

Résumé du sujet

Les étoiles naissent au sein de nuages de gaz et de poussières du milieu interstellaire (MIS), dont la structure est complexe du fait de l'interaction de processus très divers (turbulence, rayonnement, chimie...). Les raies spectrales des espèces présentes sont notre source essentielle d'information quant à la structure du MIS. La raie de [CII] à 158 microns, par exemple, est l'une des plus importantes dans l'infrarouge lointain. Elle est notamment détectée dans les régions de photo-dissociation (PDR), au bord des nuages denses au sein desquels se forment les étoiles, qui sont caractérisées par des transitions des espèces ionisées vers les espèces moléculaires (H+/H/H2 et C+/C/CO notamment), liées à l'écrantage du rayonnement lorsqu'on pénètre dans les couches profondes du nuage. Or la transition H/H2 a lieu avant C+/CO, de sorte qu'une partie du gaz moléculaire n'est pas corrélée avec CO (traceur principal du gaz moléculaire). On parle de "gaz moléculaire sombre", potentiellement tracé par l'émission [CII].

Pour étudier ces PDR, on utilise le code de Meudon (Le Bourlot et al. 1993, Le Petit et al. 2006, Gonzalez-Garcia et al. 2008), code statique 1D dans lequel une couche de gaz et de poussières est éclairée par le champ de rayonnement moyen du MIS, auquel on peut ajouter celui d'une étoile excitatrice. Ce code inclut un réseau chimique détaillé, résout le transfert radiatif dans l'UV, et de nombreux processus de chauffage et de refroidissement déterminent l'équilibre thermique. Il est donc particulièrement adapté au calcul de la structure physico-chimique des PDR (température, fraction d'ionisation, abondances, intensités). La densité en chaque point le long de la ligne de visée peut être spécifiée par l'utilisateur, mais le code est le plus souvent utilisé sur des milieux de densité uniforme, approximation que l'avènement d'observations à haute résolution rendra irréaliste.

Dans le cadre de la préparation de SPICA (projet JAXA-ESA de mission spatiale infrarouge prévue en 2018), les capacités de cartographie du spectro-imageur SAFARI commencent à être étudiées (Levrier et al. 2009). Notre approche consiste à utiliser le code PDR sur des lignes de visées issues de simulations magnétohydrodynamiques (MHD) du MIS (Hennebelle et al. 2008), et les premiers résultats (Levrier et al. 2012) montrent que la structure fractale du milieu doit être mieux prise en compte pour estimer les conditions physico-chimiques des nuages interstellaires. On a ainsi pu montrer que les abondances de différents espèces moléculaires étaient mieux reproduites par ces modèles non-uniformes, et que les corrélations entre espèces étaient plus proches des observations. Cependant, la complexité même des profils de densité utilisés rend l'interprétation des résultats difficile.

Le stage proposé vise à étudier systématiquement les propriétés physico-chimiques calculées par le code PDR sur des nuages simples. L'approche consistera à utiliser des profils de densité gaussiens, et à explorer un espace des paramètres de faible dimension (champ de rayonnement, densité de colonne, contraste de densité). On couvrira ainsi un régime intermédiaire entre les nuages homogènes et les lignes de visées complexes. Pour cette étape, on utilisera la grille EGEE sur laquelle est porté le code PDR pour calculer un grand nombre de modèles en un temps relativement court.

L'exploitation des résultats obtenus se fera selon deux axes. On fera d'abord une décomposition gaussienne des lignes de visée issues des simulations MHD, et on comparera les propriétés calculées sur celles-ci avec celles déduites des différentes composantes gaussiennes, en interpolant au besoin les résultats obtenus dans la première partie. Si l'écart entre les deux approches est minime, il sera envisageable de procéder à une décomposition gaussienne tridimensionnelle des structures vues dans les simulations MHD, et d'en déduire notamment des cartes d'émission [CII] qu'on comparera aux observations.

