

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.

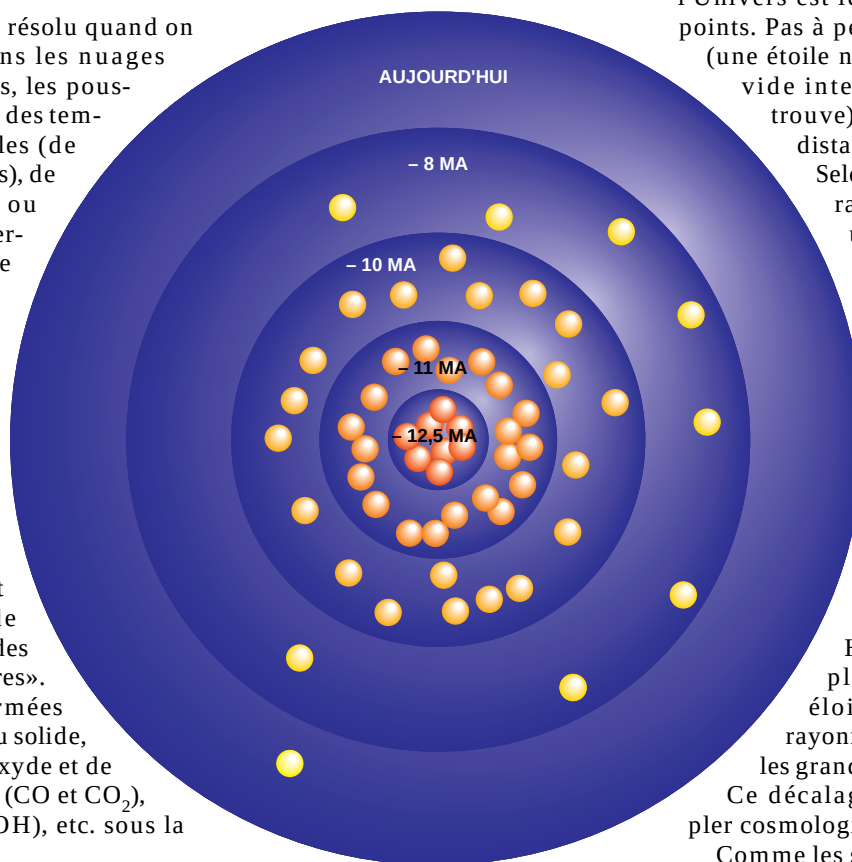
Selon cette hypothèse, les rayonnements émis par un élément chimique, tel l'hydrogène, devraient toujours être à la même longueur d'onde. Pourquoi, alors, les galaxies qui nous entourent émettent-elles des rayonnements qui semblent décalés vers les grandes longueurs d'onde?

