

Proposition de Thèse

Initiative Physique des Infinis

Titre : Super Spiral Galaxies

Encadrant : P. Salomé, Astronome-Adjoint au LERMA, Observatoire de Paris

philippe.salome@observatoiredeparis.psl.eu

Co-encadrant : D. Le Borgne, Maître de Conférence SU à l'Institut d'Astrophysique de Paris, IAP

Contexte

Nous comprenons aujourd'hui assez bien les mécanismes de croissance hiérarchique des grandes structures de l'Univers : à partir des fluctuations primordiales mesurées dans le fond diffus cosmologique, les halos de matière noire se forment et croissent sous l'effet de la gravitation pour former la toile cosmique. Néanmoins, les grands relevés de galaxies ont mis en évidence des tensions dans ce paradigme : la croissance des galaxies qui occupent ces halos est plus subtile que la simple gravité et repose grandement sur l'ajout de processus physiques propres aux baryons (le gaz et les étoiles). En particulier, les grands relevés de galaxies ont montré que les galaxies très massives (avec des masses stellaires $> 10^{11}$ Msun) sont statistiquement des galaxies rouges et éteintes, e.g. Peng et al. (2010). Sans l'intervention d'un mécanisme de retro-action pour ralentir leur croissance, les simulations numériques prédisent la formation d'une population de galaxies géantes où la formation d'étoiles reste active au sein des halos de très grandes masses.

Les grands relevés de galaxies ont montré que les galaxies locales très massives et éteintes se trouvent préférentiellement dans des amas ou des groupes : on pense que l'environnement est une des raisons possibles de la suppression de la formation d'étoiles dans ces objets (pression dynamique, collisions, effets de marée sur le gaz). La présence d'un AGN (noyau actif autour du trou noir central) est également une raison possible et généralement admise pour l'arrêt de la formation d'étoiles dans les galaxies très massives. Ces deux mécanismes peuvent en effet affecter le contenu en gaz et empêcher les galaxies de former des étoiles.

Pourtant, Ogle et al. (2016 ; 2019) ont découvert que 6 % des galaxies les plus lumineuses (en optique) à un redshift $< 0,3$ sont des galaxies super spirales géantes extrêmement massives, avec un taux de formation d'étoiles très élevé pour leur masse. En tant que telles, elles ressemblent à de gigantesques galaxies massives non éteintes (55-140 kpc de diamètre optique). Ces objets sont exceptionnels, ce sont des sources parfaites pour tester et mettre en difficulté les scénarios de retro-action (en particulier le rôle de l'AGN). De récentes études (Posti et al., 2021) ont montré que ces galaxies ont une fraction de baryons proche de la fraction cosmique, ce qui remet en question nos scénarios d'occupation des halos par les baryons et confirme l'absence possible parfois de mécanisme régulant la formation d'étoiles dans les galaxies très massives.

Aujourd'hui, l'étude de ces objets est encore très limitée. En particulier, le gaz froid (berceau de la formation stellaire) n'a jamais été observé dans ces objets. Les lignes directrices de cette thèse seront (i) de déterminer pour la première fois la quantité de gaz dans ces galaxies, cela permettra de (ii) déterminer si ces objets sont aussi efficaces pour former des étoiles que leur versions moins massives, les spirales de la séquence principale; la dynamique du gaz permettra par ailleurs (iii) de mieux quantifier la fraction de baryons vs matière noire (masse dynamique) dans ces objets exceptionnels et de mieux comprendre comment croissent les galaxies massives dans leurs halos.