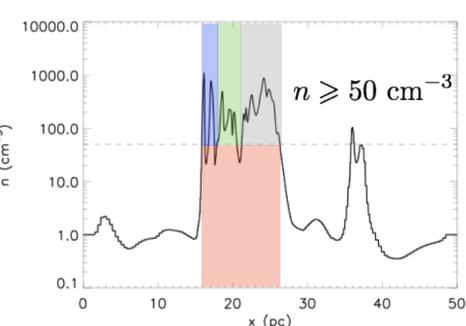
Deuxièmement, une version 3D du code PDR est actuellement en développement, fondée sur une méthode d'éléments finis avec un maillage adaptatif des structures de type triangulation de Delaunay. Le champ de rayonnement est lui aussi discrétisé selon le diagramme de Voronoï correspondant. On effectuera une comparaison des résultats du code 3D sur des structures simples (ellipsoïdes gaussiens) avec ceux du code 1D en prenant N lignes de visée traversant la structure.

Le stage se déroulera à l'ENS Paris, au sein du laboratoire de radioastronomie (LRA), et sera supervisé par F. Levrier en collaboration avec J. Le Bourlot, F. Le Petit et C. Pinto (LUTH, Meudon).

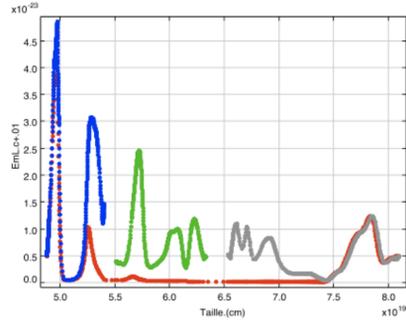
Le travail proposé est susceptible d'une poursuite en thèse.



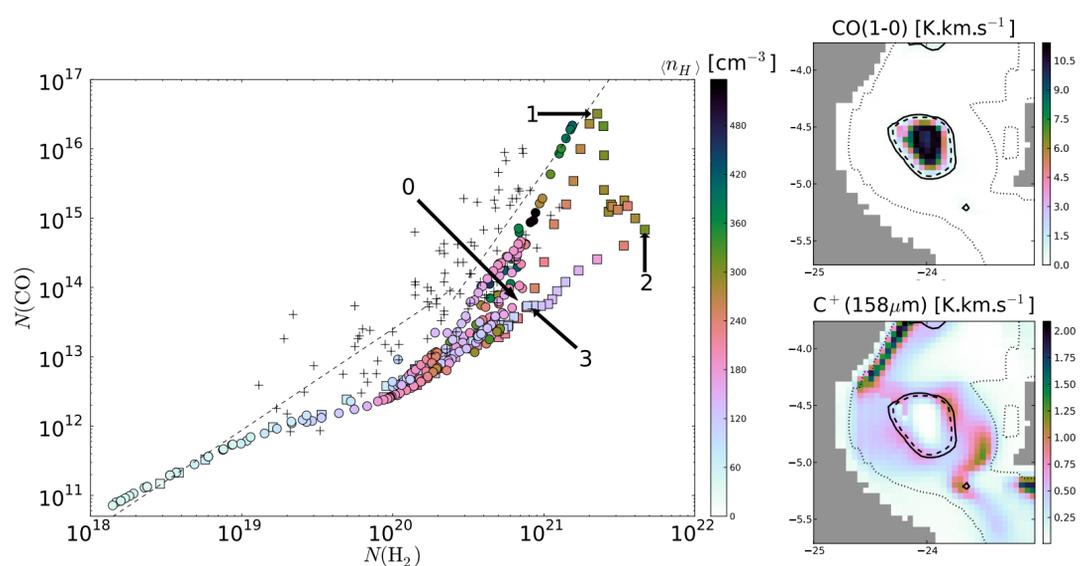
1 : Structure chimique schématique d'une région de photodissociation illuminée des deux côtés par un rayonnement UV.