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

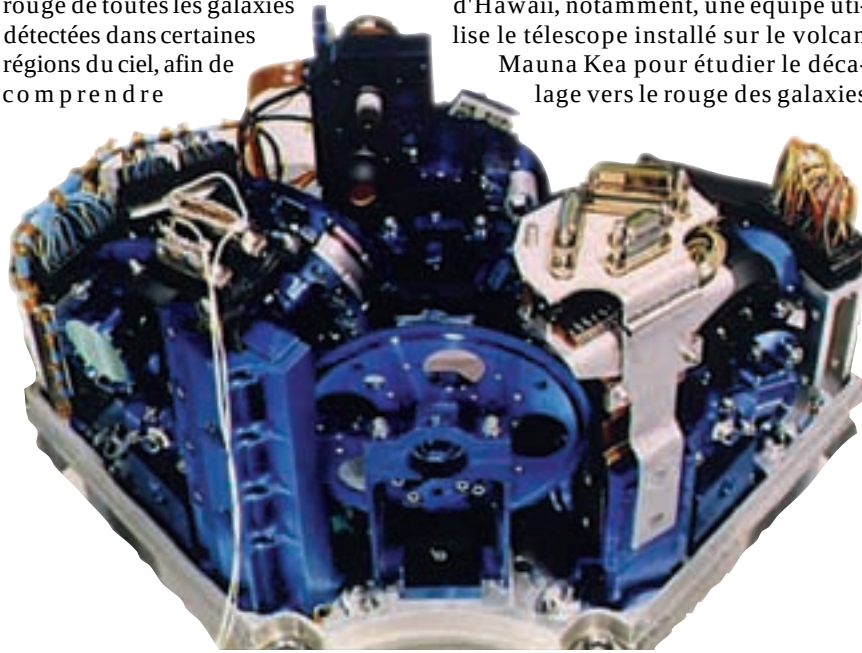


6. LE SATELLITE *ISO* A OBSERVÉ DES GALAXIES qui contribuent au fond diffus extragalactique. Ce fond provient de l'émission cumulée de toutes les galaxies depuis les premiers instants de l'Univers. Comme la lumière se propage à vitesse finie, plus les galaxies sont éloignées, plus on les voit dans le 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).

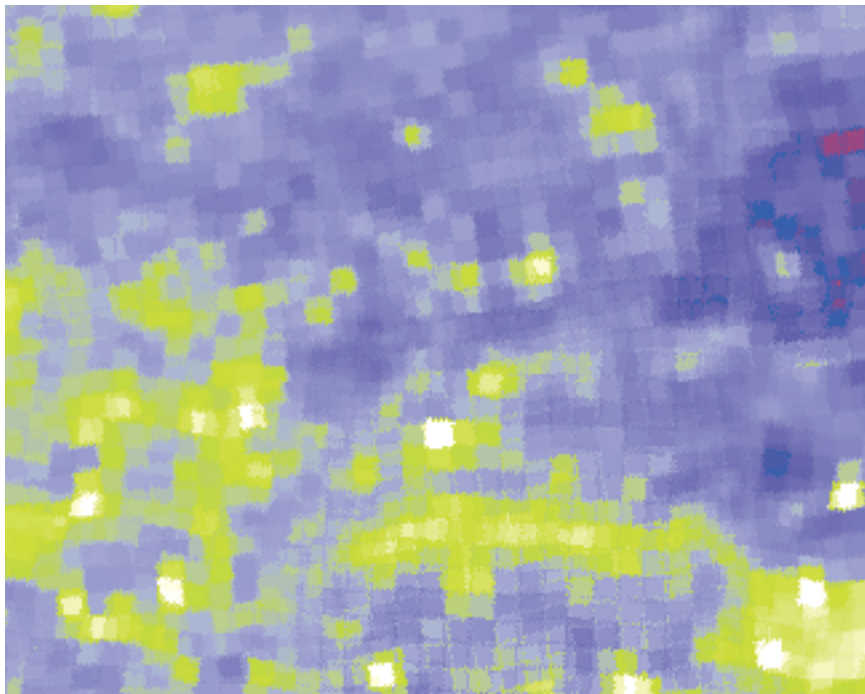
cent de son âge actuel (estimé à 12,6 milliards d'années). Aujourd'hui, les astrophysiciens mesurent systématiquement le décalage vers le rouge de toutes les galaxies détectées dans certaines régions du ciel, afin de comprendre

comment se sont formées les galaxies, et comment elles ont évolué vers les galaxies qui nous entourent.

À l'Observatoire franco-canadien d'Hawaii, notamment, une équipe utilise le télescope installé sur le volcan Mauna Kea pour étudier le décalage vers le rouge des galaxies



7. LA CAMÉRA ISOCAM embarquée sur le satellite *ISO* a été fabriquée sous la responsabilité de Catherine Césarsky et de ses collègues du CEA, et testée à l'Université d'Orsay. Cette caméra enregistre les rayonnements infrarouges à des longueurs d'onde comprises entre 2 et 16 micromètres. Le champ angulaire de la caméra était remarquablement petit : quelques secondes d'arc seulement, soit un cheveu vu à 20 mètres de distance.



