

L'astronomie dans l'infrarouge

Marcel Migeotte

Citer ce document / Cite this document :

Migeotte Marcel. L'astronomie dans l'infrarouge. In: Bulletin de la Classe des sciences, tome 60, 1974. pp. 1550-1570;

doi : <https://doi.org/10.3406/barb.1974.61063>

https://www.persee.fr/doc/barb_0001-4141_1974_num_60_1_61063

Fichier pdf généré le 04/06/2020

LECTURE

L'astronomie dans l'infrarouge

par MARCEL V. MIGEOTTE
Correspondant de la Classe

L'an dernier, à la même occasion, notre confrère P. Ledoux a traité de « La nouvelle astronomie » et principalement des quasars, pulsars et « trous noirs » (cf. LEDOUX, 1973). C'est encore d'astronomie que je vais vous parler aujourd'hui et, en particulier, d'observations qui, elles aussi, ont eu un développement extraordinaire durant ces dix dernières années, développement qui ne fait que s'amplifier.

Après avoir précisé le domaine de longueurs d'onde dont il sera question ainsi que ses caractéristiques au point de vue astronomique, nous mentionnerons l'intérêt particulier des observations dans l'infrarouge. En outre, après avoir signalé les causes principales du développement de ces observations, nous sélectionnerons trois sujets de recherche pour lesquels les progrès réalisés seront illustrés par quelques exemples. Nous terminerons en parlant des perspectives d'avenir.

L'infrarouge qui intéresse les astronomes comprend la vaste région spectrale s'étendant, en longueurs d'onde, de 0,8 micron à 1000 microns soit 1 mm.

Pour l'observation du ciel, cette région se caractérise, au niveau du sol, par la présence de nombreuses bandes d'absorption, dues à des molécules de l'atmosphère terrestre, en particulier à H₂O, CO₂, CO, CH₄, N₂O, O₃.

Entre 0,8 μ et 25 μ subsistent heureusement quelques régions spectrales (appelées « fenêtres »), dans lesquelles la transmission est suffisante pour permettre l'observation du ciel à partir du sol. A basse altitude, entre 25 μ et 1 mm, cette transmission est pratiquement nulle.

Les « fenêtres » s'élargissent un peu en observant en haute montagne. Par temps sec, des régions de transmission partielle situées vers 34,

350 et 450 μ peuvent aussi être utilisées tandis qu'au-delà de 800 μ s'ouvre une large « fenêtre » qui s'étend jusqu'aux longueurs d'onde accessibles aux radio-télescopes.

Des instruments embarqués à bord d'avions ou de nacelles stratosphériques permettent des observations dans des régions infrarouges de plus en plus étendues. Cependant, il faut nécessairement utiliser des fusées ou des satellites pour éviter complètement l'absorption atmosphérique entre 0,8 μ et 1 mm et permettre d'atteindre dans tout ce domaine un rapport signal/bruit qui n'est pas affecté par les effets atmosphériques.

Notons cependant que des observations dans l'infrarouge, à partir du sol, restent très importantes, vu qu'elles donnent la possibilité d'obtenir des précisions élevées dans la détermination des positions des objets célestes ainsi que des pouvoirs de résolution spatiaux et spectraux qui ne peuvent pas encore être atteints par engins spatiaux, par suite du manque d'équipements adéquats.

Dans un article récent, J. C. Pecker a judicieusement attiré l'attention sur le fait que l'information astronomique dans l'infrarouge est non seulement importante et utile, mais aussi irremplaçable (cf. PECKER, 1974).

Rappelons tout d'abord que la plupart des objets célestes émettent un rayonnement thermique, suivant la loi de Planck.

L'atmosphère solaire émet un tel type de rayonnement, correspondant à une température de 5.700°K. Dans ce cas, l'émission est maximum dans le visible et décroît très rapidement dans l'infrarouge, l'intensité du rayonnement à 20 μ , à 100 μ et à 1 mm étant respectivement réduite d'un facteur 10^3 , 10^5 et 10^8 par rapport au maximum.

Il n'en reste pas moins vrai que, vu leur proximité par rapport à la terre, le soleil, la lune et les autres planètes nous envoient un rayonnement infrarouge plus intense que tout autre objet céleste. Le flux reçu par notre planète dépend en effet non seulement de la luminosité intrinsèque d'un astre, c'est-à-dire de l'intensité de radiation qu'il émet, mais aussi de sa distance par rapport à la terre. Or la lumière, à la vitesse de 300.000 Km par seconde, met environ une seconde pour nous parvenir de la lune, environ 8 minutes pour venir du soleil et 4,3 années pour franchir la distance qui sépare le soleil de l'étoile qui est sa voisine la plus proche. Ce fait permet en particulier de compren-

dre l'importance de la sensibilité des détecteurs et la nécessité d'adopter des moyens d'observations spécifiques.

Le rayonnement thermique des corps qui ont une température égale ou inférieure à 600°K (soit + 327°C) se situe uniquement dans l'infrarouge. En particulier, celui d'un objet à la température de l'espace interstellaire (30°K) est émis entre 40 et 500 μ avec un maximum vers 100 μ . Un tel objet ne peut donc pas être détecté à partir du sol.

