Pour citer cet article : Auteurs (2018), Titre, Congrès Français sur les Aérosols 2018, Paris

LA POUSSIÈRE INTERSTELLAIRE CARBONÉE

T. Pino[1], K.C. Le[1], L. Gavilan[2], A. Giuliani[3] et E. Dartois[2]

[1]Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay, CNRS, Université Paris Sud, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay, France
[2]Institut d'Astrophysique Spatiale, CNRS, Université Paris Sud, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay, France
[3]DISCO beam line, SOLEIL synchrotron, Saint Aubin, France ; INRA, UAR1008 CEPIA, F-44316 Nantes, France
*Courriel de l'orateur : thomas.pino@u-psud.fr

TITLE

Carbonaceous interstellar dust

ABSTRACT

Astrophysical observations, via ground-based telescopes or satellites, reveal a complex carbon-based matter in our Galaxy. A wide variety of carbonaceous compounds has been observed, covering a wide range of sizes from molecules to micrometric dust grains: carbon chains, fullerenes, polycyclic aromatic hydrocarbon-like molecules, soot-like grains, and even amorphous carbon. This list is far from being exhaustive but exemplify the rich carbon chemistry at work in different regions of the interstellar medium, including other galaxies. In these environments, the dust plays a crucial role in the physics and the chemistry of the medium. In order to understand the information traced by these observations and the associated tracers, laboratory experiments simulating astrophysical environments and producing laboratory analogues are performed. Spectral features from the far infrared to the vacuum ultraviolet are investigated. The lifecycle of this matter is also studied by simulating the energetic environment in space such as ionic and UV starlight irradiations.

RESUME

Les observations astrophysiques, à l'aide des télescopes au sol et embarqués sur satellites, ont révélé la présence dans notre Galaxie d'une matière complexe basée sur la chimie du carbone. Un large éventail de composés carbonés sont observés, couvrant une large gamme de taille allant des petites molécules aux grains de l'ordre d'un micromètre de diamètre : des chaines carbonées, des fullerènes, des grosses molécules avec des structures voisines des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des petits grains ressemblant aux suies et même des carbones amorphes. Cette liste n'est pas exhaustive car la majorité des formes du carbone ont pu être détectées dans différents régions de la Voie Lactée et dans d'autres galaxies. La poussière joue un rôle capital dans la physique et la chimie de ces milieux. Grâce aux expériences de laboratoire, des analogues à ces poussières peuvent être produits et étudiés pour aider à l'interprétation des différentes observables astrophysiques. Les signatures spectrales de l'infrarouge lointain à l'ultra-violet du vide sont étudiées en lien avec les structures physico-chimiques associées. Des expériences d'irradiations de ces analogues permettent également d'étudier les processus énergétiques à l'œuvre dans le milieu interstellaire et de mieux comprendre le cycle de vie de la matière carbonée.

KEYWORDS: Interstellar dust, soot, amorphous carbon grains, infrared bands, UV bands, cosmic rays, UV irradiations/
MOTS-CLÉS : poussière interstellaire, suie, grains de carbone amorphe, bandes infrarouge, bandes UV, rayons cosmiques, irradiations UV.

1. INTRODUCTION

La matière carbonée, des petites molécules aux poussières, est formée dans les enveloppes d'étoiles en fin de vie et est injectée dans le milieu interstellaire. Elle entre ensuite dans la composition des nuages moléculaires au sein desquels l'effondrement gravitationnel conduit à la formation des nébuleuses primitives et aboutissent éventuellement à la formation d'un disque protoplanétaire. Durant chacune de ses étapes, des modifications et une complexification de la matière à base de carbone interviennent [Caselli & Ceccarelli 2012 ; Dartois et al 2014]. Dans tous ces environnements, du milieu interstellaire diffus aux nuages denses comme dans les disques protoplanétaires, des processus énergétiques tels que l'irradiation UV et l'irradiation par les rayons cosmiques sont à l'œuvre et constituent l'apport d'énergie principal au sein de cette poussière cosmique. Ces apports modifient les grains et les molécules, et permettent aussi l'enrichissement du milieu en molécules complexes et de grandes tailles qui ne peuvent se former efficacement par croissance homogène à cause des très basses densités. Les poussières cosmiques représentent environ 1% de la masse totale de la galaxie, mais elles jouent un rôle primordial dans l'évolution physico-chimique et la dynamique des nuages interstellaires, et d'une façon générale dans la Galaxie [Joblin & Tielens 2011].

