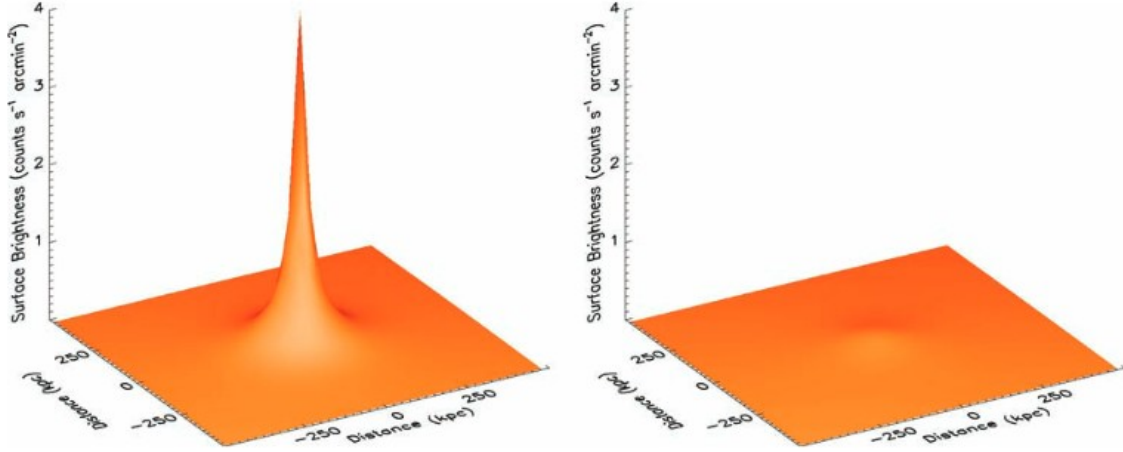


Figure 1.3. Comparaison entre les représentations de brillances de surface en rayons X de deux amas de galaxies. Le graphique de gauche représente Abell 2029, un amas de galaxies à cœur froid, tandis que celui de droite, Abell 2319, est un amas de galaxies sans cœur froid (Million & Allen 2009).

volume. Par définition, l'enthalpie (H) d'un gaz va correspondre à la somme de son énergie thermique et du travail subit lors de son refroidissement, par conséquent :

$$H = \frac{3}{2}nkT + nkT = \frac{5}{2}nkT . \quad (1.3.1)$$

Dès lors, le temps de refroidissement sera tel que :

$$t_{cool} = \frac{H}{\Delta E} = \frac{\frac{5}{2}nkT}{n^2\Lambda} ,$$

où Λ correspond à la fonction de refroidissement (Peterson & Fabian 2006). Nous obtenons donc que :

$$t_{cool} \approx 13.7 \text{ Ga} \left(\frac{T}{10^8 \text{ K}} \right) \left(\frac{\Lambda}{10^{-23} \text{ erg.cm}^{-3}.\text{s}^{-1}} \right)^{-1} \left(\frac{n}{10^{-2} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} ,$$

où Ga signifie giga-années, soit 10^8 années. Par conséquent, il est possible de voir que la densité du plasma va régir son temps de refroidissement. Or, la puissance irradiée par l'ICM par unité de volume est proportionnelle au carré de la densité, ceci impliquera que le temps de refroidissement de l'ICM sera fonction du profil d'émission de rayons X de l'amas et donc de sa classification selon l'une ou l'autre des catégories (CCC ou NCC).

1.3.2. Précipitation du milieu intra-amas

Une explication potentielle à la formation des nébuleuses filamenteuses entourant les BCGs des CCC peut résider dans l'hypothèse de limite de précipitation (Figure 1.4, Voit et al. 2017). Comme nous l'avons vu, l'ICM contient la majorité de la matière baryonique associée

à la galaxie hôte, mais fournira également le gaz nécessaire pour maintenir la formation stellaire au sein de la galaxie. Cependant, un phénomène de rétroaction associé à l'AGN est nécessaire pour chauffer l'ICM, sinon le refroidissement constant par émission augmenterait fortement le taux de formation stellaire. Or, puisqu'il n'y a aucune preuve d'une formation importante d'étoiles à l'intérieur de ces galaxies, un mécanisme empêche nécessairement le gaz de tomber dans le puits de potentiel central.

Au sein des BCGs, ce mécanisme de rétroaction serait orchestré par le trou noir super-massif, ce qui explique l'émission de rayons X depuis l'ICM entourant la galaxie. De plus, les bulles radio émises par le trou noir traversent l'ICM et entraînent des chocs, turbulences et mélanges (Falceta-Gonçalves et al. 2010). Ces phénomènes apporteront à leur tour suffisamment d'énergie pour limiter le refroidissement du gaz ambiant et donc la formation d'étoiles dans la galaxie.

L'hypothèse de limite de précipitation suggère que les écoulements mis en place par le processus de rétroaction favoriseraient la condensation du milieu ambiant chaud de l'ICM en l'élevant à des altitudes plus élevées. Par conséquent, le soulèvement adiabatique encouragerait la condensation de l'ICM en réduisant le rapport entre le temps de refroidissement et le temps de chute libre. Ce ratio permet de déterminer la masse stellaire maximale d'une galaxie en venant comparer le temps pris par le gaz pour tomber dans le puits de potentiel de la galaxie et le temps nécessaire au gaz pour se refroidir. Si le temps de refroidissement est inférieur au temps de chute libre, alors le gaz qui s'effondre peut se condenser. Ce processus est analogue aux précipitations qui se produisent sur Terre, où les gouttes de pluie sont formées par le soulèvement de gaz plus haut dans l'atmosphère. De plus, des simulations montrent que la pluie de gaz froid vers le centre de la galaxie va, dans un premier temps, alimenter le phénomène de rétroaction et donc la puissance des écoulements produit (Sharma et al. 2012b ; Gaspari et al. 2013). Ceux-ci réchaufferont en retour le milieu ambiant et augmenteront le ratio du temps de refroidissement au temps de chute libre, ce qui conduira à arrêter le phénomène de précipitation.

Nous avons présenté au sein de la sous-section précédente la définition mathématique du temps de refroidissement. Le temps de chute libre va dépendre, quant à lui, du potentiel gravitationnel local à un rayon donné soit :

$$t_{ff} = \sqrt{\frac{2r}{g}} .$$

Or, les simulations montrent que ce ratio tend à se stabiliser à une valeur de ~ 10 . En dessous de cette valeur seuil, l'ensemble gazeux ne peut persister sans se condenser pour alimenter la rétroaction. Ceci viendra en retour réchauffer l'ICM, augmenter t_{cool} , et diminuer le phénomène de précipitation pour revenir à une valeur stable du ratio.

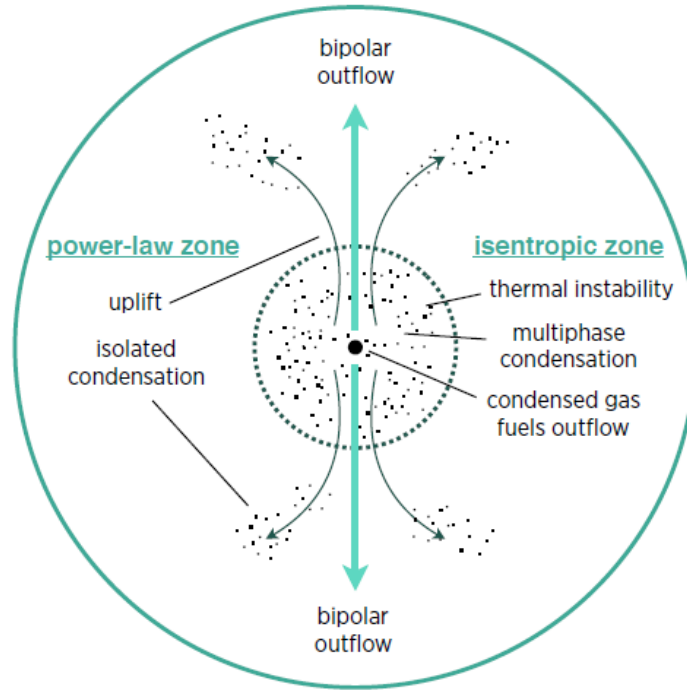


Figure 1.4. Représentation schématisée du modèle de précipitation d’un environnement gazeux (Voit et al. 2017). La figure illustre le phénomène de précipitation au sein d’une galaxie dont le trou noir central accrète de la matière. Celui-ci libère alors une grande quantité d’énergie de rétroaction qui se distribue sur de grandes distances le long de flux bipolaires.

1.4. Les noyaux actifs de galaxies

Les AGN constituent la caractéristique principale des galaxies dites actives. Celles-ci diffèrent des autres galaxies puisque la majeure partie de leur émission énergétique ne provient pas des étoiles ni du milieu interstellaire, mais plutôt de radiations dites non thermales provenant d’une région centrale de petites dimensions : l’AGN. Très minoritaires, les galaxies actives ne représentent que 3% de la population galactique (e.g. Rosswog & Brüggen 2011).

Les AGNs présentent néanmoins de très nombreuses caractéristiques comme des luminosités particulièrement élevées (jusqu’à $L \sim 10^{48} \text{erg s}^{-1}$), une zone d’émission compacte de l’ordre du milliparsec selon plusieurs bandes d’émission associée au disque d’accrétion, une forte évolution de leurs fonctions de luminosité ainsi qu’une émission couvrant tout le spectre électromagnétique (Padovani et al. 2017).

La classification des AGNs se fait selon certains paramètres observationnels comme la luminosité, le profil spectral et/ou la variabilité temporelle de l’émission. Cette tâche est rendue complexe du fait de l’émission couvrant tout le spectre électromagnétique. Néanmoins, certaines catégories générales ont émergées au fil du temps : galaxies Seyfert, galaxies radios

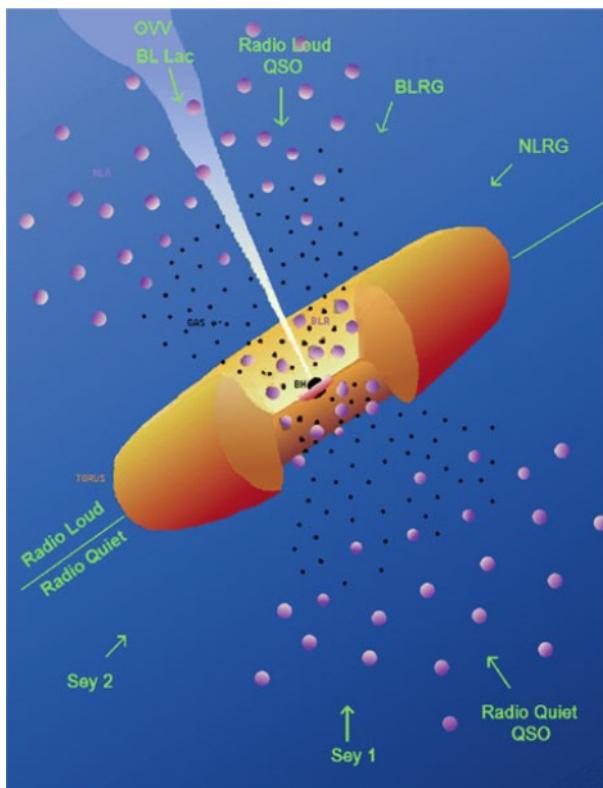


Figure 1.5. Représentation schématisée du modèle d'unification des AGNs proposé par Urry & Padovani en 1995 (Oswalt & Keel 2013). Selon ce modèle, les AGNs n'apparaissent différents que selon la ligne de vue utilisée pour les observer. Le taux d'accrétion est également une caractéristique physique permettant de les distinguer.

(présentant de gigantesques régions d'émission radio s'étendant sur de larges distances), quasars et blazars.

Au travers de plusieurs preuves observationnelles liées à l'accrétion de matière entourant l'AGN, il apparaît désormais établi que les SBH sont à la source de l'émission intense d'énergie de l'AGN. Dès lors, les différences entre les catégories d'AGNs pourraient s'expliquer selon le taux d'accrétion du SBH ainsi que de l'angle de vue par lequel l'AGN est observé. En effet, ce modèle d'unification des AGNs a tout d'abord été présenté en 1995 par Urry & Padovani et est détaillé à la Figure 1.5. Nous allons ainsi détailler au sein de cette sous-section les différentes caractéristiques de ce modèle.

1.4.1. Trou noir supermassif

Un trou noir est défini comme une déformation de l'espace-temps sous l'effet d'un corps particulièrement dense et compact dont l'attraction gravitationnelle extrême empêche toutes particules ou rayonnements électromagnétiques de s'en échapper. Par conséquent, un trou noir n'émet pas de lumière et ne peut être détecté que par l'influence gravitationnelle qu'il a sur son environnement. C'est ainsi qu'une première observation directe du SBH au centre de



Figure 1.6. Image du trou noir supermassif au centre de la galaxie M87 obtenue grâce à l’EHT. Il est possible de voir l’anneau de photons issu de la déformation des rayons lumineux à proximité du puit de potentiel extrême du trou noir. Crédits : Event Horizon Telescope Collaboration.

la galaxie M87 a pu être obtenue en avril 2019 par le *Event Horizon Telescope* (EHT - voir The Event Horizon Telescope Collaboration, 2019). En effet, la Figure 1.6 permet ainsi de voir l’anneau de photon autour de la zone de capture du trou noir : l’horizon des événements.

La zone sombre au centre correspond alors aux dimensions du trou noir qui sont généralement exprimées par le rayon de Schwarzschild (R_S) dans le cas d’un trou noir de masse M_\bullet et sans rotation par :

$$R_S = \frac{2GM_\bullet}{c^2}, \quad (1.4.1)$$

où $G = 6.674 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}^2$ et $c = 299792458 \text{ m s}^{-1}$.

La formation conventionnelle d’un trou noir se produit par effondrement gravitationnel lors du processus de fin de vie d’une étoile massive ou par un afflux important de matière sur un corps dense, notamment dans le cas de système binaire. Ce mécanisme viendra ainsi produire des trous noirs de masses stellaires qui agiront alors comme des graines pour former des trous noirs plus massifs par accrétion ou fusion (Latif & Ferrara 2016). Cependant, les processus physiques à l’œuvre lors de la formation de SBH sont encore incompris, ainsi, certains d’entre eux pourraient également provenir de trous noirs primordiaux directement issus du Big Bang (voir Volonteri et al. 2021), mais aussi possiblement de l’effondrement gravitationnel de nuages de gaz (Smith & Mann 1997, Begelman et al. 2006)

Ainsi, comme mentionnés précédemment, la masse et le moment angulaire du trou noir sont, avec sa charge, les trois seuls caractéristiques nécessaires pour le décrire selon le théorème de calvitie (*No-hair theorem*, Ruffini & Wheeler 1971). Cette conjecture implique que deux trous noirs ayant eu un processus de formation différent, mais aboutissant en une masse, une charge et un spin identique seront alors indistinguables.

Concernant la charge électrique d'un trou noir, celle-ci est généralement considérée comme négligeable d'un point de vue astrophysique, excepté dans le cas de particules chargées à proximité du trou noir, c.-à-d. des rayonnements cosmiques (voir Zajaček & Tursunov 2019).

Dès lors, les trous noirs sont souvent simplement décrits par leur masse et leur spin selon deux métriques propres. La première, issue de la relativité générale, décrit la déformation de l'espace-temps par un trou noir sans moment angulaire ni charge et est appelée métrique de Schwarzschild (Schwarzschild 1916). La métrique de Kerr (Kerr 1963), quant à elle, s'applique dans le cas d'un trou noir en rotation, mais sans charge.

De plus, les trous noirs sont généralement classifiés en fonction de leurs masses et témoignent d'une grande variété. Les SBH se trouvant au cœur des galaxies présentent des masses extrêmes ($> 10^6 M_\odot$) tandis que de théoriques micro trous noirs restent à être détectés (voir Randal & Sundrum 1999, Khachatryan et al. 2011). Les trous noirs stellaires, mentionnés précédemment, ont des masses allant jusqu'à $100 M_\odot$.

Par conséquent, plusieurs méthodes ont été développées afin de déterminer la masse d'un trou noir. Cependant, dans le cas d'un trou noir supermassif au centre d'une galaxie, il est possible d'estimer cette masse (M_\bullet) à partir de corrélations avec la luminosité et la dispersion en vitesse des étoiles proches du trou noir appartenant au bulbe de la galaxie (Kormendy & Ho 2013). Ces corrélations s'expriment de la façon suivante (Figure 1.7) :

$$\frac{M_\bullet}{10^9 M_\odot} = \left(0.544_{-0.059}^{+0.067}\right) \left(\frac{L_{K,bulge}}{10^{11} L_{K_\odot}}\right)^{1.22 \pm 0.08} \quad (1.4.2)$$

$$\frac{M_\bullet}{10^9 M_\odot} = \left(0.310_{-0.033}^{+0.037}\right) \left(\frac{\sigma_e}{200 \text{ km.s}^{-1}}\right)^{4.38 \pm 0.29}, \quad (1.4.3)$$

où $L_{K,bulge}$ représente la luminosité du bulbe dans la bande K et σ_e la dispersion de vitesse de la galaxie au sein du rayon contenant la moitié de la lumière totale émise par le bulbe de la galaxie.

Des observations récentes montrent cependant que ces corrélations ne sont plus valides pour des SBHs dont la masse est supérieure à $10^{10} M_\odot$ (e.g. McConnell et al. 2011, Hlavacek-Larrondo et al. 2012b, Mezcua et al. 2018).

1.4.2. Disque d'accrétion

Le disque d'accrétion est composé de gaz se trouvant en orbite autour du SBH. Dans le cas de l'AGN, ces disques peuvent s'étendre jusqu'à des rayons de ~ 100 voire $\sim 1000 R_S$. Ces objets en accrétion présentent un moment angulaire particulièrement élevé, or pour permettre leur chute vers le trou noir, celle-ci doit être réduite. De par la viscosité du disque d'accrétion, un phénomène de friction va se mettre en place entre les couches internes, tournant plus rapidement, et les couches externes, plus lentes. Dès lors, la perte de moment angulaire des

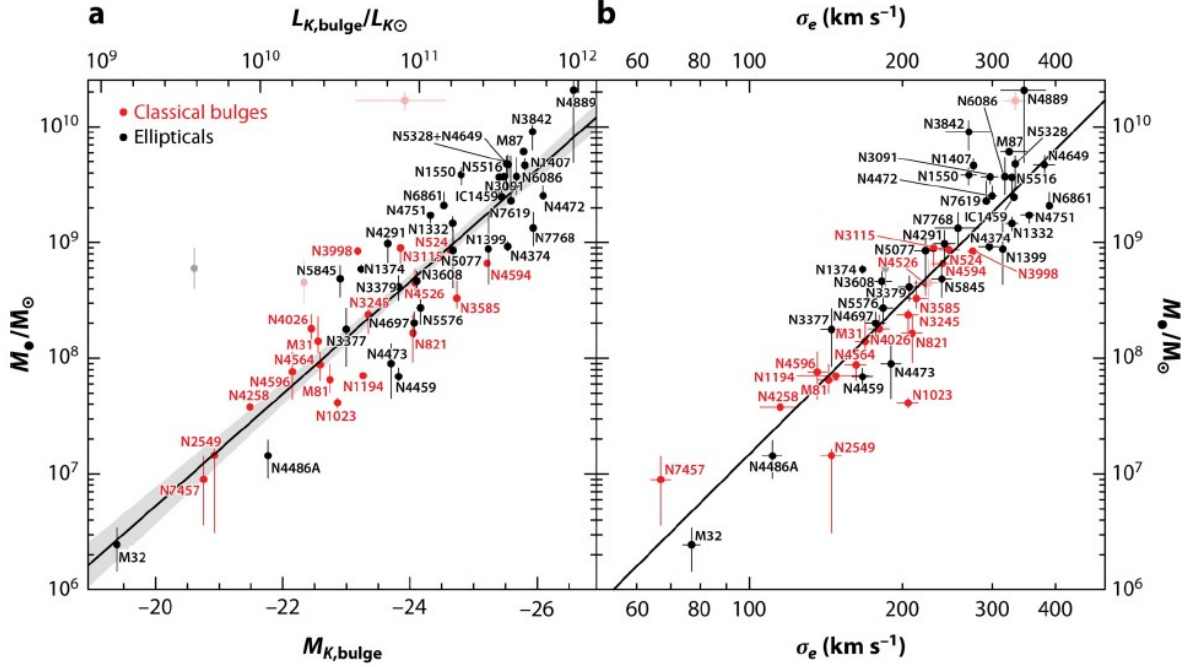


Figure 1.7. Corrélations entre la masse des SBHs (M_{\odot}) avec la luminosité ($L_{K,bulge}$) et la magnitude absolue ($M_{K,bulge}$) du bulbe des galaxies en bande K ainsi que la dispersion de vitesse de la galaxie au sein du rayon contenant la moitié de la lumière totale émise par le bulbe σ_e (Kormendy & Ho 2013).

couches internes va entraîner leur chute progressive tandis que les couches plus externes vont voir leur moment angulaire augmenter. Cette réaction en chaîne va produire une grande quantité d'énergie thermique qui se traduira par une forte émission continue avec un pic dans le domaine de l'UV fréquemment appelé *grosse bosse bleue* (Shang et al 2005).

Les modèles standard de disque d'accrétion considèrent généralement le cas de disques minces dont le rayon est bien plus grand que l'épaisseur. Cette géométrie se produit lorsque le taux d'accrétion est supérieur à 0.01 fois la limite d'Eddington, taux maximal d'accrétion d'un trou noir, auquel cas la densité au sein du disque sera plus importante et celui-ci sera alors qualifié d'optiquement épais (Narayan & Popham 1993). La luminosité d'un tel disque sera ainsi réduite et son spectre d'émission dépendra alors fortement de l'angle de vue. Lorsque cette condition n'est pas vérifiée, le disque d'accrétion ne parvient pas à se refroidir suffisamment rapidement et la pression thermique viendra le faire gonfler, diminuant sa densité et entraînant la formation d'un disque d'accrétion épais mais optiquement mince (Rosswog & Brüggén 2011).

1.4.3. Jets

À partir du disque d'accrétion entourant le SBH, l'AGN va généralement former des structures extrêmement étendues allant de quelques unités astronomiques à plusieurs mégaparsecs et émettant fortement dans le domaine radio : les jets (Sambruna et al. 2002).

Leur formation se produit dans le cas d'un trou noir dont le disque d'accrétion présente un champ magnétique intense. Celui-ci vient alors collimater du plasma hautement énergétique à proximité du trou noir qui sera ensuite éjecté à des vitesses relativistes pour former à leurs extrémités des zones de chocs intenses : les lobes (Reynolds et al. 2005). En se propageant au travers du milieu intergalactique environnant, un front de choc se met en place en avant du jet, ce qui vient ralentir la vitesse des particules de plasma éloignées du trou noir. Cette réaction vient donc créer un choc inverse (*reverse shock*) se propageant en amont du jet (Bromberg et al. 2011). Néanmoins, les jets constituent un lien entre l'AGN et sa galaxie hôte permettant ainsi un transfert de chaleur.

Comme le décrit le modèle unificateur des AGNs (voir Figure 1.5), les jets seront généralement détectés au sein des galaxies radio et quasars. Leur géométrie présente une très grande variété, des classiques jets/contre-jets symétriques de part et d'autre du SBH au simple jet visible par effet de rayonnement relativiste dû à la ligne de vue (Pushkarev et al. 2017, McKinley et al. 2018). De plus, les jets sont une source importante d'émissions radio par effet synchrotron, dû aux électrons libres se déplaçant à des vitesses relativistes au sein des lignes de champs magnétiques (Aharonian 2002).

1.4.4. Région de raies larges

La région de raies larges est une structure dense en rotation et enveloppant le disque d'accrétion. Composée de molécules de gaz chaud ($\sim 10^4$ K) et dense assemblées en nuages, cette région se trouve généralement autour de 1 pc de l'AGN (Netzer 2006). Elle est ainsi responsable des raies dites larges, observées au sein du spectre d'émission de l'AGN par la présence de gaz fortement et faiblement ionisés par l'émission du trou noir central. L'étude de ces raies ainsi que de leur variabilité au cours du temps fournit des informations sur les conditions du gaz autour du SBH. En effet, par la méthode dite de cartographie par réverbération (e.g. Peterson 1993), il est possible d'obtenir une estimation de la structure et de la dynamique de cette région.

