

INVITED DISCOURSES

L'ASTRONOMIE INFRAROUGE ET LES POUSSIÈRES GALACTIQUES.

Jean-Claude PECKER
Collège de France

ABSTRACT.

The existence, in the Galaxy, of small absorbing dust grains has been known for a long time, as they redden the light of stars located behind them, and obscure by amounts which can often even be several magnitudes... In the infrared, where absorption is smaller, one can see through the dust, while at the same time, one can observe the emission of cold dust clouds. After a brief review of technical developments, the reasons for studying the infrared, and the principles of diagnostics, are given. The analysis of the spectral features leads to identification of ice, graphite, and various silicates, as main constituents of the dust. In the fifth section, examples are given of the various sources that one meets when travelling in the Galaxy: protostars, cold and dilute, dense envelopes of young stars (cold or hot), dilute envelopes of not so young stars, and ejected clouds surrounding evolved objects... The simultaneous observation of dust, molecules and atoms, in the same regions, shows that the knowledge of the circumstellar dense regions might be of a great interest, in the study of the origin of life, and of the evolution of the Universe.

Les acteurs : D'un côté - la Galaxie, des milliards d'étoiles, plongées dans un milieu relativement dense de gaz neutre ou ionisé, d'atomes neutres ou d'ions, de molécules et de radicaux, de poussières de dimensions et de formes diverses - un milieu très irrégulier, des nuages, des nuées, des lambeaux parfois, un milieu opaque, presque impénétrable à l'oeil humain fixé vers la Voie Lactée. Et puis, au-delà de notre Galaxie, des milliards d'autres Galaxies, spirales, barrées, irrégulières, compactes, dif-fuses... plus nombreuses dans l'univers que les étoiles dans notre propre Galaxie.

De l'autre côté, l'homme, l'astronome, sur la petite Terre, grain de poussière elle-même, avec ses télescopes pas très grands et ses récepteurs limités, mais aussi avec son imagination créatrice et sa science de la Physique...

L'existence, dans notre Galaxie, de fines poussières absorbantes est connue, à vrai dire, depuis longtemps. Il suffit de regarder un peu... Ces poussières, entre une étoile et nous, en rougissent la lumière, tout comme le Soleil nous paraît plus rouge derrière les brumes du couchant. Quantitativement, l'indice de couleur de l'étoile (différence entre les magnitudes ultraviolette U et bleue B, ou bleue B et visuelle V) est plus élevé pour l'étoile rougie que ne l'indiquerait son spectre de raies; celui-ci fait conclure à une température stellaire supérieure à celle que l'on déduirait de la couleur. Le fait que l'absorption se traduise par un rougissement montre que l'opacité croît lorsque l'on se déplace vers le bleu: on peut donc espérer pénétrer mieux à travers les nuages de poussières, par des observations faites à de plus grandes longueurs d'onde. A l'extrême, cette absorption ne fait pas que rougir, c'est-à-dire affaiblir plus le bleu que le rouge: elle peut devenir si importante que le nuage de poussières est capable de camoufler tout l'espace derrière lui... Le pénétrera-t-on en parcourant le spectre depuis le visible vers l'infrarouge de plus en plus lointain?

I - LES TECHNIQUES

Aujourd'hui, le physicien et l'astrophysicien, pour effectuer ce parcours, ont à leur disposition la presque totalité des gammes de longueurs d'onde - entre les plus courtes, celles des rayons gamma, et les plus longues, celles des ondes kilométriques. Bien peu atteignent le sol directement. Et si l'infrarouge (en abrégé IR) couvre en gros la zone de longueurs d'onde allant d'un micron à un millimètre, on peut le diviser en deux régions distinctes: l'infrarouge proche qui utilise plusieurs "fenêtres" de l'atmosphère entre les bandes d'absorption de l'eau et du gaz carbonique, la dernière fenêtre largement utilisée se trouvant à 22 microns environ. Ce rayonnement peut s'observer du sol, de préférence en haute montagne. En revanche entre les fenêtres, et surtout entre 10 microns et 1 mm environ, c'est l'infrarouge lointain; il faut dépasser l'atmosphère; les ballons, même les avions, suffisent; mais bien sûr, si des satellites sont utilisables, ils permettront des périodes d'observation plus longues et plus suivies.

C'est en 1801 que William Hershell, en recevant les différentes parties du spectre solaire sur un thermomètre sensible, constata que la chaleur reçue n'atteint son maximum qu'au-delà de l'extrémité rouge du spectre visible; il

découvrait ainsi l'existence des radiations infrarouges, suspectées d'ailleurs déjà un siècle auparavant par Isaac Newton, et longtemps désignées sous le nom, un peu déroutant aujourd'hui, de "radiations calorifiques".

La véritable nature de ces "rayons calorifiques" ne pouvait pas être comprise de Hershell. C'était une erreur que de les désigner de l'épithète "calorifiques", alors que c'est la nature du récepteur, et non celle des rayons, qui les porte à s'échauffer. Mais cette erreur n'est-elle pas, elle aussi, dans une certaine mesure, très significative? Les astrophysiciens modernes en effet considèrent le rayonnement observé comme résultant d'une part des propriétés les plus profondes des objets qui rayonnent, d'autre part des avatars, absorptions, diffusions, subis par les photons sur leur parcours jusqu'à l'observateur. Plus mathématiquement, ils disent qu'un spectre est la convolution d'une "émissivité" par l'"opacité" et cette idée devra rester présente à notre esprit pendant notre voyage infrarouge dans la Galaxie.

Revenons donc à cette astronomie infrarouge, dans l'enfance au XIX^{ème} siècle.

Le premier récepteur sensible fut le tasimètre d'Edison dont il se servit lors d'une expédition d'éclipse au Wyoming, le 29 juillet 1878. Le tasimètre utilisait la dilatation d'un matériau absorbant la chaleur, un bâton de vulcanite, qui exerçait une pression sur un disque de carbone; le minime changement de résistance électrique du carbone sous cette pression était amplifié et mesuré. Edison avait réussi à rendre ce bricolage si efficace qu'il se mettait à saturer ses enregistrements si un fumeur de cigare se rapprochait, ne fut-ce qu'à quelques mètres! Mais Edison lui-même considérait l'instrument comme d'une "infinie délicatesse" et cela le condamna irrémédiablement.

Au lieu de mesurer une dilatation, phénomène en partie irréversible et dont l'utilisation était donc perturbée par des accidents, des déformations, des irrégularités, on pensa donc à mesurer la variation de résistance électrique produite par l'échauffement d'une pièce de platine noircie, absorbant par conséquent fortement toutes les radiations électromagnétiques, infrarouge compris, bien entendu. Ce fut le premier récepteur vraiment sensible, fidèle et fiable, celui-là, celui dont date, on peut le dire, l'astronomie infrarouge, le bolomètre de Langley (1881).

Depuis le bolomètre de Langley, les radiomètres, les piles thermoélectriques, jusqu'aux bolomètres modernes à germanium, éventuellement même dopé au gallium, les techniques des récepteurs ont évidemment beaucoup évolué. On utilise aussi actuellement, jusqu'à 25 microns environ, les dispositifs photoconducteurs : c'est la conductivité d'un

matériau qui dépend du flux de photons qu'il reçoit. La limitation de ces instruments, au-dessous de 5 microns, est due uniquement au bruit des photons reçus. Pour N photons, la précision de la mesure est alors proportionnelle à $1/\sqrt{N}$. Mais ceci implique que tout photon a, a priori, une probabilité unité, une certitude en somme, de faire réagir l'instrument. Au-delà de 5 microns, la limitation de la sensibilité, de la précision, reste due, quel que soit le récepteur, au bruit créé par l'environnement lui-même, environnement instrumental d'abord (mais on refroidit les récepteurs), environnement atmosphérique (on peut s'en affranchir en haute montagne, voire en avion), mais aussi environnement astrophysique, qu'il importe évidemment de ne pas négliger, et que l'on sait ne jamais pouvoir supprimer totalement.

En vérité, l'infrarouge, depuis les longueurs d'onde du visible (le rouge, vers 0.7 micron) jusqu'aux micro-ondes de la radioélectricité (vers 1 mm environ), est trop vaste pour que les techniques y soient partout les mêmes. Dans le proche infrarouge, la photographie peut encore être utilisée, au besoin en hypersensibilisant les plaques. Les difficultés commencent vers 2 microns; non seulement il faut faire évoluer le type de récepteur, mais l'optique cesse d'être idéale. A 2 microns, le verre cesse d'être transparent. A 3 microns, le quartz devient opaque; de 2.5 à 8 microns la fluorine peut être utilisée; de 7 à 14 microns, il faut des optiques en sel gemme, et la sylvine permet d'atteindre une vingtaine de microns...

Les optiques doivent donc plutôt utiliser des réflexions que des réfractions, et notamment dans les spectrographes. Le relais des spectrographes conventionnels par des spectrographes à Transformation de Fourier permet d'atteindre une très bonne résolution.

En même temps que croît la longueur d'onde, aux problèmes purement optiques se superposent d'ailleurs les problèmes astronomiques: la résolution angulaire d'un miroir télescopique de dimensions données est proportionnelle à la longueur d'onde. On conçoit qu'il faille utiliser de grands instruments si l'on veut des images fines. On conçoit que dans le domaine de l'IR lointain celui que seuls peuvent atteindre les engins satellisés extérieurs à l'atmosphère ou les avions de haute altitude, l'impossibilité pour l'instant, de très grands instruments limite beaucoup les performances. En revanche, on gagne du côté de la stabilité des images et de la diffusion par le ciel. Et la figure 1 représente finalement ce que l'on peut aujourd'hui espérer en résolution et en sensibilité dans les différentes régions de l'infrarouge.

