

INSTITUT DE FRANCE

---

ACADÉMIE DES SCIENCES

---

**EXPOSÉ SUR L'ASTRONOMIE**

**LA RECHERCHE SPATIALE  
ET LA CONNAISSANCE  
DE NOTRE GALAXIE**

PAR

**M. JEAN-CLAUDE PECKER**

Membre de l'Académie des Sciences

en la séance du 6 juin 1977

---



Dans les trois conférences que vous avez entendues, et qui concernaient l'astronomie galactique et extragalactique, MM. Fehrenbach et Wlêrick ont montré, malheureusement trop rapidement à mon gré, ce que les grands télescopes de l'astrophysique moderne ont permis d'accumuler de connaissance sur les galaxies proches et lointaines, normales ou bizarres, cependant que M. Lequeux, passant de la lumière visible aux ondes radio, a analysé les composantes moléculaires, si essentielles à la compréhension de la physique galactique. Photons optiques visibles, photons radio — ce ne sont pas les seuls : je dois en principe aujourd'hui vous parler de tous les autres !...

Le message que nous envoient les astres qui composent notre Univers observable nous parvient en effet, presque exclusivement, sous forme de photons. Photons optiques, d'énergie moyenne, d'abord, ceux de l'astrophysique classique. Photons radio, de très faible énergie, ceux de la radioastronomie, depuis une trentaine d'années. Mais aujourd'hui la gamme des fréquences accessibles est devenue considérablement plus étendue, grâce à la recherche spatiale, et comme cela est clair à partir de l'examen de la figure 1. Les acquisitions que nous vaut cette extension de nos possibilités d'investigation sont légion; et il n'est pas question pour moi d'en dresser une liste, même abrégée. Je voudrais essayer d'abord de dégager les principes et les motivations de ces recherches, de faire en somme un peu de physique, avant de passer à la Galaxie et aux objets que l'on y trouve.

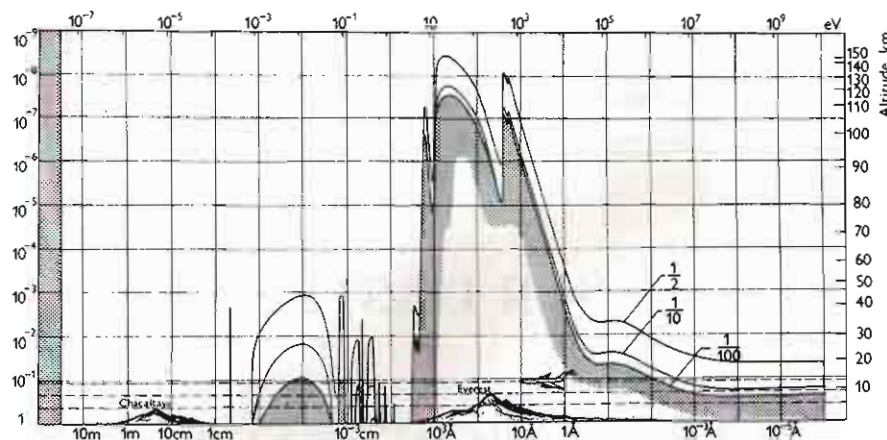


Fig. 1 (d'après J. Kleczek, *The Universe*, 1976, p. 33). — Affaiblissement des rayonnements électromagnétiques par l'atmosphère terrestre. En abscisse, la longueur d'onde. En ordonnée : à gauche, fraction de la masse atmosphérique; à droite, altitude correspondante, en kilomètres. Les nombres  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{10}$ ,  $\frac{1}{100}$  désignent la fraction du flux de rayonnement, au sommet de l'atmosphère, ayant atteint l'altitude indiquée sur la figure. On notera les « fenêtres » de la radioastronomie (à gauche), du domaine visible et du proche infrarouge (au milieu).

# I

L'émission d'un photon est toujours liée à la désexcitation : passage d'un niveau d'énergie à un autre plus bas, d'atomes, d'ions, de particules.

Niveaux discrets d'abord : dans le domaine radio, il s'agit principalement de niveaux serrés, surtout moléculaires, comme on l'a vu. Dans le domaine visible, ce sont les atomes et les ions faiblement ionisés qui affectent le spectre. Mais les ions fortement ionisés, les noyaux eux-mêmes et les particules élémentaires, se manifestent dans le domaine des rayons ultraviolets, des rayons X, des rayons gamma, inobservables du sol; des transitions atomiques et moléculaires nombreuses affectent le spectre infrarouge, lui aussi inobservable ou peu observable du sol.

Les transitions entre niveaux d'énergie peuvent aussi concerner des niveaux d'énergie non discrets, et donner lieu à des spectres continus : il peut ainsi s'agir de transitions dues à la recombinaison électron-ion en un atome (ce qui donne lieu aux spectres continus les plus classiques), ou de transitions entre deux niveaux d'énergie de l'électron libre, à la suite d'un processus de freinage de celui-ci, dans le champ d'un atome (rayonnement de freinage important, dans le domaine radio), ou dans un champ magnétique (rayonnement de synchrotron observé, dans tout le spectre, principalement dans le spectre radio).

Il est difficile de dire qu'une étoile ou qu'un milieu astrophysique émet un spectre. En réalité, ses couches successives émettent des photons de toutes sortes, mais l'opacité des milieux interposés entre ces couches émissives et l'observateur dépend de la longueur d'onde; certains photons passent au travers et sont perçus directement; d'autres sont arrêtés, absorbés; cette absorption sera suivie d'une réémission, et ce processus produira d'autres photons, de moindre énergie, qui franchiront avec succès les barrières opaques, ou qui au contraire contribueront aux équilibres locaux entre matière et rayonnement. A une longueur d'onde donnée, on observe des couches dont la profondeur dépend, en fait, de la longueur d'onde à laquelle l'observation est menée.

On voit donc que ce qui est observé résulte d'une combinaison, d'une convolution, l'intégration étant faite le long de la ligne de visée, entre les propriétés émissives de la matière et ses propriétés absorbantes (fig. 2).