Ainsi, en considérant la variation temporelle du spectre d'émission induite par le déplacement de l'émission du SBH central vers les couches extérieures de son environnement, une période caractéristique de quelques jours sera observée (Rosswog & Brüggem 2011). Cette période, correspondant au temps de parcours de l'émission jusqu'à la région de raies larges, permettra d'évaluer le rayon r de la région en considérant une géométrie képlérienne. Dès lors, la technique de cartographie par réverbération nous permet d'estimer les dimensions et

la masse du trou noir central à partir de la largeur des raies présentes dans son spectre qui nous informe sur la vitesse du gaz. Dès lors, nous aurons la relation suivante :

$$M = \frac{v^2 r}{G}, \quad (1.4.4)$$

où M représente la masse du trou noir central, v correspond à la vitesse du gaz et r aux dimensions de la région de raies larges.

1.4.5. Tore moléculaire

L'AGN est entouré par un nuage de gaz moléculaire et de poussière optiquement épais en forme de tore (Krolik & Begelman 1988). Les radiations internes émises par l'AGN sous forme de rayons X et UV vont venir chauffer ces particules qui vont réémettre cette énergie reçue sous forme de rayonnement infrarouge. Ce rayonnement va donc présenter la forme d'un spectre de corps noir avec une température de l'ordre de 20 à 80 K, ce qui viendra créer un pic d'émission IR dans le spectre de la distribution d'énergie (Almeida & Ricci 2017). En revanche, cette émission infrarouge disparaît lorsque la température est de l'ordre de 1200-1900 K puisque la poussière composant le tore vient se sublimer à cette température (Hönig 2019). Ceci crée donc une coupure dans l'émission infrarouge pour des longueurs d'onde $\lambda \leq 1\mu m$. Ce tore de poussière est également à l'origine de la différence observationnelle entre galaxies actives à cause de son absorption importante. En effet, bien que les preuves observationnelles en infrarouge à haute résolution montrent que les dimensions du tore varient de 1 à 20 pc, la nature grumeleuse du matériel qui le constitue va causer l'absorption de l'émission des régions intérieures (Elitzur 2006).

1.4.6. Région de raies minces

La région de raies minces, quant à elle, constitue la région d'émission la plus éloignée de l'AGN et, à l'inverse de la région de raies larges, elle sera généralement toujours observable, quel que soit le type de galaxie active. En effet, puisque cette région se trouve à l'extérieur du tore de poussière, la ligne de visée ne sera donc pas obstruée. Cette région externe peut ainsi s'étendre sur une distance de 10 à 100 pc du centre de l'AGN (Bianchi et al. 2012) et est composée de poussières et de gaz ionisé par l'émission du SBH central, ce qui va conduire à une émission infrarouge issue du transfert thermique (Groves et al. 2006).

1.4.7. Problèmes liés à Urry & Padovani (1995)

Bien que le modèle d'unification des AGN proposé par Urry & Padovani en 1995 offre une explication simple à la grande diversité observée des AGN, tout en considérant seulement un petit nombre de paramètres, plusieurs études récentes montrent les limites et problèmes reliés à ce type de modèle.

En effet, une des principales difficultés retenues à l'encontre du modèle d'unification est son incapacité à déterminer diverses sous-catégories ayant émergées au travers de récentes observations d'un large nombre d'AGN. Dès lors, les simples caractéristiques de luminosité et d'inclinaison du tore moléculaire obstruant le champs de vue ne parviennent pas à obtenir une représentation réaliste de la diversité des AGN. De plus, le modèle d'unification classique de Urry & Padovani (1995) ne parvient pas à déterminer de façon efficace et précise la structure physique composant le tore moléculaire au travers de ses différentes couches (Netzer 2015).

Enfin, un dernier problème relié au modèle d'unification repose dans le biais de critère de sélection établi lors de la classification des AGN dans des observations plus anciennes. En effet, le rougissement et l'obscurisation causent la perte d'une grande quantité de sources de détection d'AGN. De plus, l'utilisation de diagrammes de diagnostic permet d'obtenir des échantillons complets d'AGN servant à la classification. Or, ces diagrammes sont hautement dépendants de la distance de la cible, ainsi, certaines raies d'émission nécessaires à la formation des diagrammes de diagnostics sont parfois trop faibles et indistinguables du bruit pour certaines catégories d'AGN éloignés, empêchant alors de les considérer dans le modèle d'unification (Netzer 2015).

1.5. Rétroaction des noyaux actifs de galaxies

Un des phénomènes particuliers au sein des AGNs concerne le refroidissement de l'ICM. En effet, comme nous avons pu le voir précédemment, étant donné que le gaz composant l'ICM émet constamment un rayonnement induisant une perte d'énergie, ceci devrait avoir pour conséquence de refroidir le milieu. Par conséquent, afin de maintenir l'équilibre en pression des différentes couches de gaz, celles-ci devraient lentement se diriger vers le centre de l'AGN sous la forme d'écoulement de refroidissement. Or, cet afflux de gaz vers la région centrale de la galaxie conduirait à une forte augmentation de sa densité et favoriserait la formation stellaire en diminuant le temps de refroidissement radiatif.

Néanmoins, les observations montrent que cette formation stellaire soutenue, de l'ordre de plusieurs centaines voire milliers de masses solaires par an, n'est pas détectée (Jonhstone et al. 1987, McDonald et al. 2018). C'est ce qu'on appelle le problème des écoulements de refroidissements. Deux solutions sont généralement proposées pour tenter de résoudre ce problème. La première implique que le refroidissement du gaz n'est pas détecté, sous l'effet possible de l'absorption (Peterson et al. 2001), mais se produit tout de même, conduisant alors à des distributions inhomogènes de métallicité (Fabian et al. 2001), et expliquant également l'apparition de la luminosité en rayons X manquante au sein d'autres régions du spectre électromagnétique (Fabian et al 2002, Mathews & Brighenti 2003, Gitti et al. 2002). L'autre approche consiste davantage à expliquer cette incohérence entre l'observation et la théorie par l'apport d'une source énergétique permettant au gaz de ne pas se refroidir. Cette solution

inclut ainsi plusieurs mécanismes comme la conduction thermique de régions plus éloignées de l'amas vers les régions plus centrales (Tucker & Rosner 1983, Voigt et al. 2002) et l'apport continu d'énergie par la fusion d'amas plus petit (Markevitch et al. 2001), mais ces processus ne semblent pas en mesure de maintenir un réchauffement constant au sein de tous les amas de galaxies. En revanche, le phénomène de rétroaction de l'AGN sur son environnement apparaît comme une solution crédible au problème des flux de refroidissement.

Ainsi, selon ce modèle, c'est l'émission de jets relativistes par le SBH due à l'accrétion qui vient en retour alimenter en énergie le milieu environnant empêchant alors le refroidissement de l'ICM. Cette production énergétique est reliée au taux d'accrétion du trou noir. Dès lors, dans le cas d'un taux d'accrétion faible, ce sont les puissants jets du trou noir qui fourniront une part majeure de l'apport énergétique venant ainsi réchauffer l'ICM. En revanche, pour une valeur seuil de taux d'accrétion de l'ordre de $> 10^{-2} - 10^{-1} \dot{M}_{\text{Edd}}$, les jets ne seront plus les principaux vecteurs énergétiques, et c'est davantage l'émission radiative du trou noir qui fournira de l'énergie au milieu environnant. \dot{M}_{Edd} représente le taux d'accrétion d'Eddington, c'est-à-dire le taux d'accrétion pour lequel le trou noir va irradier à la luminosité d'Eddington. Par conséquent, le phénomène de rétroaction de l'AGN est donc séparé en deux modes distincts selon le taux d'accrétion du trou noir. Le premier mode, dit radiatif ou quasar, se met en place pour un taux d'accrétion supérieur à la valeur seuil, tandis que le second mode, dit cinétique ou radio, se produit pour des taux d'accrétion inférieurs à $10^{-2} - 10^{-1} \dot{M}_{\text{Edd}}$.

1.5.1. Mode cinétique

Dans cette sous-section nous allons décrire avec plus de détails le mode cinétique de rétroaction du trou noir afin d'expliquer comment celui-ci permet un transfert d'énergie compensant les pertes radiatives du gaz environnant.

Ainsi, les premières observations en rayons X de l'ICM de CCC ont révélé des perturbations sous forme de cavités parfois délimitées par des filaments de gaz ionisés visibles en optique. Des observations ultérieures ont permis de montrer que ces cavités, appelées "bulles", contiennent en réalité de l'émission radio. Ces bulles, souvent visibles en paires symétriques, peuvent prendre des formes variées, mais sont généralement arrondies ou elliptiques et ont tendance à conserver leur apparence très longtemps après leur développement, possiblement sous l'action de champs magnétiques (Brienza et al. 2021).

La formation de ces bulles se fait sous l'effet des jets relativistes émis par le trou noir supermassif de la BCG. Or, ceux-ci possèdent une puissance pouvant aller jusqu'à 10^{46} erg s⁻¹ (Fabian et al. 2012). Dès lors, en se servant du gaz environnant comme d'un calorimètre, il est alors possible de déterminer la puissance théorique ayant permis de sculpter ces cavités. Ainsi, on peut déterminer l'énergie contenue dans une bulle en additionnant son énergie interne donnée par : $PrV/(\gamma - 1)$ et le travail qu'il a été nécessaire de fournir pour la gonfler

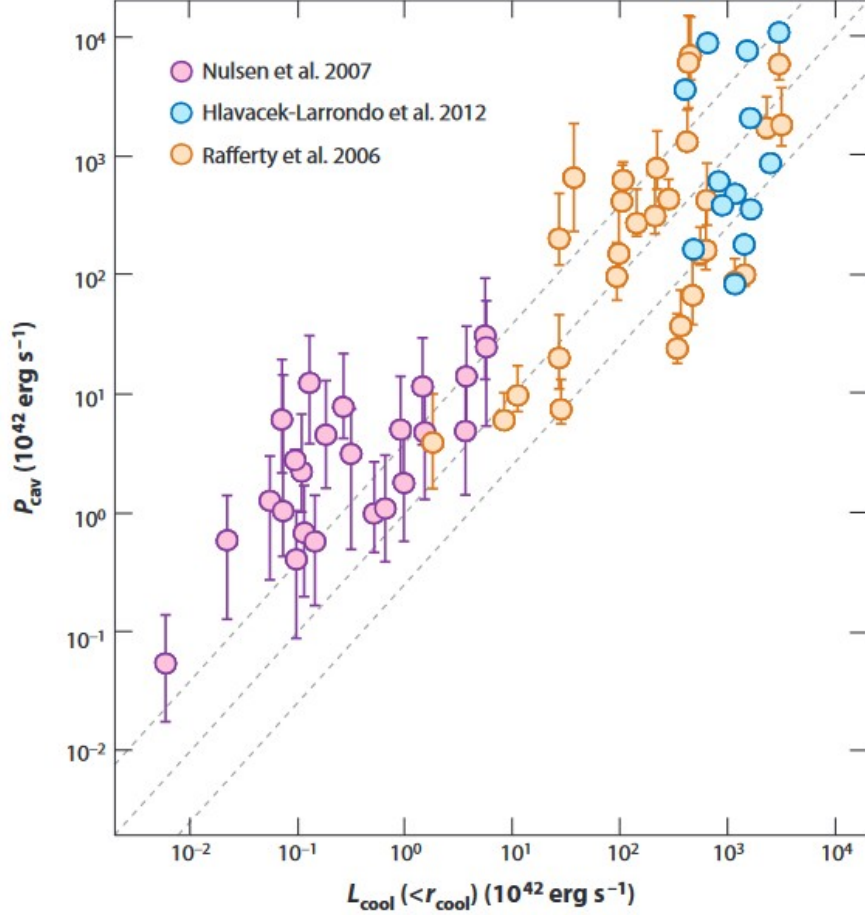


Figure 1.8. Comparaison entre la puissance des jets et la luminosité en rayons X pour quelques amas, groupes et galaxies elliptiques (Fabian 2012).

soit PrV , où Pr représente la pression, V le volume et γ constitue l'indice adiabatique. Nous obtenons alors que l'énergie contenue est telle que : $PrV/(\gamma - 1) + PrV = \gamma PrV/(\gamma - 1)$ (Churazov et al. 2002). En ajoutant à ce problème des conditions supplémentaires, il est possible d'obtenir une estimation de l'énergie de l'ordre de 10^{55} à 10^{61} erg (McNamara & Nulsen 2007). Ainsi, la comparaison entre la puissance des jets relativistes et la luminosité en rayons X de CCC semble corroborer le fait que l'AGN serait en mesure de fournir suffisamment d'énergie au milieu environnant pour combler les pertes énergétiques par rayonnement (Figure 1.8 - voir Hlavacek-Larrondo 2012a, McNamara & Nulsen 2007 2012).

1.6. La nébuleuse multiphasique entourant NGC 1275

Nous allons à présent étudier au sein de cette section l'architecture multiphasique entourant la galaxie NGC 1275, au cœur de l'article présenté dans le second chapitre de ce mémoire. Ce faisant, cette section permettra également de mieux comprendre les enjeux de cette étude ainsi que les différents éléments théoriques qu'elle implique.

Par conséquent, nous commencerons dans un premier temps par présenter cette structure ainsi que les éléments qui la composent, avant de se pencher sur les principaux modèles de formation d’une telle structure. Finalement, nous présenterons également les mécanismes permettant d’expliquer l’ionisation du gaz sur des distances aussi importantes autour de la galaxie.

1.6.1. Structure

La structure multiphasique entourant la galaxie NGC 1275 présente des types d’émissions variées allant du domaine des rayons X (Fabian et al. 2005, Sanders & Fabian 2007, Fabian et al. 2011b) à celui du radio (Lim et al. 2007, Salomé et al. 2008, 2011) en passant par le domaine optique (Conselice et al. 2001, Hatch et al. 2006, Gendron-Marsolais et al. 2018).

Elle s’étend sur une surface de plus de 100 kpc par 50 kpc pour son émission optique (Conselice et al. 2001). De plus, la composante visible en $H\alpha$ présente une structure filiforme avec des filaments minces d’une largeur de 60 à 70 pc (Fabian et al. 2008, 2016) mais extrêmement allongés avec des longueurs pouvant varier entre 5 à 30 kpc (Hatch et al. 2006).

L’émission $H\alpha$ de cette structure est également particulièrement intense, avec une luminosité de $\sim 10^{42}$ erg/s, et est associé à un gaz ionisé d’une température de l’ordre de $\sim 10^4$ K. De même, les émissions dans le domaine des rayons X tracent davantage un gaz à une température de l’ordre de $\sim 10^6$ K, qui s’élèvera à $\sim 10^{7-8}$ K pour le reste de l’ICM (Fabian et al. 2000), tandis que l’émission radio, corrélée spatialement aux filaments visibles dans le domaine optique (voir Figure 1.9), est associée à un gaz moléculaire plus froid de l’ordre de $\leq 10^3$ K (Salomé et al. 2011).

Il est intéressant de noter que la structure filamentaire visible en optique ne devrait pas pouvoir se maintenir sur de longues périodes à cause du puits de potentiel extrêmement intense que constitue la galaxie centrale d’amas. Dès lors, afin d’expliquer leur longévité, un maintien sous l’effet de champs magnétiques est avancé (Fabian et al. 2008).

1.6.2. Modèles de formation

Nous avons précédemment décrit un modèle permettant d’expliquer la formation d’une telle structure multiphasique à la section 1.3.2 sous l’effet d’une limite de précipitation.

Nous allons à présent détailler dans cette sous-section un second modèle de formation basé sur des preuves observationnelles et théoriques. En effet, en observant à nouveau la Figure 1.9, il est possible de voir la formation de bulle radio s’élevant dans l’ICM et creusant le milieu environnant très chaud visible dans le domaine des rayons X. Or, plusieurs observations au travers de ces domaines de longueurs d’onde montrent clairement une corrélation spatiale entre ces bulles radio et les filaments de la nébuleuse optique (Gendron-Marsolais et al. 2018,

McNamara et al. 2014). Dès lors, le second modèle de formation propose que les bulles radio soient à la source du refroidissement local de l'ICM lors de leur formation sous l'effet de turbulence et de chocs (Falceta-Gonçalves et al. 2010). Par la suite, une fois que la bulle se détache et commence à remonter de façon adiabatique au sein de l'ICM, elle entraînerait avec elle le gaz refroidi et le soulèverait lors de son mouvement à la façon d'une cellule de convection (Fabian et al. 2003). Ce déplacement entraînerait également des turbulences et des chocs qui viendraient à leur tour produire un phénomène de refroidissement local le long du trajet de la bulle (McNamara et al. 2016). Dès lors, le refroidissement de l'ICM entraînerait une augmentation de densité qui conduirait à la formation de filaments de gaz plus froid, alors visibles dans l'optique. Par la suite le refroidissement continuerait pour mener à la formation de structures de gaz moléculaire corrélées spatialement avec les filaments (Salomé et al. 2006).

Ainsi, ce mécanisme de formation permettrait d'expliquer à la fois le phénomène de rétroaction du trou noir supermassif, comme expliqué précédemment à la section 1.5, tout en étant capable d'élucider la formation de la nébuleuse filamentaire entourant NGC 1275. De plus, un autre argument en faveur de ce modèle est la déplétion en métaux de la galaxie en elle-même. En effet, ces métaux se retrouvent par la suite dans l'environnement de la galaxie sous l'effet du soulèvement causé par les bulles radio (McNamara & Nulsen 2007). Dès lors, les arguments présentés viennent soutenir ce modèle de formation et nous verrons également en quoi l'analyse de données menées au Chapitre 2 apporte de nouveaux arguments observationnels à ce modèle.

1.6.3. Mécanismes d'ionisation

Nous allons maintenant décrire dans cette sous-section les mécanismes d'ionisation possiblement impliqués dans l'émission de la structure multiphasique entourant la galaxie NGC 1275. Tout d'abord, plusieurs observations et études montrent que la formation stellaire au sein des nébuleuses filamenteuses optiques est présente, mais limitée (McDonald et al. 2011). Nous aborderons dans la sous-section suivante le cas particulier de NGC 1275, mais ces arguments tendent à montrer que la photoionisation ne permet pas d'expliquer l'extrême luminosité en $H\alpha$ d'une telle structure. De plus, le profil spectral des filaments est extrêmement différent de celui d'une région dite H II où l'ionisation par formation stellaire est largement dominante (Heckman et al. 1987, Crawford & Fabian 1992) et les simulations considérant seulement une ionisation stellaire ne parviennent pas à reproduire les spectres obtenus dans les nébuleuses filamenteuses (Johnstone et al. 2007).

Dès lors, un autre mécanisme potentiel serait une ionisation par l'activité intense de l'AGN au centre de la galaxie hôte. Cependant, cet argument n'apparaît pas non plus comme

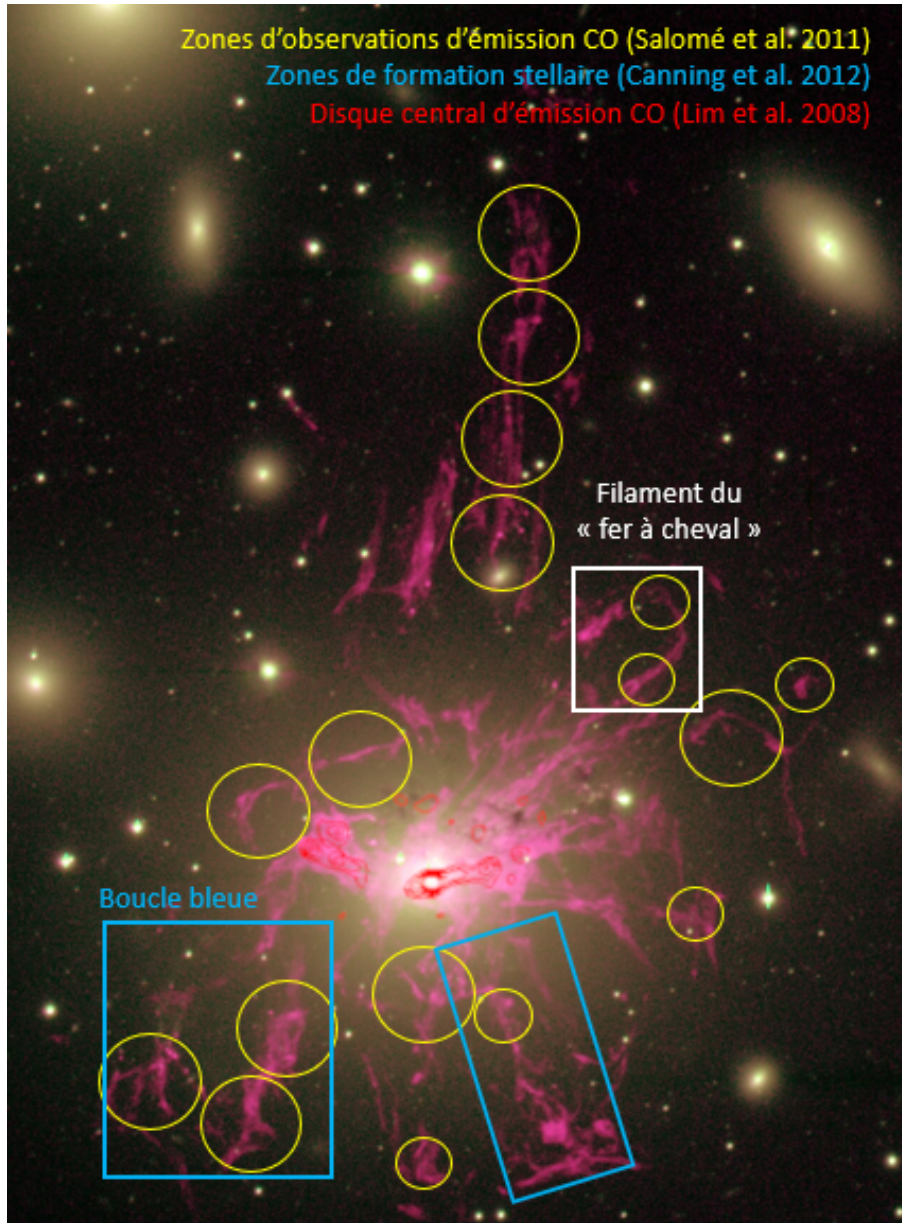


Figure 1.9. Figure composite représentant la structure multiphasique entourant NGC 1275. Le fond de l'image représente l'émission optique en $H\alpha$ obtenues à l'aide de l'instrument WIYN (Conselice et al. 2001). Les cercles jaunes témoignent des zones de détection de gaz moléculaire froid CO(2-1) au travers des filaments entourant NGC 1275 (Salomé et al. 2011). Les contours rouges illustrent l'émission de gaz moléculaire froid CO(2-1) dans le domaine radio à des longueurs d'onde de 1.3mm sous la forme d'un disque central (Lim et al. 2008). La zone intitulée boucle bleue dans le cadre bleu est une région de forte formation stellaire (Canning et al. 2012). La zone intitulée filament du fer à cheval, montre le filament illustrant la formation de cellule de convection sous l'effet de la montée des bulles radios (Churazov et al. 2000, Fabian et al. 2005).

valide, car les luminosités obtenues, notamment en $H\alpha$ et $[NII]$ sont trop élevées pour être expliquées par un tel mécanisme (Heckman et al. 1989, Conselice et al. 2001).

Un autre modèle proposant une combinaison de chocs extrêmement rapides et de photoionisation locale est en mesure de reproduire la plupart des rapports de raies en émission dans le domaine optique (McDonald et al. 2012). Cependant, une étude dans le domaine infrarouge de Jaffe & Bremer (1997) montre que les rapports de raies obtenues dans ce domaine de longueurs d'onde ne permettent pas la présence de chocs rapides au sein des nébuleuses filamentaires, les opposant ainsi aux régions HII et limitant la portée de ce modèle.

