Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 64 (2006)
Heft: 332

Artikel: L'univers, dis-moi ce que c'est? : Épisode 24 : les nuages moléculaires dans le milieu interstellaire
Autor: Barblan, Fabio
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-897677

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 21.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

L'Univers, dis-moi ce que c'est?

Episode 24: Les nuages moléculaires dans le milieu interstellaire

FABIO BARBLAN

Introduction

Avant 1970, la chimie moléculaire interstellaire avait bien peu de choses à son actif. Dans le domaine optique, on avait détecté quelques faibles raies d'absorption des molécules CN, CH et CH^+. Les radioastronomes avaient mis en évidence l'émission maser[1] de OH et H_2O et les théoriciens avaient prédit que la molécule H_2 devait exister dans les nuages sombres.

Mais personne ne s'attendait au déluge de découvertes dues à l'avènement des observations dans l'ultraviolet, l'infrarouge et le millimétrique. En peu de temps, des douzaines de nouvelles molécules se sont ajoutées à la liste existante, mais rien n'a été aussi fondamental que la reconnaissance de l'existence des nuages moléculaires géants.

Le gaz moléculaire joue un rôle important dans la structure et l'évolution d'une galaxie. Il représente la contribution du milieu interstellaire à la formation des étoiles et, dans certains cas, il constitue une partie non négligeable de la masse galactique. L'évolution des galaxies est en partie influencée par la redistribution radiale de la matière et la matière qui converge vers le centre, dans un rayon d'un kilo parsec[2] autour du noyau d'une galaxie, est avant tout du gaz moléculaire.

De nombreuses observations, principalement dans le domaine des ondes millimétriques, ont permis de déterminer les caractéristiques des nuages moléculaires. D'une densité variant de 10^2 à 10^6 particules par cm^3, ils ont une température rarement plus haute que quelques dizaines de degrés Kelvin. Un pour cent de leur masse est sous forme de poussières dont les dimensions sont plus petites que le micron. En dehors

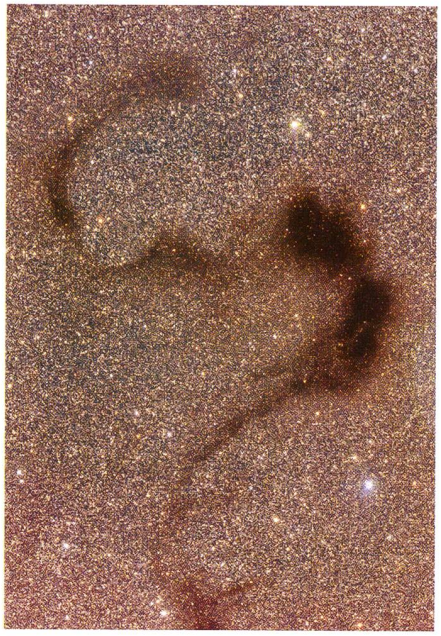


Fig. 1: Les nuages moléculaires ont très souvent une forme en filament.

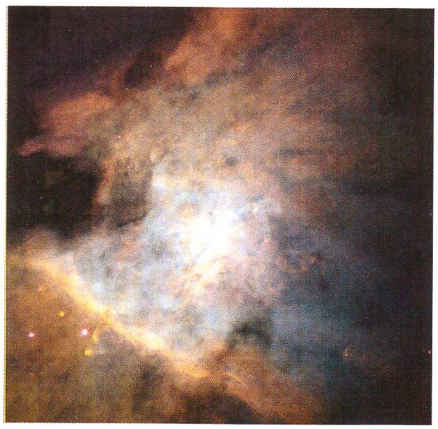
de l'hydrogène, les principaux éléments gazeux présents à l'état de traces sont le carbone (C), l'azote (N), l'oxygène (O) et le soufre (S). On y détecte plus de cent molécules des plus simples, comme le monoxyde de carbone, à des structures relativement complexes comme C_3H_2 cyclique ou MgNC pour ne citer que ces deux exemples. On peut se demander quels mécanismes chimiques permettent leur synthèse et surtout comment certaines espèces, vue leur fragilité, arrivent à survivre sur des longues périodes dans un milieu hostile.

Pour une question évidente de distance, c'est dans la Voie Lactée que l'exploration des nuages moléculaires a été, en tout cas dans une première phase, la plus intense et a apporté le plus de renseignements. Les résultats acquis dans ces études sont souvent pris comme référence pour l'interprétation les observations extragalactiques. C'est dans le plan galactique que sont situés la majorité des nuages moléculaires, et ils s'étendent entre quatre et huit kilo-parsecs du centre. On en distingue deux grandes catégories: les nuages moléculaires de petite dimension et les nuages moléculaires géants.

Les premiers ont un diamètre de quelques années lumière, une densité de 10^3 à 10^4 cm^{-3} et contiennent quelques centaines de masses solaires. Ils ont une température entre 10 et 20 °K. Et dans certains d'entre eux on peut distinguer un noyau dense (10 à 100 fois plus dense que le reste) ayant une température d'environ 5°K en moyenne. Ils sont constitués principalement d'hydrogène moléculaire.

