

L'univer, dis-moi ce que c'est? : Épisode 23 : les poussières interstellaires, 1re partie

Autor(en): **Barblan, Fabio**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen
Gesellschaft**

Band (Jahr): **63 (2005)**

Heft 327

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-897747>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

L'Univers, dis-moi ce que c'est?

FABIO BARBLAN

Episode 23: Les poussières interstellaires, 1^{re} partie

Introduction

L'observation du ciel nocturne ne laisse nullement supposer l'existence de grandes quantités de petites particules solides dispersées dans le milieu interstellaire. Lorsque W. HERSCHEL établit au 18^e siècle son catalogue stellaire, il remarqua des régions particulièrement pauvres en étoiles. Ces régions constituaient pour Herschel des zones où la population stellaire était, réellement, moins dense que dans l'immédiat voisinage. C'est seulement au cours du 20^e siècle que l'on a commencé à suspecter que ces «trous» étaient en fait des portions du ciel soumise à un fort obscurcissement. La première évidence de l'existence de la matière interstellaire est due à l'astronome R. J. TRUMPLER (1886-1956) en 1930. Lors de la mesure de la distance d'amas stellaires effectuée par deux méthodes indépendantes (la luminosité apparente de l'amas et son diamètre apparent) Trumpler n'obtint pas les mêmes résultats. De plus, il constata que les distances déterminées par la première méthode étaient systématiquement plus grandes que celles obtenues par la deuxième méthode. Il en conclut que l'espace entre la terre et les objets mesurés n'était pas vide. Depuis, l'espace interstellaire s'est peuplé d'une multitude «d'objets»: les gaz interstellaires, les nuages moléculaires, les poussières interstellaires etc. et l'astronomie de l'espace interstellaire n'a cessé de progresser. La minéralogie a été une des premières branches des sciences de la Terre à développer une filière cosmique. Elle est concernée par tous les solides de l'espace qui sont accessibles aux techniques minéralogiques. Dans les premières modélisations des nuages de poussières, les astrophysiciens ont admis que les grains étaient constitués de minéraux ressemblant à ceux du système solaire. Pendant les années 1950-1960, un changement de décor radical est intervenu et la modélisation s'est faite autour des grains de «glace» de toute espèce. Les matériaux réfractaires comme le graphite et les silicates (Figure 7) n'ont fait leur apparition, dans les modèles, qu'au courant de la décennie 1960-1970. L'observation directe de la bande de vibration du radical

SiO₄, dans les nuages de poussières, a confirmé cette hypothèse. En 1996-98, ISO (Infrared Space Observatory) a fait la découverte surprenante de bandes spectrales correspondant à des silicates cristallins.

L'importance des poussières interstellaires en astronomie est énorme malgré le fait qu'elles ne représentent qu'environ un pour cent (en masse) du milieu interstellaire.

Elles affectent le flux de radiations à travers l'espace d'une manière infiniment plus efficace que les gaz. Leur pouvoir d'absorption est nettement plus important et représentent des sources de rayonnement infrarouge de loin plus puissantes que les gaz. De plus, elles interviennent dans les processus de formation des molécules.

Généralement, poussières et gaz cohabitent, et ont donc une interaction réciproque souvent non négligeable. Mais leur comportement physique face à la lumière et leurs propriétés physiques intrinsèques sont suffisamment différentes pour pouvoir séparer distinctement la contribution de chacun de ces deux composants du milieu interstellaire. On peut poser un certain nombre de questions fondamentales concernant ces poussières interstellaires:

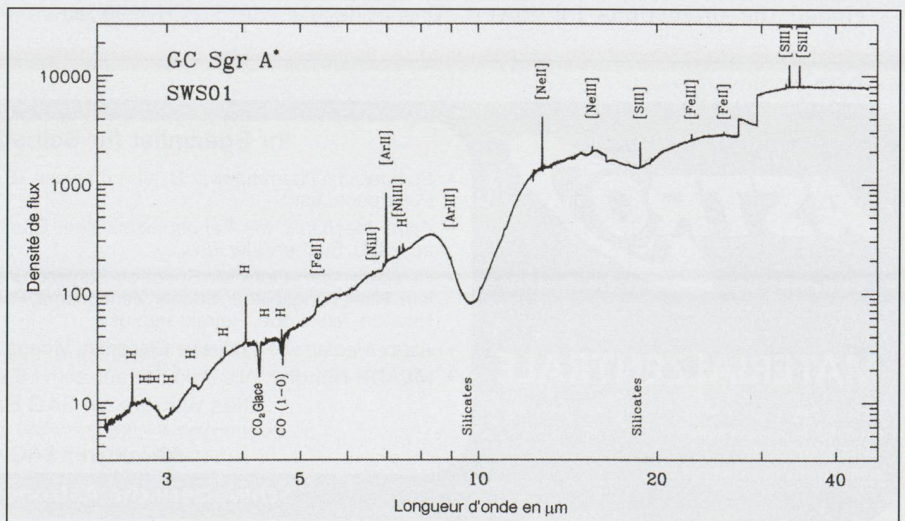
- D'où viennent-elles? Les poussières comme le nom l'indique, pour petites qu'elles soient, sont des grains de matière solide. Or, il ne faut pas oublier que si les étoiles éjectent de la matière celle-ci se trouve à une température telle que tout est à l'état de gaz. La formation des grains de poussière ne se fait donc pas dans le milieu stellaire proprement dit.
- Quelle est leur taille, forme, composition chimique, charge électrique, température etc. ...?
- Quel est ou sont le/les mécanisme(s) de croissance?
- Peuvent-elles être détruites?

Sans compter évidemment l'interrogation de base «par quels moyens d'observation» les astronomes obtiennent-ils des informations sur ces poussières interstellaires? Nous allons essayer de développer quelques éléments de réponse à ces questions.

Il y a deux possibilités pour l'observation directe des grains de poussière: la spectroscopie infrarouge et la diffusion de la lumière stellaire par les grains de poussière.

On pourrait aussi citer comme preuve indirecte de leur existence le fait que l'on constate que le gaz interstellaire ne reproduit pas l'abondance (standard) des éléments mesurés dans les étoiles. En effet, on remarque que certains éléments sont sous-représentés dans le gaz interstellaire par rapport à leur abondance dans les étoiles (Figure 6). Une façon possible d'interpréter cette diminution est effectivement de penser que ces matériaux sont à la base des grains de poussière solides interstellaires.

Figure 7: Ce schéma donne le spectre infrarouge du centre de notre galaxie entre 2.4 mm et 45 mm pris avec le spectromètre à courtes longueurs d'onde de ISO. On y décèle des zones de forte absorption due aux grains de poussière à 3 mm (glace d'eau), 9.7 mm et 18 mm dues à des silicates. (Source [3]).



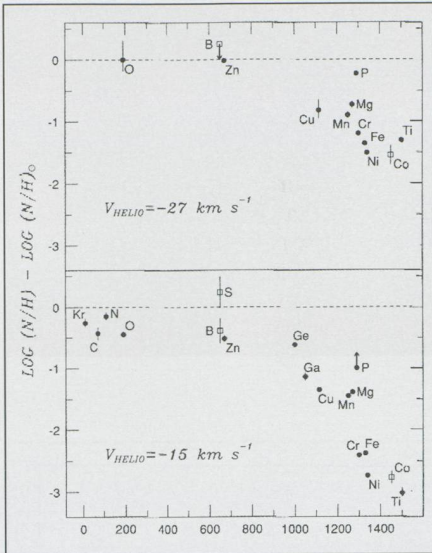


Figure 6: Ce schéma montre l'abondance par rapport à l'hydrogène, des éléments de deux nuages interstellaires dans la direction de z Oph comparée à celle du soleil. Si l'abondance est la même, l'élément se trouve sur la ligne horizontale pointillée. Si l'élément se trouve en dessous de cette ligne, cela signifie que son abondance dans le nuage est plus faible que dans le soleil. On constate que pour la grande majorité des éléments, l'abondance dans les nuages est quelque fois largement inférieure à l'abondance solaire. Cette déplétion peut partiellement correspondre à la formation de grains de poussière. (Source [3]).