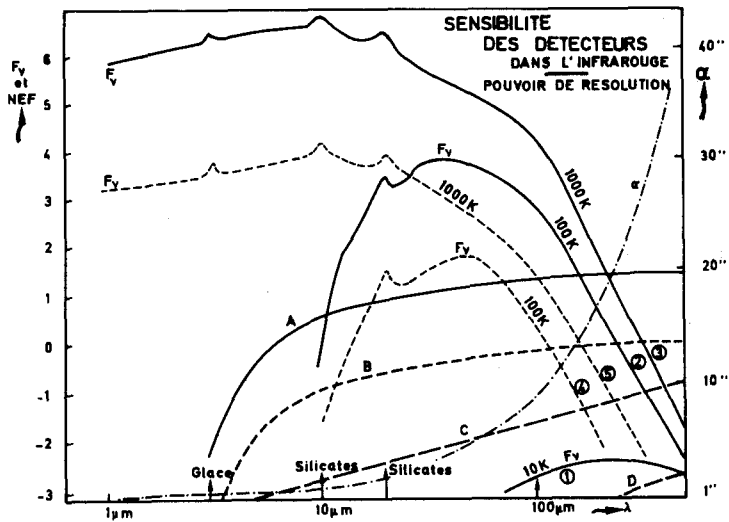


Figure 1. Sensibilité des détecteurs dans l'infrarouge;
pouvoir résolvant.

En abscisse, la longueur d'onde (échelle logarithmique); en ordonnée, le flux émis par une source (F_v) en unités de $10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ (ou en janskys), et le NEF (noise equivalent flux : flux équivalent au bruit, en janskys par $\text{Hz}^{-1/2}$); à droite, l'angle limite de résolution α en secondes d'arc.

1. Les courbes F_v , correspondent à deux sources :
 - (a) en traits pleins: source de 20" (ou 0.01 pc vue à 1000 pc), typique d'une région HII de densité moyenne ou d'un nuage moléculaire froid. Températures : 10, 100, 1000 K (courbes 1,2,3);
 - (b) en pointillé: source de 1" (ou 1000 unités astronomiques à 1000 pc), typique d'une proto-étoile au début d'une phase de contraction (courbes 4,5°.)

Les calculs ont été faits pour une valeur de l'extinction $A_V = 1$ dans le visible (même conditions que pour la figure 2; $N_H \sim 2.10^{21} \text{ atomes cm}^{-2}$).

2. Les courbes NEF correspondent au flux équivalent de bruit dans les conditions suivantes :
Temps d'intégration : 1s; télescope de 300 cm de diamètre; transmission instrumentale : 10%; bande spectrale mesurée: $\Delta\nu/\nu = 0.1$
Limite : bruit de photons de l'environnement thermique :
A : champ de 20" Environnement à 300 K (sol, avion, ballon)
B : champ de 1"

- C : champ quelconque Environnement à 4 K (conditions spatiales typiques à réaliser).
 D : champ quelconque Environnement à 1 K (conditions idéales).

3. Le pouvoir résolvant est α (représenté en ordonnée, échelle de droite). Le rayonnement d'une source varie comme β^2 (β , dimension angulaire de la source), le NEF comme β .

On notera que les sources froides (100 K) ne sont observables aisément qu'entre 10 et 100 μm ... Pour observer dans l'IR lointain il faut réduire considérablement la température de l'environnement thermique des récepteurs.

II - POURQUOI L'INFRAROUGE ?

Pourquoi donc utiliser l'infrarouge malgré ces difficultés techniques? Les raisons en sont nombreuses.

C'est dans l'infrarouge que peuvent s'observer de nombreuses transitions entre les niveaux d'énergie serrés des molécules simples : ceci est vrai aussi dans le domaine millimétrique ou centimétrique de la radioastronomie; mais si les techniques radioastronomiques ont permis de découvrir les dizaines de molécules interstellaires maintenant connues, associées aux poussières, c'est souvent aussi par l'infrarouge qu'on les étudie.

C'est dans l'infrarouge que les corps froids solides, comme les poussières - ou les planètes - rayonnent le plus. Mais ce rayonnement n'est pas le seul qui soit observable dans l'infrarouge : le rayonnement de freinage des électrons dans un gaz chaud, le rayonnement non-thermique dans un champ magnétique, sont d'autres exemples.

Mais deux faits déjà cités justifient à eux seuls la plongée dans l'infrarouge pour l'étude de la Galaxie: le rayonnement infrarouge émis par les poussières froides est intense, et cela seulement dans l'infrarouge, et la transparence des nuages poussiéreux est plus grande dans l'infrarouge que dans le domaine visible.

Dans une certaine mesure, cette opacité, dominante dans le domaine visible, est un peu la raison de l'émission dans le domaine infrarouge. Imaginons en effet une étoile entourée de poussières, plongée dans un bain absorbant, en quelque sorte. N'importe quelle étoile d'ailleurs, chaude ou froide, vieille ou jeune : pour l'instant, gardons-nous de supposer quoi que ce soit sur les raisons ou l'origine de cette association étrange. N'importe quelle étoile, dis-je, aura le même effet. Que se passera-t-il donc? Très clairement l'énergie rayonnée par l'étoile est absorbée en quelque sorte par le nuage poussiéreux, au moins en partie. Elle le chauffe, et, comme la poussière rayonne la chaleur reçue, un certain équilibre stationnaire pourra sans doute s'éta-

blir, que l'on nomme équilibre radiatif. La température devra s'équilibrer à une valeur qui dépend du degré de fragmentation des grains, de leur pouvoir absorbant, de leur distance à l'étoile. On peut donc imaginer que l'opacité du nuage de poussières dans le visible se traduit dans l'infrarouge par une émission qui compense exactement l'absorption et qui correspond à un corps noir d'un millier de degrés environ, peut-être un peu plus, peut-être un peu moins. Les deux propriétés des poussières sont donc en quelque sorte deux aspects, tout à fait complémentaires, d'une même réalité.

Bien entendu il ne faut peut-être pas prendre au pied de la lettre cette interprétation classique: si le rayonnement IR est du rayonnement visible converti, les nuages poussiéreux peuvent être discrets et, tout en rayonnant, ne pas absorber la lumière visible le long du rayon lumineux... Ou encore, d'autres sources d'énergie peuvent contribuer à l'échauffement des poussières: le rayonnement ultraviolet bien sûr, mais aussi les particules matérielles, protons, électrons, ou autres, voire l'énergie résultant d'une concentration gravitationnelle. Certains auteurs pensent même qu'à l'échelle de la Galaxie, ces sources d'énergie dominent largement; la luminosité déduite des étoiles observables serait nettement inférieure à la luminosité infrarouge de l'ensemble de la Galaxie.

Mais, dans le détail, ces exemples semblent assez rares. Si l'on porte sur un même diagramme la luminosité infrarouge de nombreuses régions HII étudiées, la luminosité des étoiles correspondant à la série principale d'âge zéro (ZAMS) et la luminosité correspondant au rayonnement Lyman alpha des mêmes étoiles, on voit une corrélation remarquable entre les deux premières valeurs: une très faible partie de l'énergie passe dans l'émission du gaz, une forte proportion au contraire est convertie en émission thermique des poussières; cela semble presque évident. Comme le rayonnement du gaz sert, lui aussi, à chauffer les poussières, c'est en définitive l'ensemble du rayonnement stellaire qui est converti en rayonnement infrarouge.

Absorption visible et émission infrarouge sont donc intimement liées.

Les lois de l'émissivité sont bien connues: ce sont celles des corps noirs, à des températures inférieures à la température de vaporisation des grains de poussières, de quelques dizaines de degrés à 1500 ou 2000 K environ; c'est dans l'infrarouge que cette émissivité est maximum. Elle conduit à une émission notable si les régions émissives ont une épaisseur, ou une opacité suffisante.

L'absorption est moins bien connue. Elle peut être déterminée à partir de la connaissance de la composition chimique des grains, de leurs dimensions, de leurs propriétés

physico-chimiques... Mais, dans le visible comme dans l'ultraviolet, l'étude du rougissement des étoiles conduit en tout cas à une évidente conclusion : l'opacité croît lorsqu'on se déplace vers le bleu. Dans le spectre visible couvert par les mesures usuelles, l'opacité varie comme l'inverse de la longueur d'onde. On voit que si une telle dépendance se maintenait dans l'infrarouge, une absorption d'environ 10 magnitudes à 5000 Å conduit à prévoir que, vers un micron, l'extinction ne sera plus que de 5 magnitudes et de 0.5 magnitude vers dix microns. En fait, ce calcul grossier est presque exact : une étoile très affaiblie dans le visible peut ne l'être qu'à peine dans l'infrarouge, même dans l'infrarouge relativement proche.

Regardons par exemple le centre de la Galaxie, région qui semble dans le domaine visible une partie plutôt banale de la Voie Lactée. C'est une zone du Sagittaire riche en étoiles - comme S Sagittarii ou 45 Ophiuchi - en amas stellaires, comme l'amas M6, en matière interstellaire bien évidemment. En réalité l'observation visuelle que nous faisons est faite dans la direction du centre galactique; mais nous n'observons pas ce centre lui-même! Vers 9000 Å de longueur d'onde, l'oeil de l'astronome est déjà plus perçant : la photographie infrarouge montre clairement les régions proches du centre. Le célèbre cliché (datant de 1952) de Bethier, Bigay, Dufay et Texereau était prophétique. A 2.2 microns, on ne peut plus utiliser, comme eux, la photographie et l'hypersensibilisation; mais on peut néanmoins obtenir (Neugebauer) des clichés remarquables où le centre galactique apparaît pour ce qu'il est : une région fortement émissive dans l'infrarouge, une région non camouflée par les nuages denses comme dans le visible. Le centre de la Galaxie est en vérité une région fascinante, symbole un peu de ce que nous trouverons dans toute la Galaxie, symbole aussi de ce que l'on peut observer au centre d'autres galaxies. C'est aussi une source radio, la source Sgr A, dont le rayonnement est non-thermique en ondes millimétriques et centimétriques et où sont détectées de très nombreuses molécules qui forment un nuage très massif (10^7 masses solaires peut-être), très complexe, en expansion rapide autour du centre et résultant de phénomènes actifs, peut-être explosifs, ayant naguère affecté cette région, véritable coeur galactique.