De vingt à deux cents parsec de diamètre, les nuages moléculaires géants (NMG) ont des masses considérables jusqu'à un million de masses solaires. Ils sont avant tout constitués d'hydrogène mais contiennent aussi d'énormes quantités de monoxyde de carbone, de poussières et sont parsemés de multiples molécules «organiques». Leur densité

Fig. 2 et 3: Interface de photodissociation entre une région H II et le nuage moléculaire adjacent. Figure 2: la nébuleuse M17, la forme fragmentée de la zone de photodissociation entre la partie gauche (brillante) et la partie droite (sombre) de la nébuleuse reproduit celle du nuage moléculaire. Dans la nébuleuse d'Orion (figure 3) cette interface est représentée par la barre oblique en bas à gauche dans l'image.



[1] MASER : Microwave Amplification by Stimulated Emission. Un maser produit un faisceau cohérent de micro-ondes.

[2] On rappelle qu'un parsec représente une distance de 3.26 années lumière.

[3] La région étudiée est donc située à une distance moyenne d'environ 60'000 années lumière du centre de la galaxie M31 autant dire à sa périphérie.

moyenne globale est de l'ordre de 10^7 cm^{-3}. Ces nuages géants totalisent, dans une galaxie, la moitié de la masse du milieu interstellaire mais n'occupent que deux pour cent du volume.

Le milieu interstellaire est loin d'avoir livré tous ses mystères. Beaucoup de choses restent encore inexpliquées et nos connaissances sont très fragmentaires. Par exemple, nous ignorons tout sur la distribution du moment angulaire dans un nuage moléculaire. Toute nouvelle étude est susceptible de remettre en question certains paradigmes de travail largement acceptés et utilisés. Une étude photométrique de l'hydrogène atomique dans le disque extérieur (à une distance entre 23 et 33 kpc[3] du centre) de la galaxie M31, effectué en 2001, semble remettre fondamentalement en cause l'opinion courante sur le rôle du gaz dans une galaxie. Cette recherche a mis en évidence entre autre la formation d'étoiles dans ces régions éloignées ce qui implique en principe l'existence de gaz moléculaire à la périphérie de la galaxie ainsi qu'une structure du gaz en masses compactes d'une dimension d'au moins deux cents parsecs. Ce dernier point accrédite l'hypothèse de la structure fractale des nuages moléculaires géants (hypothèse étudiée par D. PFENNIGER [de l'Observatoire de Genève] et al. en 1994).

Fig. 4 et 13: Deux régions de nuages sombres : le nuage Barnard 68 (figure 13) et le nuage RCW 108 (figure 4). Ces deux images montrent clairement le pouvoir absorbant de ces nuages moléculaires et l'efficacité de l'observation dans le domaine de l'infrarouge. L'image de B68 est prise dans le visible, on constate l'opacité complète du nuage, par contre l'image de RCW108 est prise dans l'infrarouge et on voit en transparence des étoiles (fortement rougies) et une région H II qui est partiellement enfouie dans le nuage.

Le paradigme du nuage confiné par gravitation

On accepte généralement l'idée que les nuages moléculaires géants, sont liés et confinés par la gravitation. La justification de cette hypothèse s'appuie sur les trois arguments suivants: le taux de formation des étoiles, le théorème du Viriel[4], la pression interne d'un gaz moléculaire.

Il est généralement admis que les étoiles se forment dans les nuages moléculaires géants. Or, une étoile est manifestement l'objet par excellence lié et confiné par la gravitation. Comment un tel objet pourrait-il se former dans un milieu qui lui-même ne serait pas confiné par la gravitation. Le taux de formation des étoiles semble aussi être compatible avec le confinement gravitationnel des NMG puisque la conséquence de ce confinement est de réduire l'efficacité de la formation stellaire (argument élaboré en 1974). Dans le cas contraire, la quantité de nuages moléculaires existant dans une galaxie impliquerait un taux de formation stellaire beaucoup plus élevé que celui qui est réellement observé.

A ce raisonnement on peut opposer les deux contre-arguments suivants. Qu'est-ce qui empêche un NMG de s'effondrer «spontanément» puisqu'il est lié par gravitation? Pour quelle raison ce confinement gravitationnel réduit-il l'efficacité de la formation stellaire (cela semble contradictoire)? Quel est alors le mécanisme qui maintient «debout» le NMG? Des calculs montrent que la turbulence interne, par exemple, ne peut pas être invoquée comme argument, le taux de dissipation[5] étant trop rapide.

D'autre part, on a mis en évidence une formation stellaire dans des nuages moléculaires situés à de hautes latitudes galactiques. Dans ces régions les nuages ne sont pas liés par gravitation. En effet les mesures de vitesses internes[6] indiquent une dispersion de ces dernières largement supérieure à la norme admissible pour un confinement gravitationnel[7].

L'utilisation du théorème du Viriel pour la détermination du rapport CO/H_2, qui est un des traceurs qui permet d'évaluer la quantité d'hydrogène moléculaire contenue dans un nuage, suppose implicitement que le nuage soit lié par gravitation.