L'absorption et la diffusion de la lumière stellaire par les grains de poussière

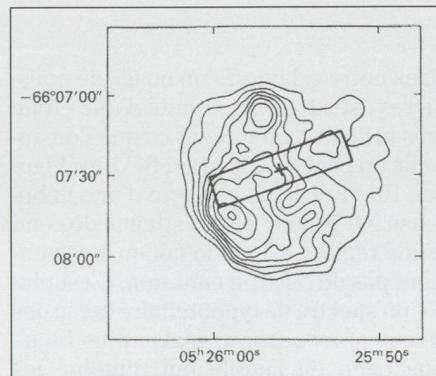
L'absorption et la diffusion de la lumière stellaire par les grains de poussière sont les deux phénomènes physiques qui permettent une observation directe de ces derniers. Le fait qu'il y ait absorption ou diffusion de la lumière n'est qu'une question de dimension, forme et composition chimique du grain de poussière ainsi que de la longueur d'onde du rayonnement. Dans le visible, il y a approximativement équipartition entre les deux phénomènes. C'est-à-dire qu'une moitié de la lumière est absorbée et l'autre moitié est diffusée.

B1) L'absorption

L'absorption de la lumière visible ou ultraviolette, par les poussières, provoque automatiquement l'échauffement de celles-ci. La température d'équilibre d'un nuage de poussières est déterminé par la balance entre la quantité d'énergie absorbée et la quantité d'énergie émise sous forme de rayonnement infrarouge. Les poussières chauffées sont de loin les sources de rayonnement infrarouge les plus répandues que les astro-

nomes aient trouvées. Le spectre émis est un spectre continu dont le maximum d'émission dépend de la température des poussières. Il y a plusieurs mécanismes possibles pour l'échauffement des grains de poussière. Le principal reste évidemment le rayonnement stellaire, mais, dans certains cas, la collision avec des ions ou des électrons d'un gaz à très haute vitesse peut être efficace. Il faut toutefois que le gaz se trouve à une température de plusieurs millions de degrés pour contribuer efficacement à l'échauffement des grains de poussière. A ces températures, le gaz émet automatiquement des rayons X. Le satellite IRAS (Infrared Astronomy Satellite) a justement mis en évidence une zone à émission infrarouge enrobée dans une région émettant des rayons X d'un rémanent de supernova (Figure 8). Ce qui semble donc bien confirmer que des gaz à très haute température peuvent échauffer des grains de poussière. Un troisième mécanisme est l'échauffement par réaction chimique exothermique à la surface des grains. Comme par exemple la formation de molécules d'hydrogène H_2 . Pour que cette réaction puisse exister deux conditions doivent être remplies. Premièrement, il faut qu'un atome d'hydrogène (du gaz) reste «collé» à la surface du grain pendant un laps de temps suffisant pour que un deuxième atome d'hydrogène vienne le rejoindre. Et deuxièmement, que le grain de poussière possède une certaine température minimale. Si ces deux conditions sont satisfaites la réaction $H + H = H_2$ peut avoir lieu. Cette réaction étant exothermique elle libère une certaine quantité d'énergie dont une partie peut servir à l'échauffement du grain de poussière.

Figure 8: Les contours indiquent l'émission en rayons X des restes de l'explosion de la supernova N 49 dans le grand nuage de Magellan. Le rectangle indique la position de la source infrarouge détectée par le satellite IRAS. Cette découverte confirme l'existence d'un mécanisme d'échauffement des grains de poussière par un gaz à très haute température. (Source [2]).



L'émission infrarouge par les poussières peut être également utilisée pour découvrir l'existence de disque de poussières circumstellaires (Figure 9) qui peuvent être à l'origine de la création de planètes. Les situations représentées par les étoiles μ Cep (Figure 4) et IRC+10216 sont des modèles types de ce genre de phénomène.