8. CE CHAMP PROFOND a été observé par l'instrument *ISOPHOT* à une longueur d'onde de 175 micromètres. Cette carte ne représente qu'une très petite partie du ciel. Les filaments brillants (en vert) correspondent à de la matière présente dans notre Galaxie ; cette matière est située au premier plan. Se superposent ensuite des sources ponctuelles (points verts isolés ou blancs) qui, elles, sont extragalactiques. Ces sources sont des galaxies, parfois très jeunes (elles se sont formées quand l'Univers n'avait que trois milliards d'années, contre 13 aujourd'hui). En dehors des filaments brillants et des sources ponctuelles, on distingue un fond granuleux (en bleu), qui correspond à l'ensemble des sources extragalactiques non résolues.

dans cinq champs qui mesurent chacun quelques minutes d'angle de côté. C'est ainsi qu'est apparue une augmentation considérable (un facteur dix environ) de la fréquence de formation d'étoiles entre l'époque actuelle et il y a cinq milliards d'années.

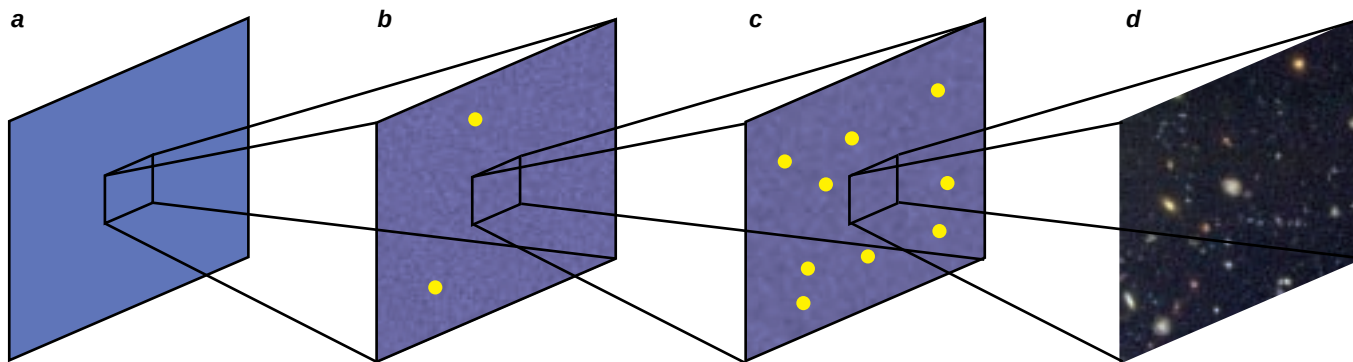
Ce résultat a été confirmé et étendu à l'aide du Télescope spatial *Hubble*, qui a accumulé, sur un même champ du ciel, des centaines d'heures d'observation, fournissant l'image la plus profonde jamais obtenue en astronomie optique. Ces observations semblaient également indiquer un maximum d'activité de formation d'étoiles il y a cinq milliards d'années.

Toutefois, pour notre Galaxie, la découverte des poussières, évoquée précédemment, a montré qu'une grande partie du rayonnement était invisible parce que absorbé. Qu'en est-il pour les galaxies lointaines ? Cette question est restée controversée. L'écran de poussière est-il homogène, c'est-à-dire les poussières sont-elles réparties de façon diffuse, cachant de la même façon tous les objets distants ? Ou bien les poussières sont-elles confinées à l'intérieur même des galaxies ?

Il y a un peu plus de dix ans, le satellite *IRAS* corrobora la seconde hypothèse en découvrant des « galaxies infrarouges » : ces galaxies forment beaucoup plus d'étoiles que notre Galaxie, par exemple, et elles émettent jusqu'à 95 pour cent de leur énergie dans le domaine infrarouge. Manifestement le recensement des étoiles dans l'Univers était biaisé quand les astronomes n'étudiaient que les rayonnements visibles.

On sait aujourd'hui que, lors des collisions entre les galaxies, la formation d'étoiles peut être centuplée, mais invisible, en raison des considérables concentrations de gaz et de poussières, qui absorbent le rayonnement. Ce sont de telles collisions qui engendrent les galaxies infrarouges découvertes par *IRAS*.