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2018-13580

Les études expérimentales sur le carbone extraterrestre jouent un rôle fondamental pour mieux comprendre son cycle de vie : au laboratoire, il est possible d'analyser les échantillons collectés tels que les météorites, les micrométéorites, les particules interplanétaires et les grains collectés par les missions spatiales de retour d'échantillons collectés in-situ comme la mission Stardust de la NASA ou directement analysés sur l'objet comme lors de la mission spatiale Rosetta. Au-delà du système solaire, les collectes de matériaux interstellaires sont impossibles. Seules quelques météorites contiennent des grains interstellaires, en général réfractaires, piégés lors de la formation du corps parent et, par « chance », préservés de toute altération dans la nébuleuse solaire. En dehors de ces quelques cas, seules les observations astronomiques à l'aide des observatoires télescopes terrestres et spatiaux nous donnent accès aux « empreintes spectroscopiques » des matériaux du milieu interstellaire : en étudiant la façon dont ces poussières absorbent et réémettent le rayonnement des étoiles environnantes, on peut remonter à la nature des constituants. L'identification de ces matériaux est un enjeu majeur de l'astronomie actuelle, afin de comprendre et de donner un cadre à l'évolution de la matière dans son cycle de vie à l'échelle de la galaxie. Ces avancées permettraient aussi de comprendre l'influence potentielle de la composition des poussières interstellaires, les matériaux primitifs, sur la composition et l'évolution des matériaux organiques du système solaire. Il est aussi possible de synthétiser, caractériser et altérer des analogues de laboratoire de la poussière carbonée cosmique pour comprendre son origine, sa formation et son évolution. Dans ces expériences, l'objectif principal est la production et l'étude de tels analogues dans des conditions similaires à celles régnant dans le milieu interstellaire afin de mieux cerner l'histoire physico-chimique de cette matière [Pino & Dartois 2011].

Bien que des informations partielles et génériques sur la nature de ces matériaux soient connues, une analyse fine fait actuellement défaut. En particulier, il faudrait identifier les matériaux responsables de certains motifs spectraux observés mais restant encore aujourd'hui non attribués à des porteurs spécifiques. Ceci permettrait à terme 1) diagnostiquer les conditions physiques et chimiques des régions du milieu interstellaire observées; 2) de tirer parti de leur observation de plus en plus fréquente dans les galaxies extérieures. Ces signatures spectrales couvrent tout le domaine de longueur d'onde, de l'infrarouge à l'ultraviolet: la "bosse" à 217 nm (une bande d'absorption géante dans l'ultraviolet), l'émission rouge étendue dans le visible, les bandes aromatiques infrarouges observées en émission et les bandes diffuses interstellaires observées en absorption dans le visible. Leur caractérisation permettra d'interpréter les observations des missions spatiales passées (ex: ISO, Spitzer, Herschel) ou à venir (ex : JWST).

2. ASTROPHYSIQUE DE LABORATOIRE

En brûlant un hydrocarbure sous vide dans des conditions favorables à la production de suies, on dispose d'un réacteur chimique modèle pour l'étude des mécanismes physico-chimiques de la combustion. L'avancée des connaissances dans ce domaine de recherche a depuis longtemps servi la communauté des astrochimistes. En particulier, les constantes de vitesse des réactions chimiques mesurées en laboratoire ont permis d'alimenter les bases de données utilisées dans les modèles d'évolution chimique interstellaire. Les modèles de croissance et d'évolution des suies issues de la combustion ont aussi influencés les scénarios de formation et croissance des poussières carbonées dans les enveloppes circumstellaires et le milieu interstellaire. Toutefois, il faut noter que les modèles de combustion ne sont pas immédiatement transposables à de telles régions de l'espace. Les conditions y sont drastiquement différentes en terme de densité et de température. En effet nos flammes « terrestres » brûlent à des pressions de quelques dizaines de millibar (en laboratoire) à quelques dizaines de bar (en milieu industriel), avec des températures de l'ordre de 1000 à 3000°C, alors que les conditions les plus denses et chaudes de la galaxie où sont observées des poussières carbonées (dans les enveloppes circumstellaires) sont plutôt de l'ordre de 10^{10} atomes / cm^3 (soit le milliardième de mbar) et d'environ 1000°C. C'est pourquoi au laboratoire, nous utilisons des flammes ou des plasmas pour produire des analogues pertinents pour les différentes régions du milieu interstellaire, en optimisant les conditions physique et chimique du milieu réactif. En particulier les suies sont apparues comme de très bons analogues de la poussière formée dans les enveloppes circumstellaires d'étoiles en fin de vie [Pino et al 2008 ; Carpentier et al 2012 ; Pino et al 2015], les carbones amorphes hydrogénés comme de très bons analogues de la poussière carbonée du milieu interstellaire diffus [Dartois et al 2007 ; Dartois et al 2007; Dartois et al 2016].
Les analyses de ces objets complexes, couvrant un large éventail de structure, reposent sur des approches multi-diagnostics. Les spectroscopies UV-visible, infrarouge et Raman sont complétées par des mesures en microscopie électronique donnant accès à leur structure [Pino et al 2008 ; Carpentier et al 2012 ;Gavilan et al 2016 ; Gavilan et al 2017]. L'utilisation d'autres méthodes complémentaires est toujours nécessaire et à l'étude pour améliorer la compréhension de ces objets et progresser sur l'interprétation des observables astrophysiques. Ces évolutions s'inspirent d'ailleurs largement des avancées concernant l'étude des suies en combustion ou des aérosols.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2018-13580

