

Évolution des amas stellaires dans les galaxies proches : une approche de modélisation d'ensemble des populations

Motivation scientifique de la thèse

Les amas stellaires sont les produits de la formation d'étoiles, un des processus fondamentaux gouvernant la formation et l'évolution des galaxies à travers les âges cosmiques. Fondamentalement, ils tracent la formation stellaire aux densités les plus élevées et jouent le rôle d'« horloges » pour mesurer les différentes phases du cycle de formation stellaire et pour tester de manière fondamentale les modèles de populations stellaires. Un intérêt intense est porté à la caractérisation de leurs propriétés globales afin de mieux comprendre la physique de la formation stellaire, la rétroaction, la destruction et la survie des amas, et en fin de compte de retracer l'évolution de leurs galaxies hôtes.

Considérant leur importance, il n'est pas surprenant que des milliers d'orbites des télescopes spatiaux Hubble (HST) en UV-optique et Webb (JWST) en IR, aient été investies dans l'étude des amas stellaires. Le projet PHANGS a récemment [publié les catalogues](#) du plus grand recensement d'amas stellaires et d'associations à ce jour avec HST, comptant environ 100 000 objets répartis dans 38 galaxies spirales, augmentant d'un ordre de grandeur la taille des échantillons disponibles jusqu'alors. 19 de ces galaxies ont fait l'objet d'observations avec JWST. Le jeu de données HST+JWST ouvre un champ unique : disposer d'un inventaire complet de la formation des étoiles, de mesures précises de la masse et de l'âge, de l'identification des populations stellaires jeunes et enfouies, et de la caractérisation de l'état physique des grains de poussière. La taille et l'uniformité de ces catalogues offrent de nouvelles opportunités pour faire progresser notre compréhension de l'évolution stellaire, de la formation des amas, de la formation et de l'assemblage des galaxies, en particulier grâce à la modélisation d'ensemble des populations d'amas.

Cette thèse vise à exploiter ce jeu de données exceptionnel auquel de la grande collaboration internationale PHANGS afin de mesurer l'histoire cosmique de la formation et de la destruction des amas stellaires dans différents environnements galactiques grâce à la modélisation d'ensemble des amas.

Pourquoi une modélisation d'ensemble des populations d'amas stellaires ?

Les études sur les amas stellaires se basent généralement sur les masses, âges et extinctions des amas individuels obtenus via l'ajustement de leurs distributions spectrales d'énergie (SED) dans les domaines UV-optique en utilisant des modèles de synthèse de populations d'étoiles. Ces paramètres ont servi de base à plus d'une décennie de travaux sur la fonction de masse des amas et la fraction d'étoiles formées en amas. Cependant, des questions fondamentales, telles que la variation de la fonction de masse initiale (IMF) des étoiles (deux amas de mêmes masse et âge peuvent se retrouver à avoir des populations stellaires différentes et donc des spectres intrinsèquement différents) et de l'effet de l'environnement, restent vivement débattues. L'une des raisons pour lesquelles ces questions restent sans réponse est que les dégénérescences entre âge, masse et extinction dans l'ajustement des SED se sont révélées difficiles à lever. Ces dégénérescences sont particulièrement aiguës pour les amas de faible masse ($<10^4 M_{\odot}$), dont les luminosités et couleurs sont fortement affectées par la stochasticité de l'échantillonnage de l'IMF, ainsi que pour les objets jeunes, dont les SED peuvent imiter celles d'amas plus âgés à cause du rougissement de leur rayonnement par la poussière. Les filtres JWST des nouvelles observations PHANGS ont le potentiel pour résoudre cette dégénérescence grâce à leur sensibilité à l'émission de la poussière dans et autour des amas.

Ces dégénérescences ne sont pas seulement problématiques en elles-mêmes, elles compliquent également le processus déjà complexe de prise en compte de l'incomplétude : seulement une fraction mal contrainte des amas de faible masse est détectée et cataloguée. La solution a simplement été d'éviter cette complexité. Les amas, pourtant critiques, de faible masse sont écartés de l'analyse. Par exemple, une étude de l'équipe LEGUS des fonctions de masse et de luminosité des amas dans NGC 628 utilise seulement 300 des 1 200 amas présent dans le catalogue. Les tailles d'échantillons diminuent encore davantage lorsque des limites sur l'âge sont également nécessaires pour l'analyse. C'est désormais sans doute le plus grand goulot d'étranglement dans les études sur les amas stellaires. Il a été progressivement reconnu qu'une approche entièrement différente est nécessaire pour exploiter pleinement le potentiel des données HST+JWST.