Ces épisodes ne sont-ils que de spectaculaires événements, trop rares et trop courts, dans la vie des galaxies, pour influencer sur leur évolution ? Ou au contraire, les collisions de galaxies, fréquentes dans le passé, ont-elles joué un rôle majeur dans leur évolution ? Dans cette dernière hypothèse, une bonne partie de l'histoire de la formation d'étoiles dans l'Univers ne serait observable que dans le domaine infrarouge.



9. LE FOND EXTRAGALACTIQUE apparaît uniforme à grande échelle (a), mais il est dû à l'émission de galaxies non résolues (d). L'instrument *ISOPHOT* permet de résoudre environ dix pour cent des galaxies (b),

les autres galaxies formant un fond granuleux. La caméra *ISOCAM* résout 80 pour cent des galaxies (l'image qu'il donne serait comprise entre c et d).

Le satellite *ISO* a apporté des éléments de réponse qui vont dans le sens de la seconde hypothèse. Plusieurs petites régions du ciel ont été très longuement observées. En raison des performances exceptionnelles des détecteurs et du mode d'observation (*ISO* travaille en mode pointé, les détecteurs étant fixés sur la partie du ciel à analyser, tandis qu'*IRAS* fonctionnait en mode de balayage), *ISO* a découvert des objets bien moins lumineux, donc plus lointains, qu'*IRAS*.

La caméra *ISOCAM* a recherché les galaxies lointaines, donc très peu brillantes, à des longueurs d'onde égales à 6 et à 15 micromètres. Le gain en sensibilité par rapport à *IRAS* est spectaculaire : environ 3 000. Le relevé le plus profond avec *ISOCAM* a été effectué sur une partie du ciel qui a été surnommée « champ profond de Hubble » : c'est ce champ qui a été exploré par le Télescope spatial *Hubble* en lumière visible et dans le domaine ultraviolet. *ISO* a trouvé bien moins de sources que *Hubble*, mais il nous a appris que l'énergie totale rayonnée par les quelques sources infrarouges détectées est comparable à celle de toutes les sources trouvées par *Hubble*.

Les sources détectées par *ISOCAM* ne sont donc pas du même type que celles observées par *Hubble*. Ce résultat spectaculaire pose des problèmes à l'ensemble des astronomes qui ont bâti depuis plus de 20 ans une compréhension de l'évolution des galaxies à partir des observations du domaine ultraviolet et visible !

L'infrarouge lointain a été observé avec le photomètre *ISOPHOT* qui, malgré sa faible résolution spatiale, permet pour la première fois d'observer les galaxies lointaines à une longueur d'onde de 175 micromètres. À cette longueur d'onde, les sources détec-

tées sont bien moins nombreuses que dans l'ultraviolet, dans le visible ou dans l'infrarouge proche. Cependant ce petit nombre est bien supérieur à celui que l'on obtient quand on extrapole l'émission des galaxies proches observées avec *IRAS*.

De ce fait, les galaxies détectées dans les relevés profonds cosmologiques avec *ISO* sont de tout autre nature que celles qui ont été détectées avec *IRAS*. Ces galaxies sont plus lointaines (et donc plus jeunes), et elles ont des propriétés qui diffèrent considérablement des galaxies locales, plus proches. Cette découverte confirme l'hypothèse qui stipulait que le rythme de la formation d'étoiles fut jadis plus élevé qu'aujourd'hui.

Cette très forte évolution des galaxies distantes s'observe également quand on mesure une composante plus diffuse, provenant de l'émission intégrée des galaxies sur toute l'histoire de l'Univers : le fond diffus extragalactique. Pour comprendre à quoi correspond ce fond, imaginons que nous soyons à bord d'un petit voilier qui passe le cap Horn : nous voyons parfaitement les mouvements de la mer déchaînée. En revanche, si nous sommes en avion, l'océan n'est alors plus qu'une étendue bleue uniforme.

Ce fond d'apparence uniforme a été observé à des longueurs d'onde comprises entre 100 micromètres et 1 millimètre par le satellite américain *COBE*. La forte intensité de ce fond montre qu'une grande partie de la formation d'étoiles est cachée du domaine visible et observable seulement dans le domaine infrarouge : l'énergie émise par toutes les galaxies dans l'Univers est environ deux fois plus grande dans le domaine infrarouge que dans le domaine visible.

