

« COMMENT LES ETOILES SE FORMENT-ELLES ? LE SECOND EFFONDREMENT ET SES CONSEQUENCES »

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 particulier, lorsqu'une étoile se forme, l'énergie gravitationnelle perdue pendant le processus d'effondrement doit être irradiée. Pourtant, seule une petite fraction de cette énergie est actuellement observée, un problème connu sous le nom de problème de luminosité. La compréhension de ce problème est fondamentale pour plusieurs raisons : i) cette phase initiale est importante pour l'évolution stellaire, ii) la quantité d'énergie rayonnée est considérable et pourrait influencer de manière très significative le milieu environnant, iii) pour déterminer comment un disque protoplanétaire se forme autour de l'étoile, il faut comprendre comment le disque et l'étoile sont reliés.

L'objectif de cette thèse est d'étudier ce que l'on appelle le second effondrement, qui est la phase la plus précoce du processus de formation des étoiles. 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 H₂, 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. Les modèles prédisent des valeurs théoriques de luminosité jusqu'à un ordre de grandeur plus élevées que les luminosités observées. Ce désaccord est connu sous le nom de problème de luminosité (Evans et al. 2009, Offner & Mc Kee 2011). Pour réconcilier théorie et observations, il a été suggéré que les proto-étoiles accrètent de manière épisodique avec de longues phases quiescentes et de très brèves périodes d'accrétion, et donc de luminosité, très intense. Toutefois, ce type de scénario manque encore de confirmation observationnelle et d'explications physiques sur l'origine de cette accrétion épisodique, qui peut avoir lieu à grande échelle ou via la fragmentation du disque protoplanétaire. Pour mieux comprendre ce problème de luminosité et contraindre les modèles, il est donc nécessaire d'avoir recours à des simulations numériques modélisant le second

effondrement et la dynamique de la proto-étoile et de son environnement, en particulier le disque protoplanétaire.

Pour des raisons de coût en temps de calcul, et contrairement au cas du premier effondrement, les simulations numériques sont encore limitées pour l'étude du second effondrement (Tomida et al. 2013, 2015, Tsukamoto et al. 2015, Vaytet et al. 2018, Wurster et al. 2018). En particulier, elles ne suivent l'évolution de l'objet proto-stellaire que sur de petites échelles de temps, en raison d'une limitation trop stricte du pas de temps d'intégration numérique.

Le but de cette thèse est 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, en particulier en ce qui concerne la phase du second effondrement, et de confronter les résultats numériques aux observations (ALMA par exemple).

DESCRIPTION

GROUPE/LABO/ENCADREMENT

Cette thèse, encadrée par Matthias González, Maître de Conférences à l'Université de Paris, et Patrick Hennebelle, ingénieur chercheur 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). 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) 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, pour prendre en main le code et s'appropriier le sujet, il sera proposé de retrouver les résultats obtenus par l'équipe lors d'une précédente étude (Vaytet et al. 2018). Cette étude sera ensuite étendue en améliorant le traitement numérique de la luminosité de la proto-étoile. Pour ce faire, le module hybride d'irradiation stellaire développé tout récemment dans l'équipe (Mignon-Risse et al. 2020) sera utilisé.

Une étude sera menée pour faire varier les conditions initiales et étudier la robustesse des résultats obtenus, en particulier en ce qui concerne la proto-étoile mais également son environnement (disque d'accrétion et outflows).

Dans un second temps, il conviendra de mener des simulations à plus grande échelle de nuages moléculaires donnant naissance à plusieurs étoiles. Elles permettront d'étudier la problématique de la fragmentation initiale ainsi que la fonction de masse initiale des étoiles.

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.

Eventuellement 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)