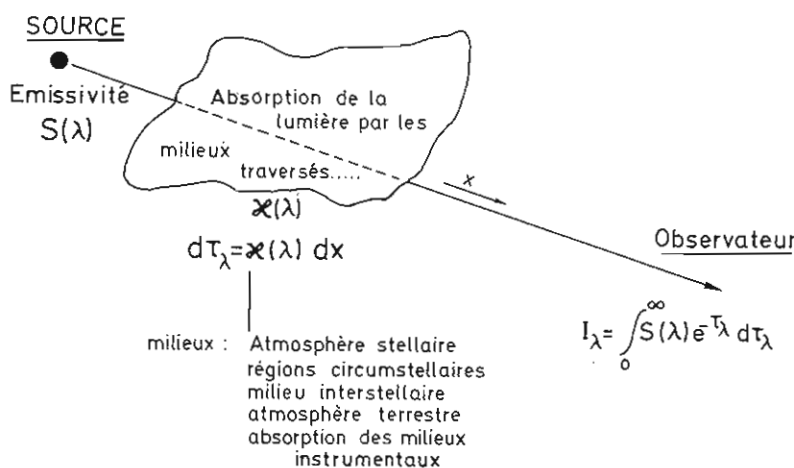


Fig. 2. — Le spectre observé résulte d'une convolution.  $x$  désigne la position d'un point sur le trajet de la lumière entre la source et l'observateur. L'émissivité,  $S(\lambda)$ , caractérise la source. Le coefficient d'absorption des milieux traversés est désigné par  $\kappa(\lambda)$ , la profondeur optique par  $\tau_\lambda$ . Les fonctions  $S$ ,  $\kappa$ ,  $\tau$  dépendent de  $x$  et de  $\lambda$ . L'observateur mesure l'intensité du rayonnement dont l'expression figure à droite sur la figure.

Or, entre un astre, reconnu comme une entité autonome par l'observation *visuelle* — étoiles, galaxies, quasars... —, et l'observateur, s'étagent les régions circumstellaires, interstellaires, interplanétaires, et l'atmosphère terrestre. L'observation visuelle elle-même ne pénètre que dans les couches superficielles de l'étoile, l'étoile étant essentiellement opaque, et non pas dans ses régions centrales, où les réactions thermonucléaires produisent les photons qui, absorbés, réémis, absorbés, réémis..., parviennent finalement, déchus, vers l'observateur.

L'émissivité de la matière stellaire, essentiellement, suit la loi de Planck. L'absorption dépend de la composition chimique. L'absorption par les couches extérieures de l'étoile, gazeuses, chaudes, est suivie par celle qu'impose la traversée du milieu circumstellaire et interstellaire, principalement formé de poussières froides, puis par celle de l'atmosphère terrestre.

On voit alors que l'ultraviolet, par exemple, loin du plan galactique en tout cas, doit permettre de pénétrer l'atmosphère extérieure des étoiles, et d'en explorer chromosphère et couronne, transparentes aux rayonnements visibles.

Plusieurs domaines spectraux relevant de l'observation spatiale semblent devoir jouer, dans les années qui viennent, un rôle important dans l'étude des galaxies, et déjà l'information qu'ils apportent sur notre propre Galaxie est fort riche. C'est d'abord le domaine de l'infrarouge, auquel nous consacrerons l'essentiel de cet exposé, ensuite celui de l'ultraviolet et des rayons X; enfin, à plus longue échéance, peut-être celui des rayons gamma...

L'infrarouge nous renseignera sur les composantes poussiéreuses des galaxies, où naissent étoiles et molécules, et dont les planètes sont en quelque sorte un résidu. L'ultraviolet et les rayons X nous informent sur les régions actives des galaxies, sur les gaz fortement ionisés

qu'elles contiennent; quant à la gamma astronomie, marquée par le rayonnement non thermique, synchrotron, de très haute énergie, elle devrait permettre de décrire les structures magnétiques, et les particules énergétiques qui caractérisent les mécanismes de l'activité galactique.

## II

A vrai dire, une portion des rayons infrarouges, ceux de longueur d'onde assez courte, parviennent à traverser l'atmosphère. On peut rappeler ici leur découverte, en 1800, par William Herschel qui explorait le spectre du Soleil avec un thermomètre : l'élévation de température constatée, plus forte que dans le visible, le conduisit à distinguer les rayons calorifiques des rayons lumineux. C'est bien entendu la convolution qui lui jouait un tour : ce

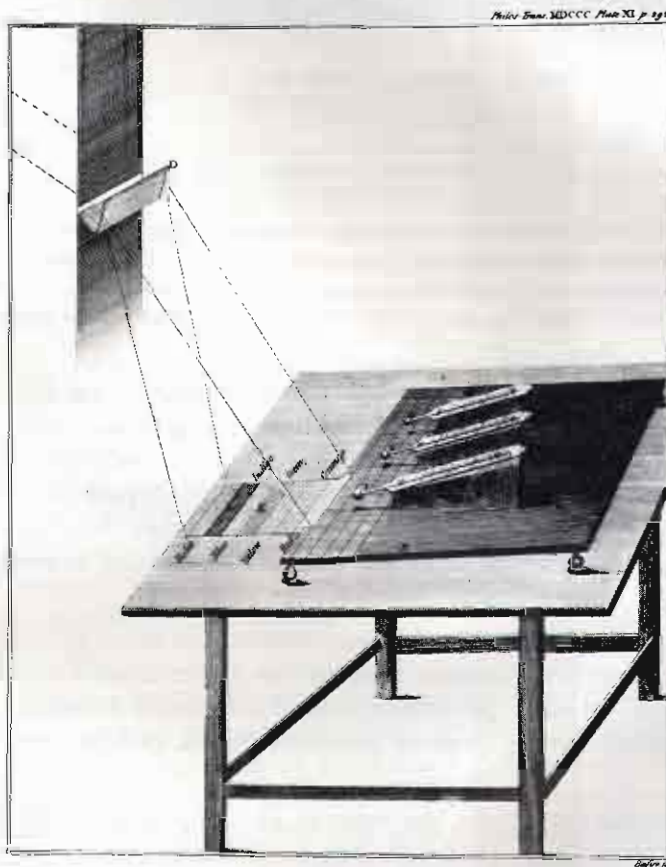


Fig. 3. — Mesure du rayonnement infrarouge par William Herschel  
(*Phil. Trans.*, 90, 1800, p. 255-283).

n'était pas le rayonnement qui était calorifique, c'était simplement le verre qui était plus opaque dans l'infrarouge — un effet auquel s'ajoutait le fait que la dispersion est bien plus faible dans l'infrarouge, donc le rayonnement plus concentré sur le thermomètre.

