

**DYNAMIQUE DU MILIEU INTERSTELLAIRE DIFFUS AUX ÉCHELLES ATTENDUES DE DÉCOUPLAGE
ENTRE LA MATIÈRE NEUTRE ET LA MATIÈRE IONISÉE (10 UA- 0.1 PC).**

THE DYNAMICS OF THE DIFFUSE INTERSTELLAR MEDIUM AT ION-NEUTRAL DECOUPLING SCALES

Etablissement **Université de Montpellier**

École doctorale **I2S - Information, Structures, Systèmes**

Spécialité **Physique et Astrophysique**

Unité de recherche **LUPM - Laboratoire Univers et Particules Montpellier**

Encadrement de la thèse **Alexandre MARCOWITH ([detailResp.pl?resp=18546](#))**

Financement du 01-10-2023 au 30-09-2026 *origine* **Concours CD ED I2S Employeur** **Université de Montpellier**

Début de la thèse le **1 octobre 2023**

Date limite de candidature (à 23h59) **9 mai 2023**

Mots clés - Keywords

Milieu interstellaire , Poussières, Turbulence , Simulations numériques

Interstellar medium, Dust particles, Turbulence, Numerical simulations

Description de la problématique de recherche - Project description

Le milieu interstellaire diffus est un milieu magnétisé très faiblement ionisé. Il est principalement constitué, en masse, de 99% de gaz neutre et de 1% de poussières (solides) chargées. Les ions ne représentent environ que 1/10 000 de la masse de ce milieu. En raison de cette faible ionisation, le gaz et le champ magnétique sont imparfaitement couplés : le gaz peut diffuser à travers les lignes de champ, un phénomène appelé « diffusion ambipolaire ». Ce phénomène physique fondamental, au centre du processus d'effondrement des nuages interstellaires et de la formation des étoiles, n'a jamais été clairement détecté dans le milieu interstellaire. Le découplage entre gaz et

champ magnétique, ou entre neutres d'une part et ions et poussières d'autre part, est attendu à des échelles situées en 100 et 1000 unités astronomiques (Zweibel 2015).

Suite à l'acceptation de notre demande d'observation JWST intitulée « The turbulent magnetized interstellar medium: looking for ambipolar diffusion in the Pleiades » (F. Boulanger et al 2022) nous avons obtenu fin 2022 des cartes JWST de l'émission des poussières ($3.3\ \mu\text{m}$) et du dihydrogène ($2.12\ \mu\text{m}$) autour de l'étoile Mérope dans la constellation des Pléiades, étoile non ionisante qui illumine ce milieu diffus. Ces cartes uniques, de dimension $0.1\ \text{pc} \times 0.3\ \text{pc}$, ont une résolution de 10 ua, et doivent donc permettre de caractériser la diffusion ambipolaire dans ce milieu. On observe dans la carte des poussières une structuration à toutes les échelles en filaments très fins, parallèles à la direction moyenne du champ magnétique mesurée par ailleurs. La carte de dihydrogène diffère fortement de celles des poussières.

L'objectif de la thèse est de développer le cadre théorique (linéaire) permettant d'analyser et d'interpréter ces données uniques, et de mettre en place les simulations MHD (magnétohydrodynamique) et PIC (particle-in-cell)-MHD permettant d'aborder les aspects non-linéaires de ce phénomène. Ce travail serait fait en étroite collaboration avec l'analyse et l'interprétation des données JWST (travail principalement mené à l'ENS en collaboration avec V. Guillet).

La première année sera consacrée à l'analyse théorique (analyse linéaire) de la propagation des ondes MHD dans un milieu tri-fluide (gaz neutre, ions, et poussières nanométriques chargées), et du développement d'instabilités de type Rayleigh-Taylor magnétisé. Une littérature abondante existe sur le sujet dans les secteurs de recherche qui s'intéressent à la chromosphère solaire. Il faudra adapter ce cadre théorique au contexte, très différent, du milieu interstellaire diffus qui possède une fraction d'ionisation de l'ordre de $1/10\ 000$. L'étudiant-e profitera de cette année pour se former à l'utilisation du code PIC-MHD AMRVAC (Van Marle, Casse & Marcowith 2018), la partie Particle-In-Cell permettant de suivre l'accélération stochastique de particules chargées comme les grains de poussières dans un milieu turbulent magnétisé.

La deuxième année sera consacrée à l'intégration d'un deuxième fluide dans le code AMR-VAC de façon à simuler la diffusion ambipolaire. Ce travail sera fait en parallèle d'une collaboration que V. Guillet et A. Marcowith mèneront avec des collègues spécialistes des simulations MHD du milieu interstellaire (B. Commerçon, P. Hennebelle) pour faire de même avec le code RAMSES (Teyssier 2002).