L'étude de l'ensemble de la Galaxie, autour de ce coeur, bénéficie des mesures IR, comme des mesures à 21 cm (hydrogène neutre) ou des mesures moléculaires : on retrouve, et on précise, la structure spirale. D'autre part le rapport de la masse de poussières et de gaz dans les nuages denses à celle entre les nuages semble très grand, ce qui peut faire évoluer nos idées sur la structure galactique.

En pénétrant vers le coeur galactique, nous traversons les régions poussiéreuses qui l'enserrent et nous découvrons

les plus chaudes d'entre elles; ainsi pouvons-nous nous enfoncer dans de nombreuses régions galactiques pour y découvrir des sources infrarouges auxquelles nous limiterons la suite de notre exposé.

Les objets que l'on peut observer dans l'infrarouge sont en vérité très nombreux. La littérature en est devenue si abondante que nous ne pouvons donner même un aperçu bibliographique (nous espérons que les auteurs voudront bien nous le pardonner). On peut distinguer plusieurs types de sources d'après leur position dans le "diagramme HR" ou, si l'on veut, d'après leurs caractéristiques évolutives.

A cet égard, l'âge, qu'il s'agisse d'étoiles froides ou chaudes, est peut-être le critère essentiel (figure 2). On peut imaginer comme suit (mais ce n'est pas la seule description concevable) la corrélation entre les nuages circumstellaires et le degré d'évolution. Il y a d'abord les objets très jeunes en contraction, étoiles non encore formées que sont les proto-étoiles; on n'a pas alors d'équilibre radiatif concevable; la source de l'énergie IR est l'énergie gravitationnelle qui se libère pendant la contraction.

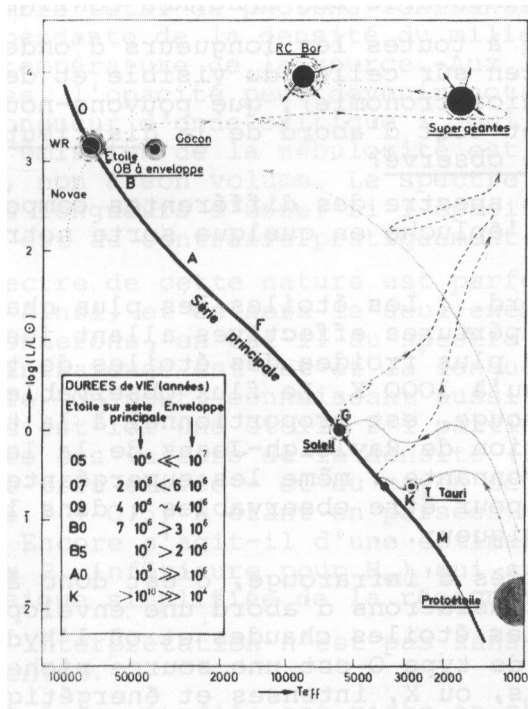


Figure 2 : Position des sources IR dans le diagramme HR.

Les trajets évolutifs sont représentés de façon schématique.

Les objets jeunes, mais déjà stellaires, peuvent être encore entourés de ce qu'il reste du nuage protostellaire; ce phénomène est rare pour les étoiles froides et très général pour les étoiles chaudes (la durée de vie de l'enveloppe étant alors plus longue que la durée de vie thermonucléaire de l'étoile adulte). Ces objets sont aussi des sources IR très nombreuses.

L'épaisseur du nuage absorbant étant sans doute un signe de jeunesse, on trouvera tous les intermédiaires depuis la proto-étoile, en passant par le cocon camouflant presque entièrement les étoiles incluses, jusqu'à l'étoile à peine affaiblie et entourée de son nuage.

Mais l'étoile évoluée, vieille (nova, supergéante) et qui sans doute éjecte des quantités de matière impressionnantes, est aussi une source IR d'un autre type; on doit peut-être s'attendre à ce que le rayonnement en soit différent de celui des objets jeunes; il s'agira peut-être même de poussières d'une autre nature.

Tout à l'heure nous donnerons, dans chaque cas, quelques exemples typiques pris entre des dizaines et des dizaines d'objets fascinants.

III - PRINCIPE DU DIAGNOSTIC DES SPECTRES CONTINUS.

Mais, ayant observé à toutes les longueurs d'onde possibles (et sans oublier bien sûr celles du visible et de l'UV comme celles de la radioastronomie), que pouvons-nous tirer de ces observations, et tout d'abord de la distribution d'énergie dans le spectre observé?

Considérons le spectre des différentes composantes de l'objet complexe qu'épluche en quelque sorte notre pénétration.

L'étoile d'abord... Les étoiles les plus chaudes, de type O, ont des températures effectives allant jusqu'à 50 000 K. Parmi les plus froides des étoiles de type M, on peut descendre jusqu'à 3000 K. Le flux observable de ces objets, dans l'infrarouge, est proportionnel à la température (c'est l'approximation de Rayleigh-Jeans de la loi de Planck) et à la surface rayonnante : même les supergéantes rayonnent trop peu dans l'IR pour être observables : dans l'infrarouge très proche, à la rigueur...

S'il y a un excès d'infrarouge, c'est donc à l'enveloppe qu'on le doit. Considérons d'abord une enveloppe gazeuse, celle qui entoure les étoiles chaudes et où l'hydrogène est ionisé. Une étoile de type O est une source riche en rayonnements ultraviolets, ou X, intenses et énergétiques. Ceux-ci peuvent ioniser, autour de l'étoile, une région d'une dimension assez grande (des parsecs, des centaines de parsecs):

c'est la "région HII". Les recombinaisons, au sein de la région HII, des électrons libres avec les protons, avec les ions plus lourds, donnent lieu à l'émission d'un rayonnement de recombinaison. Ainsi apparaissent toutes les raies de l'hydrogène en émission, notamment $H\alpha$. La mesure de ces raies de recombinaison, celles de certains ions de l'oxygène et de l'azote notamment, permet de déterminer les conditions physiques dans les régions HII : la température y est de l'ordre de 6000 à 10000 K; la densité y varie dans de larges limites, de 1 à 10 particules cm^{-3} dans les moins denses, 10000 ou même 100000 pour les très denses, plus encore parfois. La région HII rayonne dans le spectre entier. Aux grandes longueurs d'onde, ce rayonnement est dû aux transitions d'énergie entre deux états de l'électron libre, dû en somme au freinage de ces électrons : c'est le rayonnement dit de "bremstrahlung". Les photons énergétiques de l'ultraviolet se sont en quelque sorte dégradés en photons moins énergétiques, notamment en photons infrarouges.

Le spectre d'une région HII résulte, comme toujours, de la combinaison entre les propriétés émissives de la région, celles d'un corps noir, et ses propriétés absorbantes. Si la région HII est transparente dans l'IR, alors l'émission est proportionnelle au nombre total d'atomes ionisés, donc au nombre total de photons ionisants : elle sera, en gros, indépendante de la densité du milieu et ne dépendra que de la température de la source. Aux longueurs d'onde plus grandes, l'opacité peut devenir notable; à partir d'une certaine longueur d'onde critique λ_c qui, elle, dépend de la densité, l'émission de la nébulosité est proportionnelle à sa surface, non à son volume. Le spectre décroît alors vers les grandes longueurs d'onde; si l'opacité est assez faible, le spectre est au contraire pratiquement plat.

Un spectre de cette nature est parfois difficile à reconnaître. Ainsi, et ce sera le seul exemple de cette sorte que nous donnerons, en est-il du spectre de l'étoile ϕ Persei: l'excès d'infrarouge est net et la longueur d'onde critique bien visible. On peut, connaissant aussi le type de l'étoile centrale (c'est ici une étoile B 1 particulière) déduire de cette donnée les valeurs de la densité ($\log N_e = 10.1 \pm 0.5$) - en vérité très élevée - et du rayon de la région émissive ($\log R = -5.7 \pm 0.5$, R étant en parsecs) - naturellement assez petit. Encore s'agit-il d'une estimation limite (supérieure pour R , inférieure pour N_e) qui suppose une géométrie et une physique simplifiée de la région HII.

Cette interprétation n'est pas sans ambiguïté. Nous le verrons bientôt.

Si la région étudiée est riche en champs magnétiques, elle produira un rayonnement dont l'intensité croît vers les grandes longueurs d'onde, le rayonnement non-thermique dit

de "synchrotron", dû au freinage des électrons relativistes accélérés par le champ magnétique. L'émission du rayonnement synchrotron est, localement, très directive; elle a lieu dans un petit angle solide; mais certaines sources peuvent posséder des faisceaux d'électrons relativistes orientés en moyenne dans toutes les directions, et des champs magnétiques fort complexes; elles rayonnent donc aussi dans toutes les directions et sont observables. On observe des émissions de synchrotron dans le spectre des éruptions solaires. Elles caractérisent les radiosources issues d'une explosion de supernova, comme la radiosource du Crabe, Tau A. Le spectre radio des quasars est aussi dû au rayonnement de synchrotron.

En dehors du centre (Sgr A) et du Crabe (Tau A) peu de sources galactiques connues émettent du rayonnement non-thermique dans l'infrarouge; peu ont un spectre de bremsstrahlung. Les caractéristiques de ces spectres sont, le plus souvent, complètement camouflés par le spectre thermique des poussières solides localisées dans la source infrarouge.

On a dit que les photons UV d'une source chaude se "dégradaient" en photons visibles, et surtout infrarouges, de l'enveloppe gazeuse. A leur tour, ces photons, comme ceux issus de l'étoile et non encore dégradés, peuvent être absorbés par les poussières. C'est le cas notamment des photons encore énergétiques de la raie Ly α émise par les régions HII, ou même par la chromosphère des étoiles froides.

Et l'équilibre s'établit à peu près - un équilibre que nous avons désigné du nom d'équilibre radiatif. Les poussières convertissent à leur tour le rayonnement visible ou UV absorbé en rayonnement infrarouge. Et, la température d'équilibre se situant précisément dans les limites de quelques degrés à 1500° ou 2000° au plus, les régions IR ne rayonnent souvent que dans l'infrarouge.