Les galaxies dont le rayonnement constitue ce fond émettent beaucoup plus d'énergie dans le domaine infrarouge que les galaxies proches de nous.

Ce phénomène est une autre signature du changement profond des propriétés des galaxies depuis leur formation jusqu'à aujourd'hui. Il conduit à supposer que le rythme de formation d'étoiles fut constant il y a 10 à 12 milliards d'années, mais 20 fois plus fort qu'aujourd'hui (en supposant un âge actuel de 12,6 milliards d'années). Avec *ISOPHOT*, à une longueur d'onde de 175 micromètres, les galaxies détectées ne représentent que dix pour cent du fond. En revanche, à la longueur d'onde de 15 micromètres, mesurée par la caméra *ISOCAM*, le fond diffus extragalactique est presque totalement résolu en sources individuelles.

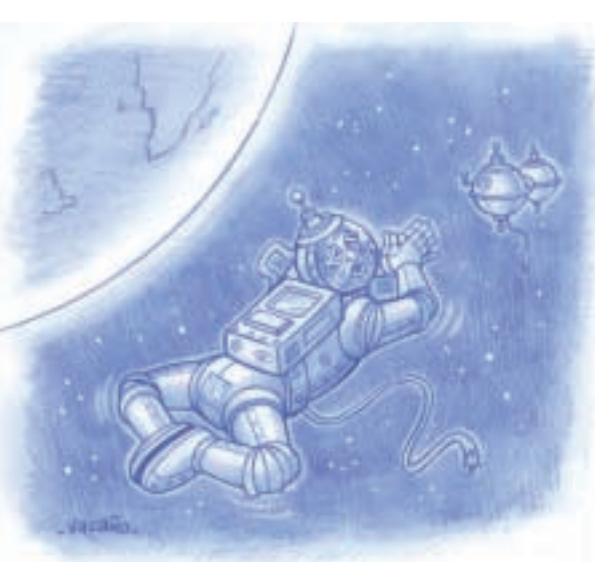
Seule une petite partie de l'Univers est visible aujourd'hui, grâce au satellite *ISO*, mais cette partie permet pour la première fois de mieux étudier l'évolution des galaxies depuis la formation de l'Univers.

Alain ABERGEL, François BOULANGER, Guilaine LAGACHE, Emmanuel DARTOIS et Jean-Loup PUGET travaillent à l'Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay.

F. COMBES, P. BOISSIÉ, A. MAZURE, A. BLANCHARD, *Galaxies et cosmologie*, Interéditions / Éditions du CNRS, 1991.

D. ALLOIN, *Les galaxies*, Éditions Flammarion (collection Dominos), 1998.

The Universe as seen by ISO, sous la direction de P. Cox et M. Kessler, *ESA Proceedings*, SP-427, 1999.



Le gravidyne

ROLAND LEHOUCQ

Nous pouvons échapper à l'attraction terrestre à l'aide d'un vaisseau-haltère dont la longueur varie à des instants précis de sa trajectoire.

Cyrano de Bergerac a retardé le duc de Guiche en décrivant sept moyens farfelus d'aller sur la Lune ; émule de Cyrano, le physicien russe V. Béletski a proposé un engin spatial qui paraît étrange au premier abord, mais dont le principe est uniquement fondé sur une conséquence des lois de la gravitation. Dans le champ gravitationnel d'une planète, l'attraction exercée sur un solide étendu diffère de celle exercée sur un point matériel de même masse ; en variant la forme d'un solide, on modifie l'intensité de la force d'attraction qu'il subit et l'on peut le lancer vers les étoiles.

Comment expliquer cette variation ? Quand l'attraction gravitationnelle est uniforme, la force d'attraction est identique en tous les points de l'objet : l'attraction qui s'exerce sur un objet étendu est égale à la force qui s'exerce sur une masse équivalente placée au centre de gravité de l'objet. En revanche, les parties d'un corps étendu plongé dans le champ gravitationnel d'une planète, champ dont l'intensité décroît avec le carré de la distance entre le corps et la planète, subissent des attractions qui peuvent être fort inégales. Chaque partie du corps d'un satellite par exemple, tombe alors vers la planète avec une accélération différente.