Finalement, un dernier phénomène capable d'expliquer l'ionisation du gaz de la nébuleuse filamentaire serait un modèle par réchauffement collisionnel entre les particules hautement énergétiques provenant de l'ICM environnant, et les particules composant les filaments, relativement plus denses et froides (Ferland et al. 2009). Ce modèle est tout particulièrement attrayant, car il est capable de reproduire les fortes raies d'émission d'hydrogène visibles au sein des filaments (Johnstone et al. 2007), ainsi que la détection locale d'émission UV d' H_2 (Johnstone et al. 2012).

Ce modèle a par la suite été renforcé par des observations en infrarouge lointain grâce au télescope Herschel capable de détecter des raies de $[CII]$ et $[OI]$ au sein de nébuleuses filamentaires (Mittal et al. 2012). Or afin d'être en mesure de reproduire le rapport de ces raies, le modèle d'ionisation par particules énergétiques provenant de l'ICM doit être renforcé par un réchauffement supplémentaire sous l'effet de turbulences (Canning et al. 2016).

1.6.4. Formation stellaire

À l'inverse de la plupart des autres structures multiphasiques ne présentant que très peu de formation stellaire, plusieurs preuves observationnelles démontrent la présence de quelques zones de genèse d'étoiles au sein de la nébuleuse filamentaire entourant NGC 1275.

En effet, Canning et al. (2012) identifie deux régions de formation stellaire située au sud et sud-est de la nébuleuse filamentaire (voir Figure 1.9). Celles-ci sont particulièrement éloignées de l'AGN, mais sont corrélées spatialement avec certains filaments. D'autres zones de formation d'étoiles sont également observées dans le centre de la nébuleuse filamentaire traduisant la présence d'amas d'étoiles dans ces régions (Holtzmann et al. 1992). Or les étoiles formées au centre de la nébuleuse filamentaire apparaissent comme étant uniformément âgées (McNamara et al. 1996, Canning et al. 2012), tandis que les amas stellaires présents au sein des filaments démontrent une plus grande variabilité dans leur âge (Canning et al. 2012), relié au cycle de formation des filaments visibles en $H\alpha$ (Hatch et al. 2006). De plus, les amas stellaires présents au sein du filament sud-est dit de la boucle bleue sont pour certains parmi les plus bleus détectés au sein de la nébuleuse filamentaire et sont ainsi plus jeunes que les étoiles formées dans les régions centrales.

Dès lors, un tel phénomène de formation stellaire au sein de la structure multiphasique entourant NGC 1275 serait probablement le résultat à long terme de la montée des bulles radio dans l'ICM (Canning et al. 2012). En effet, nous avons mentionné auparavant que les filaments maintiennent leur stabilité au cours du temps sous l'effet de champs magnétiques venant s'opposer au puits de potentiel gravitationnel intense de la galaxie centrale (Fabian et al. 2008). Par conséquent, ce phénomène expliquerait l'absence de formation stellaire dans la plupart des filaments puisqu'un effondrement gravitationnel du gaz est nécessaire pour former des étoiles (voir McKee et al. 1993). Or, dans le cas de NGC 1275, il est possible de relever la présence de nœuds au sein de la structure filamentaire, ce qui traduit la présence d'une accumulation locale de gaz froid pouvant conduire à une formation stellaire. De plus, étant donné qu'une bulle radio fantôme est également visible plus au sud du filament, il est également possible que le champ gravitationnel ayant maintenu le filament ait été perturbé par la montée de cette ancienne bulle, causant alors une formation graduelle le long du filament (Canning et al. 2012).

1.7. Spectromètre imageur à transformée de Fourier

Finalement, nous allons nous pencher davantage sur l'aspect instrumental ayant permis d'obtenir les données nécessaires à l'étude présentée au sein du Chapitre 2 de ce mémoire. Dès lors, nous allons commencer par étudier le principe de fonctionnement d'un spectromètre imageur à transformée de Fourier de façon générale avant de nous pencher un peu plus en détail sur le cas de l'instrument SITELLE.

1.7.1. Fonctionnement général d'un interféromètre

Pour mieux interpréter le contenu de cette section, une brève introduction sur le principe général d'un interféromètre va être menée. Ainsi, l'objectif d'un interféromètre est de venir séparer en deux un rayonnement électromagnétique incident pour ensuite interférer les deux rayonnements résultants créant alors un patron d'interférence. Un séparateur va permettre de faire diverger le parcours du rayon incident en deux pour ensuite les reconduire vers un dispositif de capture d'image permettant d'obtenir un interférogramme qui pourra alors être analysé.

Là où le spectromètre à transformée de Fourier va différer du spectromètre simple est dans la capacité de déplacement d'un des miroirs du système optique. Ceci va donc introduire une différence temporelle entre les deux rayons séparés, ce qui aura pour conséquence de remplacer la variation temporelle en coordonnées spatiales au sein de l'interférogramme. Il est ensuite possible d'obtenir le spectre initial du rayonnement incident en appliquant une transformée de Fourier sur l'interférogramme.

Une transformée de Fourier est une procédure mathématique permettant de passer d'une fonction dans un espace temporelle à une fonction dans l'espace des fréquences, soit :

$$\mathcal{F}(f) : \phi \mapsto \hat{f}(\phi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp^{-i\phi t} dt ,$$

où, \mathcal{F} correspond à l'opérateur de transformée de Fourier et f est une fonction intégrable sur l'ensemble \mathbb{R} .

Or dans le cas du spectromètre à transformée de Fourier, c'est l'intensité du signal reçu qui jouera le rôle de la fonction à traiter. Celle-ci va dépendre de la différence de chemin optique introduite par le déplacement du miroir p , mais aussi du nombre d'onde $\nu = 1/\lambda$, soit :

$$I(\nu, p) = S(\nu)[1 + \cos(2\pi\nu p)] ,$$

où $S(\nu)$ correspond au spectre que l'on cherche à déterminer. Dès lors, l'intensité totale intégrée sur l'ensemble des nombres d'ondes sera :

$$I(p) = 2 \int_0^{\infty} S(\nu)[1 + \cos(2\pi\nu p)] d\nu ,$$

or pour $p = 0$, nous aurons que :

$$I(0) = 4 \int_0^{\infty} S(\nu) d\nu ,$$

donc :

$$I(p) - \frac{I(0)}{2} = 2 \int_0^{\infty} S(\nu) \cos(2\pi\nu p) d\nu .$$

Il s'agit donc d'une simple transformée de Fourier d'une fonction cosinus. Par conséquent, le spectre peut-être obtenu en faisant la transformée de Fourier inverse et s'exprime alors selon l'intensité comme fonction de la différence de chemin optique, soit :

$$S(\nu) = 4 \int_0^{\infty} \left(I(p) - \frac{I(0)}{2} \right) \cos(2\pi\nu p) dp .$$

Ainsi, après avoir présenté de façon générale le fonctionnement d'un spectromètre à transformée de Fourier, nous pouvons maintenant explorer plus en détail leur développement et leur utilisation en astronomie.

1.7.2. Historique des instruments à intégrale de champ

Ainsi, afin de récolter l'information spectrale fournissant une grande quantité de renseignements sur les corps célestes observés, deux méthodes se sont établies : l'imagerie par bandes étroites et la spectroscopie intégrale de champ.

La première méthode présente l’avantage d’être capable d’imager la cible selon des longueurs d’onde spécifiques, notamment grâce à l’utilisation de filtres, cependant, la résolution spectrale obtenue est assez faible. À partir des mesures sur le flux reçu, les différentes informations physiques de la cible peuvent être extraites. La spectroscopie intégrale de champ va, quant à elle, permettre d’obtenir le spectre détaillé de la cible au détriment de sa résolution spatiale. Cette technique a cependant vu un essor important avec de grandes améliorations techniques en passant de fentes simples limitant les observations aux étoiles ou à certaines portions de cibles étendues, à des spectrographes à objets multiples composés de plusieurs fentes et capables de couvrir un large champ de vue.

Par la suite, en combinant ces deux méthodes, les instruments dits à unité à intégrale de champ ayant suivi ont ainsi pu combiner les avantages des deux techniques. Leur développement s’est principalement fait au début des années 2000, où la motivation d’obtenir à la fois des informations spectrales et spatiales dans un large champ de vue en était la principale force motrice (ex. Drissen et al. 2011).

C’est au cours de la décennie suivante et sur ces bases que s’est développé la spectroscopie par transformée de Fourier. C’est dans ce contexte que nous allons venir présenter l’instrument SITELLE au cœur des données obtenues ayant permis la réalisation du Chapitre 2 de ce mémoire.

1.7.3. SITELLE

Ainsi, comme indiqué précédemment, SITELLE est un spectromètre imageur à transformée de Fourier installé au télescope Canada-France-Hawai (CFHT). Cependant, plusieurs aspects de sa conception en font un instrument à part.

Tout d’abord, SITELLE possède un des champs de vue les plus larges pour ce type de spectromètre ($11' \times 11'$) (Drissen et al. 2019), en comparaison, les spectrographes à intégrale de champ MUSE et SINFONI, tous deux installés sur le *Very Large Telescope* (VLT), ont respectivement des champs de vue maximaux de $1' \times 1'$ (Bacon et al. 2010) et $8'' \times 8''$ (SINFONI User Manual 2017).

SITELLE possède également 7 filtres lui offrant une couverture spectrale typique de 350 à 900 nm soit des UV à l’infrarouge proche en couvrant tout le domaine optique. Cette large gamme spectrale est nécessaire pour la détection de raies spécifiques comme celles de l’oxygène ionisé [OII] $\lambda 3727$, mais également le doublet de raies du soufre ionisé [S II] $\lambda \lambda 6717, 6731$.

De plus, SITELLE est capable d’obtenir une résolution spectrale très élevée comprise entre 1-10000 pour ses observations. Cette caractéristique en fait un instrument de choix pour l’étude de cible dont le spectre d’émission présente des raies particulièrement étroites et difficiles à détecter à plus basse résolution. En effet, les filaments de gaz ionisé autour

de NGC 1275 étudiés dans ce mémoire présentent ainsi des raies de soufre nécessitant une observation à très haute résolution pour permettre leur détection.

Un schéma simplifié de la conception de SITELLE est présenté en Figure 1.10. Nous pouvons ainsi remarquer que le fonctionnement interne de l'instrument est similaire à celui d'un interféromètre de Michelson décrit précédemment. En revanche, un choix de conception intéressant à relever concerne le placement des détecteurs. En effet, dans le cas d'un interféromètre simple, le détecteur est horizontalement aligné avec le miroir et le séparateur ; or, cette conception fait en sorte qu'une part importante du rayonnement incident est renvoyée vers la source. Ce problème est réglé au sein de SITELLE en ajoutant un second détecteur permettant de récolter ce rayonnement renvoyé.

Finalement, nous pouvons également présenter la fonction instrumentale de SITELLE permettant d'obtenir le spectre à analyser. Ainsi, considérons tout d'abord une source monochromatique simple. Dans ce cas, nous savons que celle-ci sera définie par un delta de Dirac δ de sorte que l'interférogramme sera donné par :

$$I(p) - \frac{I(0)}{2} = \int_{-\infty}^{\infty} [\delta(\nu - \nu_1) + \delta(\nu + \nu_1)] \exp(2i\pi\nu p) d\nu ,$$

où ν_1 représente le nombre d'onde de la source monochromatique considérée ici.

Ainsi, en utilisant les propriétés du delta de Dirac ainsi que les règles de trigonométrie, nous obtenons que :

$$I(p) - \frac{I(0)}{2} = 2\cos(2\pi\nu_1 p) .$$

Dans la section 1.7.1, nous avons assumé un interféromètre parfait, or, puisqu'il est impossible pour l'interféromètre de parcourir une différence de chemin infinie, il faut nécessairement que l'échantillonnage de l'interférogramme soit fini. Dès lors, le signal reçu sera simplement la convolution entre l'interférogramme initial et une fonction wagon (*boxcar*), traduisant le fait que les observations ont une durée limitée. Dans notre cas, la fonction wagon $\text{boxcar}(x)$ est telle que sa valeur sera nulle pour l'entièreté des x sauf pour un intervalle allant de $-L$ à L où elle prendra une valeur de 1. Ainsi, dans ce cas, nous aurons de façon générale que :

$$S(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{boxcar}(p) \cdot \left(I(p) - \frac{I(0)}{2} \right) \exp(2i\pi\nu p) dp ,$$

d'où :

$$S(\nu) = \int_{-L}^L \left(I(p) - \frac{I(0)}{2} \right) \exp(2i\pi\nu p) dp ,$$

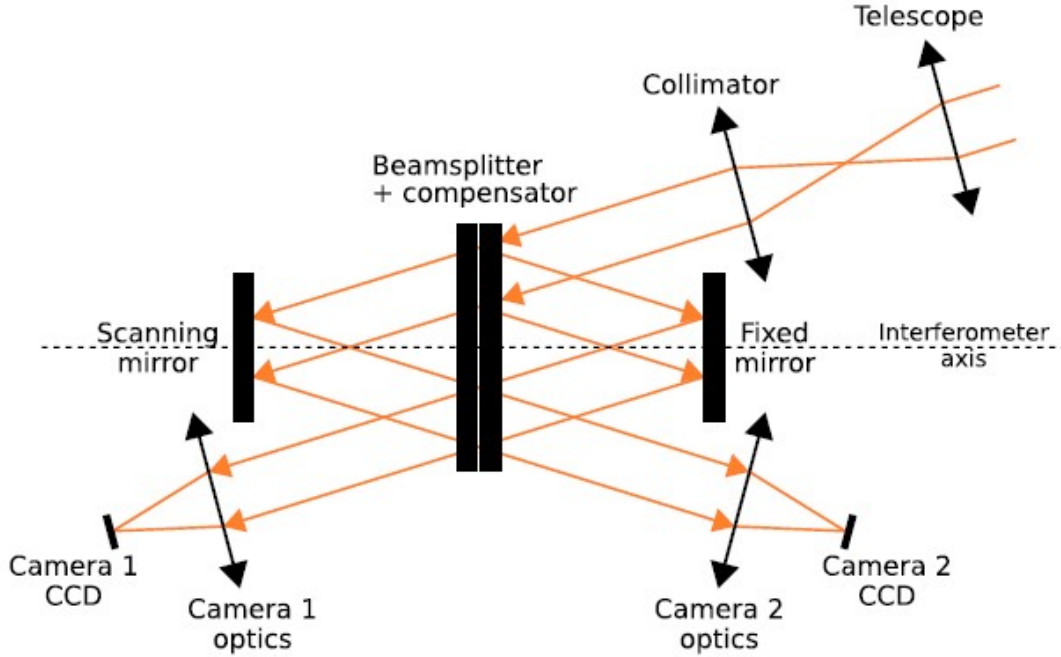


Figure 1.10. Représentation schématique simplifiée de la conception de SITELLE. Le phénomène d'interférence, produit sous l'effet du déplacement du miroir de gauche, sera réalisé à l'intersection des rayons réfléchis sur les miroirs avant d'atteindre les détecteurs. (Drissen et al. 2019)

soit, en utilisant l'expression de $I(p) - \frac{I(0)}{2}$ pour une source monochromatique, les relations trigonométriques ainsi que les propriétés de symétrie et d'antisymétrie des fonctions trigonométriques, nous obtiendrons que :

$$S(\nu) = \int_{-L}^L [\cos(2\pi(\nu_1 - \nu)p) + \cos(2\pi(\nu_1 + \nu)p)] dp .$$

Par conséquent :

$$S(\nu) = 2L \left[\frac{\sin(2\pi(\nu_1 - \nu)L)}{2\pi(\nu_1 - \nu)L} + \frac{\sin(2\pi(\nu_1 + \nu)L)}{2\pi(\nu_1 + \nu)L} \right] ,$$

d'où :

$$S(\nu) = 2L [\text{sinc}(2\pi(\nu_1 - \nu)L) + \text{sinc}(2\pi(\nu_1 + \nu)L)] .$$

La fonction wagon agit ainsi comme la fonction instrumentale de SITELLE dont la transformée de Fourier est un sinus cardinal (Martin et al. 2016).

1.8. Description de ce mémoire

Cette section a pour propos de décrire plus en détail les objectifs et méthodes employées au sein de ce mémoire.

1.8.1. Objectifs

L’objectif principal de ce mémoire est d’approfondir les connaissances acquises sur les amas de galaxies en se concentrant principalement sur les BCG ainsi que le rôle de leur trou noir supermassif sur leur environnement. Dès lors, afin de mieux comprendre ces diverses interactions, l’analyse de données observationnelles optiques à très haute résolution a été choisie, en se concentrant sur une cible particulière : NGC 1275, la BCG de l’amas de Persée. Cette méthode nous a ainsi permis d’obtenir davantage d’informations à partir d’observations dans le domaine optique grâce à une résolution très élevée ($R = 7000$, où $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$), mais également de mettre en comparaison ces données avec des observations obtenues dans d’autres domaines du spectre électromagnétique.

1.9. Déclaration de l’étudiant

Je, Benjamin Vigneron, déclare que ce mémoire et le travail qui y est présenté sont miens. Les deux chapitres présentés au sein de ce mémoire ont été rédigés par mes soins. Les figures du premier chapitre ont été obtenues auprès d’autres sources mises en références, tandis que celles présentées au sein du second chapitre sont issues de mon travail personnel.

La réduction des données ainsi que leurs analyses faites au chapitre 2 ont été réalisées au moyen du logiciel LUCI (Rhea et al. 2021). Les scripts utilisés afin de permettre ce traitement font appel à des fonctions inhérentes de LUCI, auxquelles j’ai pu apporter une contribution dans leur application afin de permettre une meilleure utilisation dans le contexte de données à très haute résolution. De plus, les données observationnelles dont est issue cette analyse ont été obtenues lors d’observations attribuées à Julie Hlavacek-Larrondo comme investigatrice principale pour l’instrument SITELLE. Julie Hlavacek-Larrondo, Carter Rhea, Laurie Rousseau-Nepton et Marie-Lou Gendron-Marsolais ont apporté une aide toute particulière afin de permettre l’analyse de ces données.

Des observations radio (Lim et al. 2008) et rayons X ont également été utilisées au sein du second chapitre grâce à l’assistance de Jeremy Lim et Carter Rhea. Cet appui a ainsi permis une analyse comparée des données optiques obtenues grâce à l’instrument SITELLE avec d’autres domaines spectraux afin de mieux comprendre leur interaction.

L’annexe A de ce mémoire présente mes contributions à titre de co-auteur, tandis que l’annexe B détaille les différentes présentations de mes résultats au sein de congrès réalisées au cours de ma maîtrise.

Bibliographie

- Aharonian, F. 2002, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 332, 215
- Almeida, C. R. & Ricci, C. 2017, *Nature Astronomy*, 1, 679
- Araya-Melo, P. A., Reisenegger, A., Meza, A., et al. 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399, 97
- Bacon, R., Accardo, M., Adjali, L., et al. 2010, 7735, 773508, conference Name : Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III ADS Bibcode : 2010SPIE.7735E..08B
- Begelman, M. C., Volonteri, M., & Rees, M. J. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 370, 289
- Bianchi, S., Maiolino, R., & Risaliti, G. 2012, *Advances in Astronomy*, 2012, 782030, aDS Bibcode : 2012AdAst2012E..17B
- Brienza, M., Shimwell, T. W., de Gasperin, F., et al. 2021, *Nature Astronomy*, 5, 1261, aDS Bibcode : 2021NatAs...5.1261B
- Bromberg, O., Nakar, E., Piran, T., & Sari, R. 2011, *The Astrophysical Journal*, 740, 100, aDS Bibcode : 2011ApJ...740..100B
- Canning, R. E. A., Ferland, G. J., Fabian, A. C., et al. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455, 3042, aDS Bibcode : 2016MNRAS.455.3042C
- Canning, R. E. A., Ryon, J. E., Gallagher, J. S., et al. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444, 336, aDS Bibcode : 2014MNRAS.444..336C
- Castignani, G., Pandey-Pommier, M., Hamer, S. L., et al. 2020, *A&A*, 640, A65
- Churazov, E., Forman, W., Jones, C., & Bohringer, H. 2000, arXiv preprint astro-ph/0002375
- Churazov, E., Sazonov, S., Sunyaev, R., et al. 2012, *Galaxy Clusters and Their Central Supermassive Black Holes : Case of M87*, conference Name : Twelfth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity Pages : 381-396 ADS Bibcode : 2012mgm..conf.381C
- Collins, C., Brough, S., Burke, D., Mann, R., & Lynam, P. 2003, *Astrophysics and Space Science*, 285, 51
- Conselice, C. J., Gallagher, III, J. S., & Wyse, R. F. G. 2001, *The Astronomical Journal*, 122, 2281, aDS Bibcode : 2001AJ....122.2281C
- Crawford, C. S., Allen, S. W., Ebeling, H., Edge, A. C., & Fabian, A. C. 1999, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 306, 857, aDS Bibcode : 1999MNRAS.306..857C
- Crawford, C. S. & Fabian, A. C. 1992, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 259, 265, aDS Bibcode : 1992MNRAS.259..265C
- Dressler, A., Oemler, Jr., A., Butcher, H. R., & Gunn, J. E. 1994, *The Astrophysical Journal*, 430, 107, aDS Bibcode : 1994ApJ...430..107D
- Drissen, L., Bernier, A.-P., Charlebois, M., et al. 2011, in *Fourier Transforms-New Analytical Approaches and FTIR Strategies* (Citeseer)

- Drissen, L., Martin, T., Rousseau-Nepton, L., et al. 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 485, 3930, aDS Bibcode : 2019MNRAS.485.3930D
- Elitzur, M. 2006, *New Astronomy Reviews*, 50, 728, aDS Bibcode : 2006NewAR..50..728E
- Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama, K., Alberdi, A., et al. 2019, *The Astrophysical Journal*, 875, L1, aDS Bibcode : 2019ApJ...875L...1E
- Fabian, A. C. 2012, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 50, p.455-489, 50, 455
- Fabian, A. C., Allen, S. W., Crawford, C. S., et al. 2002, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 332, L50, aDS Bibcode : 2002MNRAS.332L..50F
- Fabian, A. C., Arnaud, K. A., Bautz, M. W., & Tawara, Y. 1994, *The Astrophysical Journal*, 436, L63, aDS Bibcode : 1994ApJ...436L..63F
- Fabian, A. C., Johnstone, R. M., Sanders, J. S., et al. 2008, *Nature*, 454, 968, aDS Bibcode : 2008Natur.454..968F
- Fabian, A. C., Mushotzky, R. F., Nulsen, P. E. J., & Peterson, J. R. 2001, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 321, L20, aDS Bibcode : 2001MNRAS.321L..20F
- Fabian, A. C., Reynolds, C. S., Taylor, G. B., & Dunn, R. J. H. 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 363, 891, aDS Bibcode : 2005MNRAS.363..891F
- Fabian, A. C., Sanders, J. S., Crawford, C. S., et al. 2003, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344, L48, aDS Bibcode : 2003MNRAS.344L..48F
- Fabian, A. C., Sanders, J. S., Williams, R. J. R., et al. 2011a, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 417, 172, aDS Bibcode : 2011MNRAS.417..172F
- Fabian, A. C., Sanders, J. S., Ettori, S., et al. 2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318, L65, aDS Bibcode : 2000MNRAS.318L..65F
- Fabian, A. C., Sanders, J. S., Allen, S. W., et al. 2011b, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 418, 2154, aDS Bibcode : 2011MNRAS.418.2154F
- Fabian, A. C., Walker, S., Russell, H., et al. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 461, 922
- Falceta-Gonçalves, D., Caproni, A., Abraham, Z., Teixeira, D., & Dal Pino, E. d. G. 2010, *The Astrophysical Journal Letters*, 713, L74
- Ferland, G. J., Fabian, A. C., Hatch, N. A., et al. 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 392, 1475, aDS Bibcode : 2009MNRAS.392.1475F
- Gaspari, M., Ruszkowski, M., & Oh, S. P. 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 432, 3401, aDS Bibcode : 2013MNRAS.432.3401G
- Gendron-Marsolais, M., Hlavacek-Larrondo, J., Martin, T. B., et al. 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 479, L28, aDS Bibcode : 2018MNRAS.479L..28G
- Gendron-Marsolais, M., Hlavacek-Larrondo, J., van Weeren, R. J., et al. 2020, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 499, 5791, aDS Bibcode : 2020MNRAS.499.5791G