Le diagnostic est évidemment simple en première approximation : les régions étant supposées opaques, la longueur d'onde maximum de la courbe spectrale fixe la température des poussières, et l'intensité le diamètre apparent de la région poussiéreuse (ou son diamètre réel, si l'on connaît la distance de l'objet).

Mais l'opacité en question, plus faible dans l'IR que dans le visible, n'est peut-être pas très grande. On voit alors facilement que la température de première approximation est une surestimation, et que les dimensions sont en général sous-estimées. La preuve de cette transparence est souvent dans la forme du spectre, plus abrupt que ne devrait l'être un spectre de corps noir. L'écart, par rapport au corps noir, peut aussi être dû à la juxtaposition dans le

spectre de l'effet de couches à différentes températures, ou de grains à différentes températures. Nous verrons quelques exemples de ces objets.

Souvent le spectre d'une région combine les émissions et les absorptions de plusieurs zones de propriétés physiques très différentes; le spectre qui en résulte est assez compliqué : les sources IR de différentes températures s'y manifestent par un spectre de corps noir qui apparaît presque comme une raie, ou plusieurs raies, d'émission flanquées de portions de spectres continus.

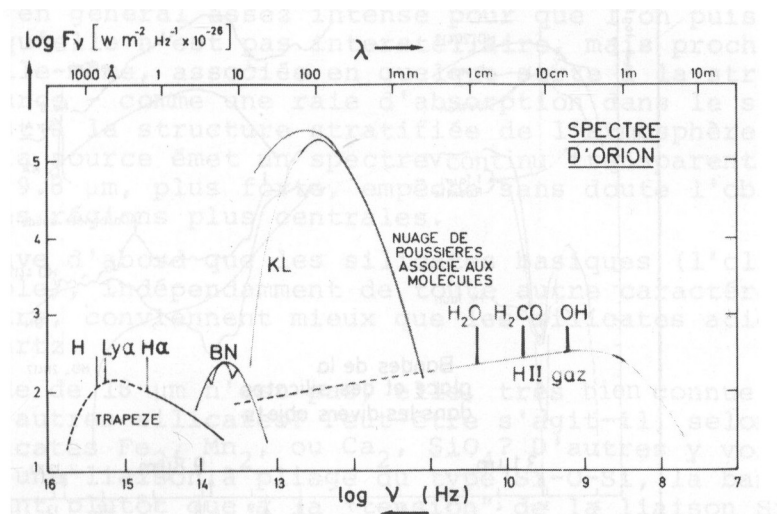


Figure 3 : Spectre d'Orion.

IV - LA NATURE ET L'OPACITE DES NUAGES DE POUSSIÈRES

Pour aller plus loin dans le diagnostic, il faut connaître l'opacité du nuage poussiéreux.

Or, si ces nuages sont transparents, ou presque, aux photons du spectre continu, ils peuvent en revanche être opaques dans certaines raies d'absorption ou d'émission, raies discrètes et caractéristiques de la composition chimique du milieu.

La spectrographie (à une résolution suffisante) permet donc d'apporter des éléments nouveaux et essentiels au diagnostic. Sans parler des caractéristiques nouvelles, nombreuses, du gaz ionisé (raies d'émission de l'argon III à

9.0 μm , du silicium IV à 10.5 μm , du néon II à 12.8 μm , du soufre II à 18.7 μm , de l'oxygène III à 88.2 μm) déjà observées, sans parler de celles dont l'observation est prévue (O III à 51.7 μm , C II à 156 μm) et que sans doute on trouvera bientôt, si ce n'est déjà fait, nous nous limiterons aux caractéristiques des poussières. A 2200 Å, on connaissait depuis longtemps, grâce aux observations dans l'UV, la "signature" du graphite. Non moins importante est la découverte, dans l'infrarouge, de celle de la glace froide à 3.07 μm et de celles des silicates à 9.8 μm et à 18 μm .

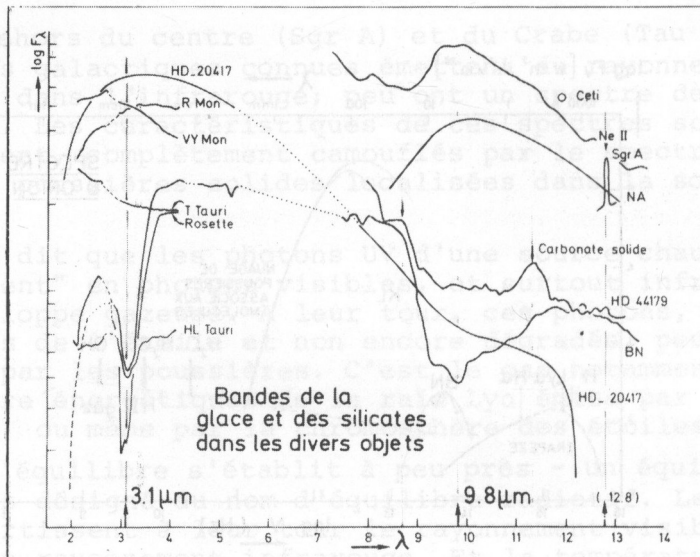


Figure 4 : Bandes de la glace et des silicates dans divers objets.

On remarquera que la bande de l'eau (3.1 μm) est présente dans certains cas et absente dans d'autres, que la bande des silicates (9.6 μm) est parfois en émission, parfois en absorption.

Les régions poussiéreuses ont aussi des spectres moléculaires, compléments de ceux qu'on observe dans le domaine millimétrique : à 2.36 μm , c'est l'oxyde de carbone CO, à 3.2 μm une autre bande due, peut-être, à C₂H...

Les bandes des silicates ont un intérêt particulier, car on peut les comparer aux spectres de laboratoire ou à des calculs.

La bande à 9.8 μm a donné lieu à bien des exégèses. N'est-on pas allé jusqu'à proposer des grains allongés de

polyoxyméthylène polymérisé, issus du formaldéhyde HCHO? Ceci avait l'avantage d'expliquer les phénomènes de polarisation linéaire, observés effectivement parfois, par des grains allongés et s'orientant dans le sens des lignes de force du champ magnétique.

Mais l'hypothèse des silicates semble avoir aujourd'hui plus de faveur... Seulement de quels types de silicates s'agit-il? Il existe de nombreux silicates connus sur la Terre ou sur la Lune !

Examinons d'un peu plus près cette bande.

On peut tout d'abord dire qu'elle apparaît souvent en absorption, plus rarement en émission; on peut dire ensuite qu'elle est en général assez intense pour que l'on puisse en inférer qu'elle n'est pas interstellaire, mais proche de la source elle-même, associée en quelque sorte à la structure de la source - comme une raie d'absorption dans le spectre solaire l'est à la structure stratifiée de l'atmosphère du Soleil. Si la source émet un spectre continu transparent, l'opacité à $9.8 \mu\text{m}$, plus forte, empêche sans doute l'observation de ses régions plus centrales.

On trouve d'abord que les silicates basiques (l'olivine par exemple), indépendamment de toute autre caractéristique du spectre, conviennent mieux que les silicates acides comme le quartz.

La bande de $18 \mu\text{m}$ n'est pas, elle, très bien connue. S'agit-il d'autres silicates? Peut-être s'agit-il, selon les uns, de silicates Fe_2 , Mn_2 , ou Ca_2 , SiO_4 ? D'autres y voient la marque d'une liaison à pliage du type Si-O-Si, la bande à $9.8 \mu\text{m}$ étant plutôt due à la "tension" de la liaison Si-O.

Mais la présence de la bande de la glace (vers $3.1 \mu\text{m}$) orienta surtout les chercheurs vers l'étude de grains "composites". Ces modèles avaient eu auparavant quelque succès dans l'étude de l'extinction visible et UV, les grains composites permettant de tenir compte des abondances atomiques dans le milieu interstellaire; on aboutissait à des grains de glace au centre desquels on pouvait imaginer un noyau de silicate. Les propriétés théoriques de tels grains reproduisaient bien certaines observations; certes ils n'étaient pas, peut-être, les seuls types possibles de grains, mais ce modèle n'en demeurerait pas moins très vraisemblable a priori. Ainsi a-t-on poussé très loin des calculs nombreux pour essayer de reproduire l'aspect essentiel des observations.

On notera qu'aux grandes longueurs d'onde de l'IR, l'émission des silicates seuls est proportionnelle à λ^{-3} , la présence d'une enveloppe de glace conduisant à une loi en λ^{-2} , ce qui conduit à une émission plus grande. L'observation confirme la nécessité d'avoir de tels grains... Mais il

est, hélas! certain que ceux-ci ne conviennent bien ni dans l'UV ni dans le visible! Ajoutons que l'utilisation des bandes du spectre conduit à des estimations, dans une hypothèse ou dans l'autre, de la masse des poussières responsables. Le rapport des masses de poussières à la masse du gaz peut être déterminé; il est de l'ordre de quelques pour cent, rarement plus de 1%.

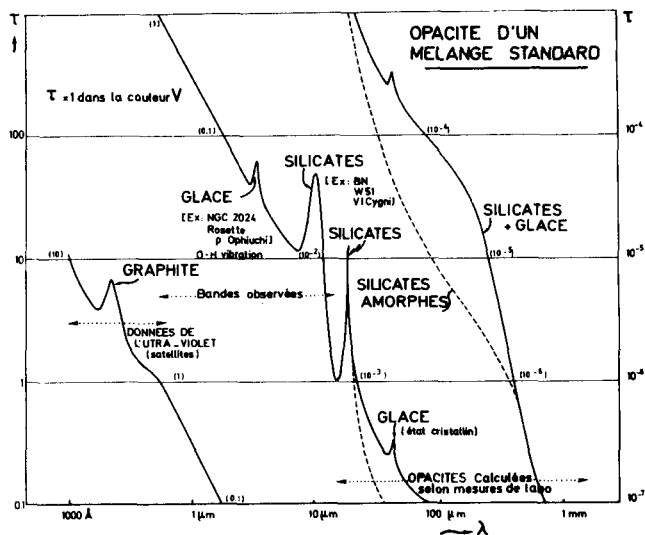


Figure 5 : L'opacité du milieu circumstellaire.