On comprend alors très bien ce qui caractérise l'observation infrarouge : le rayonnement issu des sources chaudes — étoiles, galaxies — chauffe les couches poussiéreuses, principalement protostellaires ou protogalactiques, qui les entourent. Comme le rayonnement incident y est dilué par la distance, l'équilibre s'établit à des températures

moins élevées, beaucoup moins même, que celle de l'astre illuminant. S'il y a équilibre radiatif, on peut estimer que cela implique, en gros :

$$(1) \quad T_*^4 4\pi R_*^2 = T_{\text{env}}^4 4\pi R_{\text{env}}^2,$$

où  $T_*$  et  $T_{\text{env}}$  désignent les températures,  $R_*$  et  $R_{\text{env}}$  les rayons, respectivement, de l'étoile et de son enveloppe poussiéreuse.

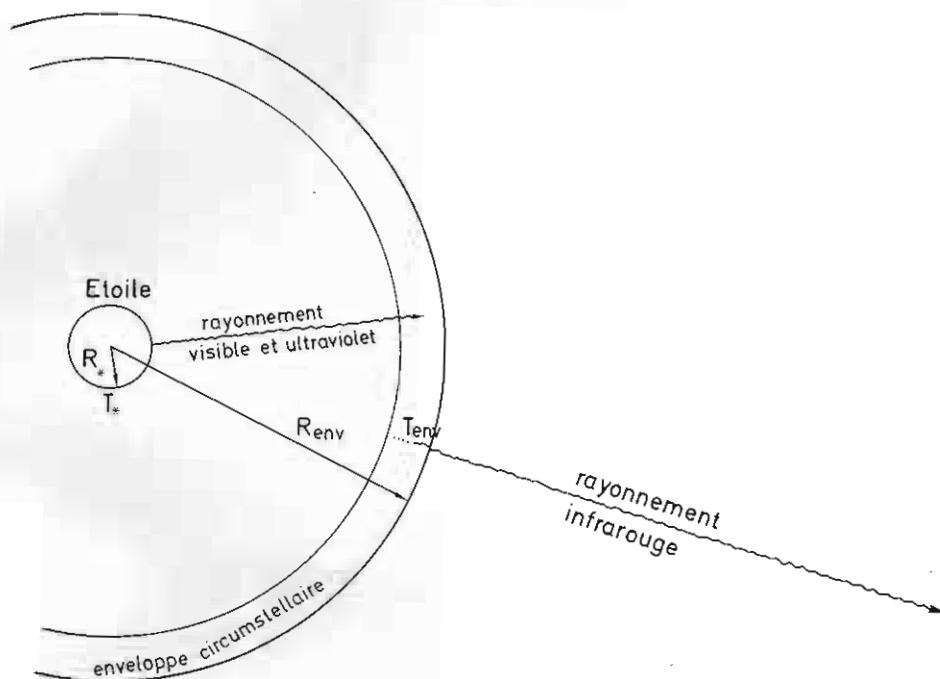


Fig. 4. — Équilibre radiatif. Ce schéma et l'équation (1) supposent que l'absorption du rayonnement par l'enveloppe est totale, et qu'il n'y a pas d'autres sources d'énergie que le rayonnement de l'étoile visible.

Les enveloppes poussiéreuses des étoiles doivent donc être froides et par suite rayonner dans l'infrarouge, et non dans le visible.

Toutefois, toutes les masses poussiéreuses qui peuplent la Galaxie ne sont pas en équilibre radiatif : l'énergie qu'elles rayonnent n'est parfois qu'en partie issue de la dégradation des photons responsables de leur chauffage partiel : ce chauffage, et le rayonnement correspondant, peut être dû aussi à l'énergie potentielle de gravitation libérée par effondrement lent du nuage. On peut le vérifier parfois en dénombrant les sources intérieures à certains nuages, et en comparant l'énergie qu'elles produisent à l'énergie observée. Ainsi est-ce le cas sans doute du nuage entourant l'étoile  $\rho$  Ophiuchus — ou celui de W3 : on peut alors penser qu'on a affaire à des systèmes stellaires en formation; dans le cas de  $\rho$  Ophiuchus, il s'agit bien certainement d'une très jeune association, en voie de formation.

L'expression (1) de l'équilibre radiatif doit aussi être modifiée dans la direction inverse dans la mesure où l'enveloppe poussiéreuse peut être déchiquetée et n'absorber qu'une partie du rayonnement ultraviolet : alors on aura une température plus basse que l'équilibre radiatif de l'enveloppe ne permettrait de le prévoir.