Les étoiles de masse faible à intermédiaire perdent une large partie de leur masse initiale lorsque, dans leur évolution, elles atteignent la branche dite «asymptotique des géantes» (voir le diagramme de Hertzsprung-Russel). Pendant cette période de perte de masse une vaste enveloppe circumstellaire composée de poussières et de molécules se forme. L'étoile CW Leo (IRC+10216)¹ est l'exemple le mieux connu d'une étoile évoluée ayant une enveloppe circumstellaire optiquement «épaisse». Elle perd selon les dernières estimations $3.5 \cdot 10^{-5}$ masses solaires par an ($\sim 7 \cdot 10^{22}$ tonnes par an). Il a été possible d'observer ces poussières à cause de la lumière diffusée des étoiles de champ. Les poussières existent par tout dans cette enveloppe, de la photosphère de l'étoile jusqu'à une distance de 3 pc de celle-ci. La masse actuelle totale de ce nuage circumstellaire est estimée à trois masses solaires et la proportion de poussières par rapport au gaz est de 4 pour mille. Les parties les plus internes de l'enveloppe sont optiquement opaques; cela est dû à une forte absorption par le carbure de silicium SiC. Une modélisation, qui permet de rendre compte de toutes les données d'observation et en particulier l'interprétation correcte des bandes spectrales observées à $11.3 \mu m$ $27 \mu m$, prévoit en plus des grains de SiC des grains de carbone amorphe enrobés dans une fine couche de sulfure ($[Mg_{0.5}Fe_{0.5}S]$).

B2) La diffusion

Les poussières interstellaires peuvent aussi diffuser la lumière. Lorsqu'il y a diffusion, c'est en fait la lumière de l'étoile elle-même qui nous parvient, mais par des chemins détournés et après avoir changé très souvent de direction. La dernière diffusion qui envoie la lumière dans notre direction semble donner au nuage de poussières sa propre brillance. La lumière diffusée représente le quart de la lumière que l'on voit

¹ CW Leo est une étoile riche en carbone située à une distance de 150 pc.

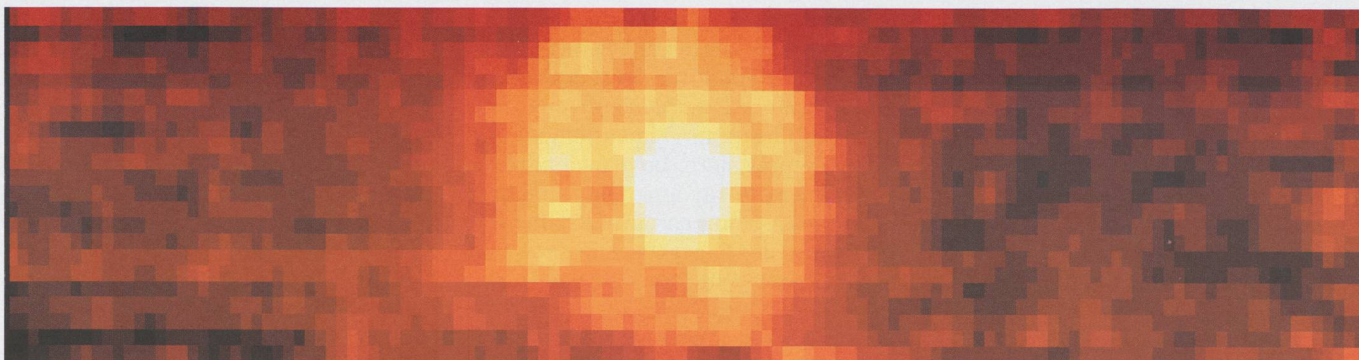


Figure 9: Image, prise par ISO, d'un nuage de poussières entourant l'étoile à carbone Y CVn.



Figure 10: Neuf des plus spectaculaires nébuleuses par réflexion sont assemblées dans cette image. Sur la première ligne, on trouve: NGC 1977 dans Orion, IC2118 (la Tête de Sorcière) et M78 aussi dans Orion. La deuxième ligne montre M20 la nébuleuse Trifide, NGC 2264 dans la Licorne et IC405. Et pour terminer, sur la dernière ligne, on trouve NGC 2023, NGC 7023 (la nébuleuse de l'Iris) et l'étoile Mérope dans NGC 1435.

Figure 11: Nébuleuse par réflexion dans la constellation d'Ophiuchus



Figure 12: Les étoiles de la Pléiades entourées de nébuleuses par réflexion.