Or les estimations effectuées par cette méthode ne sont pas en accord avec les résultats obtenus par d'autres méthodes. Elles divergent d'un facteur deux, ce qui laisse supposer que si on laisse tomber la contrainte du théorème du Viriel on peut obtenir une meilleure correspondance des résultats obtenus par différentes méthodes.

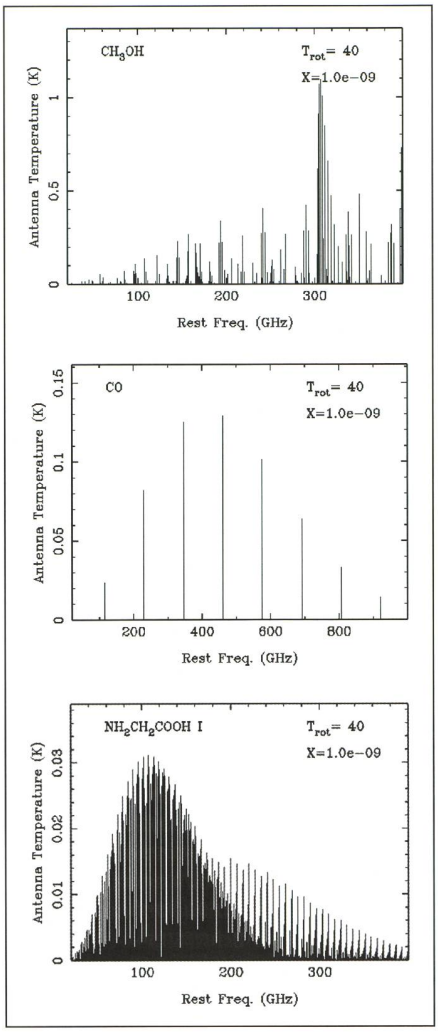


Fig. 5, 6 et 8: Schémas représentant respectivement les spectres des molécules suivantes : CH_3OH, CO et NH_2CH_2COOH.

L'argument de la pression interne est considéré comme le plus fort pour justifier le confinement gravitationnel d'un NMG. Si la pression à l'intérieur du NMG est plus grande que la pression du milieu interstellaire, alors il y aura expansion du nuage. Or, on n'observe pas un tel effet; on en conclut que la gravitation (du

[4] La notion de viriel a été introduite en 1870 par Clausius. On peut montrer que sous certaines conditions l'énergie gravitationnelle d'un nuage est égale à deux fois son énergie dynamique.

[5] La turbulence locale s'estompe en une distance et un temps tels qu'elle ne peut pas s'opposer à un éventuel effondrement gravitationnel.

[6] Les vitesses des composantes gazeuses du nuage.

[7] Une grande dispersion indique qu'une fraction (non négligeable) des particules possèdent des vitesses suffisamment grandes pour annuler un effet d'auto-gravitation .

nuage) annule l'effet de la pression donc que le nuage est lié par gravitation[8]. Il n'est donc absolument pas évident que les nuages moléculaires soient liés par gravitation. La seule situation qui indique le confinement gravitationnel, d'une partie au moins du nuage, est la formation d'une étoile par effondrement gravitationnel.

Détection des molécules

Par sa complexité la **spectroscopie moléculaire** met potentiellement à la disposition des astrophysiciens une quantité énorme d'informations. La spectroscopie moléculaire est plus complexe que la spectroscopie atomique parce qu'une molécule possède une quantité beaucoup plus grande de niveaux énergétiques. Les transitions électroniques ne représentent pas le seul moyen pour une molécule de changer d'état énergétique, il faut y ajouter les vibrations et les rotations.

Les **vibrations** découlent de l'élasticité intrinsèque d'une molécule qui autorise les atomes qui la composent à osciller les uns par rapport aux autres. Ces oscillations atomiques sont régies par les lois de la mécanique quantique ce qui impose que l'énergie vibratoire d'une molécule ne peut prendre que certaines valeurs bien définies. Dans une transition vibratoire, la molécule passe d'une énergie de vibration à une autre sans changer son état électronique. La transition peut être provoquée, comme d'habitude, par un photon ou la collision avec une autre particule. Les transitions vibratoires demandent moins d'énergie que les transitions électroniques; en conséquence, les raies d'absorption ou d'émission sont généralement situées dans l'infrarouge.

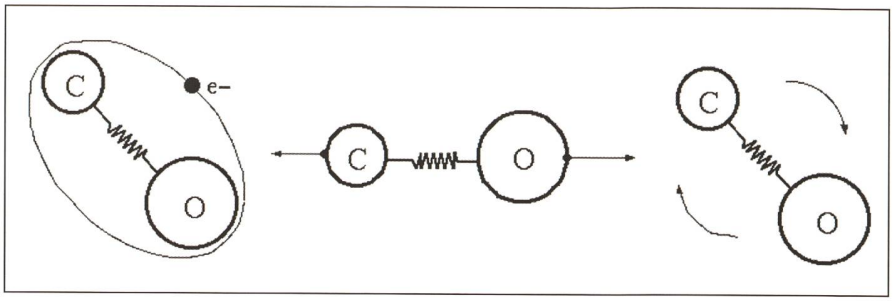


Fig. 7: Représentation schématique des trois possibilités d'excitation d'une molécule : transition électronique, vibration et rotation.