Objectif Scientifique

La fenêtre d'observation dans le domaine millimétrique (ALMA/NOEMA) offre une opportunité unique de mesurer le contenu en gaz de ces objets : la source de matière pour la formation d'étoiles se trouve sous la forme de gaz moléculaire, visible dans le domaine mm/submm. Comprendre la formation d'étoiles dans ces objets nécessite une meilleure connaissance de leur contenu en gaz, ce qui n'a encore jamais été étudié dans ces sources. Un projet pilote a été conçu pour observer 6 galaxies super spirales avec l'interféromètre

NOEMA à l'IRAM. Les observations ont été obtenues et les 6 galaxies sont détectées en CO(1-0). Le gaz est clairement présent et se trouve dans des disques moléculaires. Ces 6 sources ont également été observées dans le domaine cm avec le radiotélescope de Nançay (NRT), afin de rechercher du gaz atomique via l'émission HI. Des propositions d'observations du HI ont également été déposées au GMRT (Inde) et VLA (USA) pour mesurer la courbe de rotation d'une de ces galaxies et déterminer sa fraction de matière noire. Des observations VLA ont été obtenues et les données viennent juste d'être acquises. Grâce à ces données, il va être possible d'estimer la masse dynamique de cette galaxie et de déterminer sa fraction de baryons (vs matière noire).

Approche Scientifique

Cette thèse commencera par l'analyse des données des observations NOEMA, NRT et VLA afin (i) de dériver les propriétés galactiques résolues du gaz froid (masse, temps de déplétion, cinématique et morphologie) et (ii) de les comparer aux masses stellaires et aux taux de formation d'étoiles (à partir de données complémentaires existantes dans l'optique). Les résultats de cette première étape ouvriront la voie à un travail observationnel plus important sur ces objets. Le doctorant ou la doctorante sera responsable de la soumission de propositions pour des suivis avec NOEMA, ALMA et le télescope de 30m, ainsi que pour des projets avec MeerKAT, VLT/MUSE et JWST. Les galaxies super spirales constituent une classe d'objets encore très peu connue. Un important travail d'observation est nécessaire pour connaître les propriétés physiques de ces objets. VLT/MUSE peut permettre de cartographier les populations stellaires et les régions de formation d'étoiles via l'émission du gaz ionisé. MeerKAT peut permettre d'observer à haute résolution angulaire la distribution d'hydrogène neutre et de contraindre la masse dynamique et donc la quantité de matière noire. Le JWST peut permettre de cartographier l'émission de la poussière et celle de l'hydrogène moléculaire excité et ainsi apporter des contraintes à la fois sur la formation d'étoile et sur les conditions d'excitation du gaz froid dans lequel les étoiles se forment. L'accès aux archives des grands relevés de galaxies (e.g. SDSS, en anticipation de Euclid et du LSST) peut permettre de connaître l'environnement de ces galaxies (isolées ou en groupes/paires de galaxies). ALMA et NOEMA peuvent permettre d'accroître l'échantillon de sources dont le contenu en gaz froid est quantifié, mais aussi d'observer de nouvelles molécules, comme des traceurs de gaz dense par exemple, ou encore de cartographier à plus haute résolution spatiales certains des objets détectés (e.g. pour étudier si et comment le gaz moléculaire peut (ou pas) venir alimenter le trou noir et la rétro-action). L'encadrement de la thèse consistera notamment à choisir parmi ces pistes d'exploration en s'appuyant sur les résultats des observations en cours. Un travail de modélisation numérique (distribution spectrale d'énergie selon les populations stellaires, dynamique et morphologie des étoiles et du gaz) sera nécessaire pour interpréter les observations.

Adéquation Initiative Physique des Infinités

Cette thèse entre parfaitement dans le cadre scientifique de l'IPI. En effet, ce projet concerne l'étude de la physique de l'Univers, via l'étude de galaxies et propose d'apporter une nouvelle vision des mécanismes de croissance et d'évolution de ces grandes structures de l'Univers. Les mécanismes capables de réguler la croissance des galaxies (quenching) sont parmi les ingrédients fondamentaux des grandes simulations cosmologiques qui ont pour but de comprendre comment l'Univers s'est façonné depuis les premiers âges. Les galaxies super spirales sont un challenge pour les scénarios actuels qui considèrent que les galaxies très massives de l'Univers local devraient avoir cessé de croître. Pour comprendre des échelles extrêmement grandes de l'Univers, cette thèse propose d'utiliser l'observation spectroscopique de transitions moléculaires. C'est donc grâce à la physique de l'infinitement petit que l'on peut étudier et mieux comprendre les étapes de la construction des très grandes structures de notre Univers.

