

Sujet de thèse

Physique des régions de formation stellaire géantes des galaxies primordiales : une synergie entre observations en simulations numériques

Laboratoire

CEA-Saclay, Service d'Astrophysique

Thèse dirigée par : Frédéric Bournaud

Co-dirigée par : Emanuele Daddi

Résumé - La morphologie des galaxies de l'Univers distant, au pic de leur activité de formation stellaire (redshift $z=1-3$), est très différente des galaxies spirales proches. Ces galaxies sont en général irrégulières, dominées par des régions géantes ou « clumps » de formation stellaire. Ces « clumps » ont des tailles et masses de 100 à 1000 fois plus grandes que celles des nuages moléculaires et amas stellaires de notre Galaxie. Cette propriété pourrait s'expliquer par les grandes masses de gaz et la forte turbulence des galaxies jeunes, pouvant provoquer une instabilité et la fragmentation violente des disques galactiques.

Néanmoins, et malgré les études menées par de nombreux groupes, une compréhension précise de la formation et de l'évolution de ces clumps reste à établir, aussi bien par l'observation que du point de vue théorique. La distribution de masse stellaire et de formation stellaire dans les clumps reste débattue, et surtout l'évolution de ces régions géantes face au « feedback » des étoiles jeunes reste très incertaine. Si les clumps survivent au feedback, ils peuvent contrôler l'évolution de leur galaxie hôte : croissance du bulbe central, alimentation du trou noir supermassif, genèse des vents galactiques. Les simulations numériques manquant de résolution ont recours à des modèles « sous-maille » pour implémenter la formation d'étoiles et le feedback, et donnent des résultats discordants selon les recettes employées.

La thèse proposée explorera la nature et l'évolution des clumps par 3 approches complémentaires :

- 1) une caractérisation observationnelle basée pour la première fois sur la cartographie des quantités physiques (cartes de masse stellaires, de densité de formation stellaire) à partir de données des champs profonds du télescope Hubble (champs tels que CANDELS, H-UDF),
- 2) une comparaison systématique aux cartes simulées par divers groupes employant diverses méthodes de simulation numérique du feedback stellaire,
- 3) de nouvelles simulations numériques ayant une modélisation améliorée par l'emploi de « zooms » sur les clumps de formation stellaire, pour mieux modéliser les sites de formation stellaire et la réaction du milieu interstellaire turbulent au feedback des étoiles.

Ces approches complémentaires permettront de mieux comprendre le rôle des instabilités des galaxies primordiales dans la formation de leurs disques, bulbes, et trous noirs supermassifs. Cette étude contraindra aussi d'autres aspects fondamentaux de la formation des galaxies, tels que l'évolution de leur fraction de gaz au cours du temps. Ce travail préparera l'interprétation des observations du JWST, qui cartographiera en détail la distribution de masse stellaire dans les galaxies primordiales, et leur gaz ionisé, à comparer avec les observations des réservoirs de gaz moléculaire par ALMA. Une compréhension fine de la formation stellaire dans les galaxies jeunes est également indispensable pour étudier les populations stellaires âgées dans les galaxies proches, qui seront notamment sondées par EUCLID. Enfin, la thèse proposée emploiera des simulations numériques réalisées sur les plus grands calculateurs nationaux (GENCI) et Européens (PRACE).

Compétences souhaitées

Master 2 d'astrophysique ou physique, ou équivalent
Expérience ou goûts prononcés pour la simulation numérique et le calcul haute performance

Compétence développées

Analyse de données d'observations et de simulations
Physique de la formation des galaxies
Simulations numériques et calcul haute performance

Contacts

Frédéric Bournaud (frederic.bournaud@cea.fr)
Emanuele Daddi (edaddi@cea.fr)

Sujet détaillé

L'analyse des observations du satellite Herschel menée à l'IRFU a révélée que les galaxies de l'Univers primordial forment l'essentiel de leurs étoiles indépendamment de leur environnement et des collisions de galaxies, mais plutôt sous l'effet de leur physique interne qui régule la conversion de leurs réservoirs de gaz en étoiles. Ces galaxies primordiales se distinguent par une morphologie très différentes des galaxies actuelles : elles sont très irrégulières et dominées par des régions de formation stellaire géantes, 100 à 1000 fois plus massives que celles des galaxies actuelles – ces dernières ont des morphologies « spirales » bien plus lisses et régulières. Au niveau théorique, les simulations numériques des équipes de l'IRFU ont permis d'établir qu'une instabilité gravitationnelle dans le gaz turbulent des galaxies jeunes explique leur fragmentation en régions géantes de formation stellaire. Plusieurs équipes dans le monde suivent désormais l'exploration de ce nouveau mode d'instabilité des galaxies jeunes.