La mécanique quantique gouverne aussi les états de **rotation** d'une molécule et les limite à certaines valeurs. La proximité des niveaux d'énergie de rotation fait que les raies correspondantes à des transitions de rotation se trouvent dans la partie micro-ondes ou ondes millimétriques du spectre.

Chaque état électronique ou vibratoire est subdivisé en un certain nombre d'états de rotation.

En fait, la réalité n'est pas aussi simple. Une transition électronique peut en effet induire une transition de vibration et de rotation de même qu'une transition de vibration peut induire une transition de rotation. D'autre part, les molécules constituées de plus de deux atomes peuvent avoir différents états de vibration simultanément. Pour terminer, indiquons que dans les molécules ayant un nombre impair d'électrons chaque état de rotation est subdivisé par des effets magnétiques dus à l'électron «libre». Tout cela complique terriblement l'interprétation des spectres moléculaires.

La molécule la plus fréquente dans les nuages moléculaires est celle de l'hydrogène (H_2) . Cette molécule ne possède pas de transition dans le domaine des ondes millimétriques ou radio. Le seul moyen de l'observer est donc par la raie d'absorption ultraviolette produite dans le spectre d'étoiles situées derrière le nuage[9].

Cette technique n'est possible que pour des régions relativement transparentes. Pour des régions plus denses et opaques, il faut avoir recours à des transitions dans l'infrarouge et les micro-ondes.

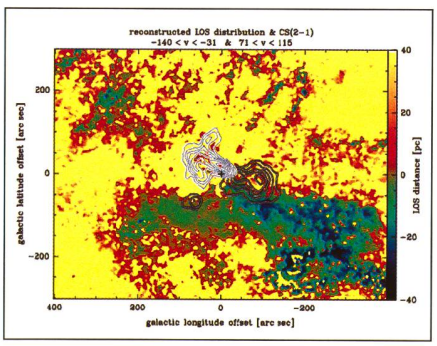
L'excitation d'une molécule H_2 produit généralement des modes de vibration et, lorsque le gaz revient à sa température d'équilibre, la molécule émet un photon infrarouge.

Une autre façon d'avoir cette émission infrarouge est la fluorescence ultraviolette. Ce procédé peut avoir lieu au voisinage d'une étoile chaude rayonnant dans l'ultraviolet.

Le photon ultraviolet est absorbé par H_2 et provoque une transition électronique. La molécule excitée revient dans son état électronique le plus bas mais pas nécessairement pour ce qui concerne son état de vibration. Pour retrouver son état de vibration fondamental, la molécule doit émettre un photon infrarouge. Donc l'émission infrarouge de H_2 n'est observée que dans des cas bien particuliers.

Par contre, le monoxyde de carbone est nettement plus facile à observer. La raie d'émission du CO est probablement le traceur le plus utilisé pour estimer les masses de H_2 froides. On utilise différentes méthodes pour estimer la masse des nuages moléculaires (et donc calibrer indirectement la relation CO – H_2). Parmi ces méthodes, il y a l'utilisation du théorème du Viriel (qui suppose comme nous l'avons déjà signalé que le nuage est considéré comme auto-gravitant). Si le nuage se trouve approximativement en équilibre viriel, alors la luminosité CO et la masse viriel sont proportionnelles. Par exemple, pour un nuage uniforme en équilibre entre gravité et pression dynamique due aux mouvements aléatoires des particules (plus grande que la pression thermique), de forme sphérique sans champ magnétique et pression externe, la masse du

Fig. 9: Cette image donne la répartition des nuages moléculaires dans la zone centrale de notre Galaxie (33 pc sur 25 pc). Le point (0,0) est l'emplacement du trou noir central. Les contours autour de ce point représentent le nuage circumnucléaire. Les distances négatives pointent vers l'observateur.



[8] Rappelons ici qu'en principe un gaz (même sur Terre où il subit l'effet de la gravitation terrestre), sous l'effet de sa pression interne, tend à occuper tout l'espace mis à sa disposition.

[9] La raie d'absorption est électronique, mais il y a simultanément aussi une transition vibratoire et de rotation. Dans les années 70 le satellite Copernicus a effectué beaucoup de mesures de ce type sur des nuages relativement transparents. Ce travail a permis de déduire pour ces nuages la fraction d'hydrogène moléculaire par rapport à celle de l'hydrogène atomique et de constater que dans les directions dans lesquelles il y a peu de poussières, la quantité de H_2 est aussi très faible (et vice versa).

nuage exprimée en masses solaires est égal à 210 fois son rayon fois la largeur à mi hauteur de la raie du CO.

