

l'on croyait être amorphes. Or la transformation de ces silicates amorphes en silicates cristallins nécessiterait une température de l'ordre du millier de kelvins, bien supérieure à la température des comètes ! À quelles étapes de la formation stellaire les silicates interstellaires cristallisent-ils donc ?

Le satellite *ISO* a également observé des silicates cristallins dans des nébuleuses planétaires, c'est-à-dire autour d'étoiles en fin de vie, lorsque celles-ci éjectent massivement leur matière dans le milieu interstellaire. Comment le milieu interstellaire contiendrait-il des silicates amorphes si les étoiles rejettent des silicates cristallins ?

Les silicates interstellaires sont-ils réellement amorphes ? Les chocs entre les poussières interstellaires ou l'irradiation des poussières provoqueraient-ils l'amorphisation de la surface extérieure, alors que le cœur serait cristallin ? La question reste ouverte, mais ce dernier scénario est invoqué par analogie avec ce qui se passe sur la Lune : dans notre Système solaire, les silicates sont essentiellement observés sous forme cristalline, exception faite de certains minéraux observés sur la Lune et dont la surface devient amorphe sous le bombardement du vent solaire. À l'Université d'Orsay, des expériences détermineront prochainement dans quelle mesure ce processus peut avoir lieu dans le milieu interstellaire.

Les petits grains interstellaires

Quand la matière interstellaire absorbe les rayonnements des étoiles, elle est chauffée et réémet des rayonnements qui dépendent de sa température, de la même façon qu'un filament d'ampoule change de couleur quand il est chauffé (voir la figure 4). De surcroît, la correspondance entre les longueurs d'onde du spectre infrarouge du milieu interstellaire et la taille des particules indique, nous le verrons, que les poussières interstellaires ont des dimensions variées, comprises entre la taille d'une molécule et quelques dixièmes de micromètre pour les grains les plus gros.

Ces derniers reçoivent continûment de la lumière émise par des étoiles (on parle de « champ de rayonnement interstellaire »). Un équilibre s'établit entre l'absorption et l'émission de rayonnement, à une température comprise entre

10 et 100 kelvins (entre -263 et -173 °C). Le rayonnement émis est dans l'infrarouge lointain (à une longueur d'onde voisine de 100 micromètres).

Toutefois le spectre d'émission du milieu interstellaire dans l'infrarouge proche, mesuré par le satellite *IRAS*,

par des instruments au sol ou embarqués sur des ballons, montre plusieurs bandes d'émission à des longueurs d'onde voisines de 3,3, de 6,2, de 7,7, de 8,6 et de 11,3 micromètres ; découvertes au début des années 1970, ces bandes n'ont été expliquées de manière



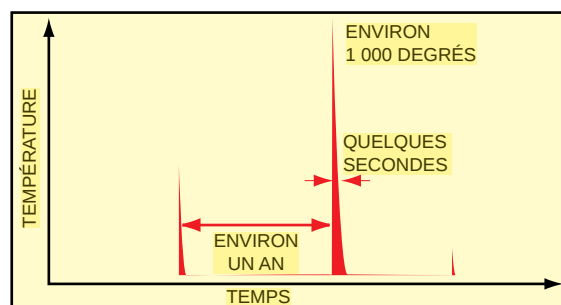
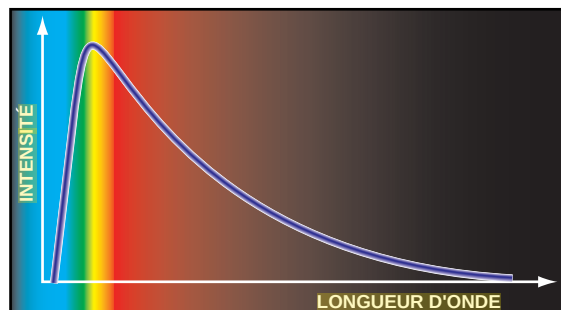
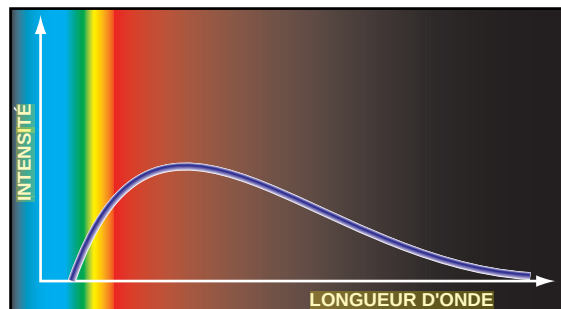
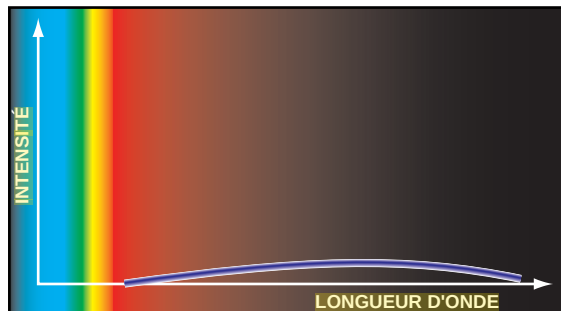
TEMPÉRATURE AMBIANTE