Des expériences de simulations des environnements astrophysiques sont également effectuées par irradiations UV des analogues de laboratoire, soit grâce à des sources continues soit grâce au rayonnement Synchrotron. Des irradiations ioniques sont aussi effectuées notamment auprès d'accélérateurs [Dartois et al 2017]. Là encore le plus large éventail possible de diagnostics est utilisé. L'évolution sous irradiations permet de contraindre les scénarios astrophysiques d'évolution de la poussière et de leur contribution à l'enrichissement de la composante moléculaire.

3. QUELQUES RESULTATS SUR L'ETUDE DE LA SPECTROSCOPIE DES SUIES

L'essentiel des travaux ont été menés par mesures ex situ sur des suies déposées sur un substrat. Le dispositif nanograins de l'ISMO abrite un bruleur Mckenna et le réacteur est une flamme basse pression de pré-mélange. Les conditions de combustion (fuel, richesse, pression, hauteur dans la flamme) sont ajustées de façon à produire de nombreux types de suies. Dans la figure 1, les spectres infrarouges de trois suies produites dans une flamme d'éthylène montrent une variété d'hydrogénation, de très aromatique pour le premier échantillon à très aliphatique pour le troisième échantillon [Carpentier et al 2012]. Grâce à ces travaux, la diversité des observables astrophysiques en émission dans l'infrarouge a pu être revisitée et un classement en termes de structures mélangeant aromatique et aliphatique, incluant le rôle des défauts dans les structures polycycliques a pu être proposé. Dans la même approche, des analogues aux porteurs détectés par leur spectre en absorption dans l'infrarouge ont pu être produits par plasma. Cette composante pourrait contenir jusqu'à 40% du carbone disponible dans ces environnements.

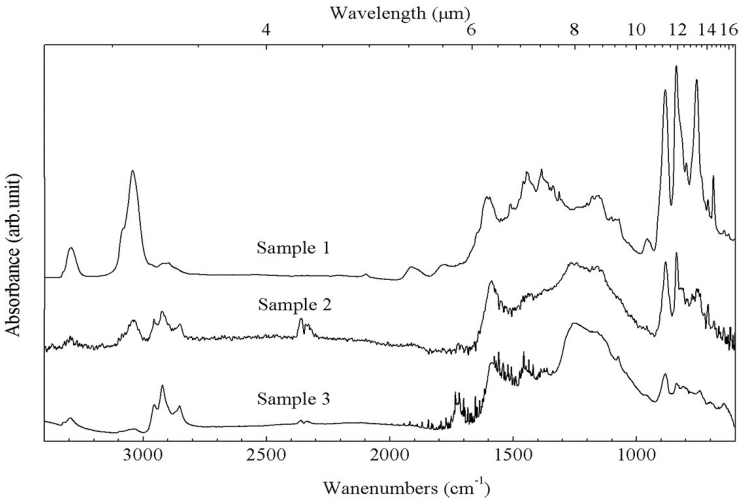

Figure 1. Spectres IR en transmission de quelques suies produites à l'ISMO [Carpentier et al 2012]

Afin d'étendre l'étude spectroscopique à l'ensemble des observables astrophysiques, une étude systématique a été mené de 1000 à 50 nm grâce à des mesures en transmission sur des dépôts minces sur film ultramince de carbone amorphe (figure 2). L'analyse de la bande $\pi-\pi^*$ a permis d'établir pour la première fois une corrélation avec les signatures spectrales infrarouge. Des relations entre les porteurs de ces différentes bandes ont pu être établies (Gavilan et al 2017).