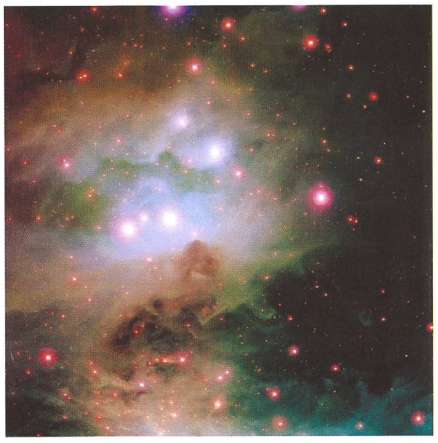
Chauffage et refroidissement

Le processus est assez simple, en dehors des régions superficielles qui sont en fait des surfaces de photodissociation (par le rayonnement ultraviolet des étoiles de champ), le chauffage des régions internes profondes est dû essentiellement aux rayons cosmiques et aux collisions gaz-grains si la densité est suffisante. Le refroidissement est dû aux raies de CO[10] et de ses substitutions isotopiques avec probablement une contribution importante des raies interdites de C I. Si on ne prend en considération que les rayons cosmiques, les calculs montrent que la température doit se situer autour de 10°K.

Formation et destruction des nuages moléculaires

Malgré les nombreux travaux de recherche qui ont été faits pendant les années 1970 – 80 sur le sujet de la formation des nuages moléculaires géants, on ne connaît toujours pas quels sont les mécanismes qui dominent la formation de tels objets. On ignore quelle est l'importance relative de la gravitation, de la radiation et des champs magnétiques dans la formation des nuages.

Fig. 10 et 11: Alternance de zones transparentes et opaques dans les nébuleuses d'Orion (figure 10) et du « Trou de serrure » (figure 11)



Les mécanismes proposés peuvent être subdivisés en trois catégories: agglomération de petits nuages par collision, instabilité thermo-gravitationnelle et l'accumulation pressurisée (par compression) dans des régions de chocs (explosion de supernova ou chocs de galaxies).

La formation par collisions inélastiques entre nuages d'hydrogène atomique qui diminue la vitesse d'agitation des particules, la perte d'énergie cinétique s'en va sous forme de rayonnement, conduit à l'effondrement gravitationnel. La contraction du nuage peut augmenter suffisamment sa densité pour favoriser la formation efficace de molécules H_2 sur les grains de poussière.

Deux indices, qui peuvent donner des indications précieuses sur la formation de ces nuages, sont apparus pendant les années 1990. La durée de vie des nuages moléculaires géants est de l'ordre de 10^7 à 10^8 années. Cette durée est nettement inférieure à celle de la rotation Galactique et dans les galaxies ayant des bras spiraux bien définis et délimités, les nuages moléculaires sont généralement confinés dans ces bras.

Considérons le premier indice. La destruction d'un nuage est généralement provoqué par la création d'étoiles massives. Ces jeunes étoiles vont provoquer l'ionisation, la photodissociation et la fragmentation du nuage. Si on accepte une fonction de masse initiale standard[11] pour la création des étoiles, chaque étoile ionise en moyenne une masse de gaz correspondant à 25 fois sa masse. Si on accepte dans notre Galaxie un taux moyen de formation stellaire de 3 masses solaires par an, le taux d'ionisation est alors de 75 masses solaires par an. Avec un milieu interstellaire dont la masse totale peut être estimée à quatre milliards de masses solaires le milieu interstellaire est ionisé tout les $5\ 10^7$ ans. Si on suppose qu'au moment de la destruction du nuage, il y a autant de matière ionisée que dispersée, le temps de recyclage est à diviser par deux. L'absence de champs magnétiques favorise la fragmentation du nuage. La présence d'un champ magnétique empêche cette fragmentation par l'interconnexion des lignes magnétiques.

Généralement, on associe à l'effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz la formation d'un noyau chaud (future étoile ou planète). Dans un travail publié en 2003 D.PFENNIGER de l'observatoire de Genève montre qu'il est possible d'aboutir aussi à des noyaux froids. On peut en effet montrer que, sous certaines conditions, un nuage en effondrement gravitationnel peut condenser, en son centre, de l'hydrogène moléculaire avant qu'il ne devienne optiquement opaque. Dans ce cas, toute compression ultérieure du noyau amène à un refroidissement. Le noyau condensé peut ainsi arrêter l'effondrement sans pour autant augmenter sa température. Il est constitué d'hydrogène moléculaire solide si sa température est inférieure à 14°K ou d'hydrogène liquide si elle est inférieure à 33°K. De tels effondrements gravitationnels froids possèdent les propriétés suivantes:

- la densité centrale est déterminée par celle de l'hydrogène liquide ou solide,
- la dimension maximum du noyau est de l'ordre de $2\ 10^4$ km,
- ils ont une énergie de liaison gravitationnelle relativement faible ils peuvent donc s'évaporer facilement sous l'effet de radiations intenses, mais la partie centrale dense peut survivre pendant plusieurs milliards d'années,
- le globule est entouré d'une atmosphère étendue de trois à trente UA qui possède un profil isothermique.

Ces globules froids stabilisés par un noyau d'hydrogène liquide ou solide constituent la face froide de la formation stellaire. Ce phénomène peut contribuer à expliquer le faible taux de formation stellaire observé. Le milieu interstellaire apparaît comme un milieu très actif recyclant constamment le gaz de régions de grande dimensions vers des régions à plus petite échelle. Les globules froids peuvent être considérés comme l'extrémité à faible masse de la fonction de masse initiale. Leur faible énergie de liaison leur confère le rôle de réservoirs de gaz facilement disponibles via un phénomène quelconque d'excitation.