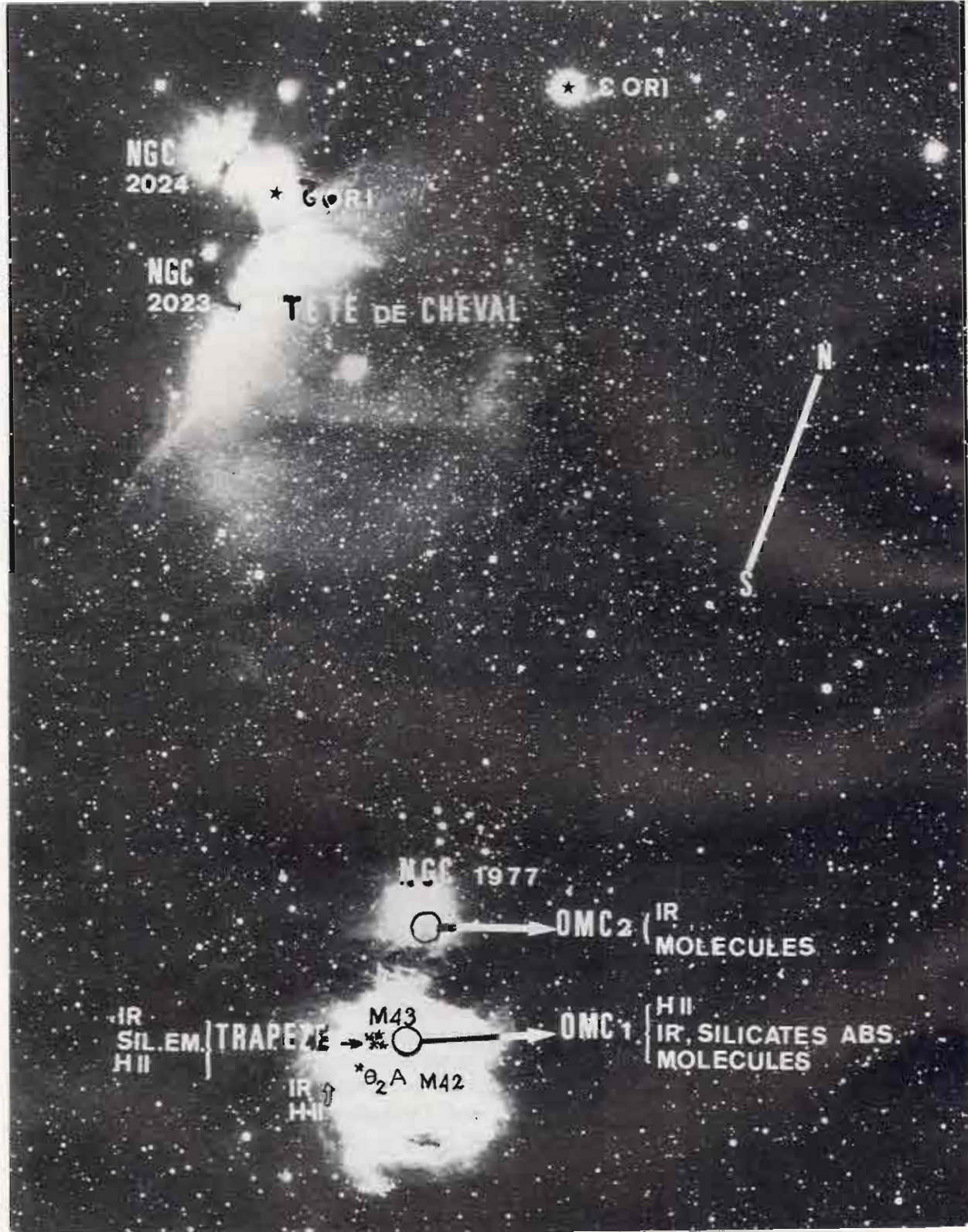


Fig. 5. — Une région riche de notre Galaxie : la région d'Orion (cliché O.H.P.). On notera les deux nuages moléculaires OMC 1 et OMC 2. Par ailleurs, les sources infrarouges sont nombreuses dans la nébulosité.

On voit de toute façon, et puisque la poussière absorbe inégalement toutes les longueurs d'onde, deux phénomènes complémentaires : l'un est l'affaiblissement des rayonnements visible et ultraviolet de l'étoile centrale, des étoiles centrales, par l'absorption circum ou interstellaire; l'autre est l'émission infrarouge par les régions circumstellaires. Un paramètre important est donc la masse circumstellaire impliquée dans ce processus : l'étoile centrale peut être soit à peine atténuée, soit, au contraire, complètement camouflée, et seule l'enveloppe qui l'entoure, véritable *cocon*, est alors observable — dans l'infrarouge bien entendu.

On pourra donc observer un nombre assez grand de types différents de sources infrarouges. Dans le diagramme de l'évolution stellaire, ce sont soit des étoiles jeunes, encore entourées de leur cocon, ou de ce qu'il en reste, parfois ténu, soit, au contraire, des étoiles vieilles, évoluées, et qui, après épuisement de l'hydrogène et de l'hélium central, subissent des phases d'instabilité, et éjectent dans l'espace des masses de matière. Et cela fait en vérité beaucoup de sources infrarouges dans la Galaxie !

### III

Le spectre des sources infrarouges apporte des renseignements sur leurs dimensions — comparées à celles de l'étoile — et sur leurs températures, la distribution des rayonnements admettant un maximum dont la position en longueur d'onde, et l'intensité, fournissent les renseignements désirés, à condition de les corriger préalablement de l'effet de la variation avec la longueur d'onde de l'absorption des poussières.

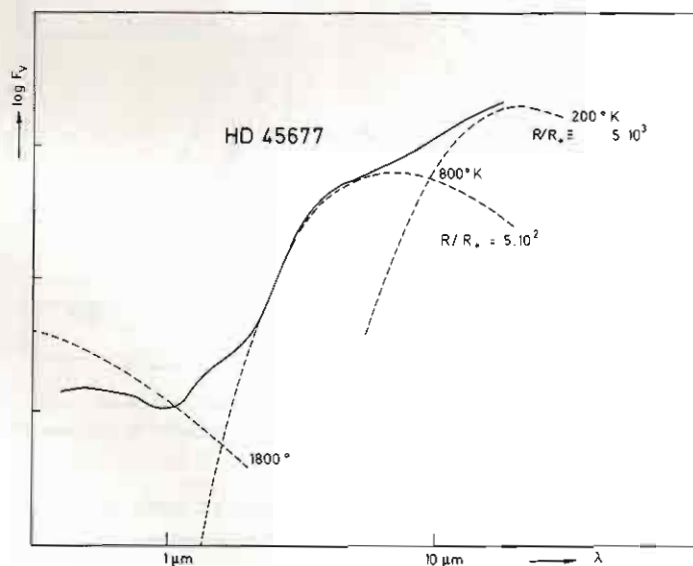


Fig. 6. — Spectre de l'étoile Be : HD 45677. — En abscisse, longueur d'onde en échelle logarithmique. En ordonnée, logarithme du flux par intervalle de fréquence. En tirets, spectre du corps noir dont les températures et les dimensions sont indiquées sur la figure.