- Girardi, M., Giuricin, G., Mardirossian, F., Mezzetti, M., & Boschini, W. 1998, *The Astrophysical Journal*, 505, 74
- Gitti, M., Brunetti, G., & Setti, G. 2002, *Astronomy and Astrophysics*, v.386, p.456-463 (2002), 386, 456
- Gopal-Krishna, B. P., Gergely, L., & Wiita, P. 2010, *New Astron. Rev*
- Groves, B., Dopita, M., & Sutherland, R. 2006, *Astronomy and Astrophysics*, Volume 458, Issue 2, November I 2006, pp.405-416, 458, 405
- Hatch, N. A., Crawford, C. S., Johnstone, R. M., & Fabian, A. C. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 367, 433, aDS Bibcode : 2006MNRAS.367..433H
- Hau G., Kaufer A., M. S.????, *Very Large Telescope, SINFONI User Manual*, European Southern Observatory
- Heckman, T. M., Armus, L., & Miley, G. K. 1987, *The Astronomical Journal*, 93, 276
- Heckman, T. M., Baum, S. A., van Breugel, W. J. M., & McCarthy, P. 1989, *The Astrophysical Journal*, 338, 48, aDS Bibcode : 1989ApJ...338...48H
- Hitomi Collaboration, Aharonian, F., Akamatsu, H., et al. 2018, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, 11, aDS Bibcode : 2018PASJ...70...11H
- Hlavacek-Larrondo, J., Fabian, A. C., Edge, A. C., et al. 2012a, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 421, 1360, aDS Bibcode : 2012MNRAS.421.1360H
- Hlavacek-Larrondo, J., Fabian, A. C., Edge, A. C., & Hogan, M. T. 2012b, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424, 224, aDS Bibcode : 2012MNRAS.424..224H
- Holtzman, J. A., Faber, S., Shaya, E. J., et al. 1992, *Astronomical Journal*, 103, 1020
- Hönig, S. F. 2019, *The Astrophysical Journal*, 884, 171
- Jaffe, W. & Bremer, M. 1997, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 284, L1
- Johnstone, R. M., Canning, R., Fabian, A., et al. 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425, 1421
- Johnstone, R. M., Fabian, A. C., & Nulsen, P. E. J. 1987, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 224, 75, aDS Bibcode : 1987MNRAS.224...75J
- Johnstone, R. M., Hatch, N. A., Ferland, G. J., et al. 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 382, 1246, aDS Bibcode : 2007MNRAS.382.1246J
- Kerr, R. P. 1963, *Physical review letters*, 11, 237
- Khachatryan, V., Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., et al. 2011, *Physics Letters B*, 697, 434
- Kormendy, J. & Ho, L. C. 2013, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 51, issue 1, pp. 511-653, 51, 511
- Kravtsov, A. V. & Borgani, S. 2012, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50, 353
- Krolik, J. H. & Begelman, M. C. 1988, *The Astrophysical Journal*, 329, 702, aDS Bibcode : 1988ApJ...329..702K
- Latif, M. A. & Ferrara, A. 2016, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 33, e051, aDS Bibcode : 2016PASA...33...51L

- Lim, J., Ao, Y., & Dinh-V-Trung. 2008, *The Astrophysical Journal*, 672, 252, aDS Bibcode : 2008ApJ...672..252L
- Lin, Y.-T., Mohr, J. J., & Stanford, S. A. 2003, *The Astrophysical Journal*, 591, 749
- Markevitch, M. & Vikhlinin, A. 2001, *The Astrophysical Journal*, 563, 95, aDS Bibcode : 2001ApJ...563...95M
- Martin, T. B., Prunet, S., & Drissen, L. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463, 4223
- Mathews, W. G. & Brighenti, F. 2003, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, vol. 41, pp.191-239, 41, 191
- Matsushita, K., Belsole, E., Finoguenov, A., & Böhringer, H. 2002, *Astronomy & Astrophysics*, 386, 77
- McCarthy, I. G., Babul, A., Bower, R. G., & Balogh, M. L. 2008, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386, 1309, aDS Bibcode : 2008MNRAS.386.1309M
- McConnell, N. J., Ma, C.-P., Gebhardt, K., et al. 2011, *Nature*, 480, 215, aDS Bibcode : 2011Natur.480..215M
- McDonald, M., Gaspari, M., McNamara, B. R., & Tremblay, G. R. 2018, *The Astrophysical Journal*, 858, 45, aDS Bibcode : 2018ApJ...858...45M
- McDonald, M., Veilleux, S., & Rupke, D. S. 2012, *The Astrophysical Journal*, 746, 153
- McDonald, M., Veilleux, S., Rupke, D. S., Mushotzky, R., & Reynolds, C. 2011, *The Astrophysical Journal*, 734, 95
- McDonald, M., Veilleux, S., Rupke, D. S. N., & Mushotzky, R. 2010, *The Astrophysical Journal*, 721, 1262, aDS Bibcode : 2010ApJ...721.1262M
- McKee, C. F., Zweibel, E. G., Goodman, A. A., & Heiles, C. 1993, *Magnetic Fields in Star-Forming Regions - Theory*, conference Name : Protostars and Planets III Pages : 327 ADS Bibcode : 1993prpl.conf..327M
- McKinley, B., Tingay, S. J., Carretti, E., et al. 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474, 4056, aDS Bibcode : 2018MNRAS.474.4056M
- McNamara, B. & Nulsen, P. 2012, *New Journal of Physics*, 14, 055023
- McNamara, B. R. & Nulsen, P. E. J. 2007, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, vol. 45, Issue 1, pp.117-175, 45, 117
- McNamara, B. R., O'Connell, R. W., & Sarazin, C. L. 1996, *The Astronomical Journal*, 112, 91
- McNamara, B. R., Russell, H. R., Nulsen, P. E. J., et al. 2016, *The Astrophysical Journal*, 830, 79, aDS Bibcode : 2016ApJ...830...79M
- Merritt, D. 1985, *The astrophysical journal*, 289, 18
- Mezcua, M., Hlavacek-Larrondo, J., Lucey, J. R., et al. 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474, 1342, aDS Bibcode : 2018MNRAS.474.1342M

- Million, E. T. & Allen, S. W. 2009, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 399, 1307, aDS Bibcode : 2009MNRAS.399.1307M
- Mittal, R., Oonk, J. R., Ferland, G. J., et al. 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 426, 2957
- Mocz, P., Fabian, A. C., & Blundell, K. M. 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 413, 1107, aDS Bibcode : 2011MNRAS.413.1107M
- Molendi, S. 2004in , American Institute of Physics, 345
- Narayan, R. & Popham, R. 1993, Nature, 362, 820
- Netzer, H. 2015, arXiv preprint arXiv :1505.00811
- Netzer, H., Mainieri, V., Rosati, P., & Trakhtenbrot, B. 2006, Astronomy and Astrophysics, Volume 453, Issue 2, July II 2006, pp.525-533, 453, 525
- Ostriker, J. & Hausman, M. 1977, The Astrophysical Journal, 217, L125
- Oswalt, T. D. & Keel, W. C. 2013, Planets, Stars and Stellar Systems Vol. 6, publication Title : Planets, Stars and Stellar Systems. Volume 6 : Extragalactic Astronomy and Cosmology ADS Bibcode : 2013pss6.book.....O
- Padovani, P., Alexander, D. M., Assef, R. J., et al. 2017, The Astronomy and Astrophysics Review, Volume 25, Issue 1, article id.2, <NUMPAGES>91</NUMPAGES> pp., 25, 2
- Peterson, B. M. 1993, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 105, 247, aDS Bibcode : 1993PASP..105..247P
- Peterson, J. R. & Fabian, A. C. 2006, Physics Reports, 427, 1, aDS Bibcode : 2006PhR...427....1P
- Peterson, J. R., Paerels, F. B. S., Kaastra, J. S., et al. 2001, Astronomy and Astrophysics, v.365, p.L104-L109 (2001), 365, L104
- Pushkarev, A. B., Kovalev, Y. Y., Lister, M. L., & Savolainen, T. 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 468, 4992, aDS Bibcode : 2017MNRAS.468.4992P
- Randall, L. & Sundrum, R. 1999, Phys. Rev. Lett., 83, 3370
- Reynolds, C. S., McKernan, B., Fabian, A. C., Stone, J. M., & Vernaleo, J. C. 2005, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 357, 242, aDS Bibcode : 2005MNRAS.357..242R
- Rhea, C., Hlavacek-Larrondo, J., Rousseau-Nepton, L., Vigneron, B., & Guité, L.-S. 2021, Research Notes of the American Astronomical Society, 5, 208, aDS Bibcode : 2021RNAAS...5..208R
- Rosswog, S. & Brüggen, M. 2011, Introduction to High-Energy Astrophysics, publication Title : Introduction to High-Energy Astrophysics ADS Bibcode : 2011ihea.book.....R
- Ruffini, R. & Wheeler, J. A. 1971, Physics Today, 24, 30, aDS Bibcode : 1971PhT....24a..30R
- Salomé, P., Combes, F., Edge, A., et al. 2006, Astronomy & Astrophysics, 454, 437
- Salomé, P., Combes, F., Revaz, Y., et al. 2011, Astronomy & Astrophysics, Volume 531, id.A85, <NUMPAGES>8</NUMPAGES> pp., 531, A85

- Salomé, P., Combes, F., Revaz, Y., et al. 2008, *Astronomy and Astrophysics*, Volume 484, Issue 2, 2008, pp.317-325, 484, 317
- Sambruna, R. M., Maraschi, L., Tavecchio, F., et al. 2002, *The Astrophysical Journal*, 571, 206, aDS Bibcode : 2002ApJ...571..206S
- Sanders, J. S. & Fabian, A. C. 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 381, 1381, aDS Bibcode : 2007MNRAS.381.1381S
- Sarazin, C. L. 1986, *Reviews of Modern Physics*, 58, 1
- Schwarzschild, K. 1916, *Abh. Konigl. Preuss. Akad. Wissenschaften Jahre 1906,92*, Berlin,1907, 1916, 189, aDS Bibcode : 1916AbhKP1916..189S
- Shang, Z., Brotherton, M. S., Green, R. F., et al. 2005, *The Astrophysical Journal*, 619, 41, aDS Bibcode : 2005ApJ...619...41S
- Sharma, P., McCourt, M., Parrish, I. J., & Quataert, E. 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427, 1219, aDS Bibcode : 2012MNRAS.427.1219S
- Smith, W. L. & Mann, R. B. 1997, *Phys. Rev. D*, 56, 4942
- Tucker, W. H. & Rosner, R. 1983, *The Astrophysical Journal*, 267, 547, aDS Bibcode : 1983ApJ...267..547T
- Urry, C. M. & Padovani, P. 1995, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 107, 803, aDS Bibcode : 1995PASP..107..803U
- Voigt, L. M., Schmidt, R. W., Fabian, A. C., Allen, S. W., & Johnstone, R. M. 2002, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 335, L7, aDS Bibcode : 2002MNRAS.335L...7V
- Voit, G. M., Meece, G., Li, Y., et al. 2017, *The Astrophysical Journal*, 845, 80, aDS Bibcode : 2017ApJ...845...80V
- Volonteri, M., Habouzit, M., & Colpi, M. 2021, *Nature Reviews Physics*, 3, 732, aDS Bibcode : 2021NatRP...3..732V
- Von Der Linden, A., Best, P. N., Kauffmann, G., & White, S. D. M. 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 379, 867, aDS Bibcode : 2007MNRAS.379..867V
- Werner, N., Durret, F., Ohashi, T., Schindler, S., & Wiersma, R. P. C. 2008, *Space Science Reviews*, 134, 337, aDS Bibcode : 2008SSRv..134..337W
- Zajacek, M. & Tursunov, A. 2019, *The Observatory*, 139, 231, aDS Bibcode : 2019Obs...139..231Z

Chapter 2

Expanding on the Nature and Kinematics of the Optical Filamentary Nebula of NGC 1275 with High Spectral Resolution Observations

B. Vigneron,¹ J. Hlavacek-Larrondo,^{1,2} T. Webb,³ C. L. Rhea,^{1,2} M.-L. Gendron-Marsolais,⁴ J. Lim,⁵ L. Drissen,^{6,2,7,8} T. Martin,^{6,2,7,8} L. Rousseau-Nepton,⁹ Y. Li,¹⁰ G. L. Bryan,^{11,12} A. Fabian,¹³ M. McDonald,¹⁴ B. McNamara,¹⁵ A. Edge,¹⁶ S. Hamer,¹⁷ N. Werner,¹⁸ A. Richard-Lafferrière,¹⁹

¹*Département de physique, Université de Montréal, C.P. 6128 Succ. Centre-ville, Montréal H3C 3J7, Canada*

²*Centre de recherche en astrophysique du Québec (CRAQ)*

³*Department of Physics, McGill Space Institute, McGill University, 3600 rue University, Montreal H3A 2T8, Canada*

³*Instituto de Astrofísica de Andalucía, IAA-CSIC, Apartado 3004, 18080 Granada, España*

⁴*Department of Physics, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong*

⁵*Département de physique, de génie physique et d'optique, Université Laval, Québec (QC), G1V 0A6, Canada*

⁶*Department of Physics and Astronomy, University of Hawai'i at Hilo, Hilo, HI 96720, USA*

⁷*Canada-France-Hawaii Telescope, 65-1238 Mamalahoa Hwy, Kamuela, Hawaii 96743, USA*

⁸*Department of Astronomy, University of California, Berkeley, CA 94720, USA*

⁹*Department of Astronomy, Columbia University, 550 West 120th Street, New York, NY 10027, USA*

¹⁰*Center for Computational Astrophysics, Flatiron Institute, 162 5th Avenue, New York, NY 10010, USA*

¹¹*Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge CB3 0HA, UK*

¹² *Kavli Institute for Astrophysics and Space Research, MIT, Cambridge, MA 02139, USA*

¹³ *Department of Physics and Astronomy, University of Waterloo, 200 University Avenue West, Waterloo, ON N2L 3G1, Canada*

¹⁴ *Department of Physics, Durham University, South Road, Durham DH1 3LE, UK*

¹⁵ *Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge CB1 0HA, UK*

¹⁶ *Department of Theoretical Physics and Astrophysics, Faculty of Science, Masaryk University, Brno, Czech Republic*

Cet article est en cours de préparation pour soumission à la revue *Astrophysics Journal* (ApJ).

Abstract

We present new high spectral resolution observations ($R = \lambda/\Delta\lambda = 7000$) of the filamentary nebula surrounding NGC 1275, the central galaxy of the Perseus cluster, with SITELLE, a Fourier transform imaging spectrometer installed on the CFHT. The impressive field of view of SITELLE ($11' \times 11'$) is capable of imaging the elongated filamentary structure of ionised gas in its entirety despite its large size of $80\text{kpc} \times 50\text{kpc}$ ($\sim 3.6' \times 2.3'$). Previous SITELLE observations of NGC 1275 revealed the velocity structure of the filaments, but suffered from poor spectral resolution ($R = 1800$) and were not capable of resolving the spectral features in detail. Here, we present new flux, velocity and velocity dispersion maps at $R = 7000$ that reveal in great detail the kinematics of the optical nebula at $[\text{S II}]\lambda 6716$, $[\text{S II}]\lambda 6731$, $[\text{N II}]\lambda 6584$, $\text{H}\alpha(6563\text{\AA})$, and $[\text{N II}]\lambda 6548$. We demonstrate that the central region of the filaments is characterized by localized multiple emission line components, and we clearly distinguish the ionised sulfur emission line doublet ($[\text{S II}]\lambda 6716$ & $[\text{S II}]\lambda 6731$). The electron density of the optical gas derived from the $[\text{S II}]$ lines shows a close resemblance to the electron density derived from X-ray observations with the Chandra space telescope. More importantly, the new flux, velocity, and velocity dispersion maps seem to indicate that there are two types of filaments: 1) a first type spreading throughout the cluster core that is faint and remarkably quiescent with a uniform velocity dispersion of ~ 50 km/s and 2) a second type found in the wake of X-ray cavities that leads to filaments that are 10 times brighter and much more turbulent with a typical velocity dispersion of ~ 200 km/s. This argument is reinforced by the clear spatial correlation between X-ray, $\text{H}\alpha$ and molecular gas emission at the lower border of an inflating radio bubble formed by NGC 1275's supermassive black hole.

Keywords: Galaxies: NGC 1275 - Galaxies: clusters: individual: Perseus cluster

2.1. Introduction

Clusters of galaxies are extended structures hosting several hundred to thousands of gravitationally bound galaxies (Bahcall 1977, Abell et al. 1989). These objects are mostly composed of dark matter while galaxies only represent a very small fraction of the cluster’s mass (Sand et al. 2004, Voigt & Fabian 2006). There is also a third component made of hot ionised gas at temperatures of $10^7 - 10^8$ K that fills these structures and is known as the intra-cluster medium or ICM (Cavaliere, Gursky & Tucker 1971, Gursky et al. 1971). Finally, an elliptical, very luminous, and large galaxy is often found at the center of the gravitational potential of the cluster and is known as the brightest cluster galaxy (BCG), which sometimes exhibits an extended filamentary nebula of optical ionised gas (Crawford et al. 1999, McDonald et al. 2010).

Galaxy clusters are typically divided into two categories depending on their X-ray emission profiles: cool-core clusters display a strongly peaked emission profile, while non-cool core clusters show a more diffuse and uniform emission profile (Million & Allen 2009, Hudson et al. 2010). The BCGs in cool-core clusters usually exhibit filamentary nebula of optical ionised gas (McDonald et al. 2010, Crawford et al. 1999). These filaments display a high $H\alpha$ luminosity (e.g. Conselice et al. 2001) as well as cold gas emission lines (e.g. Salomé et al. 2006) but are mostly devoid of star formation, which excludes photoionization as a primary ionization mechanism (Kent & Sargent 1979).

A promising explanation for the formation and evolution of the filamentary nebulae surrounding BCGs of cool-core clusters resides in the precipitation limit hypothesis (Gaspari et al. 2012, 2013, 2015, Voit et al. 2015a, 2015b, Li et al. 2015, Voit et al. 2017). As an introduction to this hypothesis, it is known that the *Circumgalactic Medium* (CGM) contains the majority of the baryonic matter associated with the host galaxy and will also provide the necessary gas to maintain its star formation (Voit et al. 2017). The constant cooling by emission of the CGM should imply high star formation rates. However, since there is no evidence of important star formation inside these galaxies, a mechanism is necessary to stop the gas from cooling and falling in the potential well (Crawford et al. 1999).

In clusters of galaxies, the heating mechanism is thought to be orchestrated by the supermassive black hole at its core. This can be seen through radio bubbles generated by

the central black hole which carve out large X-ray cavities in the ICM, entailing shocks, turbulence, and mixing (Graham et al. 2008, Randall et al. 2015, Zhuravleva et al. 2014). This phenomenon will in turn bring enough energy to limit the cooling of the ambient gas and therefore star formation in the galaxy (Crawford et al. 1999, Best et al. 2007, Voit et al. 2008).

The precipitation limit hypothesis suggests that the flows put in motion by the heating process then promote the condensation of the hot ambient medium by raising it to higher altitudes. Hence, the adiabatic uplift promotes condensation by reducing the ratio of cooling time to free-fall time. This is analogous to the precipitations occurring on Earth, where raindrops are formed by the uplifting of gas higher in the atmosphere. Moreover, simulations show that the rain of cold gas towards the center of the galaxy will initially feed the central black hole and therefore the power of the flows that it produces (Voit et al. 2017). This will, in turn, heat the ambient medium and increase the ratio of the cooling time to the free fall time so that the precipitation will cease. Observations of filamentary nebulae surrounding BCGs could therefore offer the possibility to study this hypothesis.

NGC 1275 is a bright elliptical galaxy located at the center of the Perseus Cluster and displays an extended filamentary nebula of optical ionised gas with a size of about 80 kpc \times 50 kpc (McNamara et al. 1996, Conselice et al. 2001, Hamer et al. 2016). Since the Perseus cluster is remarkably close and the observed filaments are extremely extended, its BCG constitutes a primary target of interest to study the formation and ionization mechanisms of the filamentary nebulae.

NGC 1275 has been studied extensively at all wavelengths (see Forman et al. 1972, Fabian et al. 2011, Salomé et al. 2011, Lim et al. 2012, Nagai et al. 2019). These observations have revealed several features that are influenced both by the gravitational potential of external objects as well as the supermassive black hole at its core. Indeed, X-ray observations of the cluster reveal several cavities that originate from several generations of radio jets emitted from the active galactic nuclei (AGN) of NGC 1275 (McNamara et al. 1996, Falceta-Gonçalves et al. 2010, Fabian et al. 2011, Gendron-Marsolais et al. 2018). These jets carved the neighbouring ICM, creating buoyantly rising radio-emitting bubbles (Dhawan et al. 1998, Falceta-Gonçalves et al. 2010).

The first observations of the filamentary nebula surrounding NGC 1275 by Minkowsky (1957), Rubin (1977), and Lynds (1970) unveiled a high-velocity (HV) feature (\sim 8200 km/s) associated with a forefront galaxy and a low-velocity (LV) structure (\sim 5200 km/s) linked to NGC 1275. Following *Hubble Space Telescope* observations of the low-velocity

structure unveiled the filamentary appearance of the ionised gas (Fabian et al. 2008), whereas soft X-ray counterparts were discovered for certain bright filaments with the *Chandra X-Ray Observatory* (Fabian et al. 2003b). Moreover, cold molecular gas has been associated with the emission of the filamentary nebula of NGC 1275 (Salomé et al. 2006, Ho et al. 2009, Salomé et al. 2011, Mittal et al. 2012), and also linked to a disk of emission near the galaxy (Lim et al. 2008, Nagai et al 2019).

Nevertheless, the first complete observation of the nebula was performed by Conselice et al. (2001) with high-resolution imaging, integral field, and long-slit spectroscopy (WIYN & KPNO). These observations brought forth the first velocity map of the central $\sim 45''$ of the nebula, illustrating a rotation phenomenon at this scale. Moreover, the authors hypothesize that the formation of the filaments was carried through compression of the hot ICM by outflows from the AGN of NGC 1275. Observations from the Gemini Multi-Object Spectrograph along six slits carefully positioned toward certain filaments showed evidence of outflowing gas and flow patterns (Hatch et al. 2006). In 2018, the filamentary nebula was imaged for the first time with SITELLE, a Fourier transform imaging spectrometer installed at Canada-France-Hawaiï Telescope (CFHT) that has an extremely wide field of view ($11' \times 11'$) capable of imaging the nebula in its entirety (see Figure 2.1). Gendron-Marsolais et al. (2018) showed that the velocity structure of the filaments appears to be generally devoid of specific trends or rotation.

However, these observations converge toward the idea of a formation scenario involving another mechanism for the filamentary nebula surrounding NGC 1275. Indeed, this structure could be formed by the influence of the AGN whose jets create bubbles rising in the ICM (Churazov et al. 2001, Reynolds et al. 2005). The north-eastern "Horse-shoe" filament of the nebula and its less visible counterpart also support this argument since their shape and symmetric positions are reminiscent of the toroidal flow pattern created by the elevation of a buoyant bubble in a liquid (Fabian et al. 2003b). Therefore, a formation model through turbulence-induced cooling by radio bubbles can likely be involved.