La troisième année permettra de simuler avec AMR-VAC la dynamique stochastique des poussières dans le milieu diffus en présence de diffusion ambipolaire. Ces résultats pourront être comparés avec ceux déjà obtenus avec le code RAMSES mais sans diffusion ambipolaire (Moseley, Teyssier & Draine 2023). Les résultats de ces simulations seront confrontés aux données JWST, et fourniront également des contraintes pour renouveler les modèles de dynamique des poussières utilisés dans les modèles et simulations d'effondrement des coeurs pré-stellaires incluant une coagulation des poussières (e.g. Guillet+2020, Le Breuilly+2023), qui tous se basent sur une approche hydrodynamique de type Kolmogorov - vieille de 50 ans (Voelk et al 1980) - sans prise en compte du champ magnétique ni de la diffusion ambipolaire.

The diffuse interstellar medium is a very weakly-ionized, magnetized, medium. It mainly consists, by mass, of 99% neutral gas and 1% charged (solid) dust. The ions are only about $1/10,000$ of the mass of this medium. Due to this weak ionization, the gas and the magnetic

field are imperfectly coupled: the gas can stream across the field lines, a phenomenon called “ambipolar diffusion”. This fundamental physical phenomenon, which must happen during the process of interstellar cloud collapse and star formation, has never been clearly detected in the interstellar medium. The decoupling scale between gas and magnetic field, or between neutrals on the one hand and ions and dust on the other hand, is expected at scales between 100 and 1000 AU (astronomical units), see Zweibel (2015).

Following the acceptance of our JWST observation request entitled 'The turbulent magnetized interstellar medium: looking for ambipolar diffusion in the Pleiades' (F. Boulanger et al 2022) we obtained at the end of 2022 JWST maps of dust emission ($3.3\ \mu\text{m}$) and dihydrogen ($2.12\ \mu\text{m}$) around the star Merope in the constellation of the Pleiades, a non-ionizing star which illuminates this diffuse medium. These unique maps, $0.1\ \text{pc} \times 0.3\ \text{pc}$ in size, have a resolution of 10 AU, and should therefore make it possible to characterize ambipolar diffusion in this medium. We observe in the dust map a structure at all scales in very fine filaments, parallel to the mean direction of the magnetic field measured using dust polarization. The dihydrogen map differs greatly from those of dust.

The objective of the thesis is to develop the linear theoretical framework allowing to analyze and interpret these unique data, and to set up the MHD (Magnetohydrodynamic) and PIC (particle-in-cell)-MHD simulations allowing to approach the non-linear aspects of this phenomenon. This work would be done in close collaboration with the analysis and interpretation of JWST data (work mainly carried out at the ENS in collaboration with V. Guillet).

The first year will be devoted to the linear theoretical analysis of the propagation of MHD waves in a tri-fluid medium (neutral gas, ions, and charged nanometric dust), and the development of magnetized Rayleigh-Taylor type instabilities. Abundant literature exists on the subject in the field of solar chromosphere studies. This theoretical framework will have to be adapted to the very different and particular context of the diffuse interstellar medium which pertains an ionization fraction of the order of $1/10,000$. The student will take advantage of this year to train in the use of the PIC code -MHD AMRVAC (Van Marle, Casse & Marcowith 2018). The Particle-In-Cell technique makes it possible to follow the stochastic acceleration of charged particles in a turbulent magnetized medium, such as dust grains or cosmic rays.

The second year will be devoted to the integration of a second fluid in the AMR-VAC code in order to simulate ambipolar diffusion. This work will be done in parallel with a collaboration that V. Guillet and A. Marcowith will lead with colleagues specialized in MHD simulations of the interstellar medium (B. Commerçon, P. Hennebelle) to do the same with the RAMSES code (Teyssier 2002) .

The third year will make it possible to simulate with AMR-VAC the stochastic dynamics of dust in the diffuse medium in the presence of ambipolar diffusion. These results will be compared with those already obtained with the RAMSES code without ambipolar diffusion (Moseley, Teyssier & Draine 2023). These results will be confronted with JWST data, and will also provide constraints for renewing the dust dynamic models that are used in models and simulations of the collapse of pre-stellar cores including dust coagulation (e.g. Guillet+2020, Le Breuilly+2023), which are all based on a 50-year-old Kolmogorov-type hydrodynamic approach (Voelk et al 1980) that does not take the magnetic field and ambipolar diffusion into account.

Milieu interstellaire - Formation stellaire - Turbulence - processus fondamentaux contrôlant l'effondrement gravitationnel - Poussières.