Courbes moyennes correspondant à l'absorption par un mélange de grains de graphite, silicates, avec ou sans glace. Trait plein : graphite, silicates et glace; trait pointillé: même mélange sans glace. En abscisse, longueur d'onde (échelle logarithmique); en ordonnée, profondeur optique (supposée, pour référence, égale à l'unité dans le visible) (échelle logarithmique).

Il faut aussi souligner que la complexité des mélanges de poussières est peut-être plus grande encore que nous ne l'avons laissé supposer. N'a-t-on pas observé que dans le spectre de certaines sources infrarouges, la polarisation à $9.8 \mu\text{m}$ est linéaire, celle vers $3.5 \mu\text{m}$ semblant au contraire circulaire? Cela voudrait-il dire que les grains de silicates sont allongés, mais que quelque source de polarisation circulaire jouerait aux plus courtes longueurs d'onde, et pas aux grandes? N'est-ce pas au contraire dû à ce que l'on

pénètre moins profondément dans le nuage à $9.8 \mu\text{m}$ (à cause de l'opacité des silicates) qu'à $3.5 \mu\text{m}$, où l'orientation des grains varierait le long de la ligne de visée? Le diagnostic est loin d'être évident!...

La connaissance des intensités des bandes de $3.1 \mu\text{m}$, $9.8 \mu\text{m}$, $18 \mu\text{m}$, etc. permet de connaître les rapports, dans les poussières, entre l'abondance des silicates et de la glace: l'analyse de la distribution d'énergie complète cette information et permet de déterminer mieux l'opacité des milieux interstellaire et circumstellaire (figure 5), et de compléter les méthodes de diagnostic dont nous avons décrit les principes.

V - QUELQUES SOURCES INFRAROUGES DE LA GALAXIE

A larges bandes spectrales, à haute résolution, en dressant des cartes, de nombreuses explorations systématiques du ciel infrarouge ont donc été faites.

La rapidité de ces explorations est en vérité fascinante. Prenons par exemple les régions HII. En 1971, trois d'entre elles (la nébuleuse d'Orion, M17 et M8) étaient connues comme sources infrarouges. En 1974, on en comptait plus de 50... Maintenant, ce nombre dépasse probablement la centaine... Bien que parfois on puisse observer le rayonnement de freinage des électrons, la règle - et ce fut un étonnement! - c'est que quasiment toutes les régions HII contiennent de la poussière, associée au gaz ionisé.

Très nombreuses sont donc les sources infrarouges cataloguées aujourd'hui. Commençons donc notre voyage par les régions jeunes, où se trouvent des étoiles de formation récente et où risquent de se trouver des étoiles non encore formées.

Nous ne donnerons que quelques exemples que nous essaierons de choisir parmi les plus typiques.

Prenons le cas d'une région comme Orion. La coexistence des régions HII (observées dans le visible - $H\alpha$, dans l'UV, dans le domaine radio), des poussières (observées dans l'IR), des molécules (observées dans le proche IR et dans le domaine radio), est véritablement un phénomène remarquable, et général. On peut le montrer grâce aux nombreuses cartes de ces régions, établies dans différents rayonnements, à différentes longueurs d'onde. L'association physique est dans l'ensemble évidente. Si la corrélation, dans le détail, n'est pas parfaite, c'est d'abord, évidemment, parce que des nuages absorbants, aux plus courtes longueurs d'onde, empêchent d'observer alors des caractéristiques bien visibles à de plus grandes longueurs d'onde. La corrélation des émissions observées serait sans nul doute meilleure si le nuage était transparent à toutes les longueurs d'onde! Mais alors il rayonnerait moins. Et son épaisseur optique est un

symptôme, une mesure même, de sa masse totale, de son importance réelle.

Parmi les plus intéressantes des molécules figure, on le sait, le radical oxhydrile OH, observable à 18 cm de longueur d'onde. Les 4 raies de OH ne peuvent être émises que par un effet maser, dû peut-être au rayonnement IR. Les régions responsables de ces émissions, associées donc presque toujours à une région émissive discrète dans l'IR, sont au contraire rarement associées à des structures observables dans le domaine visible.

L'ensemble de la nébuleuse d'Orion, à faible résolution, est étudiée vers 100 microns. Sa luminosité infrarouge, intégrée en surface comme sur le spectre, est remarquablement élevée : $1.6 \cdot 10^5$ fois la luminosité solaire environ! C'est bien à peu près la luminosité des étoiles O-B les plus brillantes qui y sont serties. On est proche de l'équilibre radiatif...

Le complexe d'Orion comprend plusieurs régions, toutes assez riches.

La région du Trapèze d'abord, étoiles brillantes de type O, sources intenses de rayonnement UV. On y trouve deux sources IR, la source de Ney-Allen (NA) et la source IRS4; NA a quelques secondes d'arc de diamètre, vue à 10 microns; IRS4 est ponctuelle. NA semble présenter la bande du silicate en émission; la température y est, peut-être, plus élevée.

Le groupe de sources IR, à une minute d'arc au Nord-Ouest du Trapèze comprend notamment les sources très intenses de Becklin-Neugebauer (BN) et Kleinmann-Low (KL). BN, l'une des sources IR les plus étudiées du ciel, semble une source de moins de 2 secondes d'arc, à $T \sim 500$ K; son rayonnement est fortement polarisé. La source KL, de 30 secondes d'arc de diamètre, a une structure : son noyau peut avoir environ 2 secondes d'arc. Il est de 200 K environ, tandis que la région extérieure est plus froide -130 K environ. Des sources quasi ponctuelles (ISR3, ISR2) appartiennent à ce complexe. Les sources des émissions OH et H₂O coïncident en gros avec cette région.

Ces deux groupes de sources IR dans Orion ont été assez bien étudiées.

Une autre région, parmi les plus intéressantes de l'extraordinaire complexe d'Orion, est la région, bien visible sur les clichés optiques, de la barre d'ionisation proche des étoiles du Trapèze, et plus encore de θ_2 A Ori. Les chercheurs du Californian Institute of Technology ont récemment mis en évidence qu'à cette région, à ce front, probablement vu de côté, par la tranche en quelque sorte, sont associées des poussières, à une température de 60 K seulement. Mais on observe aussi l'émission thermique de grains, sans doute

plus chaude (300 K), à laquelle se superposent, en trois régions limitées, des absorptions dues sans doute aux silicates (vers 9.5 et 12.5 μm), et en un point une émission large, proche de 9.8 μm . Cette augmentation abrupte, au voisinage de la barre, de la densité poussiéreuse, est peut-être due à l'effet de la compression du milieu extérieur par l'expansion de la zone ionisée. Celle-ci n'est pas encore en équilibre de pression avec la zone d'hydrogène neutre qui l'entoure: c'est un fait associé à la jeunesse de la région HII en question. A ce processus est sans doute associée aussi la raréfaction progressive des grains de poussières au sein des régions HII, puisque la température élevée, quelque 10000 K, tendra à les y vaporiser progressivement, cependant que le rayonnement tendra encore à repousser ces poussières, qui sont trop fines pour que les forces de gravitation l'emportent.

Il est fréquent que la région HII soit si riche en poussières (nous devrions dire sans doute: "si jeune") que les étoiles O brillantes à l'origine de son excitation soient quasiment invisibles: l'étude du spectre infrarouge, celle de la nébulosité HII, devraient permettre d'inférer la température de l'étoile en supposant l'équilibre radiatif réalisé. Mais ce n'est pas toujours aussi simple! En effet l'équilibre radiatif n'est pas toujours réalisé. Nous avons évoqué ce point en citant parmi les sources IR intéressantes le cas des proto-étoiles qui tirent l'énergie rayonnée dans l'IR de la contraction gravitationnelle: c'est, semble-t-il, le cas de la plupart des sources de la région Nord-Ouest d'Orion. En effet le flux observé dans l'IR devrait se traduire dans le visible (l'opacité étant déduite des bandes des silicates) par un rayonnement encore sensible... A vrai dire, le cas de la source BN est controversé: s'il nous paraît sans doute plus raisonnable d'y voir une proto-étoile de 5 masses solaires, certains pensent qu'il peut s'agir d'une supergéante camouflée et extrêmement brillante - un million de soleils! L'observation de la raie Brackett α est peut-être un test intéressant à utiliser.

Orion est un complexe très remarquable, où coexistent donc des régions circumstellaires, des étoiles en formation, des tourbillons de gaz, de poussières, de molécules... (figure 3).

D'autres exemples, moins complexes, peuvent peut-être mériter un temps d'arrêt. Bien des étoiles chaudes, de type O ou B, sont entourées d'une enveloppe circumstellaire relativement évoluée. Nous avons cité le cas de ϕ Per, interprétable sans poussières: il est possible aussi (c'est un exemple d'ambiguïté!) d'y voir des poussières assez chaudes -2400 K? C'est bien chaud... et la première hypothèse était peut-être la bonne.

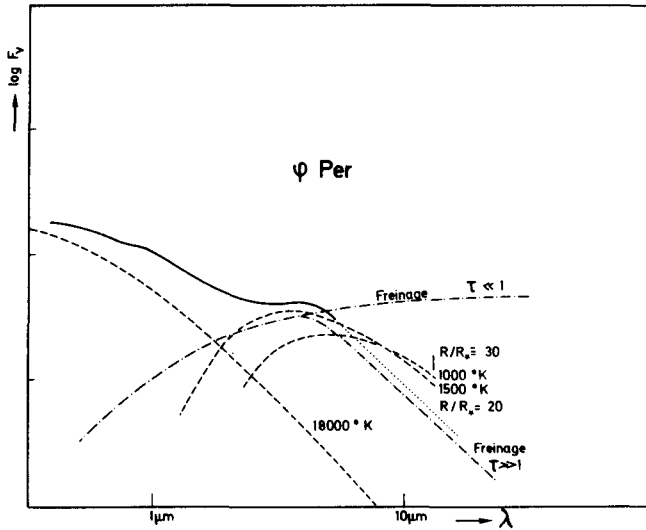


Figure 6 : Spectre de ϕ Per.