La formation de molécules interstellaires

La chimie à la surface des grains joue un rôle important dans la formation et la destruction des molécules. On dispose de nombreuses preuves directes et indirectes de ce phénomène (il était déjà connu en 1971 en ce qui concerne la molécule H_2).

[10] L'existence d'une raie représente la perte d'énergie par émission de photons. Le photon emporte une partie de l'énergie de la particule, son énergie cinétique diminue, il y a donc refroidissement.

[11] La fonction de masse initiale donne la répartition, au moment de la naissance, des étoiles sur l'échelle des masses.

Une preuve directe est le CO_2 dans les manteaux de glace qui recouvrent les grains dans les parties profondes, les plus froides, des nuages moléculaires. Les réactions permises sont celles qui font intervenir des radicaux libres[12].

Si la molécule qui vient de se former à la surface du grain y reste attachée, il n'y a évidemment pas de création de gaz moléculaire. Pour cela, il faut qu'elle se détache du grain et retourne en phase gazeuse; c'est le processus de désorption. Le mécanisme le plus simple consiste en ce qu'une partie de l'énergie de formation sert à éjecter la molécule du grain. En effet, cette fraction d'énergie transférée au grain peut provoquer un échauffement suffisant de celui-ci pour éjecter thermiquement la molécule qui vient de se former à sa surface. Ce processus de création de molécules dépend fortement de la capacité du grain à «accrocher» des atomes et de la probabilité que cela se fasse pour deux atomes ou plus au même endroit du grain.

En dehors des réactions à la surface des grains, l'autre façon de créer une molécule est que deux atomes (ou plus) se rapprochent suffisamment pour que la réaction chimique puisse avoir lieu. Cette probabilité augmente avec la densité du gaz qui accroît la probabilité de collision entre particules. Dans la mesure où ces collisions sont suffisamment douces (énergie cinétique faible) des nuages de gaz de haute densité favorisent donc la formation de molécules.

Une fois formée la molécule est susceptible d'être détruite par différents mécanismes: par exemple la dissociation due à un photon ultraviolet suffisamment énergétique. Il faut moins d'énergie pour dissocier une molécule de H_2 que pour ioniser un atome d'hydrogène. La meilleure chance de survie

[12] Les radicaux libres sont des molécules instables très réactives ayant un nombre impair d'électrons.

Molécules dans le milieu interstellaire et circumstellaire (mise à jour en septembre 2005)

2 atomes	3 atomes	4 atomes	5 atomes	6 atomes	7 atomes
H_2	C_3*	c-C_3H	C_5*	C_5H	C_6H
AlF	C_2H	l-C_3H	C_4H	l-H_2C_4	CH_2CHCN
AlCl	C_2O	C_3N	C_4Si	C_2H_4*	CH_3C_2H
C_2**	C_2S	C_3O	l-C_3H_2	CH_3CN	HC_5N
CH	CH_2	C_3S	c-C_3H_2	CH_3NC	CH_3CHO
CH^+	HCN	C_2H_2*	CH_2CN	CH_3OH	CH_3NH_2
CN	HCO	NH_3	CH_4*	CH_3SH	c-C_2H_4O
CO	HCO^+	HCCN	HC_3N	HC_3NH^+	H_2CCHOH
CO^+	HCS^+	$HCNH^+$	HC_2NC	HC_2CHO	
CP	HOC^+	HNCO	HCOOH	NH_2CHO	
SiC	H_2O	HNCS	H_2CNH	C_5N	
HCl	H_2S	$HOCO^+$	H_2C_2O	l-HC_4H* (?)	
KCl	HNC	H_2CO	H_2NCN	l-HC_4N	
NH	HNO	H_2CN	HNC_3		
NO	MgCN	H_2CS	SiH_4*		
NS	MgNC	H_3O^+	H_2COH^+		
NaCl	N_2H^+	c-SiC_3			
OH	N_2O	CH_3*			
PN	NaCN				
SO	OCS				
SO^+	SO_2				
SiN	c-SiC_2				
SiO	CO_2*				
SiS	NH_2				
CS	H_3^+**				
HF	H_2D^+, HD_2^+				
SH*	SiCN				
HD	AlNC				
FeO (?)	SiNC				
O_2 ?					
CF^+					

8 atomes	9 atomes	10 atomes	11 atomes	12 atomes	13 atomes
CH_3C_3N	CH_3C_4H	CH_3C_5N	HC_9N	C_6H_6* (?)	$HC_{11}N$
$HCOOCH_3$	CH_3CH_2CN	$(CH_3)_2CO$			
CH_3COOH	$(CH_3)_2O$	$(CH_2OH)_2$ (?)			
C_7H	CH_3CH_2OH	H_2NCH_2COOH Glycine (?)			
H_2C_6	HC_7N	CH_3CH_2CHO			
CH_2OHCHO	C_8H				
l-HC_6H* (?)					
CH_2CHCHO (?)					

est d'être protégées du rayonnement ultraviolet des étoiles par l'intermédiaire de nuages de poussières. Les deux conditions qui favorisent la production de molécules et qui les protègent sont donc la haute densité des gaz et une couche protectrice de poussières. Ce type d'environnement est réalisé de manière optimale à l'intérieur d'un nuage interstellaire. La durée de vie des molécules est plus longue à l'intérieur des nuages qu'à leur périphérie où elles se font détruire par le rayonnement ultraviolet.