Ainsi peut-on passer en revue quelques exemples typiques de ces objets qui peuplent la Galaxie.

Un cas bien connu, mais très complexe, est celui de la région d'Orion. La coexistence, qui s'y manifeste, d'étoiles jeunes et chaudes, de régions d'hydrogène ionisé (visible, —  $H_\alpha$  —, ultraviolet, radio), de poussières (infrarouge), de molécules (proche infrarouge et domaine millimétrique), est un phénomène remarquable *et très général*. On notera que la luminosité absolue infrarouge d'Orion, à 100 microns, est plus de 100 000 fois la luminosité totale du Soleil ! W3 est un complexe très jeune et peut-être encore plus excitant qu'Orion.

Un cas comme celui de HD 45677 est beaucoup plus simple : c'est une étoile B particulière, et l'enveloppe poussiéreuse y passe, dans la région la plus proche de l'étoile, d'environ 1 000 à 250 K à une distance dix fois plus grande.

Dans un autre cas d'étoile chaude, la région H II S140, la poussière est détectée, ainsi que l'émission de CO. Mais la température est seulement de l'ordre de 20 K.

Ces exemples concernent les régions circumstellaires d'étoiles jeunes et chaudes.

Parmi les étoiles froides, il en existe aussi de jeunes, encore en formation, et beaucoup moins massives que les étoiles chaudes dont nous avons parlé : c'est le cas de T Tauri, typique des étoiles en train de devenir des étoiles adultes, encore entourées de matière protostellaire, et qui manifestent une remarquable activité.

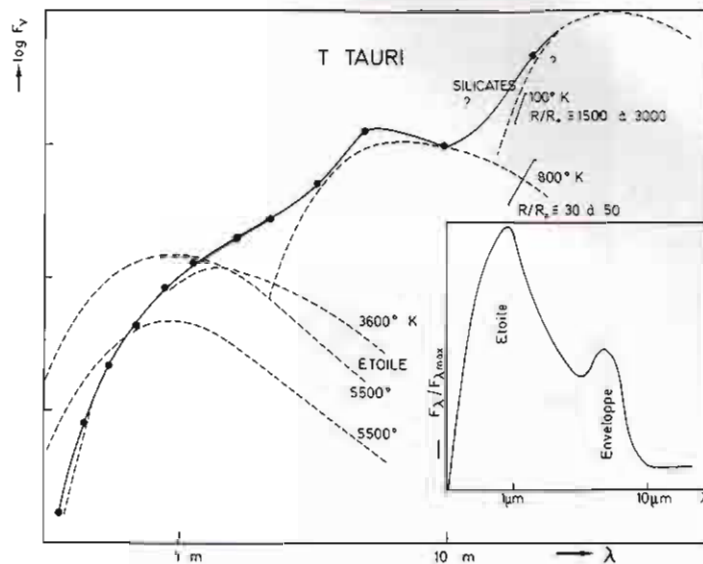


Fig. 7. — Spectre de l'étoile T Tauri. Symboles (voir fig. 6).  
Dans un encart, figure aussi la représentation du flux par intervalle de longueur d'onde.

Les objets vieux, supergéantes rouges par exemple, ont au contraire perdu tout ce nuage protostellaire primitif. Mais l'étoile n'est pas inerte pour autant, et l'évolution interne y déclenche des instabilités souvent violentes qui se manifestent en surface, et souvent mieux dans le domaine de l'infrarouge. Ainsi est-ce le cas de la variable, dont la température est de l'ordre de 6 000 K environ, qu'est la supergéante R Cor Bor. Les nuages éjectés par ces étoiles semblent riches en carbone et se condensent en nuages de poussières de graphite, de distribution assez irrégulière qui ne camouflent l'étoile que fort peu, et rarement, mais émettent du rayonnement infrarouge... Plus simples dans leur géométrie sont sans doute des objets comme NML Cygni, R Mon, ou VY Can Maj...

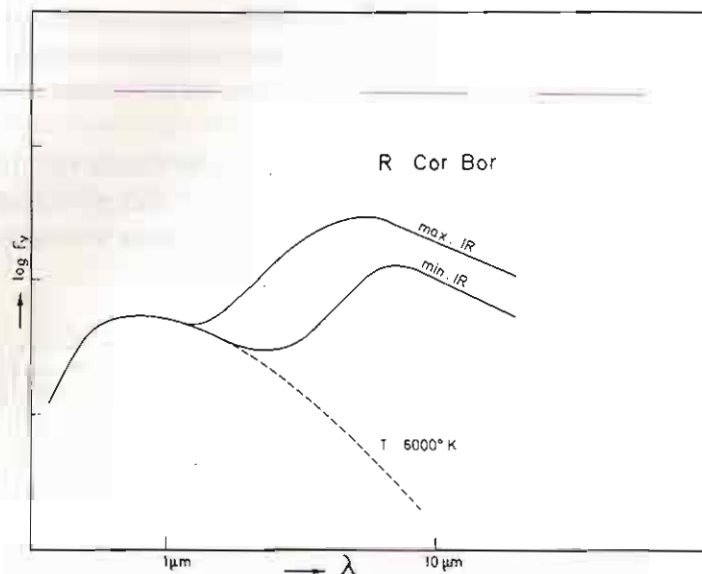


Fig. 8. — Spectre (variable) de R Cor Bor. Symboles (voir fig. 6)  
(d'après Forrest et coll.; Hartmann et Apruzese, 1976).