Dans le champ terrestre, cet effet est sensible lorsque la dimension du satellite dépasse plusieurs dizaines de kilomètres.

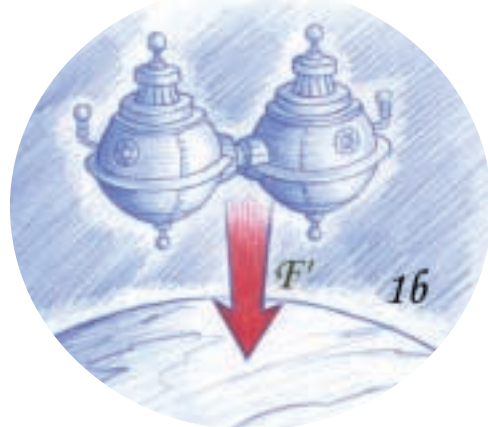
Les parties lointaines étant moins attirées que les parties proches, le satellite est étiré le long de l'axe qui lie son centre à celui de la planète. Les marées témoignent de cet étirement : sur Terre, les océans sont déformés par l'attraction de la Lune.

ATTRACTION SUR UN GRAND SATELLITE

L'engin que nous nous proposons d'utiliser pour nous déplacer dans le cosmos est en forme d'haltère : deux sphères identiques reliées par une barre rigide de masse négligeable par rapport à celle des sphères. Nous supposons, de surcroît, que l'axe de la barre est perpendiculaire au plan de l'orbite. Les sphères subissent des attractions terrestres de même intensité, car elles sont situées à la même distance du centre de la Terre, et de directions légèrement différentes puisque les droites qui joignent leur centre à celui de la Terre forment un petit angle.

La force d'attraction résultante F , orientée vers le centre de la Terre, est presque égale en intensité à la force F' que subirait un point matériel de même masse que notre haltère et situé en son centre de gravité. Presque, mais pas tout à fait ! La force F est en fait inférieure à la force F' (voir les figures 1a et 1b) : l'écart relatif entre les deux forces est proportionnel au carré du rapport entre la longueur de l'haltère et la distance au centre de la Terre (tant que la longueur de l'haltère reste petite devant la distance de son centre de gravité au centre de la Terre). Dans le cas limite où les sphères seraient écartées d'une distance énorme, la force exercée serait presque nulle, puisque cette dernière décroît avec le carré de la distance, alors que la force exercée sur la même masse placée au centre de gravité de l'ensemble ne l'est pas.

En pratique, à moins que le satellite ne soit très grand, l'écart entre les



deux forces est faible. Ainsi, pour la station spatiale *Mir*, dont la taille est de 30 mètres et la distance au centre de la Terre d'environ 6 800 000 mètres, l'écart relatif des deux forces, $(F' - F)/F$, vaut trois cent milliardièmes (3×10^{-11}). En d'autres termes, un corps très allongé subit une attraction inférieure à celle d'un corps ramassé sur lui-même. Presque insensible sur de petits satellites, cette différence est ici mise à profit pour concevoir un procédé original de déplacement spatial.

UN VAISSEAU SPATIAL PULSANT

La modification de l'orbite est la clé du voyage spatial. Pour qu'un satellite quitte le voisinage terrestre à partir d'une orbite elliptique, il faut dépenser de l'énergie, c'est-à-dire augmenter l'excentricité e (l'allongement de l'ellipse) de l'orbite initiale jusqu'à ce qu'elle dépasse l'unité, valeur au-delà de laquelle la trajectoire devient hyperbolique (voir la figure 2).

Sans apport d'énergie, l'excentricité de l'orbite est constante. Le mouvement d'un solide est en général compliqué par l'interaction entre le déplacement du centre de gravité du solide et la rotation autour de son centre de gravité. Pour des raisons de symétrie, un solide comme notre haltère placé initialement avec son axe de symétrie perpendiculaire au plan de son