In this paper, we present new high spectral resolution observations of the filamentary nebula surrounding NGC 1275 obtained with SITELLE. The first SITELLE observations presented in Gendron-Marsolais et al. (2018) revealed the kinematics of the ionized nebula, but suffered from poor spectral resolution ($R = 1800$) that could not resolve the outer filaments. Here, the high spectral resolution nature of the data at $R = 7000$ allow us to deepen the scope of the study by performing a velocity components analysis. In Section 2, we detail the observations performed with SITELLE and the various procedures used during



Figure 2.1. The complete field of view ($11' \times 11'$) of the SITELLE observations of NGC 1275 with full-band SN1 (363-386 nm; blue color), SN2 (482-513 nm; green color) filters at low spectral resolution ($R = 1800$) and SN3 filter (648-685 nm; red color) at high spectral resolution ($R = 7000$). SN2 and SN1 observations of NGC 1275 will be presented and analyzed in Hlavacek-Larrondo & Thilloy et al. (in preparation).

the data analysis. In Section 3 we present and discuss our results. Finally, a summary of our conclusions will be presented in Section 4.

To directly compare our results to those of Gendron-Marsolais et al. (2018) and the Hitomi Collaboration et al. (2018), we also adopt for NGC 1275 a redshift of $z = 0.017284$, which implies an angular scale of $21.2 \text{ kpc arcmin}^{-1}$. This also corresponds to a luminosity distance of 75.5 Mpc, assuming $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.286$ and $\Omega_{vac} = 0.714$

2.2. Data Analysis

2.2.1. Observations with SITELLE

The filamentary nebula surrounding NGC 1275 was observed in February 2020 with SITELLE, a Fourier transform imaging spectrometer installed at CFHT during Queued Service Observations 20AD99 by PIs Julie Hlavacek-Larrondo and Carter Rhea. SITELLE was used with the SN3 filter for 4 hours (1710 exposures of 8.42s) including overheads, necessary to obtain a high spectral resolution of $R = 7000$. This filter covers wavelengths from 651 nm to 685 nm. These observations were centered on NGC 1275 with RA 03hrs19mins48.16s

and DEC +41°30'42.1". Five emission lines are observed in this configuration, namely : [S II] λ 6716, [S II] λ 6731, [N II] λ 6584, H α (6563Å), and [N II] λ 6548. The oxygen emission lines [O I] λ 6300 and [O I] λ 6363 cannot be observed in such a configuration since they fall just outside of the spectral range of the SN3 filter (648-685 nm).

2.2.2. Background Subtraction

After a careful evaluation of the high spectral resolution data obtained from SITELLE, it became clear that an important variability of the background emission within the field-of-view is present in the spectra (see Appendix A). This background emission is mainly produced by the galaxies present near the filamentary nebula as well as the diffuse emission of other structures in the field-of-view. The background variability affects mainly the analysis of the [S II] λ 6717 and [S II] λ 6731 emission lines, which are much fainter than the other optical lines. To tackle this issue, we decided to divide the entire filamentary nebula into nine regions as illustrated in Figure 2.2. We then attributed to each region a specific sky zone devoid of targeted emission lines and located within the boundaries of the region. The sky zone is then used during the fitting procedure to perform the background subtraction for its entire dedicated region. Once all the regions have been fitted properly, we can then create a mosaic of the flux, velocity, and dispersion maps for the complete filamentary nebula. This procedure allows us to counter the background variability by considering several background regions instead of one to increase the reliability of our results. We have checked that even if we choose slightly different background regions, all of the results presented throughout this paper remain valid. The development of a dedicated methodology to tackle background variability in detail for SITELLE data will be part of a future paper.

2.2.3. Weighted Voronoi Tessellation

From a preliminary analysis of the high spectral resolution data of NGC 1275, we noticed that the signal-to-noise ratio (SNR) of the filamentary nebula was relatively low compared to what was expected from the SITELLE mission. Poor weather conditions during the data acquisition are considered to be the main cause of such low SNR and result in less visible filaments on an SNR map.

Thus, to tackle this issue, we decided to implement a weighted Voronoi tessellation algorithm as a feature of the LUCI software using the following tool <https://github.com/XtraAstronomy/AstronomyTools> (Rhea et al. 2020a). This procedure creates bins of pixels whose SNR is defined by a threshold chosen by the user. Therefore, regions with strong emissions will be contained within smaller bins, while regions with strong noise will be grouped into large bins making them less noticeable compared to regions of interest such as filaments.

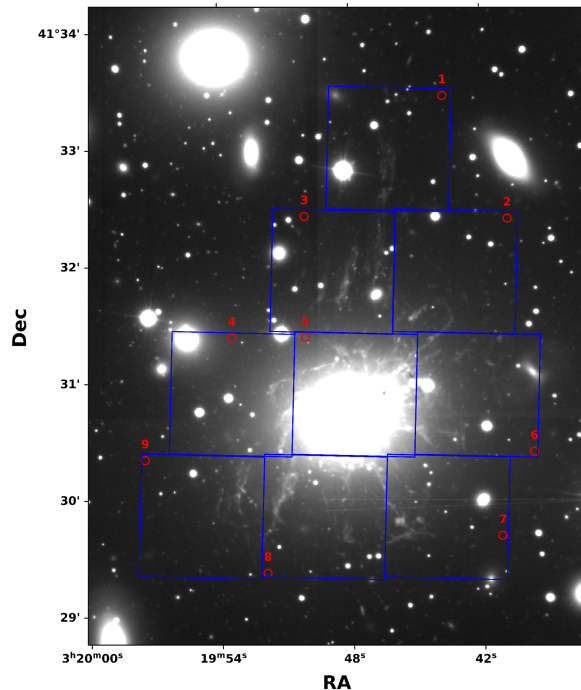


Figure 2.2. Mosaic map used during the analysis to tackle the background variability issue. The blue squares represent the regions whose spectra are fitted by LUCI, while the red circles denote the regions whose emission was used for background subtraction. The grayscale background of the figure is the deep image of the filaments surrounding NGC 1275 produced with LUCI.

More specifically, we start by making a SNR map of the filamentary nebula. We then perform a nearest neighbor algorithm to establish the distance between the weight center of each bin. The pixels are then aggregated to create the bins and attain the SNR threshold established. In our case, we decided to fix the SNR level to 30 which is close to the estimated value of $\text{SNR} = 35$ that would have been obtained in ideal observing conditions with SITELLE. From there, we establish the number of bins defined by the algorithm and create numpy files for each that will be used during the fitting procedure of the analysis. The function `wvt_fit_region` can be called to produce the fitting of a specific region of the image which will be run through the weighted Voronoi algorithm first.

One example of the WVT procedure can be seen in Figure 2.3 where the algorithm has been applied to the horseshoe filament. In this image we can see that the WVT code manages to improve the detection of the base of the horseshoe in the flux map. However, the signal of the filament's upper region is too low to be properly detected and accounted for in the resulting flux map. This motivated us to apply a flux threshold of $1 \times 10^{-18} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$ to our final maps to only consider detectable filaments.

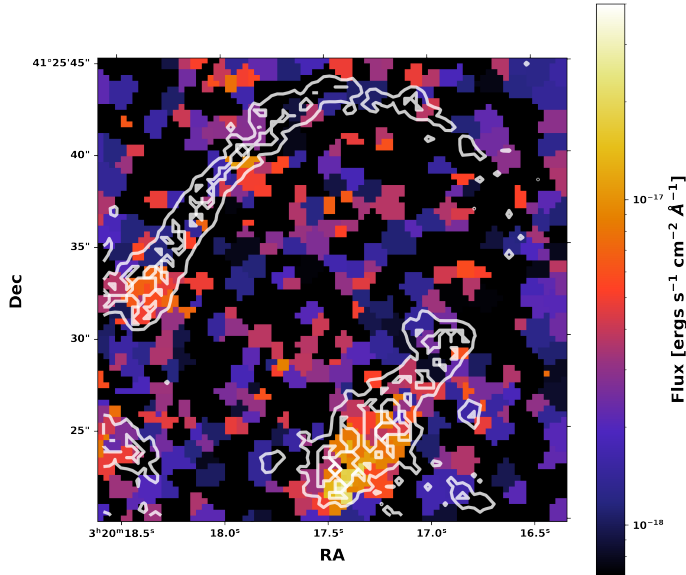


Figure 2.3. Example of a weighted Voronoi tessellation performed by `Luci` to produce the flux map of the horseshoe filament of the filamentary nebula, whose general outline, taken from the mask displayed in Figure 2.4, is superimposed on the figure as white contours.

2.2.4. Masking Procedure

To produce effective and readable maps during the fitting steps of our analysis, we decided to implement a conventional masking procedure designed to keep as much information about the filamentary nebula as necessary. To implement this mask, we used the observational data presented by Conselice et al. (2001) and produced by the WIYN 3.5m telescope. These deep observations showed the filamentary nebula surrounding NGC 1275 with unprecedented precision and spatial resolution; therefore, by using these observations as a basis for our masking procedure, we can retain the necessary information for our fitting results.

The procedure used to develop this mask was implemented as follows : first, a threshold signal-to-noise value of 10 in the Conselice et al. (2001) WIYN data was chosen in order to retain as much information regarding the filaments as possible without keeping too many background pixels in the resulting image. Thus, pixels with a value below this threshold were assigned a null value while the remaining data was set to 1 to effectively create a mask with binary values that could be passed as a Boolean array (see Figure 2.4).

For the mask to be used in conjunction with the `LUCI` software, some groundwork was needed to perfectly match the size and position of the mask with our `SITELLE` data. To do this, we determined the number of pixels needed to cover the entirety of the `SITELLE` field

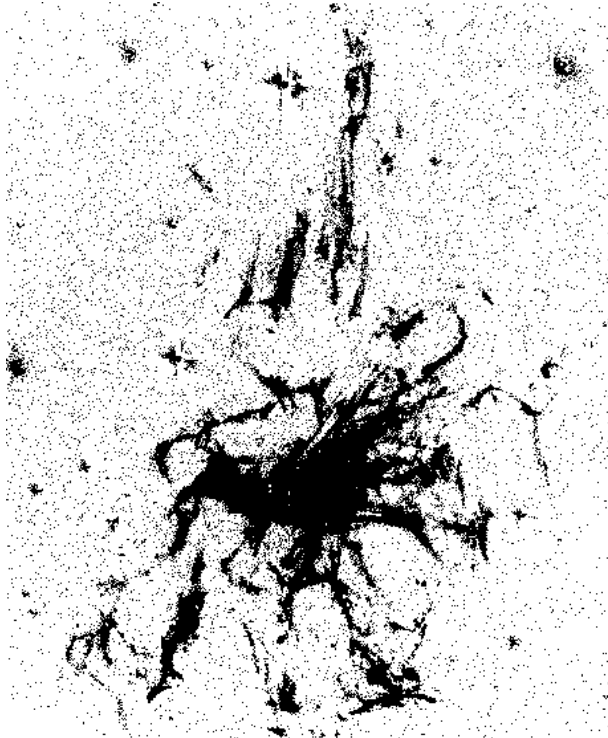


Figure 2.4. Applied mask on the SITELLE data of NGC 1275. White pixels are masked while black pixels are unmasked. The data used to produce this mask comes from the high spatial resolution images taken by Conselice et al. (2001) with the WIYN telescope.

of view by considering the pixel dimensions of both the SITELLE and WIYN instruments. Then, by knowing the position of the central pixel of the SITELLE data using the declination and right ascension, we were able to determine the corresponding pixel on the mask. Thus, by knowing the number of pixels needed as well as the central pixel we used the function `Cutout2D` from the `astropy.nddata` package to extend our mask to fit the SITELLE field of view.

We then interpolated the mask onto the specific dimensions of the SITELLE observations using the function `interp2d` from the `scipy.interpolate` package, therefore creating a perfectly fitted mask without losing its nature despite having different dimensions originally.

Finally, to properly align the mask with the SITELLE data, we determined the position of 11 stars in both fields of views, which would then act as anchor points for the `estimate_transform` and `apply_transform` functions of the `astroalign` package.

2.2.5. Emission Line Fitting Procedure

After applying our conventional mask to the SITELLE data cube, we were able to proceed to the emission lines fitting part of the analysis. The recent software LUCI was used to perform the fit (Rhea et al. 2020a, Rhea et al. 2020b, Rhea et al. 2021a, Rhea et al. 2021b) according to our mosaic structure detailed previously. Indeed, LUCI offers several

advantages based on the robustness of the machine learning methods it uses. Since LUCI is a novel analysis software, a summary of its operations and capabilities will be presented here but we invite the user to see <https://crhea93.github.io/LUCI/index.html> for more details (Rhea et al. 2021a).

First, the spectra found in the data cube are normalized according to the highest amplitude and a shift in wavelength is applied to properly center the velocities between -500 & 500 km/s. This constraint is necessary for the following procedure that uses machine learning. Indeed, to efficiently fit a spectrum, the velocity and broadening prior informations need to be precise to facilitate the minimization algorithm at the heart of the emission lines fitting and thus to accelerate the whole procedure (Zeidler et al. 2019, Bittner et al. 2019). Therefore, a machine learning technique based on a convolutional neural network (CNN) is used to properly determine these priors.

From there, the values obtained through the CNN are passed as the line position and broadening. The amplitude, however, is obtained from the height of the shifted emission line. With these three values, the line can be effectively fitted by LUCI with the `scipy.optimize.minimize` function from the `scipy` package. This function uses the SLSQP (Sequential Least Squares Programming) optimization algorithm. Since SITELLE’s Instrumental Spectra Function (ISF - see Martin et al. 2016) is a sincgauss, we used the sincgauss fitting model presented by LUCI. The results from this procedure are the amplitude, velocity, and broadening of the five emission lines : $[\text{S II}]\lambda 6716$, $[\text{S II}]\lambda 6731$, $[\text{N II}]\lambda 6584$, $\text{H}\alpha(6563\text{\AA})$, and $[\text{N II}]\lambda 6548$.

Finally, to account for the location of Earth on its orbit at the time of observations, a correction is applied to the velocity map. This correction is determined with the `heliocentric_correction` function of the LUCI package, and gives a velocity correction of -27.5 km/s.

2.2.6. Multiple Emission Components

The high spectral resolution observations of the filamentary nebula revealed many intricacies which required specific care during our analysis. One of these difficulties resides in the local multiple emission components affecting the spectral appearance of our data (see Annex B). Indeed, since the three-dimensional structure of the filaments is not currently known, it is difficult to decipher the possible overlap of several filaments. For instance, the forefront galaxy acts as a source of contamination in our spectra. Moreover, broad, multiple component emission lines from the AGN are coupled with the filament emission in the central $7''$ by $7''$, thus, the resulting fits produced by LUCI are poor when considering these specific regions.

For the sake of clarity in our resulting maps, we decided to mask the main sources of multiple emission components. Firstly, the high-velocity system, associated with a forefront galaxy, has a velocity of ~ 8200 km/s. It can thus be identified through its systemic velocity and ignored during the fitting procedure. The AGN located at the center of NGC 1275 is also a powerful source of emission with extremely broad emission lines. This intense broadening overlapping with the filaments' narrow emission impedes LUCI from properly fitting the central regions of the filamentary nebula. Therefore, to facilitate the analysis, we decided to mask the most broadened region of emission coming from the AGN. To do so, we studied the emission line profiles with LUCI and determined that the AGN spectral presence is confined within a radius of ~ 2.6 kpc from the center of the galaxy. Regarding the localized clumps of multiple component emission lines, we decided to only fit a single component to extract their spectral information. An extended analysis will be performed in the future with a dedicated procedure to adequately fit these closely related emission components, only displaying small shifts in velocity, as well as developing a joint model to properly disentangle the broad AGN emission in the central region of the filamentary nebula.

2.2.7. [SII] Emission Lines Fitting

Regarding the detection and fitting of the [S II] λ 6716 and [S II] λ 6731 emission lines, one of the main difficulties in their analysis resides in the fact that the background emission falls near them. However, after applying our methodology to tackle the background variability, we were able to detect and resolve these emission lines. Once this was done, to improve the fitting procedure made with `Luci` even more, some additional changes were implemented.

Indeed, since the [S II] λ 6716 and [S II] λ 6731 emission lines are fainter than the [N II] λ 6583, H α (6563Å), and [N II] λ 6548 lines, we decided to change our WVT code to measure the SNR of the [S II] doublet instead. Therefore, the tessellations are determined according to the [S II] signal to noise ratio which makes them bigger but allows us to improve the detection of these emission lines. This has allowed us to produce the first complete analysis of the ionised sulfur emission in the entirety of the filamentary nebula, which will be detailed in section 2.3.

2.3. Results and discussion

2.3.1. Ionization Process

Through our analysis of the high spectral resolution data with LUCI, we have obtained several resulting maps that will be presented throughout this section. This subsection will specifically discuss the flux and ratio maps as well as the information they convey regarding the ionization mechanism involved in the filamentary nebula.

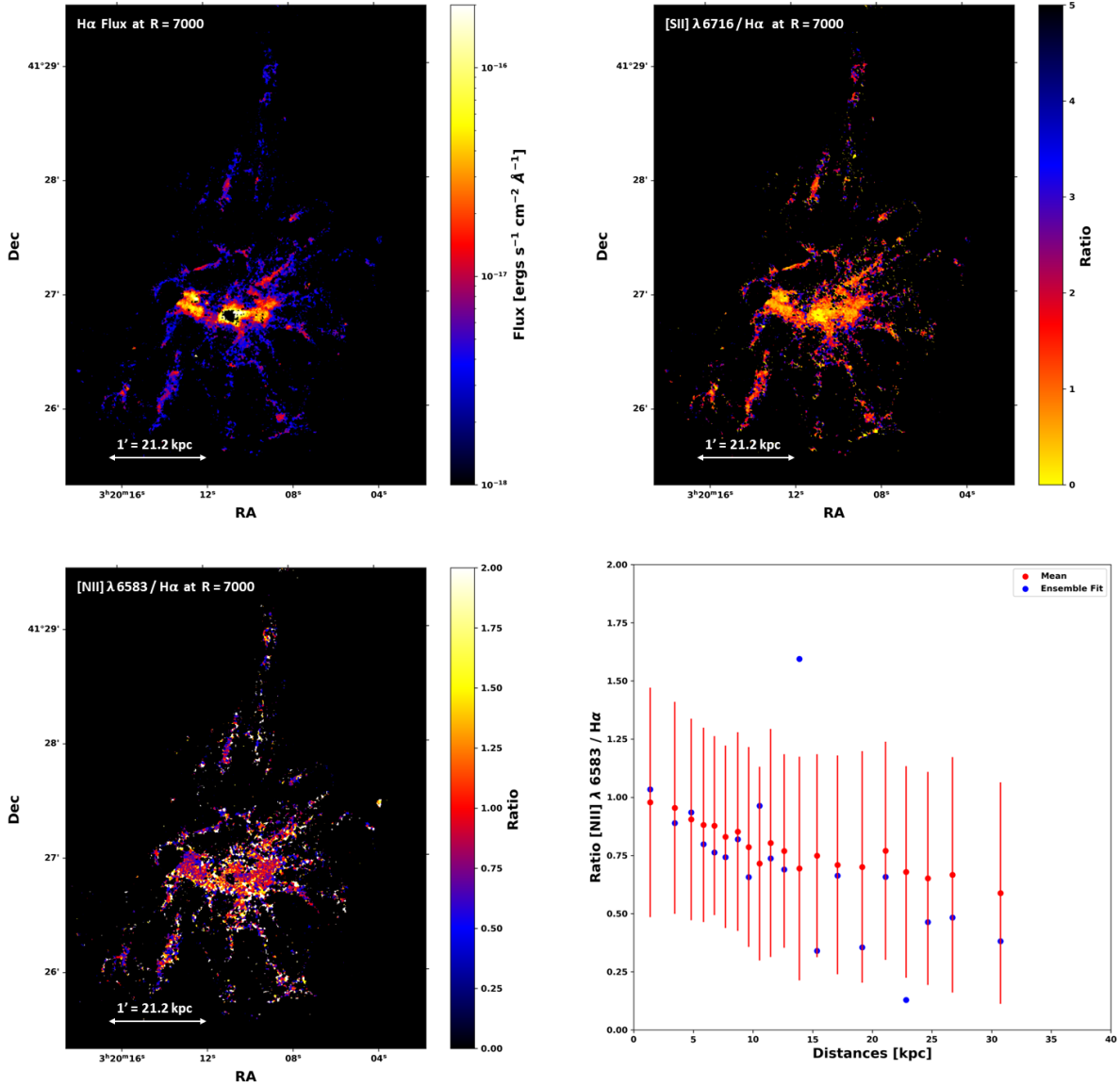


Figure 2.5. Upper left : $H\alpha$ flux map of the filaments in NGC 1275. Upper right : $[S\text{ II}]\lambda 6716/H\alpha$ line ratio map. Bottom left : $[N\text{ II}]\lambda 6583/H\alpha$ line ratio map. Bottom right : Mean (in red) and ensemble fits (in blue) across annuli containing 1500 pixels for the $[N\text{ II}]\lambda 6548 / H\alpha$ ratio.

First, the $H\alpha$ flux map shown in the upper left plot of Figure 2.5 reveals a disk-like structure in the central region extending to ~ 22 kpc by 5 kpc displaying a flux an order of magnitude higher than the rest of the filaments. The flux map from Gendron-Marsolais et al. (2018) hinted to this structure, but the new data reveal it in much greater detail. The high flux is also associated with a large velocity dispersion, which will be discussed in section 2.3.4, as well as a higher line intensity. Likewise, localised parts of specific filaments also display slightly higher $H\alpha$ fluxes, but most of them have a homogeneous lower flux.

Emission line ratios can be of great interest when studying the ionization properties of an emitting gas (see Kewley et al. 2019). In this regard, the $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$ ratio is of importance since it informs us of the relative implication of stars versus AGN for the ionization of the filaments, respectively through radiation or shock heating. In the case of a low ratio (meaning $\text{H}\alpha \gg [\text{N II}]\lambda 6583$), photoionization is more likely to occur, while for a higher ratio (meaning $\text{H}\alpha \leq [\text{N II}]\lambda 6583$), a higher level of ionisation is needed, thus, AGN activity is more likely to ionise the gas (Sánchez Almeida et al. 2012). Therefore, in the case of the filamentary nebula surrounding NGC 1275, we can see that the central region of the structure displays a ratio close to or slightly superior to 1.0, while the extended filaments show a variety of smaller ratio values between 0.5 to 1.0, as can be seen in the lower left plot of Figure 2.5.

This can also be seen in the lower right plot of Figure 2.5, where we produced the mean (i.e. taking the mean of the ratio values accross the annuli) and ensemble fit results (i.e. fitting one spectra for the entirety of the pixels inside the annulus to obtain an ensemble ratio value) for the $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$ ratio across annuli containing 1500 pixels each. This figure shows a diminution in the mean values from the center (0 - 10 kpc) to the outer filaments (10 - 30 kpc) from 1.0 ± 0.5 to 0.6 ± 0.5 , thus suggesting a gradual change in the ionisation mechanism.

This result is similar to what was previously found by Gendron-Marsolais et al. (2018) with the low-spectral resolution SITELLE data ($R=1800$), but also through slit spectroscopy (Hatch et al., 2006). The presence of star formation has already been detected for specific southern and north-western regions of the filamentary nebula (see Cannning et al. 2010, 2014). However, photoionization leads to a ratio that is highly dependent on metallicity, with an upper limit of around 0.5 (Kewley et al. 2006), thus, such a process could not explain higher ratio values found throughout the southern filaments. In addition, we can also conclude that the central region, near the AGN, is more likely to be ionised by its activity since it displays higher ratio values, while a different process would be involved to ionize the outer filaments showing intermediate $[\text{N II}]\lambda 6548 / \text{H}\alpha$ emission line ratio values.