Plutôt que de nous appuyer sur l'ajustement des SED pour des objets individuels comme cela se fait classiquement, nous proposons dans cette thèse de surmonter ces défis en appliquant des techniques bayésiennes

pour effectuer une modélisation d'ensemble des populations d'amas stellaires. Cette stratégie est analogue à la modélisation des diagrammes couleur-magnitude des étoiles pour en déduire l'histoire d'une population. Longtemps inapplicable aux amas stellaires à cause de la faible taille des échantillons, ce champ est désormais ouvert grâce au vaste échantillon d'environ 100 000 amas stellaires et associations récemment publié par PHANGS.

Plan d'analyse

La première étape de la thèse consistera à développer un modèle d'incomplétude pour les données PHANGS HST+JWST. Une bonne compréhension de l'incomplétude des données, c'est-à-dire la capacité à prédire la probabilité que des amas soient observés en fonction des propriétés qui leur sont attachées (voir paragraphe suivant) est essentielle pour caractériser les catalogues d'amas. Une détermination appropriée de l'incomplétude nécessite une analyse minutieuse des images HST et JWST avec des amas synthétiques pour déterminer le taux de détection en fonction des propriétés photométriques et d'autres caractéristiques (par exemple, la compacité, la brillance de surface locale de la galaxie). Cette analyse d'incomplétude ne permettra pas seulement d'appliquer la nouvelle approche de modélisation décrite ici, elle sera également une ressource cruciale pour d'autres analyses des populations d'amas et augmentera considérablement la valeur des catalogues publics HST et JWST pour les études des amas stellaires.

Dans une seconde étape, pour construire une modélisation d'ensemble des amas, nous nous baserons sur une bibliothèque d'amas stellaires en cours de développement au sein de la collaboration PHANGS. Une des difficultés actuelles dans les modèles d'amas est la prise en compte insuffisante des effets de l'échantillonnage stochastique de l'IMF : plusieurs amas pourtant de masses identiques peuvent avoir des spectres différents. Dans cette nouvelle bibliothèque, pour chaque amas synthétique d'âge et de masse donnés, l'IMF est échantillonnée de manière stochastique autant de fois qu'il est nécessaire pour peupler l'espace résultant, une spécificité unique de cette bibliothèque. Les amas sont ensuite pondérés par des distributions paramétriques de masses et d'âges (ainsi que des paramètres de nuisance comme l'extinction) ainsi que par la fonction d'incomplétude afin de produire des distributions photométriques synthétiques. Ces dernières sont ensuite comparées aux distributions photométriques observées afin de contraindre les paramètres physiques d'ensemble des populations d'amas. Parce que la modélisation prend en compte de manière auto-cohérente les effets de l'incomplétude et de la stochasticité, elle utilise toutes les données disponibles dans les catalogues d'amas stellaires. Elle évite ainsi les coupes sévères qui écartent les sources en dessous des limites en masse où l'incomplétude et la stochasticité sont problématiques.

Dans une dernière phase, nous diviserons les galaxies en différentes zones radiales où nous sélectionnerons des régions spécifiques en fonction de caractéristiques telles que des cartes de poussière et de morphologie (bras spiraux, bulbe, etc.). En comparant les taux de formation d'étoiles (SFR) dérivés des études précédentes dans ces régions, nous pourrions ensuite analyser comment le SFR local se corrèle avec les échelles de temps de destruction des amas et si celles-ci varient avec la masse. Cette approche offrira un aperçu de la vie et de la mort des amas en fonction de l'environnement local et global de chaque galaxie.