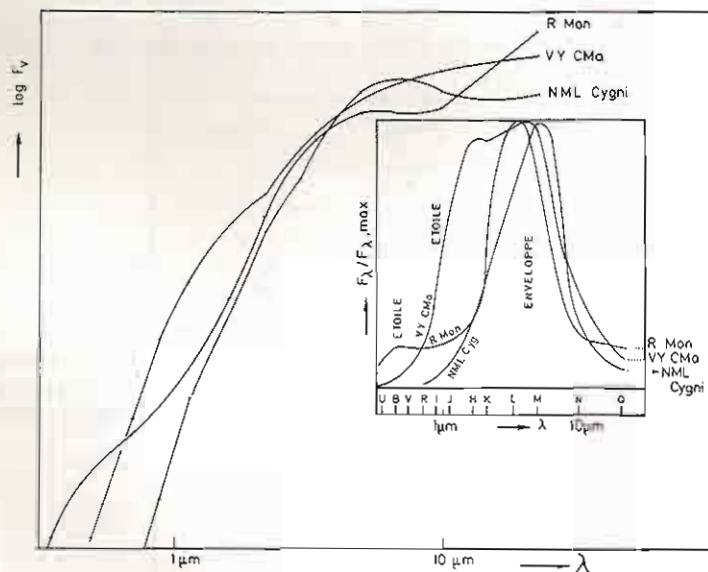


Fig. 9. — Spectres de trois supergéantes rouges. Symboles (voir fig. 6 et 7).

Cette exploration met en évidence dans le spectre des objets étudiés les bandes de l'eau (glace), des silicates (basiques sans doute : olivine plutôt que quartz), qui complètent celles du graphite mesurées dans l'ultraviolet (et qui semblent caractériser plutôt les étoiles âgées).

Ces objets vieux sont toutefois rares, et je crois nécessaire de revenir, pour y insister, sur le caractère de jeunesse de la plupart des sources infrarouges de la Galaxie. Si un volume de matière diffuse se condense en une étoile, il faut considérer deux temps caractéristiques : le temps d'effondrement de l'enveloppe d'une part, et d'autre part celui de formation de l'étoile qui commande aussi sa durée de vie le long de la série principale des étoiles; c'est lorsque le

temps de chute de l'enveloppe est de l'ordre de grandeur du temps de vie dans la série principale, que l'on peut espérer observer les poussières circumstellaires. Une proportion très importante des étoiles chaudes, une sur dix mille du côté des étoiles froides, sont des candidats à être des sources infrarouges.

La durée de vie des enveloppes poussiéreuses est en effet limitée (*fig. 10*) : les petites poussières sont chassées par la pression de rayonnement, les grosses poussières sont attirées, et détruites par évaporation; quant aux poussières de dimensions intermédiaires, elles ne résistent pas longtemps au bombardement érosif des protons...

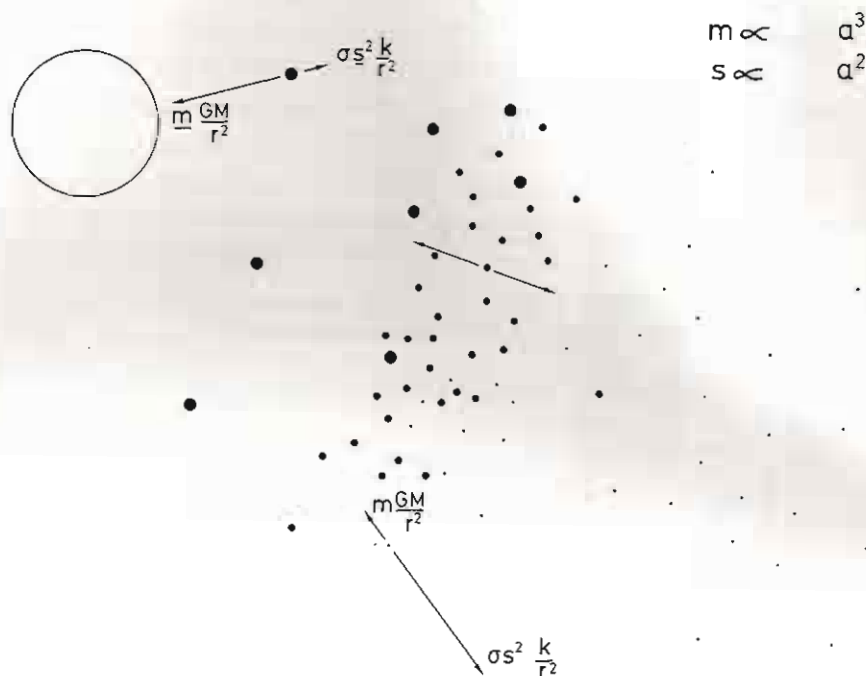


Fig. 10. — Durée de vie des enveloppes poussiéreuses. (*Voir texte*). Les symboles  $m, s, a$ , désignent respectivement la masse, la section efficace, le rayon des grains de poussière; les symboles  $r, M, G, k$ , désignent respectivement la distance du grain à l'étoile, la masse de l'étoile, la constante de Newton, et une constante physique appropriée caractérisant l'effet de la pression de radiation.

#### IV

Parmi les sources infrarouges les plus intéressantes figure le centre même de notre Galaxie.

Localisé dans la région du Sagittaire, le centre de la Galaxie est encore, malgré son âge (quelque dix milliards d'années au moins), une région fort active. Un nuage poussiéreux l'entoure, difficile à percer dans le visible, mais transparent dans le proche infrarouge (l'un des premiers bons clichés date de 1952 — Berthier, Bigay, Dufay, Texereau — et a été publié dans les *Comptes rendus* de l'Académie des Sciences), et émissif aux grandes longueurs d'onde, infrarouge lointain, ou ondes radio.