La chimie dans les nuages moléculaires

La majorité des molécules découvertes depuis 1987 l'ont été grâce à une spectroscopie dans le domaine du rayonnement millimétrique des nuages denses dans la direction du Sagittaire, d'Orion et du Taureau.

On dénombre actuellement 120 molécules différentes dans le milieu interstellaire et les enveloppes circumstellaires d'étoiles froides (principalement les géantes de la branche asymptotique)

Le domaine de complexité va de la simple molécule biatomique (comme CS) à des molécules contenant neuf atomes ou plus comme par exemple l'alcool éthylique (C_5H_5OH). On a aussi détecté quelques ions moléculaires.

Parmi les molécules que l'on trouve dans l'espace, il y en a qui sont des produits connus et courants sur Terre comme NH_3 (ammoniaque) ou CO (monoxyde de carbone) et d'autres que l'on ne trouve pas sur Terre, même pas dans les laboratoires ultra-spécialisés et qui de ce fait n'ont pas de nom comme HC_7N ou $HC_{11}N$. Sur la Terre, la grande majorité des molécules que l'on trouve dans l'espace seraient considérées comme appartenant au domaine de la chimie organique, mais il est absolument clair que dans l'espace ces produits ne sont pas d'origine biologique.

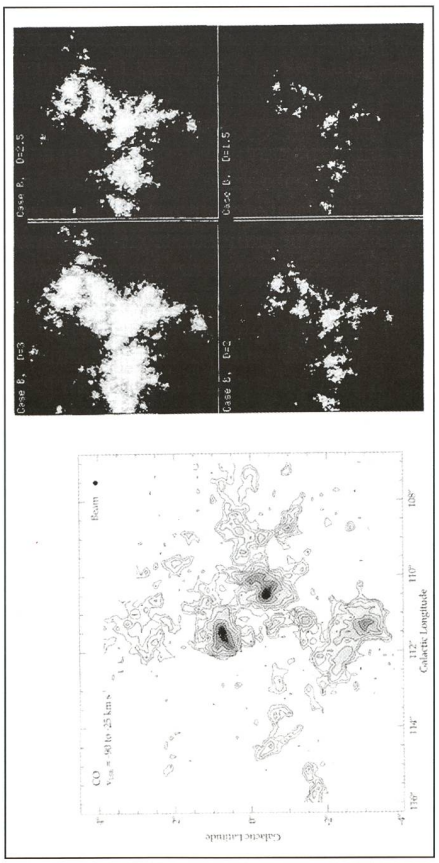
Lorsqu'on aborde le problème de la chimie dans l'espace, la question qui surgit immanquablement est: «pour quelle raison détecte-t-on exactement ces molécules-la et pas d'autres?». Le fait est que la chimie interstellaire est fondamentalement différente de la chimie à la surface de la Terre ou dans les laboratoires. Par exemple, le monoxyde de carbone (CO) manifeste dans l'espace une stabilité à toute épreuve par contre sur terre on le considère comme un réactif dangereux, facilement inflammable et comme un poison. Ce qui singularise la chimie dans l'espace sont les faits suivants:

- dans l'espace, les réactions ne peuvent avoir lieu qu'entre gaz et à la surface des grains de poussière. Il s'agit d'une chimie en phase gazeuse contrairement à la chimie terrestre qui est une chimie principalement en phase liquide,
- l'absence de liquide (le liquide favorise les réactions chimiques, la probabilité de réaction entre particules est maximale parce que les liquides sont plus denses que les gaz et nettement moins rigides que les solides),
- la densité des composantes en jeu est infiniment plus faible dans l'espace que sur terre.

La faible densité qui inhibe la formation de certaines molécules peut au contraire en favoriser d'autres. L'ion moléculaire N_2H^+ est, par exemple, sur Terre, tellement réactif qu'on n'a jamais pu en isoler une quantité suffisante pour pouvoir l'étudier. Dans l'espace sa probabilité d'être détruit est très faible, il existe en «grande» quantité et est facilement observable dans le domaine millimétrique.

- la faible température du milieu interstellaire fait que les réactions endothermiques[13] n'existent pas (énergie cinétique trop faible).

Fig. 12: A gauche, les isophotes du CO dans un nuage Galactique. A droite, une simulation fractale (D. Pfenniger et al). La ressemblance entre les deux structures est frappante.



- le rôle différent dans le milieu interstellaire de l'oxygène. Il y a absence pratiquement complète de réaction d'oxydation (par exemple CO est beaucoup plus abondant que CO_2)

Ces contraintes font que la chimie dans l'espace ne peut pas produire les mêmes molécules que la chimie terrestre. Elle ne produit que les molécules qui ont, par rapport à ces conditions particulières, une probabilité suffisante d'être créées.