Retour scientifique attendu

La mise en œuvre de cette modélisation ne permettra pas seulement une utilisation complète des jeux de données existants sur les amas, elle permettra enfin une analyse robuste des échantillons agrégés des populations d'amas à travers les galaxies, et une première tentative de modélisation de l'histoire cosmique de la formation des amas. Elle résout le problème des fonctions d'incomplétude différentes en raison des variations de profondeur des observations entre les galaxies, ainsi que la plage de distances (5-20 Mpc pour les galaxies PHANGS). De plus, nous serons en mesure d'étudier des échantillons construits en fonction des paramètres environnementaux, indépendamment, afin d'examiner si des conditions particulières sont nécessaires pour former des amas.

L'analyse des échantillons en tant que population est essentielle pour comprendre comment l'environnement galactique peut influencer la formation des étoiles et des amas. Il n'y a tout simplement pas suffisamment d'amas dans une seule galaxie pour une analyse statistique une fois que la population est subdivisée par paramètres environnementaux. Dans cette thèse, nous nous concentrerons sur l'implémentation de l'approche de modélisation d'ensemble sur l'échantillon d'amas stellaires PHANGS, car les données nécessaires pour explorer les dépendances environnementales sont facilement accessibles. Une fois développés, les outils produits par ce travail seront mis à la disposition de la communauté. Les difficultés profondes liées à la transformation des

observations des amas stellaires en propriétés physiques sont connues depuis longtemps. Cependant, notre communauté n'a pas encore pu surmonter l'inertie associée à un changement majeur dans les méthodes et les outils d'analyse fondamentaux sur lesquels repose l'ensemble de notre domaine. Cette thèse fournira les ressources nécessaires pour nous « débloquer » et faire progresser l'étude de la formation et de l'évolution des amas stellaires.

Publications espérées

L'impact considérable de la modélisation d'ensemble ouvre de larges perspectives au niveau des publications. Considérant la durée limitée de la thèse, nous estimons raisonnable de viser trois articles :

1. Modèles d'incomplétude des observations HST et JWST
2. Modélisation d'ensemble des amas des 19 galaxies HST+JWST avec incomplétude et stochasticité
3. Impact de l'environnement sur la vie et la mort des amas

Ses travaux contiendront les germes d'autres articles qu'elle pourra développer en postdoc si elle le souhaite. Il est également très probable qu'elle sera amenée à contribuer à divers articles de la collaboration PHANGS concernant les amas stellaires.

Environnement de recherche

Cette thèse se développera au sein de l'équipe Galaxies & Cosmologie du Laboratoire Lagrange à Université Côte d'Azur. À l'interface entre les groupes galactique et extragalactique, bénéficiant à plein de la gamme de recherche de l'équipe.

Cette thèse s'intégrera également la collaboration internationale PHANGS, ce qui sera hautement bénéfique pour de multiples raisons :

1. Le travail de thèse sera basé sur les catalogues HST+JWST constitués par l'équipe PHANGS.
2. Cela utilisera également des outils qui sont activement développés par le cadre de cette collaboration.
3. Cela permettra un accès direct à certains des meilleurs experts mondiaux sur les sujets de sa thèse.
4. La collaboration PHANGS travaille activement à la promotion de jeunes chercheuses et chercheurs, ce qui est bénéfique pour leur carrière à long terme considérant le niveau de compétition très élevé sur les postes permanents dans le domaine de l'astronomie.

En plus du travail avec la collaboration PHANGS au sens large, nous envisageons également de développer cette thèse en lien particulièrement étroit avec :

1. Dr. Janice Lee : astronome au *Space Telescope Science Institute* (Baltimore, États-Unis d'Amérique), PI des sondages PHANGS-HST et PHANGS-JWST, une des meilleures expertes sur les amas d'étoiles.
2. Prof. Aida Wofford : professeure à *Universidad Nacional de México* (Ensanada, Mexique), une des meilleures expertes des populations stellaires, elle mène actuellement le développement de la bibliothèque de modèles stochastiques qui seront utilisés pendant la thèse.

Les candidatures sont à envoyer avec un CV, une lettre de motivation et un relevé de notes à Médéric Boquien (mederic.boquien@oca.eu). La personne devrait être titulaire d'un Master 2 (ou équivalent) en astrophysique. Une maîtrise du développement Python, de l'anglais, et des statistiques seront particulièrement valorisées, ainsi que des connaissances en formation et évolution des galaxies. Toutes les candidateuses envoyées d'ici au 21 juillet seront prises en considération.