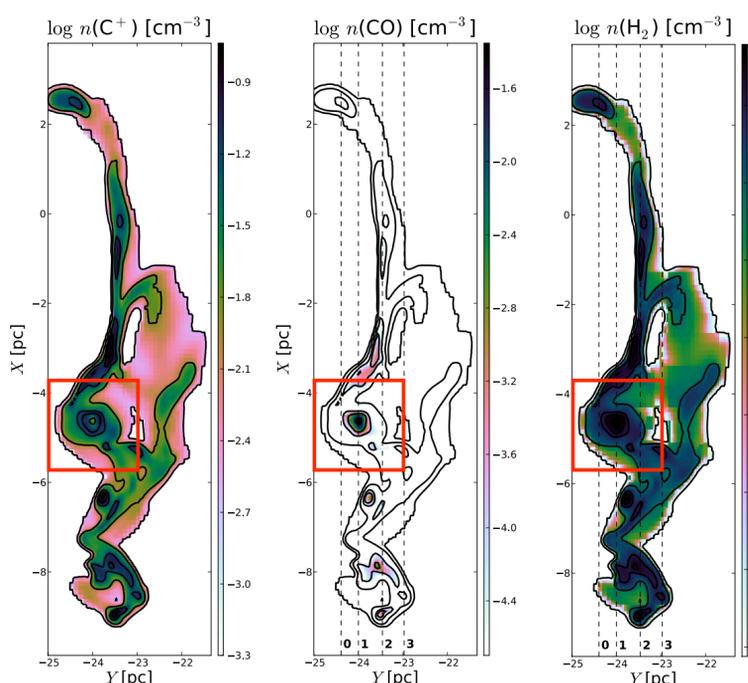
2 : Profil de densité le long de la ligne de visée extraite de la simulation MHD. Trois surdensités sont isolées et traitées par le code PDR, ensemble (rouge) ou séparément (bleu, vert et gris).



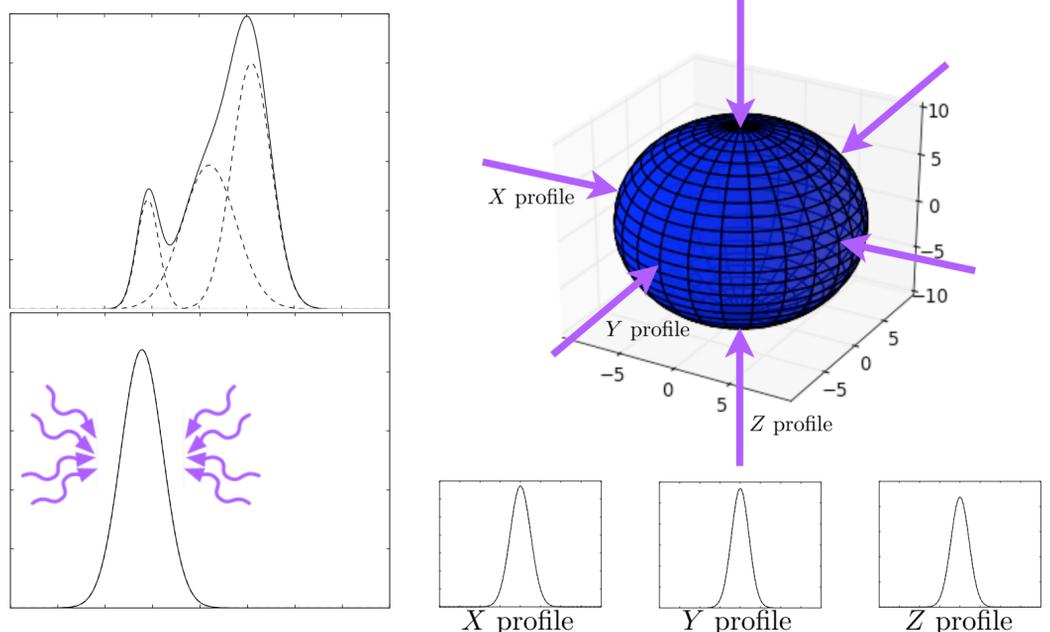
3 : Exemple de résultat du code PDR : émission de la raie [CII] à 158 microns dans les surdensités indiquées sur la figure 2 (mêmes couleurs). Les effets de "shielding" unidimensionnel sont clairement apparents.



2 : À gauche - Corrélation entre les densités de colonne de CO et de H₂, le long des lignes de visée parallèles à l'axe X. À droite - Émission intégrée de la raie CO(1-0) à 115 GHz, et de la raie de structure fine de C⁺ à 158 microns dans le coeur indiqué en rouge sur la figure 4. Les pointillés montrent la zone où l'hydrogène est essentiellement sous forme moléculaire H₂.



4 : Coupe 2D des abondances de C⁺, CO et H₂ dans une simulation MHD du MIS post-traitée par le code PDR.



5 : À gauche - Décomposition gaussienne d'un profil de densité complexe (en haut) et principe d'utilisation d'un profil de densité gaussien dans le code PDR (en bas). À droite - Principe de l'utilisation du code PDR unidimensionnel dans une approximation à 6 rayons sur des structures gaussiennes ellipsoïdales, en vue d'une comparaison avec le code PDR 3D.