Ces résultats ouvrent de nouvelles questions fondamentales pour la formation des galaxies. Si ces régions géantes survivent à la rétroaction des étoiles jeunes (chauffage, pression radiative, explosions de supernovae), alors elles peuvent piloter l'évolution ultérieure de leur galaxies hôtes : formation du bulbe centrale, alimentation des trous noirs supermassifs, genèse des vents galactiques. Jusqu'ici, simulations et observations ont manqué de résolution pour résoudre la physique cruciale du couplage entre les étoiles jeunes et les considérables réserves de gaz dans ces régions géantes.

Pour s'attaquer à la question de l'évolution des régions géantes de formation stellaire, et de leur impact sur l'évolution des galaxies hôtes, la thèse explorera l'effet des processus de rétroaction par trois approches complémentaires :

1/ Une caractérisation observationnelle basée sur la cartographie des quantités physiques dans les galaxies jeunes (cartes de masse d'étoiles, de masse de gaz, de taux de formation d'étoiles) reconstruites à partir des diverses longueurs d'ondes observées par le télescope spatial Hubble et d'autres observatoires au sol.

2/ Une comparaison systématique des cartes observées à celles prédites par les simulations réalisées par plusieurs groupes qui emploient diverses modélisations des processus de rétroaction. 3/ Le développement de nouvelles simulations numériques, employant des « zooms » sur les régions de formation stellaire géantes, pour résoudre au mieux la physique mise en jeu et s'affranchir des paramètres incertains dans les modèles « sous maille » employés à l'heure actuelle.

La synergie proposée entre simulations et observations, au sein d'une même équipe, est une approche unique dans ce domaine ; les co-encadrants sont des experts reconnus de l'une ou l'autre des techniques. Le travail de thèse pourra en bénéficier pour obtenir des résultats d'envergure sur l'instabilité des galaxies primordiales, l'évolution de leurs régions géantes de formation stellaire, et l'impact sur la morphologie actuelle des galaxies et l'alimentation de leurs trous noirs centraux.

Ce sujet de thèse s'inscrit dans plusieurs projets majeurs de l'IRFU. Le travail observationnel permettra de préparer, puis d'exploiter, les observations du futur télescope spatial JWST. Ce dernier, dont les premières données doivent arriver en 2018, va en effet permettre de cartographier le gaz ionisé par les étoiles jeunes dans les régions de formation stellaires des galaxies de l'Univers primordial, témoin direct des effets de rétroaction post-formation stellaire. Les données spectroscopiques à haute résolution spatiale du JWST couvriront des longueurs d'ondes hors de portée des observatoires actuelles, et se préparer à l'interprétation de ces données est un enjeu important pour notre laboratoire. Notre équipe dispose déjà de données issues du nouvel interféromètre radio ALMA qui sondent le gaz moléculaire froid pré-formation stellaire. La compréhension fine des processus de formation stellaire dans les galaxies est aussi un projet clé pour l'exploitation des observations du futur satellite EUCLID, projet majeur pour l'IRFU, notamment pour les projets d'« archéologie galactique » qui consistent à étudier les traces actuelles, dans les galaxies proches, des processus de formation d'étoiles dans les galaxies jeunes : l'IRFU/SAP est responsable de cet aspect au sein du consortium EUCLID. Ce sujet reposera aussi sur l'utilisation intensive des supercalculateurs nationaux (GENCI) et européens (PRACE) par les équipes de l'IRFU.

L'étudiant(e) formé(e) au cours de cette thèse aura ainsi l'opportunité d'aborder des questions astrophysique majeures, tout en se formant à des techniques de pointes. Il/elle aura l'opportunité de manipuler et analyser des jeux de données multi-longueur d'onde issus d'observatoires de pointe et de participer à l'extraction du signal physique dans ces données. Il/elle participera à la réalisation de simulations numériques de pointe sur les supercalculateurs de GENCI, notamment le successeur du calculateur Curie au TGCC du CEA. A cette occasion l'étudiant suivra, si nécessaire, des formations sur le calcul parallèle et la modélisation numérique, et mettra en

œuvre ces compétences sur des simulations numériques parmi les plus ambitieuses au niveau mondial. Le spectre large de cette formation doctoral confèrera à l'étudiant un profil de haut niveau, allant de l'astrophysique au calcul haute performance.

Compétences souhaitées

Master 2 d'astrophysique ou physique, ou équivalent

Expérience ou goûts prononcés pour la simulation numérique et le calcul haute performance

Compétence développées

Analyse de données d'observations et de simulations

Physique de la formation des galaxies

Simulations numériques et calcul haute performance

Contacts

Frédéric Bournaud (frederic.bournaud@cea.fr)

Emanuele Daddi (edaddi@cea.fr)