En abscisse, longueur d'onde (échelle logarithmique); en ordonnée, logarithme du flux par intervalle de fréquence; en tiret, spectre de corps noir; en trait mixte, rayonnement de freinage.

Un cas comme celui de HD 45677, également une étoile de type B, assez particulière, est assez remarquable: l'enveloppe circumstellaire y passe, dans la région la plus proche de l'étoile, d'une température de l'ordre de 1000 K à 250 K seulement à une distance dix fois plus grande (figure 7).

Prenons un autre objet, assez simple, Henize 938, une étoile de type Be, très rougie: on peut montrer que l'extinction dans le domaine visible est de l'ordre de 30, soit presque 4 magnitudes. L'équilibre radiatif est près de la vérité certainement. Et il s'agit là d'un cas banal... (Figure 8).

Autre exemple encore, et fascinant, celui de la région W3 (IC 1795).

La forme du spectre montre que l'opacité est faible, puisque la pente est plus rapide vers les petites longueurs d'onde que celle du corps noir: l'opacité peut s'en déduire, et sa variation avec λ ; cela montre qu'il s'agit de poussières de dimensions nettement plus faibles que la longueur d'onde. La source IR correspond à 270 K environ; mais la structure n'est pas simple: aux longueurs d'onde radio, les com-

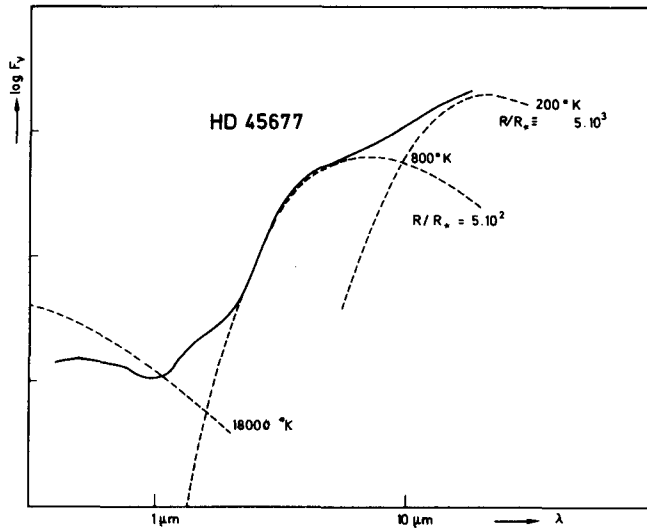


Figure 7 : Spectre de HD 45677; symboles: voir fig. 6.

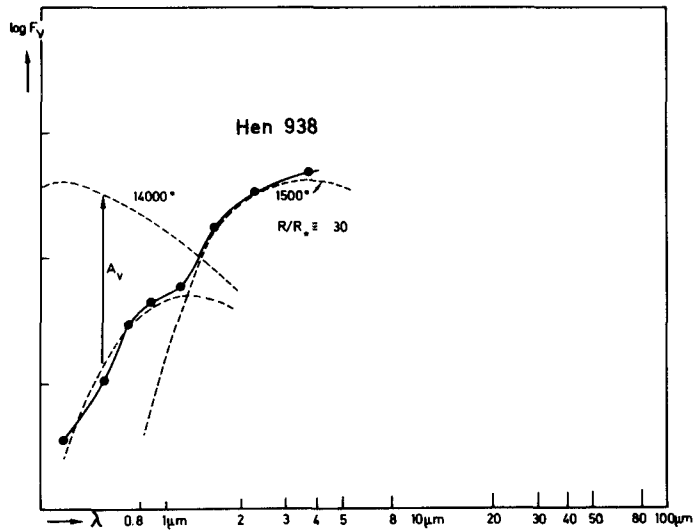


Figure 8 : Spectre de Hen 938; symboles: voir fig. 6.

On notera qu'il faut admettre une absorption importante dans le visible pour expliquer les observations.

posantes plus froides sont observables. La température y est de l'ordre de 50 K. La poussière s'étend fort loin des sources IR (détectées aux courtes longueurs d'onde). Il semble que la densité décroisse, à partir des noyaux de condensation, selon une loi en $\rho^{-1.5}$ ou ρ^{-2} - une loi qui correspond à ce qui se passerait au sein d'un nuage en train de s'effondrer.

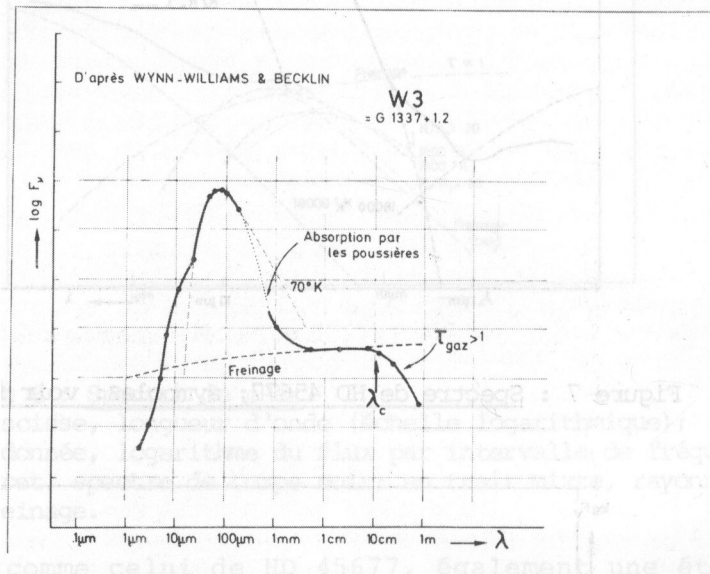


Figure 9 : Spectre de W3.

Au coeur de W3, plusieurs sources quasi-ponctuelles sont identifiées et confirment cette impression de grande jeunesse : IR2 est certainement une étoile brillante, très chaude, à la fois très rougie et très affaiblie par l'opacité de la poussière dans le domaine visible. Quand à IR5, ce serait peut-être l'un des points dans le ciel où nous pourrions bien saisir au vol un processus de condensation rapide, tant est énorme (beaucoup plus encore, semble-t-il, que dans le cas de la source BN d'Orion) la luminosité totale de l'objet.

Un exemple encore très remarquable est celui du nuage de la région de Ophiuchus, au voisinage de l'étoile ρ Oph. De telles régions constituent des complexes d'une nature différente de celle du complexe d'Orion. Il s'agit d'une nébulosité par réflexion. De nombreuses étoiles chaudes et de petites régions HII, observées par l'intermédiaire de leur émission en H α , sont noyées dans le nuage. La pénétration dans ce nuage, grâce à l'infrarouge, peut donc permettre, en principe, de déceler de nouvelles régions très jeunes et

de très jeunes étoiles. Or on y compte justement, à 2 microns, une cinquantaine de sources IR, dont certaines sont importantes - et sans doute cette exploration, complétée à d'autres longueurs d'onde (100 μm par exemple), n'est-elle pas encore tout à fait exhaustive! Ces objets sont sans doute des étoiles brillantes, mais l'obscurité produite par le nuage peut atteindre pour certaines d'entre elles, visibles, 10 à 15 magnitudes et, en certains autres points, au moins 30 magnitudes. Il s'agit d'un groupement d'étoiles très jeunes que l'étude spectrographique de l'un des objets suggère comme devant être des étoiles O et B en train, en quelque sorte, d'arriver sur la série principale. C'est une véritable association, analogue à celles que l'on connaît ailleurs, déjà dispersées, déjà débarrassées de la gangue de poussières où elles sont, ici, encore plongées. La densité de ce groupe semble être très grande - de plus de 20 étoiles par parsec cube - contre 6 et 7, respectivement, pour les Pléiades et pour l'amas h Persei.

Cette observation montre, il est intéressant de le noter, qu'un nuage obscur, ou prétendu tel, dans le domaine visible, peut véritablement regorger de sources de rayonnement UV et visible : leur action physique sur la poussière dense et épaisse est sûrement loin d'être négligeable. De plus l'estimation de l'extinction permet des évaluations étonnantes de la masse de tels nuages, compatibles d'ailleurs avec le nombre d'étoiles chaudes dont elles sont le berceau; il s'agit de milliers de masses solaires...! Incontestablement, on remonte là vers l'origine des amas, vers leur physique, vers une révision aussi des statistiques - étoiles, matière interstellaire, sources d'énergie - concernant la Galaxie.

Les étoiles que l'on a vues, entourées d'un nuage circumstellaire, avec une composante gazeuse et une composante poussiéreuse, ont en vérité une intéressante géométrie. Comme la rotation des corps célestes est liée à un aplatissement, on a songé à décrire certains de ces objets en envisageant un disque de poussières plus ou moins aplati. S'il s'agit d'une étoile chaude, le centre en est évidé par l'ionisation, comme c'est déjà visible sur les clichés bien connus d'objets comme la nébuleuse Rosette. Alors la forme du disque de poussières est plutôt celle d'un tore aplati : c'est peut-être le cas de la région HII Sharpless 106... Suivant que l'observation est faite de côté ou de face, l'étoile est plus ou moins obscurcie, dans le domaine visible, par les poussières. Ainsi avait-on suspecté que la variation de cette inclinaison pouvait être à l'origine de la dispersion des excès de couleur des étoiles d'amas jeunes comme NGC 2264.

