

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.

ciel par *ISO* caractérise des molécules contenant au moins une dizaine, voire une centaine de cycles.

Les glaces moléculaires

Des centaines de molécules ont été identifiées dans le milieu interstellaire, mais comment des molécules complexes se forment-elles dans l'espace? Même dans les régions les plus denses, le gaz interstellaire est très ténu (à peine dix millions de molécules par litre), et les collisions entre atomes ou entre molécules sont rares. Toutefois, les molécules complexes se forment nécessairement par réaction d'atomes ou de molécules simples, qui doivent donc se trouver côte à côte à un certain moment.

Le mystère a été résolu quand on a observé que, dans les nuages moléculaires denses, les poussières sont parfois à des températures très faibles (de l'ordre de dix kelvins), de sorte qu'un atome ou une molécule qui percutent un grain (de rayon inférieur à un micromètre) restent collés à celui-ci, en raison de forces très faibles, nommées forces de Van der Waals (voir la figure 3).

Ainsi, les poussières se recouvrent progressivement d'un manteau de molécules, formant des «glaces interstellaires». Ces glaces sont formées non seulement d'eau solide, mais aussi de monoxyde et de dioxyde de carbone (CO et CO_2), de méthanol (CH_3OH), etc. sous la forme solide.

Des noyaux d'hydrogène qui se propagent à grande vitesse dans le milieu interstellaire, ainsi que des photons provenant des étoiles, irradient ces glaces et leur confèrent beaucoup d'énergie. Les molécules étant à proximité les unes des autres, l'énergie apportée aux atomes ou aux molécules des grains leur permet des associations chimiques et la formation de nouvelles molécules. Parfois les nouvelles espèces formées sont libérées dans le gaz : l'échange est permanent entre les molécules collées sur

les surfaces et les molécules présentes dans le gaz.

Le satellite *ISO* a identifié les molécules qui constituent les manteaux de glaces : les vibrations et rotations des molécules correspondent à des absorptions ou à des émissions dans le spectre infrarouge, à des longueurs d'onde caractéristiques des diverses molécules (voir la figure 3). Les étoiles nées dans ces nuages moléculaires émettent un rayonnement qui détruit le nuage de poussières où elles se sont formées et qui rejette ainsi toutes les molécules dans la phase gazeuse. Ces molécules voyagent dans notre Galaxie et participent à nouveau à la formation de nuages interstellaires,

et ainsi de suite. Ce cycle de matière est à l'origine de l'enrichissement moléculaire de notre Galaxie au cours du temps.

Les observations cosmologiques

Les instruments du satellite *ISO* nous ont révélé la nature de la matière interstellaire dans le voisinage du Système solaire et donné des informations sur l'Univers dans son ensemble. Parmi les grandes questions de la cosmologie contemporaine figure celle de la formation des galaxies et, plus généralement, celle de l'histoire de la formation des étoiles.

L'astrophysique suppose que l'Univers est identique en tous ses points. Pas à petite échelle, bien sûr (une étoile n'est pas identique au vide interstellaire où elle se trouve), mais à l'échelle des distances intergalactiques.

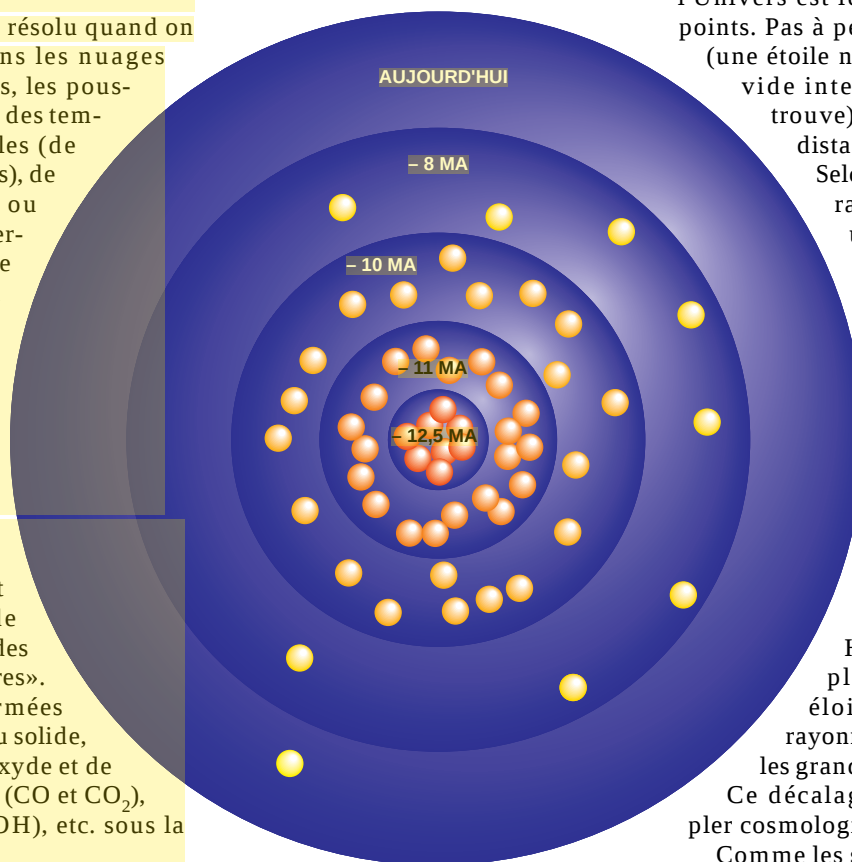
Selon cette hypothèse, les rayonnements émis par un élément chimique, tel l'hydrogène, devraient toujours être à la même longueur d'onde. Pourquoi, alors, les galaxies qui nous entourent émettent-elles des rayonnements qui semblent décalés vers les grandes longueurs d'onde?

En 1929, l'astronome américain Edwin Hubble montra que plus les galaxies sont éloignées, plus leur rayonnement est décalé vers les grandes longueurs d'onde.

Ce décalage est un effet Doppler cosmologique.

Comme les sources décalées vers le rouge sont des sources éloignées de la Terre et comme la lumière se propage à la vitesse de 300 000 kilomètres par seconde, le rayonnement qui est le plus décalé a voyagé sur de longues distances et a donc mis beaucoup de temps à nous parvenir : en regardant aux grands décalages vers le rouge, les astronomes explorent le passé de l'Univers.

La galaxie la plus lointaine jamais détectée se trouve à un décalage vers le rouge de l'ordre de 6,7, ce qui correspond à un Univers ayant dix pour



6. LE SATELLITE *ISO* A OBSERVÉ DES GALAXIES qui contribuent au fond diffus extragalactique. Ce fond provient de l'émission cumulée de toutes les galaxies depuis les premiers instants de l'Univers. Comme la lumière se propage à vitesse finie, plus les galaxies sont éloignées, plus on les voit dans le passé. Leurs émissions sont de plus en plus décalées vers les grandes longueurs d'onde. De ces émissions, on a déduit que pour une étoile de type Soleil formée aujourd'hui, il s'en formait 8 il y a 8 milliards d'années, 20 il y a 10 milliards d'années, 20 il y a 11 milliards d'années, 10 il y a 11,5 milliards d'années, 4 il y a 12 milliards d'années (sur cette figure, les échelles de taille de l'Univers ne sont pas respectées).