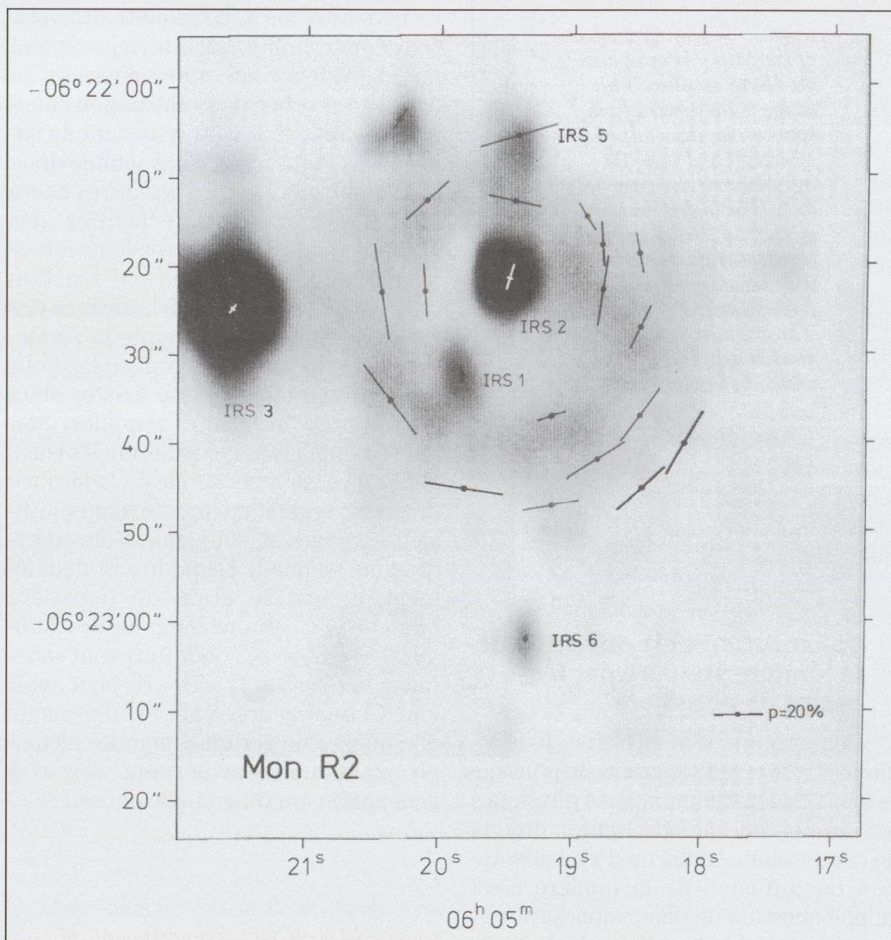


Figure 5: Cette image représente la nébuleuse R2 dans la constellation de la Licorne à la longueur d'onde de 2.2 mm. Les points sombres indiquent les régions de plus forte émission infrarouge. Les traits noirs indiquent la direction de polarisation du rayonnement infrarouge dû à la diffusion de la lumière par des particules de poussière. La configuration en cercles de la direction de polarisation indique clairement que la source illuminatrice des poussières est la source IRS 2. (Source [1]).

dans notre galaxie. Si un nuage de poussières est situé à proximité d'une étoile très brillante, on obtient ce que l'on appelle une nébuleuse par réflexion (Figures 10, 11 et 12). Le spectre d'une nébuleuse par réflexion se distingue de celui d'une région H II par le fait qu'il ne contient pas de raies en émission. C'est plutôt un spectre de type stellaire (avec des raies en absorption) mais «plus bleu» que celui de l'étoile qui illumine les

poussières. Cela en raison du fait que le rayonnement bleu est diffusé avec plus d'efficacité que les autres composantes du rayonnement². Pour pouvoir obtenir une nébuleuse par réflexion, il faut que la température de l'étoile soit comprise entre certaines limites. Elle ne doit pas

² La couleur bleu du ciel terrestre relève du même phénomène.