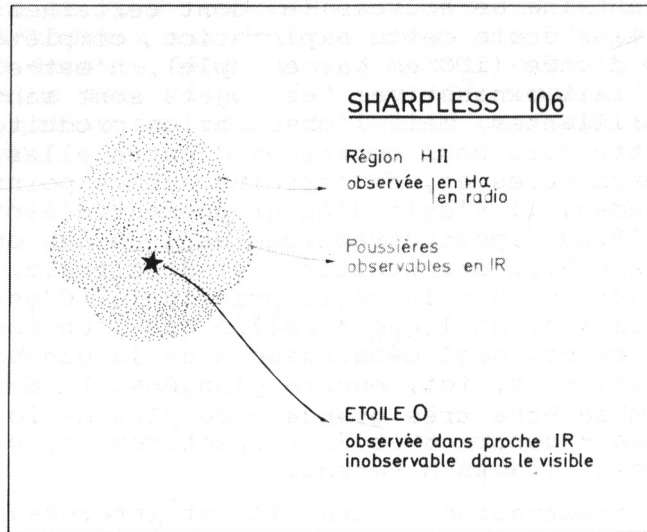


Figure 10 : La source IR Sharpless 106.

Les observations s'interprètent grâce à la combinaison de 3 régions : l'étoile O, la région HII, les poussières dont la distribution semble être toroïdale.

Il est intéressant de noter que si les nuages circumstellaires qui entourent les étoiles jeunes sont sans doute des résidus de l'époque protostellaire, il s'agit peut-être de nuages protoplanétaires. Le système solaire, bien appauvri maintenant en poussières fines, est un exemple de ce qui peut arriver à un tel nuage; et la distribution des masses planétaires y figure bien en gros celle d'un tore aplati...

Jusqu'ici, nous avons vu des objets jeunes, mais assez massifs, et correspondant, le cas échéant, à des étoiles chaudes. Venons-en aux étoiles froides.

Parmi elles, des étoiles jeunes, comme l'étoile T Tauri par exemple, de masse voisine de la masse solaire, et si typique de ces naines explosives dont on a tout lieu de croire que ce sont des étoiles si jeunes qu'elles sont encore en formation, pas encore sur la série principale des étoiles adultes. (Figure 11).

Des étoiles jeunes, on peut s'attendre à tout! La formation des enveloppes, progressivement moins riches en gaz, en poussières, passe par des stades où l'objet stellaire, déjà visible, est encore entouré de nuages épais.

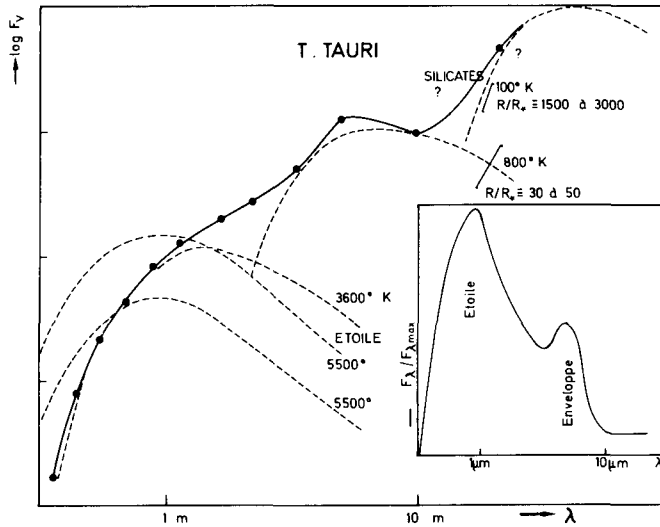


Figure 11 : Spectre de T Tauri; symboles: voir fig. 6. Dans un encart figure aussi la représentation du flux par unité de longueur d'onde en fonction de la longueur d'onde.

Mais que dire des objets plus vieux? Une supergéante rouge, par exemple, est une étoile massive évoluée. Elle a quitté la série principale, et sans doute toute trace du nuage protostellaire primitif, du chaos de poussières, de gaz, d'atomes et de molécules, antérieur à l'apparition du rayonnement, a-t-elle disparu... Mais l'étoile n'en est pas pour autant un objet inerte, et les phénomènes internes y déclenchent des instabilités souvent violentes, qui se manifestent en surface... et souvent mieux encore dans le domaine de l'infrarouge.

Prenons le cas, par exemple, de l'étoile R Coronae Borealis. C'est une étoile variable, irrégulière, bien connue, et depuis longtemps; son spectre, au maximum d'éclat, ressemble vaguement à celui d'une étoile supergéante de 5000 K environ, une GO I. Mais l'étoile peut perdre plusieurs magnitudes; au minimum d'éclat, son spectre d'absorption semble inchangé; des raies d'émission, du titane ionisé par exemple, apparaissent. Cette étoile semble riche en carbone: les bandes de la molécule C_2 y sont assez intenses. Or l'observation infrarouge, qui confirme bien évidemment la variabilité de ces objets, met en évidence une différence très nette entre maximum et minimum dans le spectre de l'émission infrarouge.

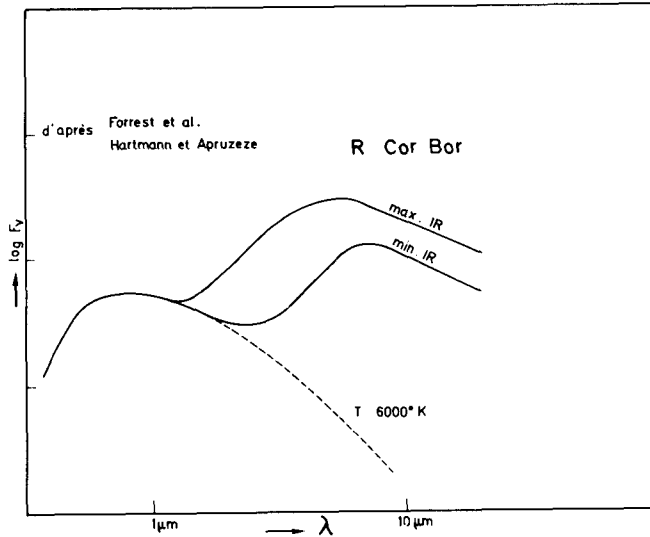


Figure 12 : Spectre de R Cor Bor; symboles: voir fig. 6.

Le diagnostic des observations dans l'infrarouge permet de montrer que les nuages éjectés, riches en carbone, se condensent en nuages de poussières de graphite. Ces nuages passent de temps en temps devant l'étoile, ce qui explique le manque de corrélation exacte entre l'émission IR et la magnitude visible : même si ces nuages ne passent pas devant le disque, ils émettent dans l'infrarouge. Des modèles utilisant le graphite comme absorbant principal donnent avec les observations une coïncidence remarquable. Au moment du maximum IR, c'est une sphère poussiéreuse d'environ 350 rayons stellaires ; au minimum, elle a près de 600 rayons stellaires. Dans les deux cas, on trouve la même masse totale de poussières, de l'ordre de $4.6 \cdot 10^{-7}$ masse solaire. En réalité, il ne s'agit pas d'une sphère homogène, mais d'une masse sphérique de nuages peut-être discrets, d'épaisseur optique 5 dans le visible. L'étoile est camouflée pendant 11% du temps; la poussière, formée à 300 rayons, est éjectée; elle atteint 600 km/sec et entraîne, dans ce mouvement, du gaz qui émet comme une nébulosité. Emise presque sphériquement, elle se tasse en une couche gazeuse diffuse, vide, l'éjection ne durant qu'un certain temps. Ce mécanisme permet d'estimer la perte de masse annuelle à 10^{-5} fois la masse solaire. Le spectre d'émission de la nébulosité gazeuse est renforcé, par contraste, quand le rayonnement proprement photosphérique est atténué par l'obscurcuration. Nous avons ainsi un modèle raisonnable, qui pourrait aussi représenter ce qui arrive dans le cas de l'explosion d'une nova...

Mais ce n'est pas le seul modèle possible. Ainsi les observations restent-elles compatibles avec un modèle où la poussière serait éjectée non par l'étoile, mais par un compagnon plus froid.

R Coronae Borealis est un exemple assez bizarre. Plus normaux sont sans doute les objets comme NML Cygni, R Monocerotis, VY Canis Majoris... Autour d'une étoile carbonée, froide, et ayant éjecté de la masse, les poussières de graphite se disposent en enveloppe. Souvent l'enveloppe est simple. Souvent aussi deux enveloppes sont présentes : c'est peut-être le cas de IRC + 10216; une enveloppe est à 600 K environ; une autre, à une distance 4 à 5 fois plus grande de l'étoile, est à une température d'environ 400 K.

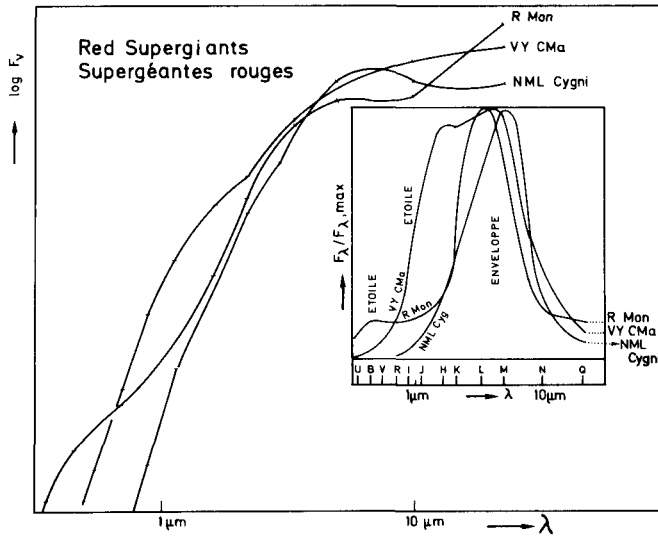


Figure 13 : Spectre de 3 supergéantes rouges; symboles: voir fig. 6 et 11.

VI - CONCLUSION

Mais ne poursuivons pas plus longtemps... J'espère avoir montré à la fois la richesse des observations et l'importance des diagnostics, aussi bien en ce qui concerne les objets jeunes qu'en ce qui concerne les étoiles évoluées. L'implication des découvertes infrarouges sur la connaissance de l'évolution de la vie stellaire, dans ses stades primitifs, ou avancés, est en vérité énorme. L'évolution, depuis les stades de formation jusqu'au stade actuel... Jusqu'au stade actuel et même plus loin, puisque nous avons

évoqué tout à l'heure la formation des planètes.