QUELQUES CENTAINES DE DEGRÉS



QUELQUES MILLIERS DE DEGRÉS



4. LES CORPS ÉMETTENT UN RAYONNEMENT qui dépend de leur température. Ce phénomène s'observe quand on chauffe le filament d'une ampoule à incandescence : de noir, le filament tourne au rouge, puis au blanc. Progressivement son spectre se décale vers les courtes longueurs d'onde et le rayonnement devient visible. Un objet dont la surface est à la température ambiante émet surtout des infrarouges ; un objet chauffé à plusieurs milliers de degrés (tels le Soleil ou le filament d'une ampoule) émet de la lumière visible. Les plus gros grains interstellaires, très froids, émettent dans l'infrarouge lointain ; ils sont à l'équilibre thermique. En revanche, les grains les plus petits sont chauffés très rapidement chaque fois qu'ils absorbent un photon ultraviolet ou visible. Ils sont alors portés à une très haute température et se refroidissent très vite (courbe inférieure).

satisfaisante que dix ans après : elles résulteraient de l'émission infrarouge de grains très petits, constituants majeurs de la matière interstellaire.

Ces grains sont si petits

(leur diamètre est inférieur à une dizaine de nanomètres, ou milliardièmes de mètre) que l'énergie d'un seul photon ultraviolet ou visible suffit à les chauffer à une température de l'ordre de 1 000 degrés. Or, les plus petits grains reçoivent très peu de photons, parfois moins de un par an. Après absorption d'un photon, un grain se refroidit en quelques secondes, en émettant des rayonnements infrarouges. Entre l'absorption de deux photons, les grains restent à une température très basse (quelques kelvins). Un très petit grain émet donc l'essentiel de son énergie dans le peu de temps où il est très chaud (parfois pas plus de quelques secondes par an). Ce cycle est celui

du «chauffage impulsif» (voir la figure 4).

Quelle est la nature des grains de poussière qui émettent ces rayonnements ? En 1984, à l'Université Paris VI, Alain Léger et l'un d'entre nous (J.-L. Puget) ont remarqué que les bandes d'émission à 3,3, 6,2, 8,7, 8,6 et 11,3 micromètres ressemblaient à celles de grosses molécules d'hydrocarbures aromatiques, des molécules composées seulement d'atomes de carbone et d'hydrogène, qui s'enchaînent pour former des cycles aromatiques (tel celui du benzène C_6H_6). Les bandes d'émission du milieu interstellaire seraient dues à divers modes de vibration des liaisons entre deux atomes de carbone, ou entre un atome de carbone et un atome d'hydrogène de telles molécules.

La sensibilité des instruments d'ISO a révélé les bandes d'émission infrarouge quasiment partout dans notre Galaxie, confirmant l'omniprésence des émetteurs de raies infrarouges à toutes les étapes du cycle interstellaire. Le fait que la forme du spectre observé par ISO soit inchangée alors que l'intensité du rayonnement varie typiquement de 1 à 10 000 est une éclatante confirmation du chauffage des poussières par le mécanisme impulsif.

Les observations et les modèles stellaires indiquent que les petits grains de poussière porteurs de liaisons aromatiques sont rejetés par les étoiles riches en carbone à la fin de leur vie. Cependant les estimations montrent que ces étoiles ne sont probablement pas seules à produire les grains observés dans le milieu interstellaire. L'origine des hydrocarbures aromatiques du milieu interstellaire reste ainsi une question ouverte.

Leur structure aussi, car les spectres interstellaires sont comparés à des spectres enregistrés en laboratoire. Or les composés étudiés en laboratoire sont obtenus dans des conditions physiques qui ne sont pas identiques à celles du milieu interstellaire, et les conditions d'observation sont différentes (température, pression, densité de particules...). On ne sait notamment pas isoler et étudier, dans des conditions proches de celles du milieu interstellaire, des grosses molécules aromatiques hydrogénées, composées de plus de cinq cycles benzéniques, alors que l'intensité des bandes d'émission observées dans le



5. LE SATELLITE ISO a été lancé en 1995 par l'Agence spatiale européenne. Il mesure 5,3 mètres de haut et pèse 2,4 tonnes. Il a fonctionné pendant 29 mois, mesurant les rayonnements infrarouges de l'Univers. ISO a étudié la nature des poussières du milieu interstellaire et précisé le rythme de formation des étoiles au cours de l'évolution de l'Univers.