Another possibility that is often presented as a mechanism to explain the ionisation of the filaments is through collisional excitation by energetic particles coming from the hot ICM (see Ferland et al. 2009). In such circumstances, the $[\text{N II}]\lambda 6548 / \text{H}\alpha$ emission line ratio would be close to ~ 0.3 . However, if we consider the ratio of $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$, displayed in the upper right plot of Figure 2.5, we can see that the outer filaments show higher ratio values above ~ 1 . In the case of ionization by cosmic rays, the ratio of $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ is predicted to be at 1.4 according to the cosmic ray heating model (see Table 5 of Ferland et al. 2009), which could be an argument in favor of the collisional ionisation model for the outer filaments. However, the northern filaments as well as parts of some other filaments show even higher $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ ratio values above ~ 2.5 , preventing us from validating this ionisation model.

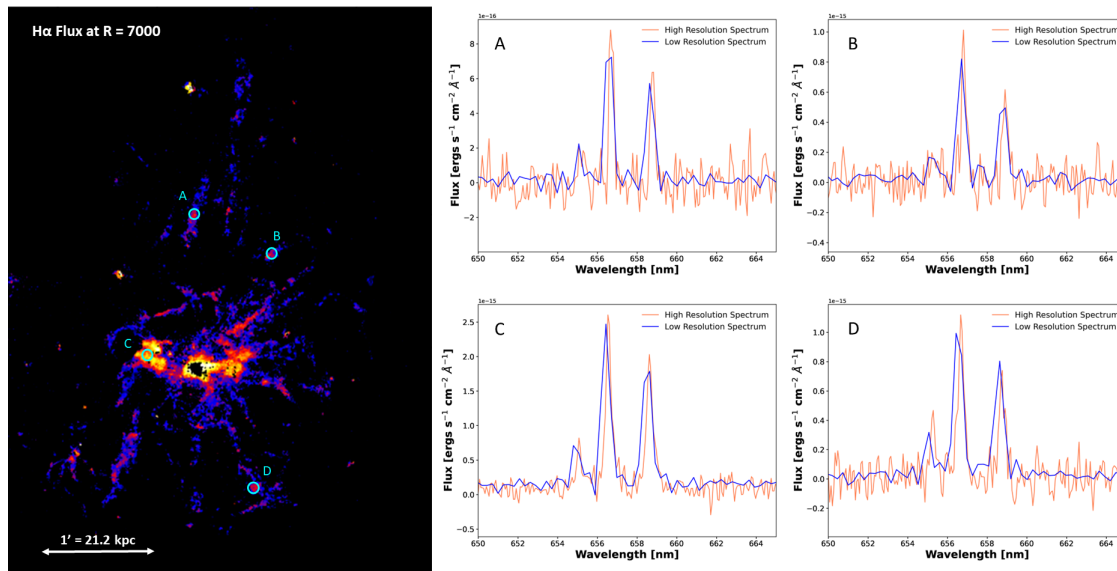


Figure 2.6. Comparison of the spectra extracted from four regions denoted by the letters A, B, C, and D for both low and high spectral resolution. On the left side, the H α flux map is used to display the region of emission while the right side showcases the differences between low and high-resolution spectra.

Finally, to pursue a more detailed analysis of the ionization mechanisms involved in the filamentary nebula, other line ratios are needed. By analyzing subsequent observations with the SN1 (365 - 385 nm) and SN2 (480 - 520 nm) filters of SITELE, we would have the necessary line ratios to perform complete Baldwin-Phillips-Terlevich diagrams (BPT, Baldwin et al. 1981). These filters would indeed allow us to obtain the H β λ 4861, [O III] λ 4959, [O III] λ 5007, [O II] λ 3726 and [O II] λ 3729 emission lines. This work is currently underway and will be published in a future article (Hlavacek-Larrondo & Thilloy et al. in preparation).

2.3.2. High versus Low Spectral Resolution Comparison

Previous low-spectral resolution observations of the filamentary nebula surrounding NGC 1275 were already analyzed by Gendron-Marsolais et al. (2018) and revealed several key features of the velocity structure. They were also a cornerstone to produce the mapping of the entire velocity structure of the filamentary nebulae.

Our new high spectral resolution observations, however, presented new challenges during the analysis step. Indeed, the spectra produced by SITELE during data reduction at CFHT use a Fourier transformation based on a sinc function, which shows specific lobes around the central peak. For low-spectral resolution data, these lobes would not be resolved clearly. However, our new high spectral resolution observations are capable of resolving them. Indeed, Figure 2.6 shows the comparison of spectra extracted from four regions

of the filamentary nebula at low and high-spectral resolution. It also demonstrates that the high-spectral resolution observations manage to recover the sinc lobes, while the low-spectral resolution observations could not accurately do. Since these lobes contain spectral information they were taken into account during the spectral fitting procedure with LUCI by specifically choosing a sincgauss model.

Moreover, the spectral resolution associated with SITELLE observations induce a minimum value of velocity dispersion that can be resolved clearly (see Figure 3 in Rousseau-Nepton et al. 2019). Thus, when considering a small spectral resolution of $R = 1800$ with the SITELLE instrument, as was the case for the observations studied in Gendron-Marsolais et al. (2018), the lower velocity dispersion bound that could be obtained was of ~ 80 km/s. However, with a high spectral resolution of $R = 7000$, the lower velocity dispersion value that can be determined is of ~ 15 km/s, allowing us to properly resolve the emission lines. This result is visible in Figure 2.6 when comparing the spectra of the same region at both low and high spectral resolution. We can indeed observe that the width of the emission lines is smaller than what was previously found by Gendron-Marsolais et al. (2018).

2.3.3. Central Disk

As we mentioned, the filamentary nebula seen in the optical is part of a larger multiphase structure that correlates with filament-like structures seen in X-rays (Fabian et al. 2003b, Walker et al. 2015, Hitomi Collaboration 2018) and molecular gas structures in radio (Salomé et al. 2008, Lim et al. 2008, Gendron-Marsolais et al. 2020). These emission lines at different wavelengths display a clear spatial correlation between each other and are at the heart of many models explaining the formation of such structures. Indeed, it is argued that the black hole jets act as fuel for radio expanding bubbles, rising through and carving the ICM, while inducing turbulence and shocks. This effect can be seen through the deformation of optical filaments taking the shape of convection cells and their spatial correlation with the trailing radio bubbles (Fabian et al. 2003b; see also the horseshoe filament in left plot of Fig 2.7).

One model argues that the depletion of metals in the galaxy and the deformed morphology of these filaments are explained by this phenomena of rising bubbles fueled by the activity of the central supermassive black hole (McNamara & Nulsen 2007).

A second model demonstrates that the rising of radio bubbles through the ICM thus creating shocks and turbulence, could develop local thermal instabilities in the X-ray emitting gas. Such regions would be at the source of small cooling flows where the density of material would increase as a consequence of cooling. Due to the intense gravitational potential of the BCG, these filaments of cooler gas would fall onto the BCG thus fueling the black hole activity through this feedback cycle (Voit et al. 2017, Tremblay et al. 2018).

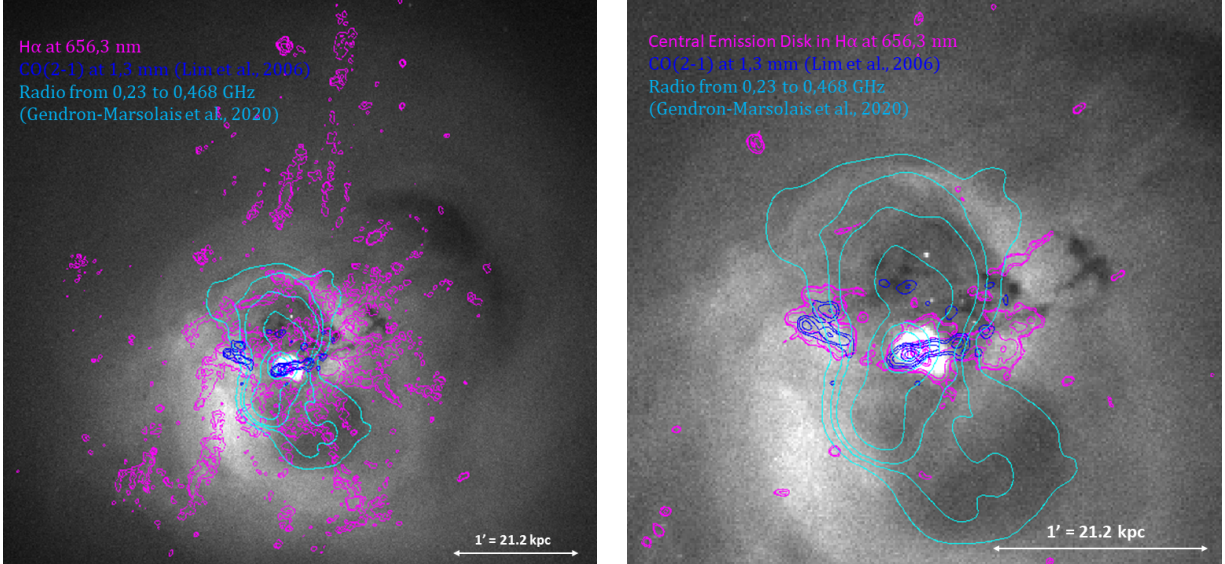


Figure 2.7. Left: Spatial comparison between several emission regions of the electromagnetic spectrum. The background showcases the X-ray emission as observed with Chandra between 0.5 and 1 keV. The magenta contours illustrate the H α emission filaments as observed with SITELLE. The cyan contours display the low radio emission from 0.64 to 1.3 m as observed with the VLA (Gendron-Marsolais et al. 2020). Finally the deep blue contours represent the CO(2-1) central emission disk as observed with the SMA (Lim et al. 2008). Right: Zoomed-in image of the left-side figure with a H α flux cut-off of 1×10^{-17} ergs s $^{-1}$ cm $^{-2}$ Å $^{-1}$.

This precipitation-based model would explain the multiphase structure by the cooling of gas from X-ray temperatures at 10^5 K down to cold molecular gas at $< 10^3$ K visible in radio (McNamara et al. 2016, Dutta et al. 2022). Thus, the detection of a cold CO(2-1) molecular gas structure close to the central region of the filaments in NGC 1275, as well as similar detections of correlated cold molecular gas in the outer filaments (Salomé et al. 2011) offer a key argument regarding this formation model. The central disk-like structure was detected and studied by Lim et al. (2008) and is divided into three main filaments and smaller clumps, all located near the central plane of the galaxy. They also showed that this central disk spatially correlates with the optical filaments seen in H α , as well as the X-ray emission between 0.5 and 1 keV. Our new observations with SITELLE as seen in Figure 2.7 show that the H α flux contours spatially correlate with the CO(2-1) molecular gas as seen by Lim et al. (2008), especially in the case of the inner western filaments, while also located along the lower border of an expanding radio-filled bubble as observed by Gendron-Marsolais et al. (2020). This region seems to be directly linked with the central disk that has higher flux and velocity dispersion as seen with the H α flux map shown in Figure 2.5.

This result is similar to what was previously obtained by Salomé et al. (2011), where the detection of CO across the filaments demonstrated that the central region has a flux around 10 times higher than the emission found in the filaments. However, Lim et al. (2008) clearly

showed that this higher central emission is not only linked to the AGN, but also to this bright and uniform disk feature. This result proves insightful when considering the observations of BCGs by ALMA (Russell et al. 2019) revealing mostly filamentary and disk-like structures around these galaxies. These features rarely display rotation, which is also the case for the central disk of NGC 1275 (see Lim et al. 2008).

Since the central disk observed both in the optical and radio is an order of magnitude brighter than the rest of the filaments, it could mean that only this type of structure would be visible in less emissive filamentary nebulae in other BCGs, where extended thread-like filaments could be hidden due to their diffuse brightness.

Recent ALMA observations of NGC 1275 by Nagai et al. (2019) provided a detection of a smaller portion of the central disk in CO(2-1) close to the AGN, as well as HCN(3-2) and HCO⁺(3-2) emission within a radius of 1.8'' around the AGN, revealing a rotating motion of the emitting gas at this scale. Thus, a kinematic study of the innermost optical emission will be carried out in a future work after the disentanglement of the AGN and filaments emission at a similar scale to see if a rotation motion is also detected in the optical domain.

2.3.4. Velocity Dispersion

Previous observations of the filamentary nebula surrounding NGC 1275 with slit spectroscopy or IFU instruments demonstrated that the velocity dispersion of the ionised optical gas was significantly higher in the central region near the AGN (~ 150 km/s) while diminishing gradually to lower values (~ 50 km/s) in the outer filaments (Hatch et al. 2006, Hitomi Collaboration 2016). These observations argued that the AGN activity was at the source of a higher level of agitation in the central region while other mechanisms such as the turbulence and shocks induced by the trailing of ascending radio-filled bubbles would induce a lower but non-negligible velocity dispersion in the outskirts of the structure (Falceta-Gonçalves et al. 2010). The velocity dispersion map produced by Gendron-Marsolais et al (2018) with SITELLE supported this model by showing similar values.

However, with the new SITELLE observations at high spectral resolution, we now observe a central velocity dispersion almost two times higher in the central disk-like structure than the previous low-spectral observations showed (Gendron-Marsolais et al. 2018, see left plot of Fig. 2.8). On average the velocity of the central disk-like structure is ~ 160 km/s. The disk-like structure seems specifically located at the position of the central radio disk and the border of the inflating radio bubble, as can be seen in the right side of Figure 2.7, where the radio bubble is delimited by the cyan contours as observed in radio by Gendron-Marsolais et al. (2020). The most striking feature displayed by this map is that there doesn't seem to be a clear gradient between the high dispersion of the central region ($\sim 150 - 250$ km/s) and the lower dispersion of the outer filaments (~ 50 km/s - see also the right plot of Figure 2.8).

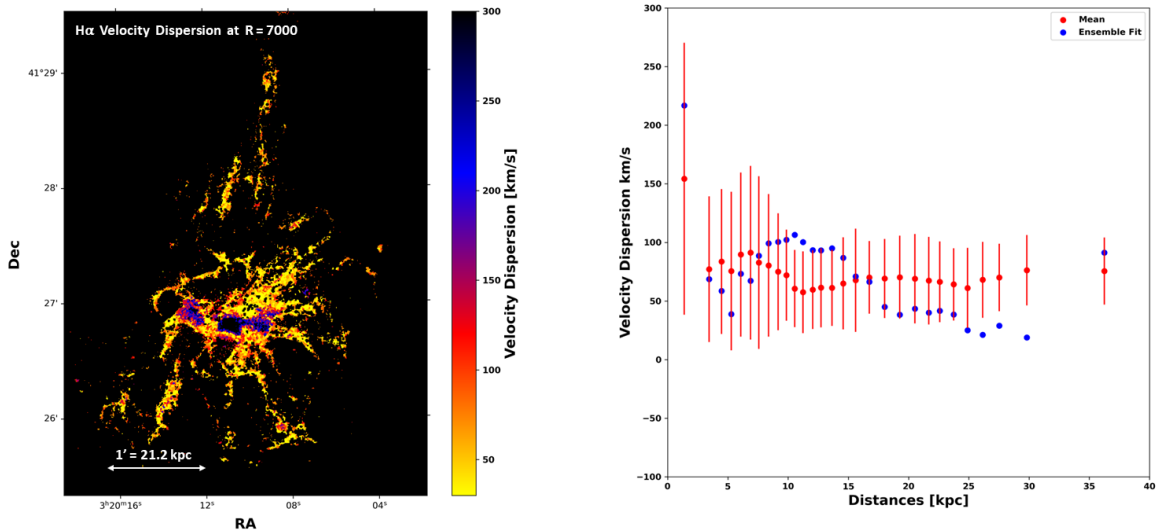


Figure 2.8. Left: H α velocity dispersion map. Right: Mean (in red) and ensemble fits (in blue) across annuli containing 1500 pixels for the H α velocity dispersion.

This conclusion is expected since more gas is likely found near the potential well, however, few multi-component emission lines are found in the central region, which will be discussed in section 2.3.6. Thus, this result could also imply that two completely different mechanisms might be at play to introduce such a clear differentiation in velocity dispersion.

An interesting similarity to our results can be observed in the study of Abell 2597 by Tremblay et al. (2018) as observed with MUSE and ALMA. This study also demonstrated the presence of a spatial correlation between a central v-shaped molecular gas structure and its optical emission counterpart in H α . Both of these structures were also found to be comoving and closely traced the wake of the X-ray cavities formed by the activity of the BCG's AGN. Moreover, when considering the velocity dispersion of the optical gas in Abell 2597 (see Figure 13 of Tremblay et al. 2018), a similar trend where the correlated emission region displays an extremely high velocity dispersion (> 150 km/s) which quickly falls to lower values for the outer filaments (~ 50 km/s) can be seen.

This also reinforces the idea that NGC 1275 and Abell 2597 share several similar properties such as the trailing that is found between the H α filamentary nebula and the X-ray cavities (Tremblay et al. 2018), as well as the interaction between the inflating radio bubbles and the central bright H α and molecular gas structures closely following its edges (see the left side of Fig. 2.7).

Regarding the filament formation models that have been developed and detailed previously, Tremblay et al. (2018) explore a unifying model involving chaotic cold accretion, precipitation, and stimulated feedback through the description of a galaxy-scaled "fountain". In this model, the central cold molecular gas and optically emitting filaments would supply

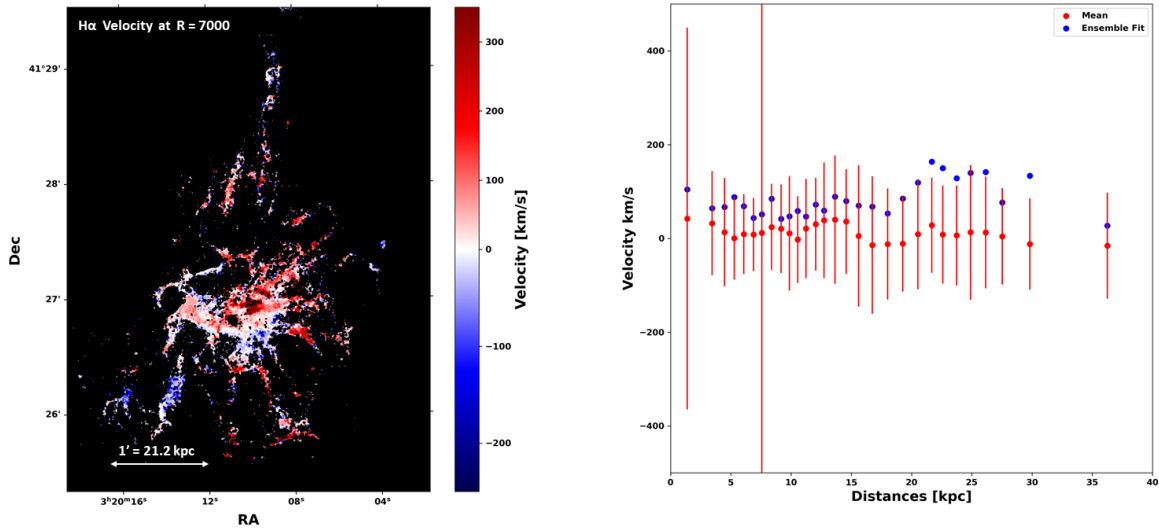


Figure 2.9. Left: $H\alpha$ velocity map. Right: Mean (in red) and ensemble fits (in blue) across annuli containing 1500 pixels for the $H\alpha$ velocity.

the accretion reservoir of the AGN, thus fueling its activity. The jets it produces would then inflate radio bubbles, buoyantly rising and carving the surrounding ICM, therefore, creating turbulence and thermal instabilities as well as uplifting ionised gas in their trail (McNamara et al. 2016). The raised material would then precipitates back to the central potential well thus sustaining the "fountain". Moreover, further thermal instabilities generated by the turbulent AGN feedback would reinforce the precipitation of colder gas in slightly denser parts of the ICM, thus facilitating the formation of extended filamentary nebulae (Voit 2018).

To better understand the underlying dynamics at play in the filamentary nebula surrounding NGC 1275, a velocity structure function will be modeled based on our new high spectral resolution observations similarly to previous work by Li et al. (2020). This study will be presented in a future article.

2.3.5. Kinematic Structure

Now focusing on the analysis of the kinematic structure obtained with the new SITELE observations, we find an extremely similar $H\alpha$ velocity map as to what was previously obtained by Gendron-Marsolais et al. (2018) at lower spectral resolution observations (see Figure 5 of Gendron-Marsolais et al. (2018) and left plot of Figure 2.9). This result strengthens previous conclusions regarding the dynamics of the filamentary nebula. Moreover, when looking at the mean and ensemble velocity fits across annuli containing 1000 pixels (see right plot of Figure 2.9), there doesn't seem to be a specific radial velocity trend throughout the filaments, which reinforces the idea of a chaotic velocity structure.

Lim et al. (2008) also produced a velocity map of the central molecular gas disk detectable in radio, which showed mostly blue-shifted velocities and thus argued that this disk was non-rotating. We decided to compare the velocities obtained for the optical emission by considering a redshift value of $z = 0.01756$ to replicate the variation effect introduced in the velocity calculation of Lim et al. (2008). Thus, when superimposed on this shifted velocity map, we can see that the corresponding $H\alpha$ emission shows a similar velocity structure (see Figure 2.10 and Figure 2 of Lim et al. 2008) which doesn't seem to display a clear rotation pattern either.

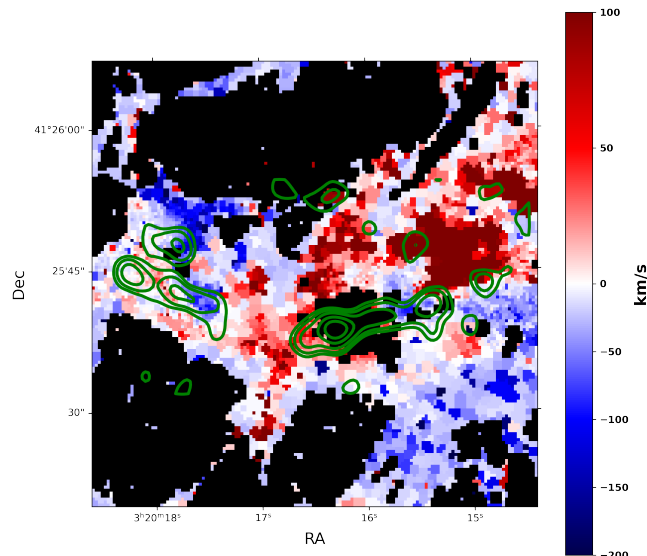


Figure 2.10. Velocity map in $H\alpha$ of the central region of the filamentary nebula considering a redshift of $z=0.01756$ in order to match the study of Lim et al. (2008). The contours of the central disk observed in $CO(2-1)$ are superimposed in green.

The detection of similar disk-like structures can also be found in simulation works such as those done by Li & Bryan (2014), where they exhibit higher levels of flux and originate from the cooling of gas onto the black hole's potential well. However, the main difference to these simulations is the fact that the central disk always displayed a rotating motion along the plane perpendicular to the jets, which is not the case for our observations where the motion seems more chaotic (see Figures 2.9 & 2.10). This difference between simulations and observations could be explained by the fact that the physical processes at play in the formation and evolution of the filaments are still not fully understood. Moreover, the presence of radio bubbles fueled by the SMBH relativistic jets, which seem spatially linked to the presence of this disk, was not considered in previous simulations until recently (Yang et al. 2019).

Thanks to the high spatial and spectral resolution of SITELLE, we can study the velocity profiles of targeted filaments in their entirety. To do this, we extracted the velocity measurements of the bins through the filaments while also measuring the mean across ten sub-regions of equal sizes. Figure 2.11 shows that the velocities of the outer filaments are significantly more heterogeneous, while the velocities of the central filament display less variations.

The northern filament displays a complicated velocity profile ranging from slightly positive to slightly negative values the further away from the base of the filament. Similar results were obtained both with SITELLE (Gendron-Marsolais et al. 2018) and the Gemini Multi-Object Spectrograph (Hatch et al. 2006). The southern filament mostly shows negative velocities slightly decreasing then increasing along the filament, while the central filament seems to display an inverse trend with mostly positive velocity values. However, this could argue for a small-scale rotation in this part of the central disk with velocities slightly increasing and then decreasing along the filament.