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2018-13580

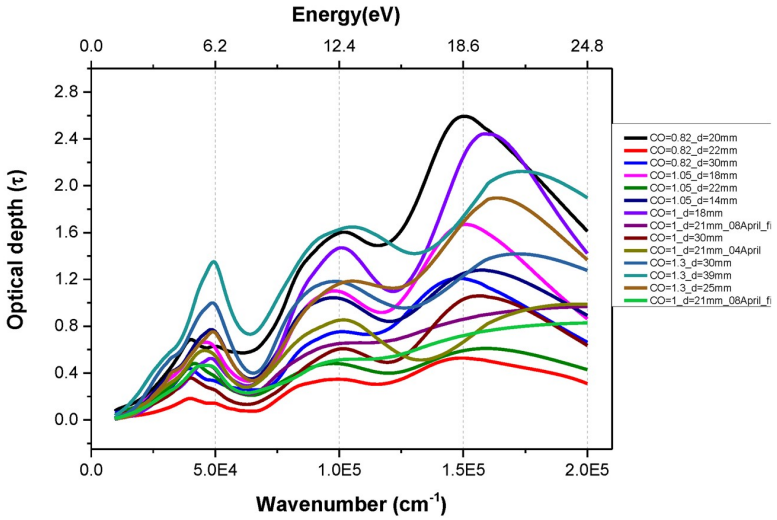

Figure 2. Spectres Visible-UV en transmission de quelques suies produites à l'ISMO (Gavilan et al 2017)

L'analyse de l'ensemble des spectres est toujours en cours notamment concernant les bandes σ–σ^*. Des études complémentaires seront nécessaires pour l'interprétation des structures observées.

Ce travail a été soutenu par le programme national de l'INSU/CNRS Physique et Chimie du Milieu Interstellaire.

Caselli P. and Ceccarelli C. (2012) Astron. Astrophys. Rev. 20, 56
Carpentier, Y., Féraud, G., Dartois, E., Brunetto, R., Charon, E., Cao, A.-T., d'Hendecourt, L., Bréchignac, P., Rouzaud, J.-N., Pino, T. (2012) Astron. Astrophys. 548, A40
Dartois, E., Chabot, M., Pino, T., Beroff, K., Godard, M., Severin, D., Bender, M., Trautmann, C. (2017) Astron. & Astrophys. 599, A130
Dartois, E., Jallat, A., Alata, I., Gavilan, L., Cruz-Diaz, G. A., Chabot, M., et al. (2016) Polycyclic Aromatic Compounds. 1-11
Dartois, E. Engrand, C. Brunetto, R. et al. (2014) Geochem. J. 48, 511-518
Dartois, E.; Munoz-Caro, G. M. (2007) Astron. & Astrophys. 476, 1235-1242
Dartois E., Geballe T. R., Pino T.,. Cao A.-T, Jones A., Deboffle D., Guerrini V., Bréchignac Ph. and d'Hendecourt L. (2007) 463, 635-640
Gavilan, L., Alata, I., Le, K.C., Pino, T., Giuliani, A., Dartois, E. (2016) Astron. & Astrophys. 586, A106.
Gavilan, L., Le, K.C., Pino, T., Alata, I. Giuliani, A., Dartois, E. (2017) Astron. & Astrophys., in press
Joblin C. and Tielens A.G.G.M., PAHs in the Universe, EAS Publications Series 46, 29 (2011)
Pino T., et al. 2015, Highlights of Astronomy 16, 717-719.
Pino T., E. Dartois, A.-T. Cao, Y. Carpentier, Th. Chamaillé, R. Vasquez, A. P. Jones, L. d'Hendecourt and Ph. Bréchignac (2008), Astron. & Astrophys. 490, 665-672
Pino. T and Dartois E. (2011) Chemistry in Astrophysical Media, EPJ Web of Conferences 18

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2018-13580