

PROPOSITION DE STAGE

STRUCTURE CHIMIQUE 3D DU MILIEU INTERSTELLAIRE TURBULENT

DIRECTEURS : B. GODARD, G. PINEAU DES FORÊTS, P. HENNEBELLE

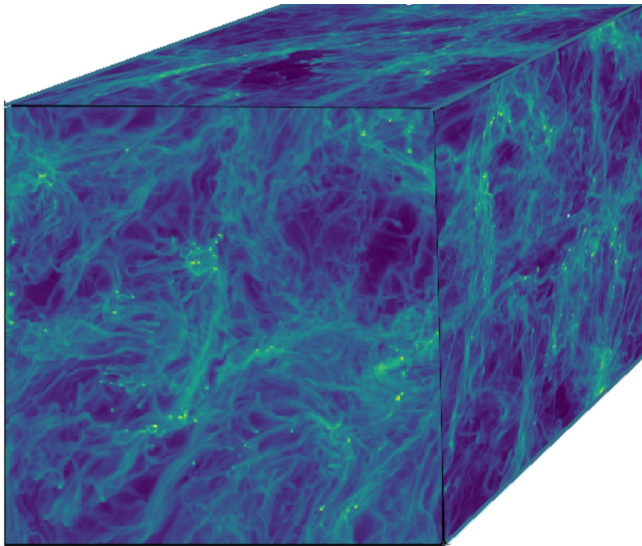
Contexte scientifique – Comprendre en détail les processus physiques qui régissent l'évolution des nuages interstellaires et leur effondrement gravitationnel vers de nouvelles étoiles est un sujet majeur de la physique galactique et extragalactique. Toute la difficulté de cette tâche réside toutefois dans la richesse et la complexité des processus impliqués. (1) Pour commencer, le milieu interstellaire est un **environnement inhomogène et multi-phase** [1] : à l'instar des mixtures liquide-vapeur rencontrées dans les fluides de Van der Waals, le milieu interstellaire neutre se divise naturellement en une phase chaude ($T \sim 8000$ K) et une phase froide ($T \sim 100$ K) qui coexistent en équilibre de pression. (2) D'autre part, en plus d'être soumis à la gravité, le milieu interstellaire est le siège d'une **turbulence magnéto-hydrodynamique fortement compressible** : l'énergie mécanique injectée à grande échelle par les supernovae et la rotation galactique est ainsi transférée de manière multi-fractale vers les petites échelles où elle se dissipe. (3) Enfin, la matière qui compose le milieu (le gaz et les grains de poussière) est en constante interaction avec le rayonnement stellaire et les rayons cosmiques. Chacun de ces aspects influe sur la dynamique des nuages et sur la formation des étoiles qui y prend place.

Afin d'aborder ce problème dans toute sa complexité, la comparaison systématique des résultats des modèles théoriques aux observations est fondamentale. D'un point de vue observationnel, les grands instruments à toutes les longueurs d'onde (e.g. FUSE, Herschel, ALMA) ont conduit à l'observation massive de raies atomiques et moléculaires, qui sont devenues, au cours du temps, des traceurs incontournables de la dynamique interstellaire et de la formation stellaire. D'un point de vue théorique, de nombreux efforts ont été accomplis pour développer d'une part des simulations numériques, seules capables de représenter la structure 3D turbulente du milieu interstellaire, et d'autre part des codes de résolution de réseaux chimiques complexes, seuls capables de calculer l'évolution chimique du milieu, l'excitation des raies moléculaires et le transfert de rayonnement. Très récemment, ces deux approches ont été couplées afin de décrire de manière cohérente la **chimie multi-phase et multi-échelle du milieu interstellaire**. Une telle approche a permis d'analyser pour la première fois les observations du milieu interstellaire de manière statistique et de prédire les distributions en probabilité des compositions chimiques le long de lignes de visée [2].

Objectif – Dans ce cadre global, l'objectif du stage sera d'analyser l'excitation de l'hydrogène atomique et moléculaire dans un ensemble de simulations du milieu interstellaire turbulent. Les profils de raie de H et H₂ seront ensuite calculés afin d'établir des prédictions pour le futur télescope spatial James Webb (JWST, lancement prévu en 2021) et le future Square Kilometre Array (SKA, mise en service prévue en 2027) et de répondre aux questions suivantes.

- Quelles sont les probabilités d'observation des différentes raies de H₂ ?
- Quelle est la contribution du H₂ chaud hors équilibre chimique à l'émission totale de H₂ ?
- Quelles sont les variabilités spatiale et spectrale attendues des émissions de HI (21 cm) et H₂ ?

Méthodes et compétences acquises – Le stage consistera à manier et à modifier des outils de post-traitement de simulations numériques magnéto-hydrodynamique de pointe. Ces outils seront utilisés massivement sur un ensemble de 305 simulations à l'aide du cluster de calcul *Totoro* de l'ERC MIST (Molecules, magnetic fields and Intermittency in coSMic Turbulence). Au cours du travail l'étudiant(e) se familiarisera ainsi avec tous les processus physiques du milieu interstellaire (MHD, thermodynamique, chimie, excitation, transfert) et les méthodes utilisées actuellement pour introduire ces processus dans les modèles théoriques les plus évolués. D'un point de vue numérique, l'étudiant(e) approfondira ses



connaissances en programmation informatique (e.g. Python, Fortran ou C++), découvrira des outils de pointe (e.g. RAMSES) et apprendra à manier des serveurs de calcul.

Perspectives – Le stage sera potentiellement suivi d’une thèse qui pourra prendre différentes directions en fonction des intérêts et aptitudes de l’étudiant(e). Parmi les orientations possibles, nous envisageons l’analyse et la simplification de l’architecture des réseaux chimiques (travail mathématique fondé sur des méthodes de biologie moléculaire), l’implémentation et l’exploration de processus de microphysique dans RAMSES, la comparaison statistique et multi-dimensionnelle à des ensembles massifs de données ou enfin la prédiction de spectres observés par les grands instruments actuels et à venir (SKA, ELT, JWST, ALMA, NOEMA).

Références bibliographiques

[1] Wolfire, M., McKee, C. F., Hollenbach, D., Tielens A. G. G. M., 2003, ApJ, 587, 278

[2] Bellomi, E., Godard, B., Hennebelle, P., Valdivia, V., Pineau des Forêts, G., Lesaffre, P., Péroult, M. A&A, in press