2.3.6. Regions and Knots with Multiple Components Emission Lines

We carefully examined the emission spectra of the SITELLE observations. In doing so, we detected several regions presenting multiple velocity components, all found in the central part of the filamentary nebula. Some of these regions appear as small knots or plumes displaying an extremely low variation in velocity, sometimes on less than 10 pixels of SITELLE field of view, leading to slightly double-peaked emission lines. However, we can also detect slightly larger regions displaying several components in velocity and located at the central-eastern part of the filamentary nebula below the high-velocity system.

It is not yet clear if these regions with multiple velocity components are due to the superposition of filaments with Doppler-shifted velocities in the line of sight, or simply the result of some noise effect in our high spectral resolution data. The former could be of interest since it would allow us to gain more insight into the central 3D structure of the filamentary nebula, which could be a cornerstone to develop a velocity reconstruction in three dimensions of the central region, thus leading to a better understanding of its motion.

As mentioned in section 2.2.6, other emission regions clearly show the spectral influence of either the AGN or the forefront galaxy. This translates into extremely broad or displaced emission lines in our spectra. All of these regions and knots with multiple components emission lines will be studied in future works through a careful analysis performed with LUCI. Spectra of specific regions of interest displaying several emission lines components are presented in Appendix B.

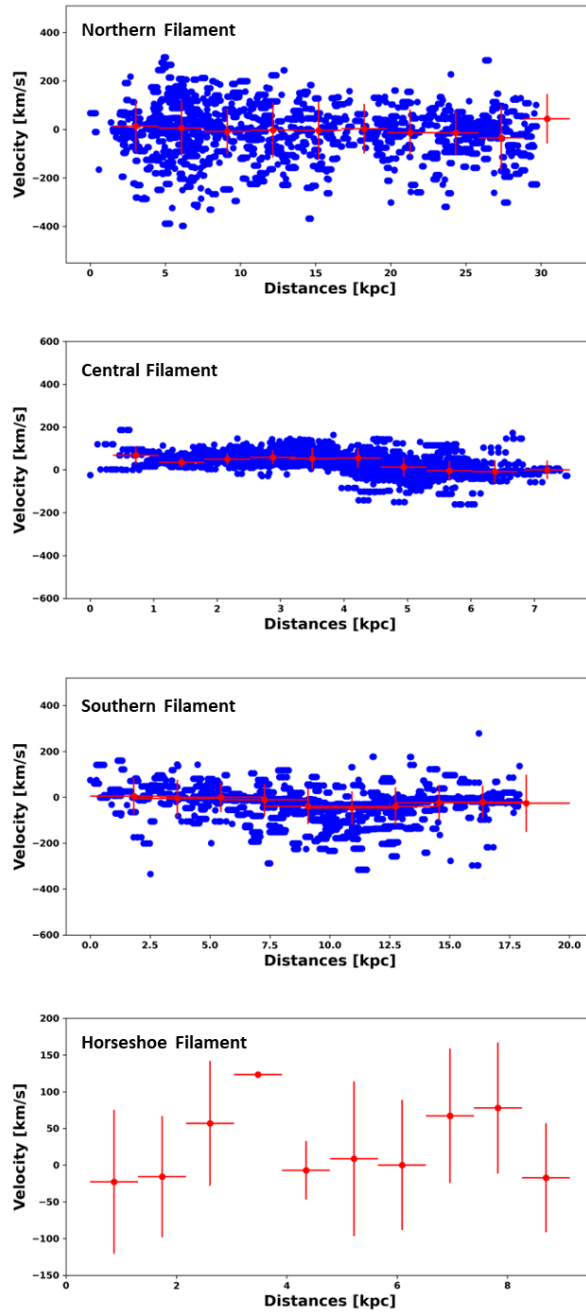


Figure 2.11. Velocity profiles of selected filaments in the nebula surrounding NGC 1275 (in km/s). The first three profiles show the velocity of each pixel bins found in the region in blue, while the red points illustrates the mean taken in ten subregions of equal widths. The velocity profile of the Horseshoe filament only displays the mean velocity across these ten subregions.

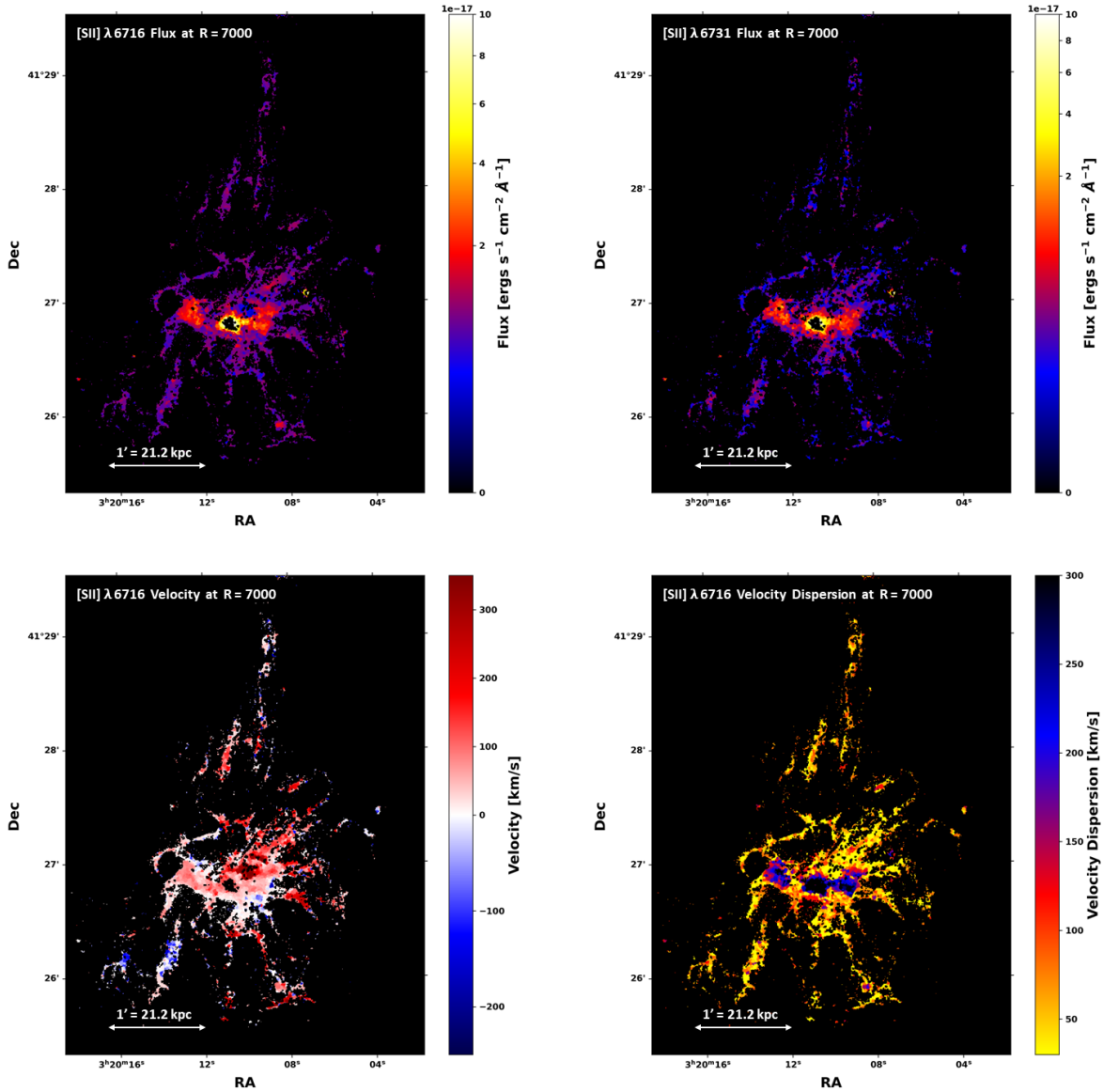


Figure 2.12. Upper left: [S II] λ 6716 flux map for the of the filaments in NGC 1275. Upper right: [S II] λ 6731 flux map. Bottom left: [S II] λ 6716 velocity map. Bottom right: [S II] λ 6716 velocity dispersion map.

2.3.7. Electronic Density

Another key result of our analysis comes from the clear detection of the [S II] emission line doublet as seen in Figure 2.12. The bottom left and right plots clearly show similar velocity and velocity dispersion maps as H α . From the flux emission maps of both lines, we can then produce a ratio map of [S II] λ 6731/[S II] λ 6716, as displayed in the left plot of Figure 2.13. The [S II] emission doublet is a forbidden emission line and informs us on the

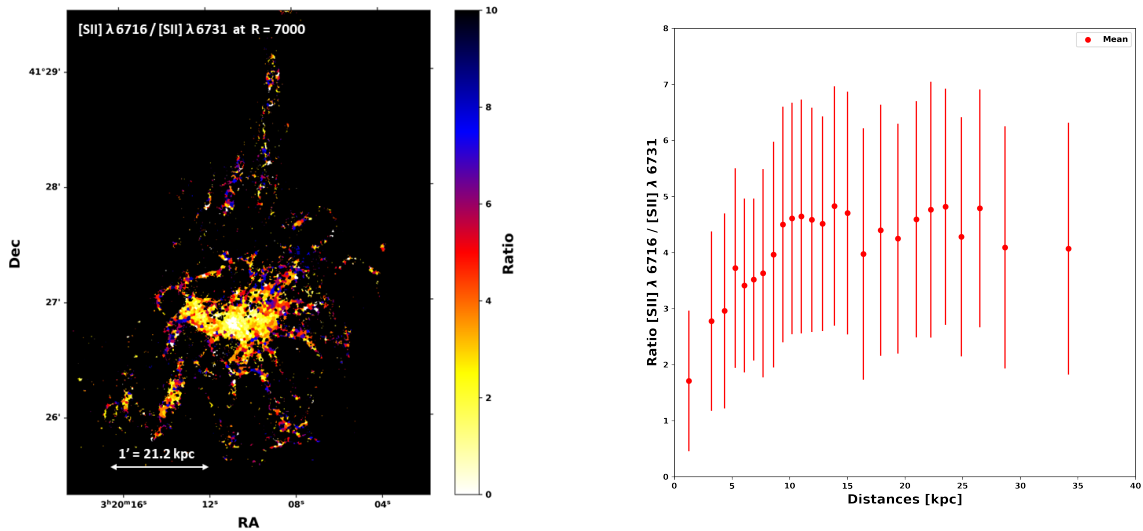


Figure 2.13. Left : $[\text{S II}]\lambda 6716 / [\text{S II}]\lambda 6731$ ratio map. Right : Mean $[\text{S II}]\lambda 6716 / [\text{S II}]\lambda 6731$ ratio across annuli containing 1500 pixels.

electronic density of the optical filamentary nebula surrounding NGC 1275. The ratio is inversely proportional, meaning that the lower the ratio, the higher the electronic density.

Looking at the ratio map we obtain, we can see that the central region of the filaments displays a rather uniform lower ratio (≤ 2), consistent with previous early measurements by Johnstone & Fabian (1988). The southwestern region also seems to display a slightly lower ratio across the filaments ($\sim 2 - 3$). The rest of the filamentary nebula gives heterogeneous higher values of ratio (≥ 4), giving an unclear result on electronic density (see right plot of Figure 2.13).

One interesting point of comparison comes from the study of star formation regions in the outer filaments by Canning et al. (2012). Indeed, these authors found that two regions associated with the southern filaments demonstrated clear gradual star formation aligned with the $\text{H}\alpha$ filaments. Furthermore, in the case of the region named the "Blue Loop", corresponding to our south-eastern region of lower $[\text{S II}]$ ratio, a clear spatial correlation with dense hot X-ray gas was also found, which could then explain the higher density of optically emitting gas in this specific region (See Figure 14 of Canning et al. 2012). However, no similar result seems to be found for the other southern star-forming filament, as seen from our observations shown in left plot of Figure 2.13.

Our results can also offer a comparison with previous electronic density maps in X-rays as obtained with the Chandra telescope (e.g. Fabian et al. 2000, 2003a). We are still working on producing the complete electronic densities in X-ray and optical through annuli containing 1500 pixels. However, when considering Figure 2.13, we can notice a similar trend in electronic density, with a high central value associated with the large quantity of ionised

gas present in this region. The density then diminishes along the outer filaments as distance increases from the central AGN. However, some bumps in density can be seen at around ~ 15 kpc and ~ 25 kpc which could be linked to the presence of X-ray and ghost cavities associated with radio bubbles carving through the ICM. This similarity in both optical and X-ray density maps displays the central role of these cavities in effectively displacing the electronic material.

2.4. Conclusion

We performed the analysis of new high spectral resolution observations with SITELLE and obtained new flux, velocity, and velocity dispersion maps of [S II] λ 6716, [S II] λ 6731, [N II] λ 6584, H α (6563Å), and [N II] λ 6548 emission lines for the filamentary nebula surrounding NGC 1275, the brightest cluster galaxy of the Perseus cluster.

- We detected a central disk-like structure displaying higher flux ($\sim 5 \times 10^{-17} - 2 \times 10^{-16}$ ergs.s $^{-1}$.cm $^{-2}$.Å $^{-1}$) and velocity dispersion ($\sim 150 - 300$ km/s) than the rest of the filaments which is also spatially correlated with a disk-like structure as seen in CO(2-1) associated with molecular gas. Both of these structures seem to spatially correlate with the wake of the radio bubbles that have been inflated through the relativistic jets of the supermassive black hole at the center of the galaxy. However, this disk-like feature does not display a clear rotation pattern which entails a definitive difference from similar structures obtained through simulations.
- The rest of the filamentary structure displays fainter flux measurement ($\sim 1 \times 10^{-18} - 1 \times 10^{-17}$ ergs.s $^{-1}$.cm $^{-2}$.Å $^{-1}$) as well as much lower velocity dispersion ($\sim 30 - 100$ km/s) across the outer filaments, thus implying a potential more quiescent formation mechanism.
- We also obtained new line ratio maps across the entirety of the filamentary nebula. Moreover, we managed to produce the first complete map of the [S II] emission ratio, giving us new information on the density of the gas that is comparable to previous measurements done in X-ray.
- Thanks to our incredibly high spectral resolution, we also managed to detect regions and knots displaying multiple emission line components. However, they are extremely localized and only found in the central part of the filamentary nebula. Nevertheless, a future study of these structures could potentially help us to gain more insight into the three-dimensional structure of the central filaments.

Through our analysis of new high spectral resolution observations of the filamentary nebula surrounding NGC 1275, we reinforced the previous results established by Gendron-Marsolais et al. (2018) and discovered new structures in the optical emission of the filaments. However, these are the first results obtained with this dataset and we expect to get more

through an improved analysis of the emission close to the AGN, a study of the SN1 and SN2 filters of SITELLE, as well as the calculation of the velocity structure function with these new maps. Finally, new X-ray observations with the XRISM space telescope (XRISM Science Team 2020), the successor of Hitomi, will enable a breakthrough in the study of AGN feedback, which this study will offer a basis for the analysis of renewed X-ray observations of NGC 1275.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) which is operated by the National Research Council (NRC) of Canada, the Institut National des Sciences de l'Univers of the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) of France, and the University of Hawaii. The observations at the CFHT were performed with care and respect from the summit of Maunakea which is a significant cultural and historic site.

B.V. acknowledges financial support from the physics department of the Université de Montréal. J. H.-L. acknowledges support from NSERC via the Discovery grant program, as well as the Canada Research Chair program.

Software

python (Van Rossum & Drake 2009), astropy (Collaboration et al. 2013; Astropy Collaboration et al. 2018), numpy (Harris et al. 2020), scipy (Virtanen et al. 2020), matplotlib (Hunter 2007), luci (Rhea et al. 2021a)

Appendix A

Background Variability

In this section, we display two spectra extracted from background regions (see Figure A.1) which illustrate the clear variability in background emission at high spectral resolution.

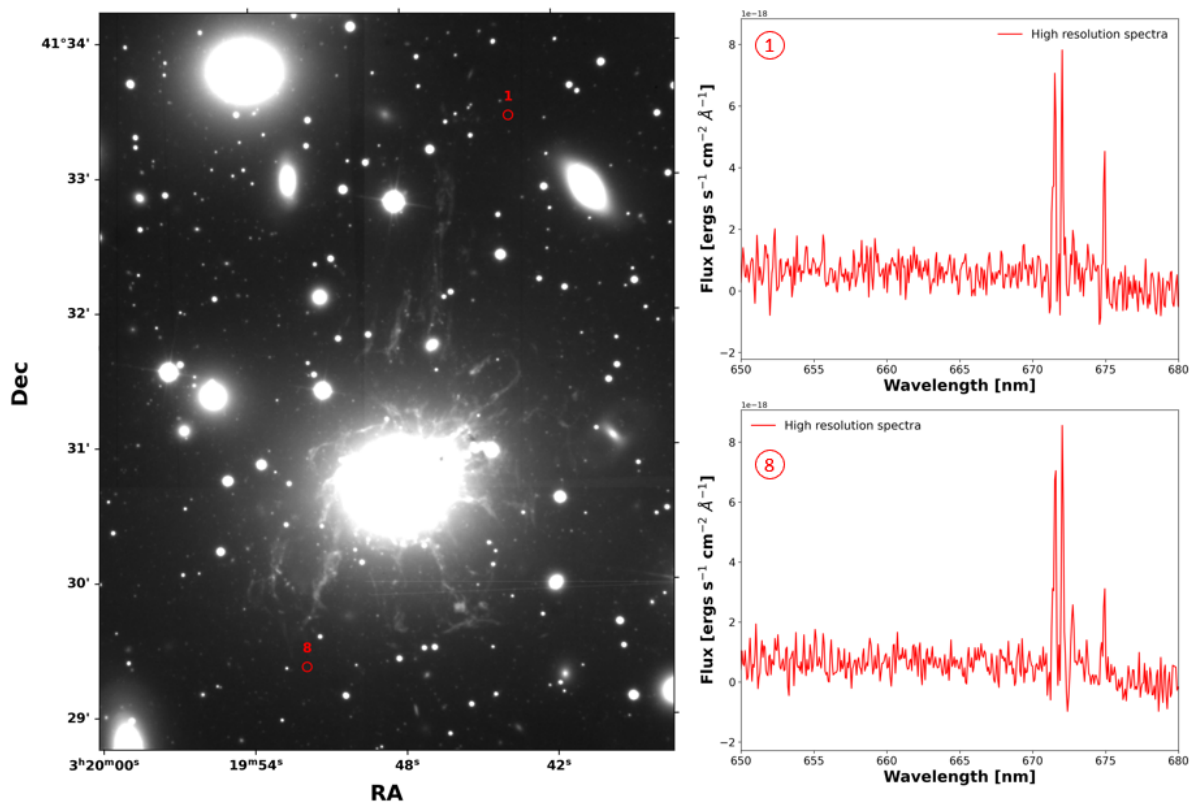


Figure A.1. Comparison of the spectra extracted from two background regions denoted by the numbers 1 and 8 at high spectral resolution.

Appendix B

Multiple Emission Line Components Spectra

In this section, we show a small number of spectra belonging to localized regions of the filamentary nebula and displaying multiple emission line components. The HVS denotes the high-velocity system which is a forefront galaxy.

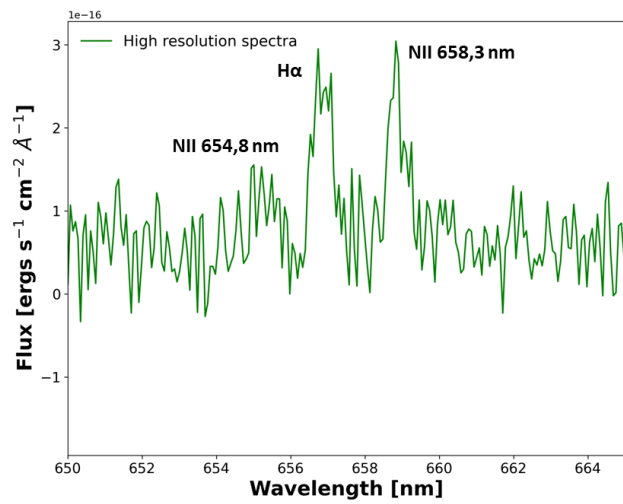
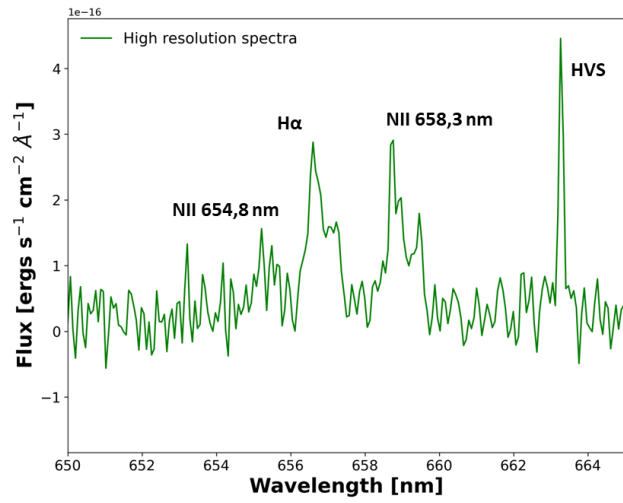
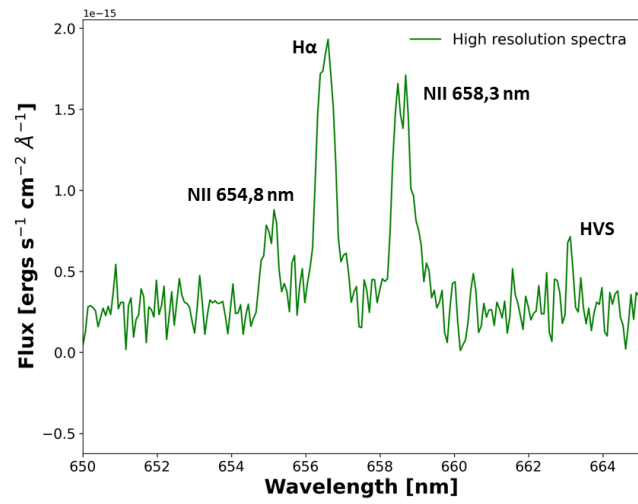


Figure B.1. Spectra of localized regions of the filamentary nebula displaying multiple components emission lines.