Et il faut bien dire que les techniques nouvelles, en étudiant les milieux froids de l'espace et les molécules souvent compliquées qui s'y forment, attirent notre attention, inévitablement, sur le problème de l'origine de la vie... Nous nous bornons aujourd'hui à l'évoquer. La coexistence entre le gaz (appauvri en éléments susceptibles de former des particules solides) et les poussières (graphite, silicates, glace) est en elle-même un problème fort intéressant. Quand l'équilibre s'est-il formé entre atomes, molécules gazeuses et grains solides, équilibre qui progressivement se détruit dans la formation stellaire?

Cet équilibre résulte de processus divers. D'un côté, l'équilibre entre atomes et molécules, au sein du gaz, implique des collisions de construction et des dissociations dues soit à des collisions, soit à un champ de rayonnement. Peu de molécules résistent bien soit aux élévations de température, soit au rayonnement : les liaisons sont de l'ordre de quelques électrons-volts. De toutes les molécules, les plus stables sont CO - énergie de dissociation : de l'ordre de 11 volts -, N_2 , C_2 , NO, et la plus abondante peut-être, observable dans l'ultraviolet, H_2 . Les oxydes comme SiO , TiO , ZrO , etc. sont également stables, mais moins abondants a priori, car la composition moyenne de l'ensemble du milieu interstellaire comporte, comme celle du Soleil, un nombre d'atomes par unité de volume qui, en première approximation, décroît avec la masse atomique.

D'un autre côté, atomes et molécules peuvent être adsorbés par des grains de poussières et sont donc, dans les régions périphériques de ces grains, susceptibles de réagir entre eux plus facilement peut-être que dans le gaz. Entre l'adsorption (souvent à l'état atomique) et de dégazage (souvent à l'état moléculaire), un certain équilibre ne s'établit peut-être en fait jamais.

Cet équilibre difficile est-il un fantôme des espaces intergalactiques, des temps protogalactiques? Les opinions sont partagées. Le milieu d'une galaxie en formation est-il assez chaud, comme la théorie usuelle de l'univers en expansion le prévoit? Alors il doit se refroidir avant la formation des molécules et des grains... Et il faut admettre un refroidissement très général pour expliquer que la majeure partie du gaz interstellaire soit presque complètement privée des atomes qui constituent les édifices moléculaires stables. Il n'est pas interdit d'imaginer qu'une protogalaxie très froide permettrait une meilleure compréhension des observations. Mais ces observations ont-elles valeur de généralité? Ne sont-elles pas limitées à certaines régions de la Galaxie? Des migrations de grains, de molécules... ne sont-elles pas possibles, dans le champ combiné et complexe

des forces de la gravitation et de celles qu'exerce la pression du rayonnement? Nous disposons certes d'éléments d'information. Mais la théorie des processus microscopiques et macroscopiques est encore balbutiante, et nous sommes loin de savoir tirer des informations existantes leurs conséquences sur l'évolution de la Galaxie dans son ensemble.

Ce n'est déjà pas si mal, me semble-t-il, d'être arrivé à préciser la structure et l'évolution des régions circumstellaires. L'environnement d'une étoile, d'un groupe d'étoiles, c'est le milieu où s'effectue la transition progressive entre deux physiques : la physique des intérieurs stellaires, physique d'une matière quasiment en équilibre thermodynamique et où il suffit presque de connaître la température pour qu'une description complète en soit possible - et la physique du milieu très dilué qu'est l'espace interstellaire où la dégénérescence qu'implique l'équilibre n'existe pas, où les propriétés ne peuvent être décrites qu'à l'aide de nombreux paramètres d'état. Entre les deux, une vaste zone de transition : c'est là que se fait la physique même qui commande les observations de l'astrophysique... Dans ces régions où la densité passe des valeurs stellaires aux valeurs interstellaires - une dizaine d'ordres de grandeur plus faible! - aux confins des condensations, les énergies se convertissent les unes dans les autres, les particules s'accélèrent, les photons se dégradent... C'est là que s'amplifient les flux de masse et les ondes mécaniques, ou que s'éteignent les effondrements - dans un magma chaotique et splendide... Quelle physique y appliquer, sinon une physique loin de l'équilibre? Ces études pourraient être la source d'une nouvelle thermodynamique où la notion de processus irréversible serait, à coup sûr, bien différente de celle qu'utilise la thermodynamique théorique des milieux proches de l'équilibre.

D'aucuns nous reprocheront, à ce point de notre exposé, de nous lancer dans d'imprécises extrapolations lyriques... La vérité de l'exploration infrarouge se suffit en effet à elle-même. Voici quelques années, la Galaxie n'était en somme qu'une famille aplatie d'étoiles quasi-ponctuelles. Quelques milliards de points lumineux perdus dans l'immense vacuité d'un volume de mille milliards de parsecs! Entre les étoiles, presque rien : seuls des nuages visibles mais rares, un certain rougissement des étoiles lointaines, montraient que le milieu galactique n'était pas le vide absolu. Peu à peu, grâce à l'astronomie spatiale ultraviolette, à la radioastronomie, à 21 cm ou dans le domaine des ondes millimétriques ou centimétriques, à l'astronomie infrarouge enfin, menée depuis les observatoires de montagne, les ballons, les avions, les satellites,... ce monde vide s'est peu à peu rempli. Les étoiles sont noyées, enveloppées, embrumées, éteintes par des masses diffuses, cocons cotonneux d'objets

jeunes, ou déjections d'astres instables et mourants... Mélange de gaz chauds et froids, de grains solides ou de poussières de taille variée, de molécules issues de ces grains, ou de matériaux susceptibles de les former. Milieu dense, épais, où l'on ne saurait s'étonner de trouver des planètes nombreuses, poussières parmi les plus grosses, et la Vie, et nous-mêmes... Et tout cela en évolution permanente, incessante, confuse. Ce qui était poussière retourne à la poussière : la protogalaxie en formation aboutira à une galaxie déchue et morte. D'autres galaxies se formeront dans les débris sans doute... Et il ne s'agit sans doute là que d'une boucle magnifique, mais infime, d'une Evolution universelle, où les galaxies comme la nôtre se comptent par milliards...

INDICATIONS BIBLIOGRAPHIQUES

Il a paru nécessaire de renoncer à une bibliographie exhaustive et même à une bibliographie des travaux évoqués dans le texte, tant sont nombreuses les références utiles. Je renverrai cependant à quelques articles de revue récents.

- Neugebauer, G., Becklin, E., Hyland, A.R. : 1971, Infrared sources of radiation, *Ann.Rev.Astron.Astrophys.* 9, 67.
- Pecker, J.-C., 1972, Données de l'observation et de la théorie et prévisions concernant les spectres (IR et ondes ultracourtes) des étoiles normales et particulières de type peu avancé, *Mém.Soc.R.Sci.Liège*, 6ème série, 3, 243.
- Pecker, J.-C. : 1976, The O-complex : the O stars and their gas-dust circumstellar medium, *Mém.Soc.R.Sci.Liège*, 6ème série, 9, 319.
- Stein, W.A. : 1975, Recent revelations of infrared astronomy, *Publ.astron.Soc.Pacific*, 87, 5.
- Wynn-Williams, C.G., Becklin, E.E. : 1974, Infrared emission from HII regions, *Publ.astron.Soc.Pacific*, 86, 5.

Je tiens à remercier très vivement tous les collègues qui m'ont aidé dans ce travail, principalement le Dr. G.Neugebauer pour communication de documents inédits, ainsi que Messieurs P.Léna, qui m'a considérablement aidé à la réalisation des figures, J.P.Baluteau pour communication avant publication de ses travaux récents, et R.Kandel pour d'utiles discussions.

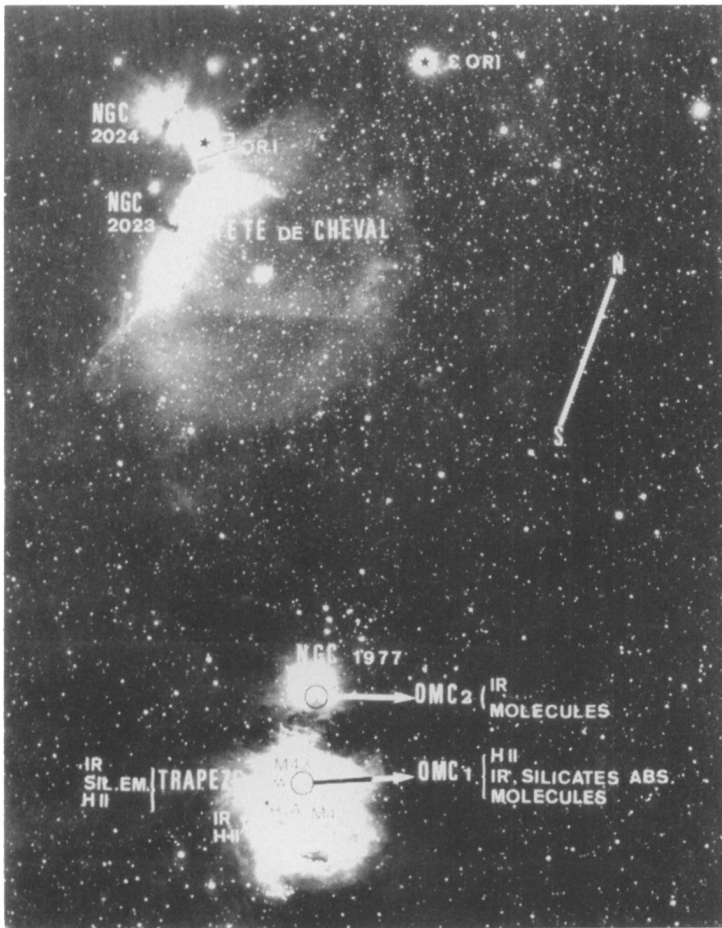


Figure 14 : Une région particulièrement riche : la région d'Orion (cliché O.H.P.).

On a indiqué sur ce cliché la position des principales caractéristiques des régions nébuleuses d'Orion.