Astrophysique

Travaux théoriques dans le contexte de l'analyse des données du James Webb Space Telescope (JWST) : cycle 1 GO proposal 2143: PI François Boulanger, Co-PI Vincent Guillet & Alexandre Marcowith. Proposition au cycle 2 d'observation du JWST également effectuée.

Objectifs

Développement d'un cadre théorique analytique et des outils numériques pour étudier le phénomène de diffusion ambipolaire dans le milieu interstellaire diffus, et son impact sur la dynamique des poussières interstellaires - à la fois traceur majeur du milieu interstellaire et acteur physico-chimique de son évolution.

Méthode

- 1) Analytique : étude perturbative d'un modèle de magnétohydrodynamique à trois fluides.
- 2) Numérique : simulations magnétohydrodynamique à trois fluides, puis inclusion du suivi des poussières par le biais de techniques particle-in-cell. Etude de la rétroaction de la poussières sur la dynamique du milieu via l'écriture d'une loi d'Ohm généralisée.

Résultats attendus - Expected results

Interprétation des données du JWST sur le milieu interstellaire diffus aux échelles de la diffusion ambipolaire.
Actualisation d'un outil numérique pour l'étude de la dynamique de la poussière en turbulence magnétohydrodynamique (MHD).
Révision des modèles de dynamique des poussières pour la coagulation et la fragmentation des poussières pendant l'effondrement des coeurs pré-stellaires, et étude de la rétroaction de cette évolution des poussières sur la dynamique d'effondrement MHD des coeurs.

Références bibliographiques

- E. Zweibel 2015 Astrophysics and Space Science Library, Volume 407, p85.
F. Boulanger et al 2022 : JWST Cycle 1 GO Proposal #2143, PI F. Boulanger (LPENS), V. Guillet main Co-PI, A. Marcowith & A.-J. Van Marle Co-PI (LUPM).
A.J. van Marle, F. Casse, A. Marcowith, 2018, MNRAS, 473, 3394.
R. Teyssier, 2002, A&A, 385, 337.
E.R. Moseley, R. Teyssier, B. Draine, 2023, MNRAS, 518, 2825.
H.J. Völk et al 1980, A&A, 85, 316.
U. Lebreuilly et al 2023, MNRAS, 518, 3326
V. Guillet et al 2020, A&A, 643, A17

Précisions sur l'encadrement - Details on the thesis supervision

La thèse sera co-dirigée avec le Dr Vincent Guillet (IAS, Orsay), chercheur associé au LUPM.
Vincent.Guillet@umontpellier.fr , téléphone 0607598783, HDR : oui.

Conditions scientifiques matérielles et financières du projet de recherche

L'étudiant aura accès à un code développé au LUPM, le code MHD MPI-AMR-VAC auquel est adjoint un module de type particle-in-cell de suivi de particules chargées dans un milieu magnétisé. L'étudiant aura un poste de travail dédié.

Ouverture Internationale

Interaction avec R. Teyssier (Princeton).

Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant : diffusion, publication et confidentialité, droit à la propriété intellectuelle,...

Nous attendons au moins deux publications. La première attenante à l'étude linéaire et à l'interprétation des structures observées dans les images des Pléiades du JWST (Cycle 1 GO proposal #2143). La seconde attenante à une étude numérique non-linéaire de la dynamique multi-fluide (neutres, ions, poussières) du milieu interstellaire. Si le temps le permet nous envisageons une troisième publication attenante à l'étude de la dynamique stochastique de la poussière en turbulence MHD en présence de diffusion ambipolaire, suite numérique du modèle Guillet+2020.

Collaborations envisagées

CRAL-ENS Lyon : Benoit Commerçon

IAM-CEA-Saclay : Patrick Hennebelle

Les deux collaborateurs seront amenés à une mise à jour du code MHD RAMSES en incluant des modèles multi-fluides voire un module PIC pour gérer les particules non-thermiques comme les grains chargés (voire les rayons cosmiques).

Profil et compétences recherchées - Profile and skills required

L'étudiant devra avoir un master 2 avec de solides connaissances en Physique fondamentale voire en Astrophysique. Une bonne connaissance de la physique des plasmas serait un plus. De plus, des connaissances en Python, Fortran voire C ou C++ ainsi qu'une expérience en simulation numérique serait également un plus.

The student must have a master 2 with solid knowledge in fundamental physics or even in astrophysics. A good knowledge of plasma physics would be a plus. In addition, knowledge of Python, Fortran or even C or C++ as well as experience in numerical simulation would also be a plus.

Dernière mise à jour le 10 mai 2023