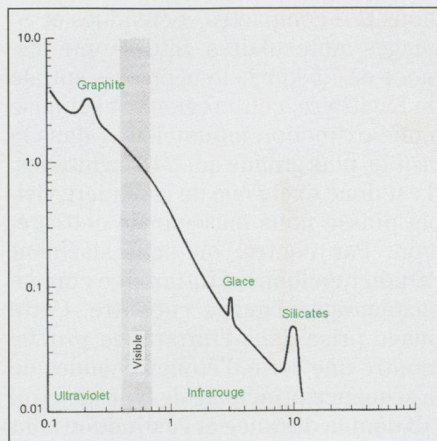


Figure 3: Dans ce schéma, on a horizontalement la longueur d'onde exprimée en μm et verticalement l'extinction exprimée en magnitudes. La courbe est normalisée de telle façon que l'extinction dans le visible correspond à une magnitude. Elle montre l'allure générale de la courbe d'extinction par des particules de poussière interstellaire en fonction de la longueur d'onde. (Source [1])

être inférieure à 15000°K et ne pas dépasser les 30000°K . La limite supérieure est imposée par le fait que si la température est trop élevée, il y a ionisation du milieu et on bascule dans une nébuleuse à émission. Il ne faut pas oublier que gaz et poussières sont intimement liés. La limite inférieure est liée à la courte durée de vie des étoiles massives, celles ayant la plus grande probabilité d'être associées à ce type de nuage.

Une caractéristique importante de la lumière diffusée est le fait qu'elle est polarisée (il y a une direction privilégiée de la vibration électromagnétique). La direction de la polarisation maximale indique d'où vient le rayonnement qui illumine le nuage de poussières. La mesure de cette polarisation permet donc de déterminer dans quelle direction se trouve l'étoile responsable de cette illumination (Figure 5).

La Galaxie est remplie d'une lumière diffuse que l'on ne peut correctement expliquer que par la présence de grains

³ Il convient de faire la distinction entre le rougissement dû aux poussières interstellaires et celui dû aux poussières de l'atmosphère terrestre.

⁴ Un changement d'intensité d'un facteur 100 représente une différence de magnitude entre les deux objets de 5 unités.

⁵ Ces valeurs sont arrondies, les valeurs exactes se calculent en utilisant l'expression suivante: $(2.512)^{\text{(nombre de magnitudes absorbées)}}$.

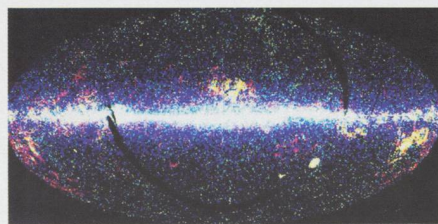
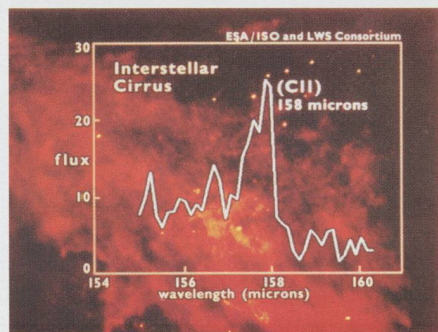


Figure 1: Cette image montre les sources ponctuelles de rayonnement infrarouge détectées par le satellite IRAS (Infrared Astronomical Satellite) sur l'ensemble du ciel. La codification des couleurs est la suivante: - les points bleus sont des étoiles froides de notre galaxie, - les points jaune-vert sont des galaxies. Le fait qu'il y ait une «apparente» concentration le long d'un grand cercle au dessus du plan galactique provient du superamas local, - les points rouges sont les cirrus infrarouges de notre galaxie.

Figure 2: Image d'un cirrus infrarouge prise par ISO. En superposition son spectre.



de poussière. Lorsqu'on calcule la section efficace pour la diffusion de Rayleigh par des atomes ou molécules et qu'on la compare aux mêmes calculs pour des grains de poussière, on constate que ce que l'on observe n'est compatible qu'avec une diffusion produite effectivement par des grains de poussière. Cette lumière diffuse de faible intensité qui possède un maximum autour de 100 micromètres donne ce que l'on appelle les «cirrus infrarouges» (Figures 1 et 2). Le satellite IRAS les a cartographiés et on constate qu'il existe une étroite corrélation entre les régions de cirrus infrarouges et les régions d'émission de la raie de 21cm de l'hydrogène, ce qui confirme l'association intime entre gaz et poussières.

