

Simulations numériques de disques protoplanétaires : turbulence MRI et poussières

Les écoulements turbulents au sein des disques protoplanétaires contrôlent non seulement l'accrétion vers les étoiles naissantes, mais également la façon dont le gaz et la poussière qui les composent s'agrègent pour former des planètes. De nombreux avancées ont été faits dans ce domaine ces dernières années, notamment grâce aux données spectaculaires en radio (ALMA) et en infrarouge (VLT, JWST, GRAVITY). En parallèle, des progrès techniques et méthodologiques ont permis d'améliorer grandement nos connaissances des disques grâce aux résultats de simulations numériques. Notamment, les simulations magnétohydrodynamiques (MHD) permettent de modéliser la turbulence, dont le principal vecteur est l'instabilité magnétorotationnelle (MRI). Celles-ci nous renseignent sur l'interdépendance entre l'accrétion vers l'étoile et le lancement de jets et de vents, ainsi que sur les premières étapes de la formation planétaire. Les simulations présentées sont réalisées grâce au code MHD GPU IDEFIX.

Il est crucial de savoir si une simulation est numériquement convergente, c'est-à-dire si ses caractéristiques globales (e.g. la viscosité α) ne dépendent pas de la résolution. Afin d'éviter de réaliser des simulations à différentes résolutions, le facteur de qualité MRI est souvent utilisé. Il est défini comme le rapport de la longueur d'Alfvén sur la taille de la cellule de calcul. Si le facteur de qualité est supérieur à une valeur seuil, alors la simulation est considérée comme convergente. Nous montrerons que des simulations non convergentes ont des facteurs de qualité largement supérieurs à cette valeur seuil, et en expliquerons les raisons (Jannaud et Latter, soumis à MNRAS). Par conséquent, le facteur de qualité MRI n'est pas un bon indicateur de la convergence numérique de simulations MHD de disques d'accrétion.

Pour permettre l'étude de l'interdépendance entre cette turbulence MRI et la formation planétaire, nos simulations MHD doivent modéliser la dynamique des poussières dans le disque. Nous présenterons les deux principales méthodes d'implémentation des poussières, comme particules lagrangiennes et comme fluide sans pression, puis montrerons quelques tests sur lesquels la qualité de cette implémentation peut être vérifiée. Nous illustrerons la méthode "fluide sans pression" par des simulations 3D globales de formation planétaire via accrétion de cœur, dans les régions internes du disque (0,03 à 5 unités astronomiques). On y trouve une région turbulente interne (zone active) en MHD idéale et une région laminaire externe (zone morte) où les effets non-idéaux dominent. L'interface entre ces deux zones, autour d'une unité astronomique, est un lieu préférentiel de piégeage de poussières. Elle est donc particulièrement cruciale pour la formation planétaire. Nous montrerons la capacité de l'interface zone active/zone morte à piéger la poussière, ainsi que l'influence de la taille des poussières et de la présence de vents MHD sur l'efficacité de ce piégeage.

Enfin, si le temps le permet nous montrerons l'influence de la présence d'une couronne chaude au-dessus du disque dans les simulations d'accrétion. Celle-ci est prédite par les modèles et observations, et permet d'alléger la condition CFL, contraignante à ces altitudes. Cependant, son altitude et son contraste en température par rapport au disque sont parfois fixés ad hoc, et semblent avoir un fort impact sur la nature et l'amplitude de l'accrétion.