Encadrement (Rôle et Compétences)

Philippe Salomé a déjà encadré ou co-encadré 4 thèses. Il est l'encadrant principal et porteur des projets d'observations en cours et proposés concernant les galaxies super spirales. Son sujet d'étude est la formation d'étoiles dans galaxies et les mécanismes de rétro-action qui régulent cette formation stellaire. Il est expert des techniques d'observation dans le domaine millimétrique et sub-millimétrique, le domaine d'émission des molécules dans l'Univers.

Damien Le Borgne étudie de la physique de galaxies d'un point de vue de modélisateur. Sa maîtrise des codes de synthèse spectrale dans une large gamme de longueur d'ondes (X, UV, visible, IR) et de l'exploitation des grands relevés de galaxies en font un expert des mesures de propriétés physiques de populations de galaxies (masses stellaires, taux de formation d'étoiles, décalage spectral, morphologie). Il a récemment co-encadré deux thèses.

Les domaines d'expertise des deux encadrants sont complémentaires et permettront d'accompagner idéalement le doctorant ou la doctorante dans son travail d'étude du gaz, des étoiles et de la formation stellaire dans les galaxies super spirales. Pour explorer le rôle de l'environnement dans la formation de ces objets (fusions de galaxies vs accretion séculaire), l'expertise de D. Le Borgne sera précieuse avec l'exploitation des grands relevés de galaxies.

Ce projet permettra de renforcer la collaboration entre l'IAP et le LERMA. Le succès du précédent projet ANR LYRICS (PI Philippe Salomé) entre le LERMA et l'IAP a montré la pertinence et la force d'un tel noyau de recherche entre nos laboratoires autour d'expertises complémentaires et de motivations communes. Ce nouveau projet de recherche permettra d'augmenter la visibilité (publications, conférences) et l'attractivité de nos laboratoires d'astronomie en ouvrant la voie à une nouvelle classe d'objets avec d'autres développements possibles autour des expertises de nos laboratoires: simulations numériques idéalisées de galaxies extrêmement massives et riches en gaz, un cas peu étudié, simulations cosmologiques pour suivre l'évolution de ces objets dans des simulations à grande échelle, augmentation de l'échantillon avec les futurs relevés (par exemple Euclid et LSST). L'étudiant(e) en thèse bénéficiera donc d'un environnement très riche pour accomplir et développer son projet de recherche.

Publications et production des encadrants en lien avec le sujet

[ADS Link - Philippe Salomé](#)

[ADS Link - Damien Le Borgne](#)

1) Tremblay, G. R.; Oonk, J. B. R.; Combes, F.; **Salomé, P.**; et al.

(2016) Nature, 534, 218T « Cold, clumpy accretion onto an active supermassive black hole »

Participation à la construction du proposal. Contribution à l'analyse des données et la detection de l'absorption. Contribution à la rédaction de l'article.

2) Olivares, V.; **Salomé, P.**; Combes, F.; Hamer, S., et al., (2019) A&A, 631, 22 « Ubiquitous cold and massive filaments in cool core clusters ». Travail dans le cadre de la [thèse](#) de Valeria. Encadrement complet du travail : construction du projet, aide à la reduction analyse des données, interprétation, jusqu'à la réaction de son premier article.

3) Salomé, Q.; **Salomé, P.**; Combes, F. (2015) A&A, 754, 34S « Jet-induced star formation in 3C 285 and Minkowski's Object ». Travail dans le cadre de la [thèse](#) de Quentin. Encadrement de tout le travail depuis la préparation des demandes de temps, reduction analyse des données, interprétation, jusqu'à la réaction de son premier article.