La lumière diffusée permet d'obtenir des informations sur l'albédo des grains de poussière, c'est-à-dire leur capacité à réfléchir la lumière qui est une indication sur l'état de leur surface. Elle donne aussi une information sur le facteur de phase, c'est-à-dire, qu'elle précise si le grain diffuse la lumière de préférence

vers l'avant ou vers l'arrière, ce qui constitue une indication sur la forme du grain.

L'observation des nuages de poussières peut se faire à partir d'instruments terrestres si la température du nuage est plus grande que 150°K . L'observation dans le visible qui requiert au moins une température de 1500°K est généralement impossible parce qu'à cette température les grains sont en principe détruits.

L'extinction interstellaire

Le milieu interstellaire n'est nulle part complètement transparent, ni nulle part complètement opaque dans la totalité des longueurs d'ondes. L'atténuation que la lumière subit à cause des poussières interstellaires est appelée l'extinction interstellaire (Figure 3). Elle est responsable du rougissement de la lumière qui nous provient des étoiles et d'autres objets de l'espace³. L'extinction interstellaire est due à l'absorption et à la diffusion de la lumière stellaire par les grains de poussière; elle dépend évidemment de la longueur d'onde du rayonnement. On la mesure en magnitude. Elle représente donc le nombre de magnitudes perdues par rapport à l'éclat réel de l'objet mesuré. Typiquement dans le plan de la Galaxie, on estime que la perte est d'une magnitude tous les 500 pc parcourus par la lumière et ceci pour le rayonnement visible. Dans ces conditions, la lumière d'une étoile qui doit parcourir 2 kpc dans la plan de la Galaxie avant de nous rejoindre subit une diminution de luminosité d'un facteur $40^{(4)}$, d'un facteur 1600 si elle doit parcourir 4 kpc et si elle doit parcourir les 30000 pc qui nous séparent de l'autre extrémité de la Galaxie la perte de luminosité correspond à un facteur de $10^{24(5)}$. On voit aisément que dans la direction du plan galactique, il n'est guère possible d'explorer que l'immédiat voisinage du soleil en lumière visible. Heureusement, toutes les longueurs d'ondes ne subissent pas la même atténuation. Une utilisation aussi large que possible de toute l'étendue du spectre électromagnétique permet aux astronomes de pénétrer à des profondeurs interdites par le seul usage de la lumière visible. On comprend ainsi l'effort porté sur la réalisation d'instruments capables de capter la lumière en dehors du spectre visible. L'exemple de la région H II W51 montre bien ce phénomène de l'extinction différentielle en fonction de la longueur d'onde. W51 est un des plus lumineux complexes de formation stellaire de notre galaxie. C'est un environnement riche en jeunes étoiles massives, en ré-

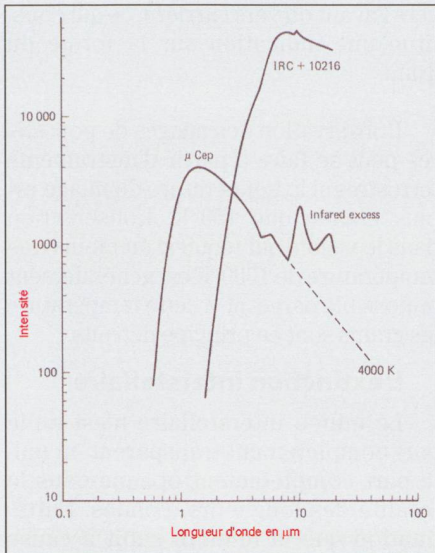


Figure 4: Emission infrarouge d'enveloppes de poussière autour d'étoiles. L'étoile lumineuse μ Cep possède un spectre infrarouge avec un maximum à $7 \mu\text{m}$ qui correspond parfaitement avec l'émission d'un corps noir à 4000°K . Mais on remarque deux pics à $10 \mu\text{m}$ et à $20 \mu\text{m}$, qui correspondent à l'émission infrarouge de grains de silicate chauffés indiquant l'existence d'une enveloppe circumstellaire de poussières. Les particules de poussière absorbent environ 10% de la lumière incidente est ré-émettent cette énergie sous forme de rayonnement infrarouge. L'enveloppe de poussières est trop tenue pour pouvoir la détecter directement. C'est seulement à travers le rayonnement infrarouge que l'on peut inférer sur sa présence. (Source [1]).