Le centre galactique, source infrarouge, source riche en molécules, source radio intense, est aussi la source de rayons gammas la plus importante du ciel : on voit que le bilan d'énergie doit faire appel à un autre domaine de la physique spatiale — la gamma-astronomie... Ceci

me fournit une transition du domaine infrarouge au domaine gamma. Le centre galactique (et un très petit nombre de sources gamma de notre Galaxie) ont été observés, à des énergies de photons dépassant 30 MeV (soit environ  $0,004 \text{ \AA}$ ). La source du rayonnement est principalement la transformation d'une particule  $\Pi^0$  en deux photons dans le milieu interstellaire, et le rayonnement de freinage des électrons. Les indications qu'on peut fort difficilement en déduire, semblent prouver une abondance de l'isotope  $^{13}\text{C}$  dans le centre de

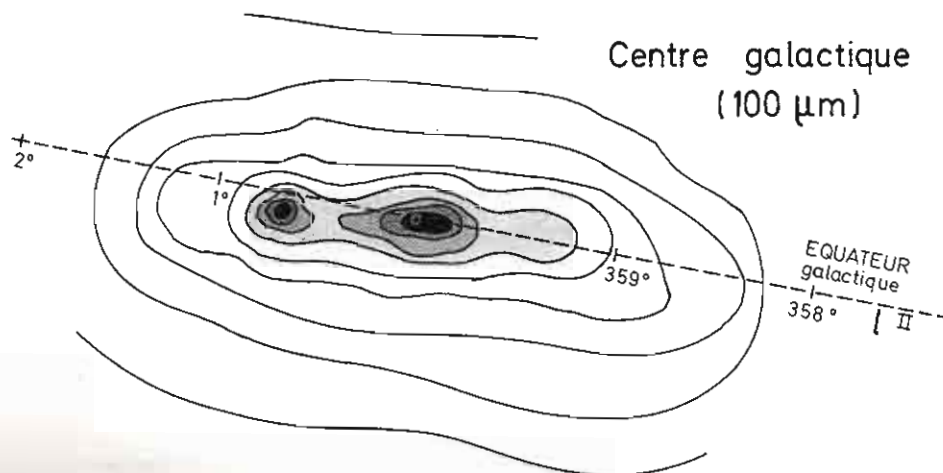


Fig. 11. — Le centre galactique observé à  $100 \mu$  (d'après Hoffmann et coll., 1971).

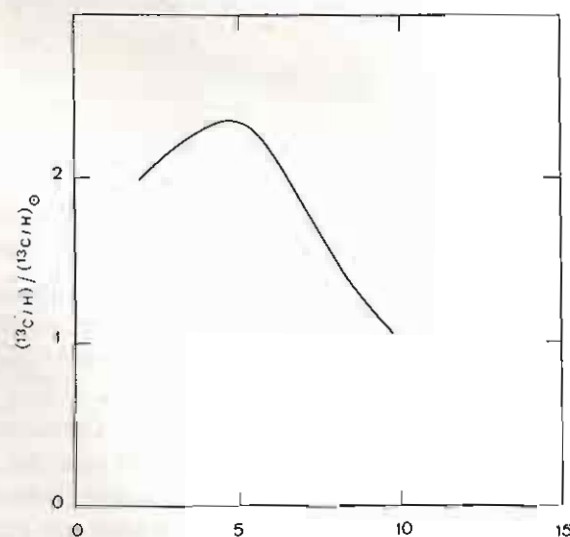


Fig. 12. — Variation de l'abondance de l'isotope  $^{13}\text{C}$  en fonction de la distance au centre galactique. En abscisse, distance au centre galactique, en kiloparsecs. En ordonnée, rapport de l'abondance relative du  $^{13}\text{C}$  à l'hydrogène au point considéré à la même abondance dans le Soleil (d'après Cesarsky et coll., 1977).

la Galaxie deux fois plus grande qu'au voisinage du Soleil, et cette indication peut avoir des conséquences sur l'évolution physicochimique de la Galaxie.

Dans le domaine X, dans le domaine ultraviolet, les découvertes, en dehors du centre galactique sont aussi très fondamentales et doivent permettre d'étudier le bilan d'énergie, les mécanismes d'évolution dans la Galaxie. Nous n'en parlerons pas plus, faute de temps.

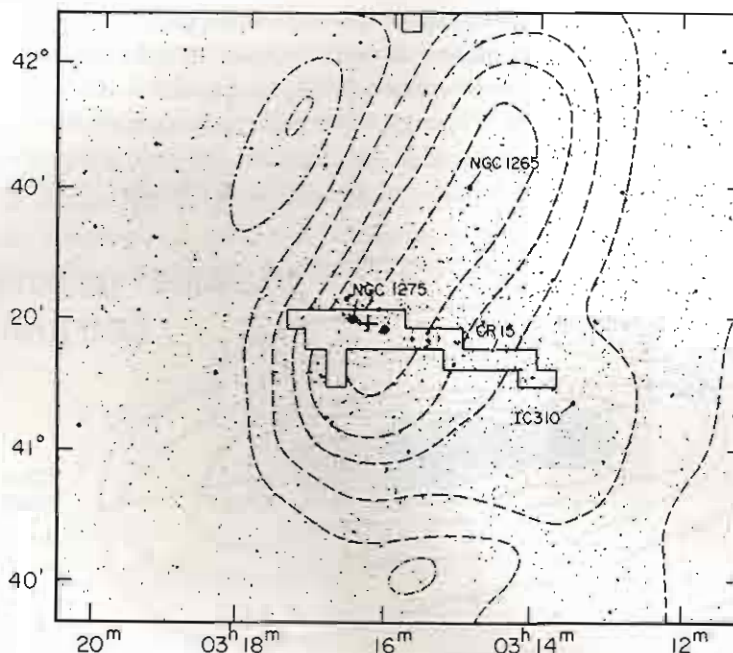


Fig. 13. — Étude en rayons X et en ondes radio de l'amas de galaxies de Persée. Le tracé en traits pleins délimite les régions émettrices de rayons X; les isophotes (en pointillé) représentent les observations radio de 3C 84 B à 408 MHz; les deux groupes d'observations sont superposés à une carte photographique dans le domaine visible. En abscisse, ascension droite; en ordonnée, déclinaison (d'après Cash et coll., 1976).

## V

Encore n'avons-nous parlé que de notre Galaxie. Mais gamma astronomie, astronomie ultraviolette et X, et astronomie infrarouge nous donnent, et pourront nous donner, d'utiles renseignements sur quelques galaxies extérieures. La figure 13 montre, par exemple, une étude en rayons X de l'amas de galaxies de Persée, et la figure 14 une galaxie gamma.