Bibliography

- Abell, G. O., Corwin, Jr., H. G., & Olowin, R. P. 1989, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 70, 1, aDS Bibcode: 1989ApJS...70....1A
- Bahcall, N. A. 1977, In: *Annual review of astronomy and astrophysics*. Volume 15. (A78-16576 04-90) Palo Alto, Calif., Annual Reviews, Inc., 1977, p. 505-540., 15, 505
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 93, 5, aDS Bibcode: 1981PASP...93....5B
- Best, P. N., Von Der Linden, A., Kauffmann, G., Heckman, T. M., & Kaiser, C. R. 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 379, 894
- Bittner, A., Falcón-Barroso, J., Nedelchev, B., et al. 2019, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 628, id.A117, 14 pp., 628, A117
- Canning, R., Fabian, A., Johnstone, R., et al. 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 405, 115
- Canning, R. E. A., Ryon, J. E., Gallagher, J. S., et al. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444, 336, aDS Bibcode: 2014MNRAS.444..336C
- Cavaliere, A. G., Gursky, H., & Tucker, W. H. 1971, *Nature*, 231, 437, aDS Bibcode: 1971Natur.231..437C
- Churazov, E., Brüggén, M., Kaiser, C. R., Böhringer, H., & Forman, W. 2001, *The Astrophysical Journal*, 554, 261, aDS Bibcode: 2001ApJ...554..261C
- Collaboration, A., Robitaille, T., Tollerud, E., et al. 2013, A33
- Collaboration, H., Aharonian, F., Akamatsu, H., et al. 2018, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, arXiv:1711.00240 [astro-ph]
- Conselice, C. J., Gallagher III, J. S., & Wyse, R. F. 2001, *The Astronomical Journal*, 122, 2281
- Crawford, C. S., Allen, S. W., Ebeling, H., Edge, A. C., & Fabian, A. C. 1999, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 306, 857, aDS Bibcode: 1999MNRAS.306..857C
- Dhawan, V., Kellermann, K. I., & Romney, J. D. 1998, *The Astrophysical Journal*, 498, L111, aDS Bibcode: 1998ApJ...498L.111D
- Dutta, A., Sharma, P., & Nelson, D. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 510, 3561, aDS Bibcode: 2022MNRAS.510.3561D
- Fabian, A. C., Johnstone, R. M., Sanders, J. S., et al. 2008, *Nature*, 454, 968, aDS Bibcode: 2008Natur.454..968F
- Fabian, A. C., Sanders, J. S., Allen, S. W., et al. 2003a, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344, L43, aDS Bibcode: 2003MNRAS.344L..43F
- Fabian, A. C., Sanders, J. S., Crawford, C. S., et al. 2003b, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 344, L48, aDS Bibcode: 2003MNRAS.344L..48F

- Fabian, A. C., Sanders, J. S., Etori, S., et al. 2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318, L65, [_eprint: https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/318/4/L65/2830936/318-4-L65.pdf](https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/318/4/L65/2830936/318-4-L65.pdf)
- Fabian, A. C., Sanders, J. S., Allen, S. W., et al. 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 418, 2154, aDS Bibcode: 2011MNRAS.418.2154F
- Falceta-Gonçalves, D., de Gouveia Dal Pino, E. M., Gallagher, J. S., & Lazarian, A. 2010, *The Astrophysical Journal*, 708, L57, aDS Bibcode: 2010ApJ...708L..57F
- Ferland, G. J., Fabian, A. C., Hatch, N. A., et al. 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 392, 1475, aDS Bibcode: 2009MNRAS.392.1475F
- Forman, W., Kellogg, E., Gursky, H., Tananbaum, H., & Giacconi, R. 1972, *The Astrophysical Journal*, 178, 309, aDS Bibcode: 1972ApJ...178..309F
- Gaspari, M., Brighenti, F., & Temi, P. 2015, *Astronomy & Astrophysics*, 579, A62
- Gaspari, M., Ruszkowski, M., & Oh, S. P. 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 432, 3401
- Gaspari, M., Ruszkowski, M., & Sharma, P. 2012, *The Astrophysical Journal*, 746, 94
- Gendron-Marsolais, M., Hlavacek-Larrondo, J., Martin, T. B., et al. 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 479, L28, aDS Bibcode: 2018MNRAS.479L..28G
- Gendron-Marsolais, M., Hlavacek-Larrondo, J., van Weeren, R. J., et al. 2020, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 499, 5791, aDS Bibcode: 2020MNRAS.499.5791G
- Graham, J., Fabian, A. C., & Sanders, J. S. 2008, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 386, 278, aDS Bibcode: 2008MNRAS.386..278G
- Gursky, H., Kellogg, E. M., Leong, C., Tananbaum, H., & Giacconi, R. 1971, *The Astrophysical Journal*, 165, L43, aDS Bibcode: 1971ApJ...165L..43G
- Hamer, S. L., Edge, A. C., Swinbank, A. M., et al. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 460, 1758
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al. 2020, *Nature*, 585, 357, number: 7825 Publisher: Nature Publishing Group
- Hatch, N. A., Crawford, C. S., Johnstone, R. M., & Fabian, A. C. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 367, 433, aDS Bibcode: 2006MNRAS.367..433H
- Hitomi Collaboration, Aharonian, F., Akamatsu, H., et al. 2016, *Nature*, 535, 117, aDS Bibcode: 2016Natur.535..117H
- Ho, I. T., Lim, J., & Dinh-V-Trung. 2009, *The Astrophysical Journal*, 698, 1191, aDS Bibcode: 2009ApJ...698.1191H
- Hudson, D. S., Mittal, R., Reiprich, T. H., et al. 2010, *Astronomy & Astrophysics*, 513, A37
- Hunter, J. D. 2007, *Computing in Science & Engineering*, 9, 90, conference Name: Computing in Science & Engineering
- Johnstone, R. M. & Fabian, A. C. 1988, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 233, 581, aDS Bibcode: 1988MNRAS.233..581J

- Kent, S. M. & Sargent, W. L. W. 1979, *The Astrophysical Journal*, 230, 667, aDS Bibcode: 1979ApJ...230..667K
- Kewley, L. J., Groves, B., Kauffmann, G., & Heckman, T. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 372, 961, aDS Bibcode: 2006MNRAS.372..961K
- Kewley, L. J., Nicholls, D. C., & Sutherland, R. S. 2019, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 57, 511
- Li, Y. & Bryan, G. L. 2014, *The Astrophysical Journal*, 789, 54, aDS Bibcode: 2014ApJ...789...54L
- Li, Y., Bryan, G. L., Ruszkowski, M., et al. 2015, *The Astrophysical Journal*, 811, 73
- Li, Y., Gendron-Marsolais, M.-L., Zhuravleva, I., et al. 2020, *The Astrophysical Journal*, 889, L1, aDS Bibcode: 2020ApJ...889L...1L
- Lim, J., Ao, Y., & Dinh-V-Trung. 2008, *The Astrophysical Journal*, 672, 252, aDS Bibcode: 2008ApJ...672..252L
- Lim, J., Ohyama, Y., Yan, C.-H., Dinh-V-Trung, & Wang, S.-Y. 2012, *The Astrophysical Journal*, 744, 112, aDS Bibcode: 2012ApJ...744..112L
- Lynds, R. 1970, *The Astrophysical Journal*, 159
- Martin, T. B., Prunet, S., & Drissen, L. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463, 4223, aDS Bibcode: 2016MNRAS.463.4223M
- McDonald, M., Veilleux, S., Rupke, D. S. N., & Mushotzky, R. 2010, *The Astrophysical Journal*, 721, 1262, aDS Bibcode: 2010ApJ...721.1262M
- McNamara, B. R. & Nulsen, P. E. J. 2007, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, vol. 45, Issue 1, pp.117-175, 45, 117
- McNamara, B. R., O'Connell, R. W., & Sarazin, C. L. 1996, *The Astronomical Journal*, 112, 91, aDS Bibcode: 1996AJ....112...91M
- McNamara, B. R., Russell, H. R., Nulsen, P. E. J., et al. 2016, *The Astrophysical Journal*, 830, 79, aDS Bibcode: 2016ApJ...830...79M
- Million, E. & Allen, S. 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399, 1307
- Minkowski, R. 1957, 4, 107, conference Name: Radio astronomy ADS Bibcode: 1957IAUS...4..107M
- Mittal, R., Oonk, J. R., Ferland, G. J., et al. 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426, 2957
- Nagai, H., Onishi, K., Kawakatu, N., et al. 2019, *The Astrophysical Journal*, 883, 193, aDS Bibcode: 2019ApJ...883..193N
- Price-Whelan, a. A. M., Sip\Hocz, B. M., Günther, H. M., et al. 2018, *The Astronomical Journal*, 156, 123, publisher: American Astronomical Society
- Randall, S. W., Nulsen, P. E. J., Jones, C., et al. 2015, *The Astrophysical Journal*, 805, 112, aDS Bibcode: 2015ApJ...805..112R

Reynolds, C. S., McKernan, B., Fabian, A. C., Stone, J. M., & Vernaleo, J. C. 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 357, 242, aDS Bibcode: 2005MNRAS.357..242R

Rhea, C., Hlavacek-Larrondo, J., Perreault-Levasseur, L., Gendron-Marsolais, M.-L., & Kraft, R. 2020a, *The Astronomical Journal*, 160, 202, aDS Bibcode: 2020AJ....160..202R

Rhea, C., Hlavacek-Larrondo, J., Rousseau-Nepton, L., Vigneron, B., & Guité, L.-S. 2021a, *Research Notes of the American Astronomical Society*, 5, 208, aDS Bibcode: 2021RNAAS...5..208R

Rhea, C., Rousseau-Nepton, L., Prunet, S., Hlavacek-Larrondo, J., & Fabbro, S. 2020b, *The Astrophysical Journal*, 901, 152, aDS Bibcode: 2020ApJ...901..152R

Rhea, C., Rousseau-Nepton, L., Prunet, S., et al. 2021b, *The Astrophysical Journal*, 910, 129, aDS Bibcode: 2021ApJ...910..129R

Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., Greenfield, P., et al. 2013, *Astronomy & Astrophysics*, 558, A33, publisher: EDP Sciences

Rubin, V., Oort, J., Ford, W., & Peterson, C. 1977, *Astrophysical Journal*, 211, 693

Russell, H. R., McNamara, B. R., Fabian, A. C., et al. 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 490, 3025, aDS Bibcode: 2019MNRAS.490.3025R

Salomé, P., Combes, F., Revaz, Y., et al. 2011, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 531, id.A85, <NUMPAGES>8</NUMPAGES> pp., 531, A85

Salomé, P., Combes, F., Revaz, Y., et al. 2008, *Astronomy and Astrophysics*, Volume 484, Issue 2, 2008, pp.317-325, 484, 317

Salomé, P., Combes, F., Edge, A. C., et al. 2006, *Astronomy and Astrophysics*, Volume 454, Issue 2, August I 2006, pp.437-445, 454, 437

Sanchez Almeida, J., Terlevich, R., Terlevich, E., Fernandes, R., & Morales-Luis, A. 2012, *Astrophysical Journal*, 756

Sand, D. J., Treu, T., Smith, G. P., & Ellis, R. S. 2004, *The Astrophysical Journal*, 604, 88, aDS Bibcode: 2004ApJ...604...88S

Team, X. S. 2020, arXiv preprint arXiv:2003.04962

Tremblay, G. R., Combes, F., Oonk, J. B. R., et al. 2018, *The Astrophysical Journal*, 865, 13, aDS Bibcode: 2018ApJ...865...13T

Van Rossum, G. & Drake, F. L. 2009, *PYTHON 2.6 reference manual*

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. 2020, *Nature Methods*, 17, 261, number: 3 Publisher: Nature Publishing Group

Voigt, L. M. & Fabian, A. C. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 368, 518, aDS Bibcode: 2006MNRAS.368..518V

Voit, G., Donahue, M., Bryan, G., & McDonald, M. 2015, *Nature*, 519, 203

Voit, G. M., Cavagnolo, K. W., Donahue, M., et al. 2008, *The Astrophysical Journal*, 681, L5, aDS Bibcode: 2008ApJ...681L...5V

Voit, G. M. & Donahue, M. 2015, *The Astrophysical Journal Letters*, 799, L1

- Voit, G. M., Meece, G., Li, Y., et al. 2017, *The Astrophysical Journal*, 845, 80, aDS Bibcode: 2017ApJ...845...80V
- Walker, S. A., Kosec, P., Fabian, A. C., & Sanders, J. S. 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 453, 2480, aDS Bibcode: 2015MNRAS.453.2480W
- Yang, H.-Y. K., Gaspari, M., & Marlow, C. 2019, *The Astrophysical Journal*, 871, 6, publisher: American Astronomical Society
- Zeidler, P., Nota, A., Sabbi, E., et al. 2019, *The Astronomical Journal*, 158, 201, aDS Bibcode: 2019AJ....158..201Z
- Zhuravleva, I., Churazov, E., Schekochihin, A. A., et al. 2014, *Nature*, 515, 85, aDS Bibcode: 2014Natur.515...85Z

Chapitre 3

Conclusions

Tel que présenté dans ce mémoire, les amas de galaxies constituent un environnement d'intérêt particulier où des phénomènes physique complexes se produisent sur des échelles de distances variant de plusieurs ordres de grandeur. Du trou noir supermassif de $\sim 10^{-7} - 10^{-4}$ pc, à l'AGN recouvrant plusieurs régions d'émission différentes, imbriquées jusqu'à des distances de 10 à 100 pc, pour finalement considérer les processus ayant lieu dans l'environnement proche de la BCG jusqu'à 100 kpc et au-delà au travers de l'amas de galaxies sur des distances de \sim Mpc.

Dès lors, il a ainsi été possible d'explorer les différents liens complexes existant entre les BCG et leur environnement. Tout d'abord, le cycle de rétroaction orchestré par l'AGN de la BCG et empêchant le refroidissement en chaîne de l'ICM, permet d'expliquer l'absence d'une formation stellaire effrénée au sein de l'environnement de la galaxie centrale. De plus, ce phénomène a pour conséquences d'établir une structure filamentaire visible dans le domaine optique et appartenant plus largement à une architecture multiphasique visible dans différents domaines de longueurs d'ondes. Ces différentes émissions spectrales sont corrélées spatialement et agissent comme des traceurs de gaz ionisé à des températures variant de plusieurs ordres de grandeur. Finalement, diverses mécanismes d'ionisation et modèles de formation ont été développés, mais des incertitudes demeurent sur les phénomènes en place au sein des BCGs.

Par conséquent, grâce à l'étude de nouvelles données optiques à très haute résolution spectrale de la nébuleuse filamentaire entourant la galaxie centrale de l'amas de Persée, plusieurs aspects théoriques ont pu être étudiés afin de mieux comprendre diverses mécanismes impliqués au sein de ces environnements.

Ainsi, grâce au champ de vue exceptionnel de l'instrument SITELLE, utilisé dans le cadre de ces observations, permettant de recouvrir l'entièreté de la nébuleuse filamentaire, de nouvelles cartes de flux, vitesse et dispersion ont pu être obtenues au moyen de l'algorithme de traitement des données LUCI développé récemment (Rhea et al. 2021). En fittant efficacement

les lignes d'émission issues de la nébuleuse filamentaire entourant NGC 1275, à savoir les raies [S II] λ 6716, [S II] λ 6731, [N II] λ 6584, H α (6563Å), et [N II] λ 6548, il est possible d'obtenir les mesures de flux, de vitesse et de dispersion en vitesse du gaz composant les filaments.

Une des découvertes clés au sein des ces données est la détection d'un gradient net et très intense de dispersion en vitesse entre les régions centrales des filaments et les régions éloignées. Dès lors, cette observation suggèrerait la présence d'un mécanisme de turbulence différent entre ces régions.

De même, en comparant les cartes de flux en rayon-X, H α et gaz moléculaire CO (2-1) visible dans le radio au centre du système filamentaire, une corrélation spatiale est visible et semble indiquer qu'un phénomène de refroidissement particulièrement intense soit présent et relié au gradient de dispersion. Or cette région de refroidissement semble prendre la forme d'un disque équatoriale épousant les coutours inférieurs des bulles radios en formation sous l'effet des jets relativistes de l'AGN. Dès lors, les similarités entre les résultats obtenues et ceux issus d'observations MUSE et ALMA de la BCG Abell 2597 suggère qu'un modèle de "fontaine galactique" (Tremblay et al. 2018) pourrait être considéré afin d'expliquer la formation de la nébuleuse filamentaire entourant NGC 1275

La haute résolution spectrale ($R = 7000$) de ces observations a, de plus, permis une détection du doublet de [SII] au travers des filaments. Celui-ci se révèle ainsi pertinent pour en apprendre davantage sur la densité électronique du gaz au sein de la structure permettant dès lors une comparaison avec la densité obtenue pour le gaz rayon-X. Dès lors, il est possible de voir que la densité électronique entre les deux domaines de longueurs d'onde semble corrélées. En effet, celle-ci est plus importante au centre de la nébuleuse filamentaire, où le gaz est présent en plus grande quantité, et tend à diminuer en s'éloignant du centre. Par ailleurs, il est possible de détecter la présence de creux de densité, vraisemblablement reliés à la présence des cavités formées par la montée des bulles radios produites par le SMB au centre de la BCG.

3.1. Recherche à venir

A la complétion de cette thèse, des données supplémentaires concernant la nébuleuse filamentaire entourant le galaxie NGC 1275 sont en cours d'analyse. Ainsi, des observations de cette structure à l'aide des filtres SN1 et SN2 de l'instrument SITELLE (365-385 nm et 480-520 nm, total de 7.7h, PI : M.-L. Gendron-Marsolais) vont permettre d'obtenir une étude des raies d'émissions suivantes : H β , [OII] λ 3726, [OII] λ 3729, [OIII] λ 4959 & [OIII] λ 5007.

A partir de cette analyse, il sera alors possible de mener à bien un diagnostic Baldwin-Phillips-Terlevich (BPT, Baldwin et al. 1981) en comparant les différents ratios de raies suivants : [NII] λ 6584 / H α , [OIII] λ 5007 / H β , [S II] λ 6716 / H α et [OII] λ 3726 / [OIII] λ 5007.

Ces mesures conjointes offriront alors une plus grande source d'information sur les mécanismes d'ionisation possibles au travers de la nébuleuse filamentaire.

Dans un futur proche, des observations renouvelées de l'émission rayons X entourant NGC 1275 pourront être obtenues au moyen du nouveau télescope XRISM, successeur du télescope spatial Hitomi, dont le lancement est prévu durant l'année 2023. Ce nouveau télescope spatial permettra ainsi de mieux comprendre le mécanisme de rétroaction des AGN où l'étude effectuée dans le présent mémoire pourra servir de base de comparaison avec des données optiques.

Par ailleurs, une demande de temps sera effectuée auprès du télescope spatial James Webb afin d'étudier avec une meilleure résolution spatiale l'émission IR de la nébuleuse filamentaire. En effet, d'anciennes observations obtenues à l'aide du télescope spatial Herschel (Mittal et al. 2012) montrent effectivement la présence d'émission IR au centre de la nébuleuse. Or, la détection d'une corrélation spatiale entre différent type d'émission dans cette région centrale, montrant également une dispersion en vitesse particulièrement élevée, pourrait offrir la possibilité de mieux comprendre le mécanisme de formation des filaments visibles dans le domaine optique.

Finalement, sur un aspect plus technique d'analyse des données, nous chercherons à mettre au point une méthode plus poussée permettant de mieux tenir compte du bruit au sein des données spectrales de SITELLE, qui peuvent devenir prévalente notamment à très haute résolution spectrale. Ainsi, nous tenterons de développer un algorithme utilisant des techniques d'apprentissage machine capable de déterminer le degrés de variation du bruit entre les pixels afin, dès lors, de produire une carte de bruit pouvant être utilisé afin d'en faire la réduction lors de l'analyse de données.

Bibliographie

- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 93, 5, aDS Bibcode : 1981PASP...93....5B
- Mittal, R., Oonk, J. B. R., Ferland, G. J., et al. 2012, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 426, 2957, aDS Bibcode : 2012MNRAS.426.2957M
- Rhea, C., Hlavacek-Larrondo, J., Rousseau-Nepton, L., Vigneron, B., & Guité, L.-S. 2021, Research Notes of the American Astronomical Society, 5, 208, aDS Bibcode : 2021RNAAS...5..208R
- Tremblay, G. R., Combes, F., Oonk, J. B. R., et al. 2018, The Astrophysical Journal, 865, 13, aDS Bibcode : 2018ApJ...865...13T

Annexe A

Autres Publications À Titre de Co-Auteur

A.1. The First High-contrast Images of X-Ray Binaries : Detection of Candidate 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. ; Artigau, É. ; Lafrenière, D. ; Fabian, A. C. ; Walton, D. J. ; Weiss, L. M. ; Doyon, R. ; Ren, B. B. ; Rhea, C. L. ; Bégin, T. ; Vigneron, B. ; Naud, M. -E.

Contributions : Suggestions et commentaires concernant l'analyse et la discussion.

A.2. A Machine-learning Approach to Integral Field Unit Spectroscopy Observations. III. Disentan- gling Multiple Components in H II Regions

Auteurs : Rhea, Carter L. ; Rousseau-Nepton, Laurie ; Prunet, Simon ; Hlavacek-Larrondo, Julie ; Martin, R. Pierre ; Grasha, Kathryn ; Asari, Natalia Vale ; Bégin, Théophile ; Vigneron, Benjamin ; Prasow-Émond, Myriam.

Contributions : Suggestions et commentaires concernant l'analyse et la discussion.

A.3. LUCI : A Python Package for SITELLE Spectral Analysis

Auteurs : Rhea, Carter ; Hlavacek-Larrondo, Julie ; Rousseau-Nepton, Laurie ; Vigneron, Benjamin ; Guité, Louis-Simon.

Contributions : Participation au développement et aux tests du programme d'analyse des données LUCI.

Annexe B

Congrès où l'étudiant a présenté ses résultats

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

Médium : Conférencier sélectionné

Titre : Expanding on the Nature and Kinematics of the Filamentary Nebula of NGC 1275 with High Spectral Resolution Observations.

Lieu : En ligne

Date : 16 – 20 Mai 2022

Auteurs : B. Vigneron, J. Hlavacek-Larrondo, T. Webb, C. Rhea, M-L. Gendron-Marsolais, L. Rousseau-Nepton.

B.2. Rencontre annuelle du Centre de Recherche en Astrophysique du Québec (CRAQ)

Médium : Conférencier sélectionné

Titre : Expanding on the Nature and Kinematics of the Filamentary Nebula of NGC 1275 with High Spectral Resolution Observations.

Lieu : Hôtel Estrimont, Orford (QC), Canada

Date : 11 – 13 Mai 2022

Auteurs : B. Vigneron, J. Hlavacek-Larrondo, T. Webb, C. Rhea, M-L. Gendron-Marsolais, L. Rousseau-Nepton.

B.3. Poster Symposium Targeting Early-career Researchers (PoSTER)

Médium : Affiche

Titre : Expanding on the Nature and Kinematics of the Filamentary Nebula of NGC 1275 with High Spectral Resolution Observations.

Lieu : En ligne

Date : Mai 2022

Auteurs : B. Vigneron, J. Hlavacek-Larrondo, T. Webb, C. Rhea, M-L. Gendron-Marsolais, L. Rousseau-Nepton.

B.4. Symposium Annuel de Physique pour un Avenir en Recherche et en Industrie (SAPHARI)

Médium : Affiche

Titre : Expanding on the Nature and Kinematics of the Filamentary Nebula of NGC 1275 with High Spectral Resolution Observations.

Lieu : En ligne

Date : Mars 2022

Auteurs : B. Vigneron, J. Hlavacek-Larrondo, T. Webb, C. Rhea, M-L. Gendron-Marsolais, L. Rousseau-Nepton.

B.5. Centenaire du Département de Physique de l'Université de Montréal

Médium : Affiche

Titre : Expanding on the Nature and Kinematics of the Filamentary Nebula of NGC 1275 with High Spectral Resolution Observations.

Lieu : Campus MIL, Montréal (QC), Canada

Date : 20 Octobre 2021

Auteurs : B. Vigneron, J. Hlavacek-Larrondo, T. Webb, C. Rhea, M-L. Gendron-Marsolais, L. Rousseau-Nepton.

B.6. Galaxy Cluster Formation II (GCF-II)

Médium : Affiche

Titre : Expanding on the Nature and Kinematics of the Filamentary Nebula of NGC 1275 with High Spectral Resolution Observations.

Lieu : En ligne

Date : 14 – 18 Juin 2021

Auteurs : B. Vigneron, J. Hlavacek-Larrondo, T. Webb, C. Rhea, M-L. Gendron-Marsolais, L. Rousseau-Nepton.

B.7. Rencontre annuelle de la Société Canadienne d’Astronomie (CASCA)

Médium : Affiche

Titre : Expanding on the Nature and Kinematics of the Filamentary Nebula of NGC 1275 with High Spectral Resolution Observations.

Lieu : En ligne

Date : 10 – 14 Mai 2021

Auteurs : B. Vigneron, J. Hlavacek-Larrondo, T. Webb, C. Rhea, M-L. Gendron-Marsolais, L. Rousseau-Nepton.

B.8. Symposium Annuel de Physique pour un Avenir en Recherche et en Industrie (SAPHARI)

Médium : Affiche

Titre : Expanding on the Nature and Kinematics of the Filamentary Nebula of NGC 1275 with High Spectral Resolution Observations.

Lieu : En ligne

Date : 4 – 5 Mars 2021

Auteurs : B. Vigneron, J. Hlavacek-Larrondo, T. Webb, C. Rhea, M-L. Gendron-Marsolais, L. Rousseau-Nepton.