gions H II compactes et étendues et en nuages moléculaires. Situé à une distance de 7.5 kpc le long du bras spirale du Sagittaire, cette région est soumise à une extinction interstellaire, dans le visible, plus grande que 24 magnitudes. Il est donc exclu que de la lumière visible puisse nous parvenir de cette région. Par contre, on peut aisément l'étudier en lumière infrarouge comme en témoigne l'image ci-contre. Cette image prise dans l'infrarouge proche montre une série d'étoiles chaudes de la séquence principale de type spectral OB dont la distance et l'extinction sont compatibles avec celle de W51. Ce sont donc bien des étoiles membres de W51 (Figures 13 et 14).

FABIO BARBLAN
Route de l'Etraz 6a
CH-1239 Collex/GE

Figure 13: Une image Infrarouge de W51

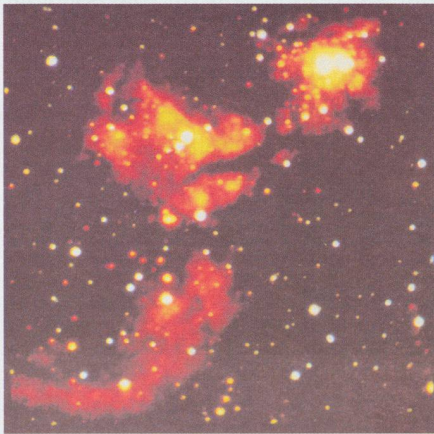
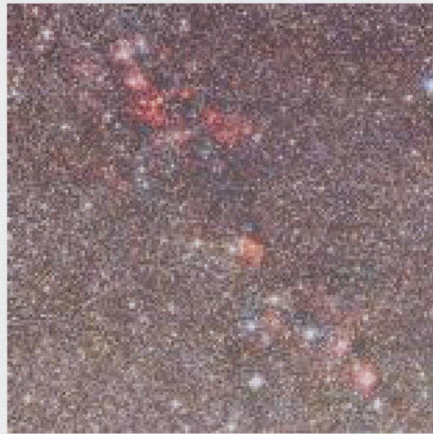
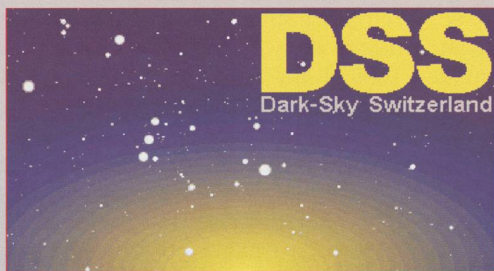


Figure 14: Image infrarouge de W51



Bibliographie

- [1] *The Fullness of Space*, G. WYNN-WILLIAMS, Cambridge University Press, 1992.
- [2] *The Dusty Universe*, A. EVANS, Ellis Horwood, 1993.
- [3] *The Physics of the Interstellar Medium*, J. E. DYSON AND D. A. WILLIAMS, Institute of Physics Publishing, 2nd ed. 1997.
- [4] *The Physics of Interstellar Dust*, E. KRÜGEL, Institute of Physics Publishing, 2003.
- [5] *Solid Interstellar Matter: The ISO Revolution*, Ed. L. d'Hendecourt et al., Springer Verlag, 1999.



Dark-Sky Switzerland

Gruppe für eine effiziente Aussenbeleuchtung
Fachgruppe der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Mitglied der International Dark-Sky Association

www.darksky.ch

info@darksky.ch

Wir brauchen Ihre Unterstützung, denn wir wollen

- ⇒ die Bevölkerung über Lichtverschmutzung aufklären
- ⇒ Behörden und Planer bei Beleuchtungskonzepten beraten
- ⇒ neue Gesetzestexte schaffen

Dazu brauchen wir finanzielle Mittel* und sind auf Ihren Beitrag angewiesen.
Ihr Beitrag zählt und ist eine Investition in die Qualität des Nachthimmels.
Direkt auf PC 85-190167-2 oder über www.darksky.ch

DSS Dark-Sky Switzerland - Postfach - 8712 Stäfa - PC 85-190167-2



* z.B. für Pressedokumentation, Material, Porto, Telefon