La chimie dans un nuage moléculaire dense est caractérisée par le fait que l'hydrogène y est présent essentiellement sous forme moléculaire, contrairement au milieu interstellaire diffus, et par une absence presque totale de rayonnement UV. Les ions et électrons sont formés grâce aux rayons cosmiques qui agissent sur H_2 et sur ce qui reste d'hydrogène atomique et d'hélium et produisent les ions H_2^+, H^+ et He^+. Les réactions les plus simples et courantes dans ce milieu sont les suivantes:

$$H_2^+ + H_2 \text{ donne } H_3^+ + H$$
$$C + H_3^+ \text{ donne } CH^+ + H_2$$
$$CH^+ + H_2 \text{ donne } CH_2^+ + H$$
$$CH_2^+ + H_2 \text{ donne } CH_3^+ + H$$

La chimie de l'oxygène est relativement complexe et possède des liens avec la chimie du carbone conduisant à des molécules dont la stabilité à toute épreuve a déjà été signalée.

Tous les modèles de chimie en phase gazeuse que les scientifiques ont élaborés pour l'oxygène, le carbone, l'azote et le soufre posent généralement des problèmes d'accord avec les observations. Par exemple, les études des raies de structure fine du carbone atomique laissent penser qu'il existe une quantité importante de carbone neutre, par contre les modèles ne prévoient que du CO.

L'abondance de O_2 et H_2O est très faible contrairement à ce que disent les modèles. A ce jour O_2 n'a jamais été détecté de façon convaincante. La situation peut être améliorée si on construit des modèles qui tiennent compte des réactions qui peuvent avoir lieu à la surface des grains sans pour autant résoudre complètement le problème.

Une autre manière d'aborder le problème est de penser que les nuages sont très fragmentés (on revient donc sur le

[13] Les réactions endothermiques sont des réactions chimiques qui absorbent de la chaleur (il faut fournir de l'énergie pour qu'elle ait lieu).

modèle fractal ou par morceaux) ce qui permet au rayonnement UV de passer à travers. Dans ce cas, le monoxyde de carbone est photo-dissocié et la teneur en carbone atomique est augmentée. Mais la régularité de la distribution des poussières et l'inhomogénéité de la distribution des raies du CO semblent indiquer que cette hypothèse n'est pas satisfaisante.

On peut aussi essayer de résoudre le problème en considérant que ces nuages moléculaires sont turbulents. Ce qui implique l'existence d'un brassage permanent entre les régions externes et internes de ces nuages.

Citons aussi le phénomène de bi-stabilité: on peut assister sous certaines conditions (abondance des éléments lourds) à un double régime simultané d'ionisation par les rayons cosmiques, qui diffèrent l'un de l'autre d' un facteur 10. Ce qui conduit à une abondance de carbone atomique augmentée et à une réduction de O_2 et H_2O.

Notons pour terminer que l'abondance moléculaire et atomique à l'intérieur du nuage peut différer d'un endroit à un autre et que des variations temporelles rapides peuvent produire des oscillations et la propagation d'ondes chimiques.

Fig. 13: Le nuage obscur Barnard 68.

Turbulence dans les nuages.

A la fin des années 50, les premières observations des vitesses des gaz interstellaires font apparaître d'une façon très claire que les vitesses observées ne sont pas entièrement d'origine thermique. Les raies de rotation moléculaire, par exemple, ont des largeurs qui dépassent la largeur qui serait d'origine purement thermique (bien entendu en correspondance avec les températures déterminées dans ces nuages) et qui serait de deux ordres de grandeur plus petite que celle effectivement observée. Une explication possible de cette constatation est d'admettre que le milieu interstellaire est turbulent. On constate que la dispersion de la partie thermique des vitesses internes croit comme la racine carrée de la dimension du nuage et que la masse totale du nuage croit comme la racine carrée de la 5^e puissance de la dimension du nuage.

Ces deux relations sans être une démonstration définitive appuient fortement l'hypothèse de la turbulence et laissent penser que la structure des nuages pourrait être fractale.

FABIO BARBLAN
Route de l'Etraz 6a, CH-1239 Collex/GE

Les images 1, 2, 3, 12 et 13 proviennent de l'excellent livre de James Lequeux: Le milieu interstellaire, Savoirs Actuels, EDP Sciences/CNRS Editions, 2002.

DSS
Dark-Sky Switzerland

Dark-Sky Switzerland

Gruppe für eine effiziente Aussenbeleuchtung
Fachgruppe der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Mitglied der International Dark-Sky Association

www.darksky.ch info@darksky.ch

Wir brauchen Ihre Unterstützung, denn wir wollen

- die Bevölkerung über Lichtverschmutzung aufklären
- Behörden und Planer bei Beleuchtungskonzepten beraten
- neue Gesetzestexte schaffen

Dazu brauchen wir finanzielle Mittel* und sind auf Ihren Beitrag angewiesen.
Ihr Beitrag zählt und ist eine Investition in die Qualität des Nachthimmels.
Direkt auf PC 85-190167-2 oder über www.darksky.ch

DSS Dark-Sky Switzerland - Postfach - 8712 Stäfa - PC 85-190167-2

* z.B. für Pressedokumentation, Material, Porto, Telefon