4) Bonjean, V.; Aghanim, N.; **Salomé, P.**; Beelen, A.; Douspis, M.; Soubrié, E. (2019), 622A, 137B « Star formation rates and stellar masses from machine learning ». Travail dans le cadre de la [thèse](#) de Victor. Encadrement du projet jusqu'à la rédaction de son premier article.

5) Polles, F. L.; **Salomé, P.**; Guillard, P.; Godard, B.; Pineau des Forêts, G.; Olivares, V.; Beckmann, R. S.; Canning, R. E. A.; Combes, F.; Dubois, Y.; Edge, A. C.; Fabian, A. C.; Ferland, G. J.; Hamer, S. L.; Lehnert, M. D. (2019), A&A 651, 13P) « Excitation mechanisms in the intracluster filaments surrounding Brightest Cluster Galaxies ». Encadrement du projet, travail dans le cadre du [postdoc](#) de l'ANR LYRICS

6) « GOODS-Herschel : an infrared main sequence for star-forming galaxies », D. Elbaz, M. Dickinson, H.S. Wang, T. Siaz-Santos, G. Magdis, B. Magnelli, **D. Le Borgne** et al., 2011, A&A 533, 119.

- 7) « COSMOS2015 photometric redshifts probe the impact of filaments on galaxy properties », C. Laigle, ..., **D. Le Borgne** et al., 2018, MNRAS, 474, 5437
- 8) « Galaxy evolution in the metric of the cosmic web », K. Kraljic, ..., **D. Le Borgne** et al, 2018, MNRAS, 474, 547
- 9) « Galaxy merger histories and the role of merging in driving star formation at $z > 1$ », S. Kaviraj, ..., **D. Le Borgne**, 2015, MNRAS, 452, 2845
- 10) “Photometric redshifts from evolutionary synthesis with PEGASE: the code ZPEG and the $z=0$ age constraint”, **D. Le Borgne**, B. Rocca-Volmerange, 2002, A&A, 386, 446.

Calendrier prévisionnel sur les 3 ans

Année 1

- Travail de bibliographie et de compréhension du sujet
- Exploitation des programmes en cours (6 galaxies) via les observations NOEMA, NRT et VLA déjà obtenues : objectif d’une publication des résultats issus de ces projets
- Exploitation des données GMRT, VLT/MUSE si les projets sont acceptés pour le prochain semestre
- Ecriture de nouvelles propositions d’observations (accroître les échantillons, données complémentaires)

Année 2

- Finalisation des travaux de la première année
- Travail de modélisation de la dynamique des disques (modèles simples et éventuellement post-traitement de simulations numériques en collaboration avec A. Hallé, CR au LERMA)
- Etude du rôle de l’environnement : ces galaxies sont-elles isolées ou bien en groupes / paires.
- Ecriture de nouvelles propositions d’observations
- Exploitation des données des nouveaux programmes (soumis la 1^{er} année)
- Participation à des conférences pour présenter les résultats

Année 3

- Finalisation des publications (issues des travaux de la seconde année)
- Exploitation des données obtenues
- Ecriture de nouvelles propositions d’observations
- Rédaction du manuscrit de thèse
- Participation à des conférences et séminaires pour présenter les résultats obtenus et valoriser le travail de thèse en vue d’un postdoc

Profil de candidature recherché

- Connaissances astrophysiques : Milieu Interstellaire / Galaxies / Telescopes et instrumentation
- Connaissances physique : Processus de rayonnement, Gravité, Physique quantique, Optique
- Connaissances techniques : Réduction, analyse des données, modélisation
- Autonomie pour effectuer des observations (sur place / à distance)

Nous avons été contacté par 4 étudiants en Master 2. Nous avons organisé des interviews et tous les profils de ces étudiants sont adaptés au sujet proposé. Nous avons donc pu effectuer un classement provisoire et confidentiel.

Courte bibliographie

- Lelli et al., 2016
- Di Teodoro et al., 2021
- Ogle et al., 2016, 2019a, 2019b
- Posti et al., 2018, 2019, 2021