

« TRANSFERT RADIATIF ET FORMATION DES ETOILES »

RESUME

Les étoiles sont l'élément de base de l'univers et jouent un rôle clé tant pour l'évolution des galaxies à grande échelle que pour la formation et l'évolution des planètes à petite échelle. Bien qu'une connaissance de plus en plus détaillée soit nécessaire pour aborder correctement ces questions, des problèmes importants continuent d'entraver notre compréhension, en partie lié au fait que plusieurs effets doivent être pris en compte tels que le champ magnétique, la turbulence ou encore le rayonnement.

En effet, lorsqu'une étoile se forme, l'énergie gravitationnelle perdue pendant le processus d'effondrement doit être irradiée. Or, le traitement de l'énergie radiative demande un traitement numérique spécifique, qui est contraignant pour les codes de simulation.

L'objectif de cette thèse est d'étudier les processus de formation des étoiles, avec un accent particulier sur le traitement numérique du transfert radiatif. Pour ce faire, des simulations numériques avec le code RAMSES, prenant en compte l'interaction de l'hydrodynamique, du champ magnétique et du rayonnement, seront menées. Les résultats numériques seront ensuite comparés aux observations pour mieux comprendre et contraindre les scénarios de formation des étoiles.

DESCRIPTION ET PROBLEMATIQUE

Le scénario en deux étapes (Larson 1969) de formation des étoiles est bien établi. Le gaz du nuage moléculaire initialement optiquement mince subit un premier effondrement isotherme jusqu'à atteindre les densités où il devient opaque. Le gaz forme alors un premier cœur hydrostatique. L'accrétion permet ensuite d'augmenter la température jusqu'à atteindre le seuil de dissociation de H_2 , réaction endothermique, qui provoque un second effondrement jusqu'à la formation de la proto-étoile.

Lors de cet effondrement, la proto-étoile ré-émet une partie de l'énergie gravitationnelle sous forme de rayonnement via sa luminosité. Le traitement numérique de cette énergie radiative étant contraignant, différentes méthodes numériques ont été développées. La principale difficulté est liée à la vitesse de la lumière qui est grande devant les vitesses de l'écoulement et conduit donc à des pas de temps numériques explicites très petits et qui entraîne un temps de calcul rédhibitoire sur les temps caractéristiques de formation des étoiles.

Les algorithmes implicites permettent de contourner cette difficulté au prix d'un grand nombre d'itérations. Les algorithmes explicites utilisent une vitesse de la lumière arbitrairement réduite d'un facteur élevé (typiquement 100 à 1000) mais assurant que cette dernière, reste grande devant les vitesses du fluide.

Dans le code communautaire RAMSES, des méthodes de transfert radiatif implicites ont été développées puis utilisées dans le contexte de la formation des étoiles (Mignon-Risse et al. 2021a,b) et des méthodes explicites dans le contexte de la

ré-ionisation cosmologique (Rosdahl et al. 2022).

Le but de cette thèse est de développer des méthodes numériques innovantes pour le transfert radiatif et de mener des simulations numériques de magnéto-hydrodynamique radiative à la pointe de l'art afin de mieux contraindre les scénarios de formation des étoiles actuellement proposés, et de confronter les résultats numériques aux observations (ALMA par exemple).

Un intérêt particulier sera porté à la modélisation de la température des disques proto-planétaires entourant les étoiles en formation, En effet, la température de ces régions est un élément crucial pour la formation des planètes et les différentes méthodes de transfert radiatif peuvent induire des différences de température, en particulier dans les régions les plus proches de l'étoile (Tung et al. 2024). Il s'agira donc de développer des techniques (traitement multigroupe par exemple) permettant une bonne modélisation des parties internes du disque.

DESCRIPTION

GROUPE/LABO/ENCADREMENT

Cette thèse, encadrée par Matthias González, Professeur à l'Université Paris Cité, et Patrick Hennebelle, directeur de recherche CEA, sera effectuée au sein de l'équipe LMPA (Modélisation des Plasmas Astrophysiques), dans le laboratoire AIM (Astrophysique, Instrumentation, Modélisation). Ce laboratoire est à la pointe des simulations numériques en astrophysique en France (<http://irfu.cea.fr/Projets/COAST>) et compte en son sein un groupe d'observateurs de régions de



formation d'étoiles mondialement reconnus (P. André, A. Maury, lauréate de l'ERC Advanced Grant PEEBLES en 2023). M. González est l'un des responsables scientifiques du projet ANR COSMHIC sélectionné en 2020. P. Hennebelle est l'un des porteurs du projet ERC Synergy ECOGAL sélectionné en 2019. Le/la doctorant(e) bénéficiera donc d'un environnement scientifique particulièrement riche.

Équipe LMPA : <http://irfu.cea.fr/Dap/>

<http://irfu.cea.fr/Pisp/matthias.gonzalez/>

TRAVAIL PROPOSE

Pendant cette thèse, le(la) doctorant(e) utilisera le code RAMSES (Teyssier et al. 2002) pour modéliser la formation des étoiles. Ce code contient des modules de magnéto-hydrodynamique : MHD idéale (Fromang et al. 2006), effets non-idéaux de diffusion ambipolaire et ohmique (Masson et al. 2012), ainsi que différents modules de transfert radiatif : diffusion à flux limité (Commerçon et al. 2011, 2014, González et al. 2015), modèle M1 (Rosdhal et al. 2013) et modèle hybride (Mignon-Risse et al. 2020). La plupart de ces modules ont été (co-)développés par des membres du laboratoire AIM.

Dans un premier temps, une étude comparative des différents modèles de transfert radiatif sera menée dans le contexte de la formation d'une étoile isolée, de faible masse ou massive. Un intérêt particulier sera porté sur une modélisation fine de l'irradiation stellaire (importance des effets multigroupes par exemple). Les mécanismes physiques à l'origine de l'éjection de matière, de la formation et de la fragmentation du disque d'accrétion seront étudiés.

Dans un second temps, il conviendra de rajouter d'autres effets pertinents tels que la rétroaction par les jets et par les régions HII afin de traiter le cas de la formation des étoiles les plus massives.

Enfin, on étudiera des simulations à plus grande échelle de nuages moléculaires donnant naissance à une population d'étoiles. Elles permettront d'étudier la problématique de la fragmentation initiale ainsi que la fonction de masse initiale.

Tout au long de la thèse, des observations synthétiques à partir des résultats de simulations seront menées pour établir des cartes d'émission et

de polarisation. Ces cartes synthétiques seront inter-comparées aux observations et seront mises en ligne à la disposition de la communauté scientifique via la base de données Galactica (<http://www.galactica-simulations.eu/db/>) développée au CEA.

FORMATION ET COMPETENCES REQUISES

Stage de master 2 préalable proposé par les encadrants.

Un master 2 en astrophysique ou simulation numérique est vivement souhaité.

Langages de programmation : Fortran, python.

Éventuellement calcul parallèle : MPI/OpenMP.

COMPETENCES ACQUISES

Autonomie, synthèse de résultats et écriture de rapports (français et anglais), présentations orales (français et anglais).

Programmation, calcul haute performance.

COLLABORATIONS/PARTENARIATS

Benoît Commerçon (CRAL, ENS Lyon)

CONTACT

Matthias González (matthias.gonzalez@cea.fr)

Patrick Hennebelle (patrick.hennebelle@cea.fr)