On sait en effet que les galaxies un peu anormales, celles notamment dont vous a parlé Gérard Wlérick, présentent souvent un excès d'ultraviolet et un excès d'infrarouge. L'excès d'ultraviolet n'est pas accessible encore aux engins spatiaux, faute de sensibilité; mais on peut le mesurer du sol dans le proche ultraviolet. Que ne pourra-t-on faire quand un télescope optique de dimension raisonnable sera en orbite, vers 1985 ? Certaines de ces sources sont cataloguées comme sources de rayons X; elles sont souvent aussi des sources infrarouges intenses. C'est le cas, par exemple, du quasar 3C 273, le quasar <sup>(1)</sup> le mieux connu. Ce fait souligne la ressemblance entre le centre actif de notre Galaxie, une galaxie normale, et les galaxies actives, quasars, galaxies de Seyfert, etc., et le rôle essentiel des poussières dans l'évolution galactique.

Et maintenant que ces techniques se développent, si activement, et laissent présager pour les années 80 de véritables mutations de la connaissance astronomique, notre pays est-il dans

(<sup>1</sup>) Nous adoptons l'orthographe « quasar » au singulier. Ceci est cependant contraire à l'étymologie. Quasars, comme QSS, est une abréviation de « *quasi stellar astronomical radio source* » dans le premier cas, de « *quasi stellar source* » dans le second, et pas seulement de l'adjectif quasi stellar, ou de quasistar, comme on le croit parfois. L'Académie des Sciences (Comité du langage scientifique) admet les deux orthographes.

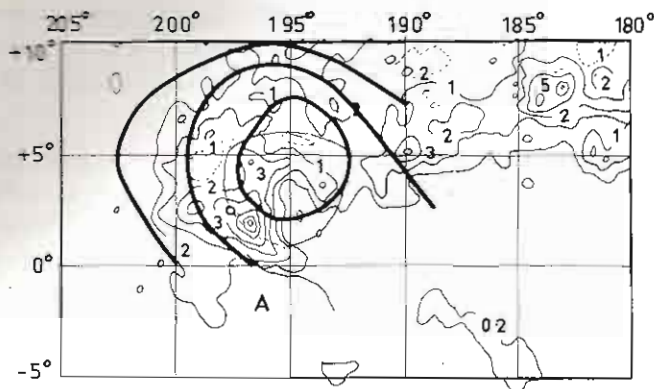


Fig. 14. — La galaxie de Simonson étudiée en rayons gamma (d'après Cesarsky et coll., 1976). En traits fins, isophotes radioastronomiques à 21 cm. En traits épais, isophotes dans le domaine des rayons gamma.

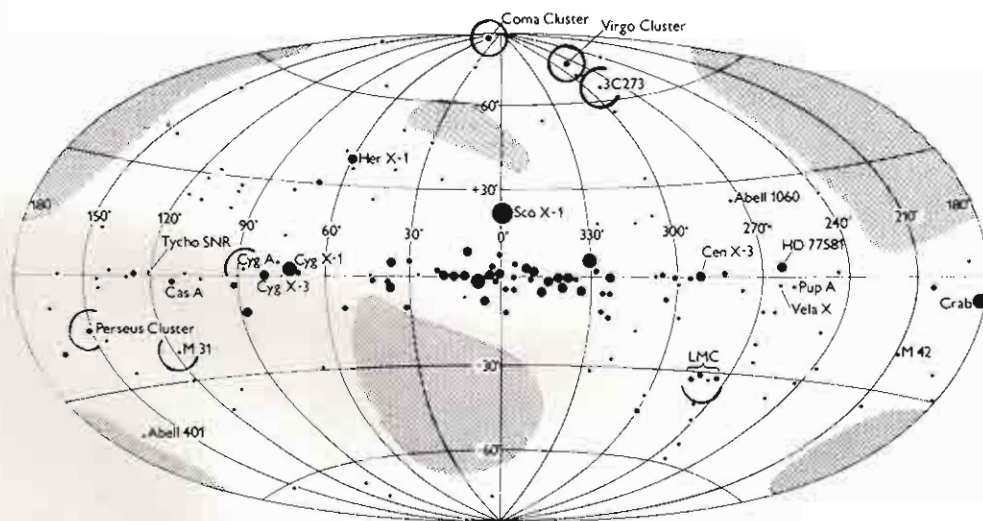


Fig. 15. — Carte des sources X observées par le satellite Uhuru. — Cette carte est tracée en coordonnées galactiques. Les points noirs montrent les positions des sources, et leur dimension correspond à l'éclat de la source. Entourées d'un cercle sont représentées quelques-unes des sources extragalactiques d'une importance particulière : galaxies proches (M 31, LMC), amas (Coma, Virgo, Persée), radiogalaxie (Cyg A), quasar (3C 273). La plupart des autres sources sont galactiques.

la course, comme dans le domaine de l'optique astronomique au sol, ou de la radioastronomie, ainsi que nous l'ont rappelé MM. Fehrenbach et Lequeux ?

Le C.N.E.S. a eu le mérite, depuis une quinzaine d'années, de favoriser l'étude quantitative de l'ultraviolet solaire — et ce d'une façon sûrement plus précise qu'en d'autres pays — et de l'ultraviolet stellaire; on a aussi entrepris l'étude par avion stratosphérique et par ballon, des sources infrarouges, qui complétait les études menées des observatoires de montagne. Mais il faut bien reconnaître que les moyens nécessaires pour explorer l'univers galactique ne sont que rarement à notre portée — en tout cas pas à la portée de la France seule. Des coopérations sont nécessaires et doivent se développer. Le moyen le plus efficace sera certainement la navette spatiale. Nous espérons pouvoir placer des expériences françaises sur le Spacelab, et sur les télescopes qu'il portera, ou que la navette libérera dans l'espace, comme

le « Large Telescope »; mais ceci n'est que pour d'ici quelques années seulement. D'ici là des instruments plus modestes, le satellite Copernicus de la N.A.S.A., ou les européens TD-1 et COS-B, ou encore le satellite anglo-européen I.U.E., ont accueilli et accueilleront de nombreux programmes français.

Nous espérons que l'avenir verra s'accroître, en France, les moyens accordés à ceux qui s'occupent, hors de toute application industrielle ou militaire, de connaître un peu mieux l'Univers invisible... — ou plutôt la fraction invisible, mais considérable, de l'Univers observable.