Notons que des techniques appropriées ont dû être mises au point pour tenir compte des émissions thermiques du télescope et de l'atmosphère terrestre. Par exemple, pour certains domaines de longueurs d'onde, les observations s'effectuent en utilisant, dans le télescope, un miroir oscillant qui permet de comparer, environ 20 fois par seconde, le flux provenant de l'objet céleste à détecter à celui d'une région du ciel très voisine. Quoi qu'il en soit, les émissions en question limitent les possibilités ultimes de détection. Pour les améliorer, il est nécessaire d'observer à des altitudes élevées avec des instruments suffisamment refroidis. En fait, dans certaines parties de l'infrarouge, la sensibilité maximum ne peut être atteinte qu'en plaçant les instruments en dehors de l'atmosphère terrestre et en les refroidissant à l'hélium liquide. A titre d'indication, nous signalerons qu'à l'aide d'un télescope embarqué, il est possible d'atteindre actuellement une sensibilité, à 100 μ , de 50 à 100 F.U. [1 F.U. (flux unit) = 10^{-26} W/m²/Hz].

Mais l'émission thermique des objets célestes n'est pas la seule possible dans l'infrarouge. Certaines sources émettent du rayonnement free-free (rayonnement de freinage) ou du rayonnement synchrotron.

Le premier est produit par des électrons libres freinés dans un plasma électrons-protons. Il est typique des enveloppes circumstellaires ionisées, des régions H II (hydrogène ionisé) et de nombreuses nébuleuses gazeuses.

Le deuxième est dû à des électrons se déplaçant à très grande vitesse (électrons relativistes) dans un champ magnétique suffisamment intense.

Les observations dans l'infrarouge permettent, en particulier, de décider des différents phénomènes physiques qui engendrent le rayonnement.

L'observation, dans l'infrarouge, de raies atomiques et moléculaires est aussi de toute première importance puisqu'elle permet d'obtenir des informations sur la constitution chimique et les conditions physiques

des sources célestes. L'intérêt particulier réside dans la possibilité d'observer des raies spectrales provenant de transitions énergétiques de l'ordre de 1 à 0,001 eV.

Vu la loi de diffusion de lord Rayleigh (en $1/\lambda^4$) applicable lorsque les dimensions des particules sont petites par rapport à la longueur d'onde, l'infrarouge permet de découvrir des objets célestes masqués par des nuages de poussières diffusant fortement les radiations visibles.

Notons que la courbe de variation de l'opacité, en fonction de la longueur d'onde, de la couronne, de la chromosphère et des hautes couches de la photosphère solaire montre que des observations entre 1 μ et 1 mm peuvent fournir des renseignements sur les hautes couches en question, sur la zone de transition photosphère-chromosphère ainsi que sur la basse chromosphère. L'infrarouge s'avère donc utile pour étudier certaines couches des atmosphères stellaires.

Les développements extraordinaires des observations dans l'infrarouge durant ces dix dernières années résultent principalement de l'amélioration de la sensibilité des détecteurs et de la mise au point de nouvelles techniques optiques, par exemple, la spectroscopie par transformée de Fourier.

Actuellement, la sensibilité des détecteurs est très élevée dans tout l'infrarouge.

Pour couvrir le domaine de 1 à 5 μ , des « cellules » PbS, PbSe, PbTe et InSb sont utilisées couramment, le refroidissement à 77°K par de l'azote liquide permettant de réduire le bruit de fond.

Au-delà de 5 μ , il convient d'employer des détecteurs au germanium dopé par différentes impuretés (Hg, Cu, Zn, As, Ga) ou au silicium dopé à l'arsenic, ces détecteurs nécessitant un refroidissement inférieur à 5°K, au moyen d'hélium liquide. Entre 5 μ et 1 mm, ils atteignent une sensibilité au moins 100 fois plus élevée que celle des meilleurs thermocouples.

La spectroscopie par transformée de Fourier permet d'obtenir un spectre à partir d'un interférogramme réalisé au moyen d'un instrument à deux ondes du type Michelson (cf. par ex. BELL, 1972).

Cette méthode présente, dans l'infrarouge, un certain nombre d'avantages par rapport aux spectromètres classiques.

a) N éléments spectraux peuvent être observés simultanément pendant un certain temps. Dans ce cas, le rapport signal/bruit est multiplié par un facteur \sqrt{N} (avantage multiplex ou avantage Fell-

gett). En pratique, un « élément spectral » correspond à la bande passante comprise dans le profil instrumental. Dans certains cas, N peut atteindre 10^6 . Certes, la plaque photographique présente l'avantage en question mais elle est pratiquement inutilisable pour des longueurs d'onde supérieures à 1.2μ .

b) Un interféromètre ne nécessite ni fente d'entrée ni fente de sortie, d'où l'augmentation considérable de « l'étendue » du faisceau admis par l'appareil (avantage Jacquinot).

c) Le domaine spectral étudié avec le même instrument peut être très grand; il ne dépend en effet que de la bande passante de la lame séparatrice de l'interféromètre et de la région spectrale couverte par le détecteur.

d) La limite de résolution (exprimée en cm^{-1}) est inversement proportionnelle à la variation de longueur (en cm) d'un des bras de l'interféromètre par rapport à l'autre. Pratiquement, des différences de marche d'un mètre ont été utilisées. Lorsque les observations sont terminées, on peut facilement diminuer le pouvoir de résolution ou améliorer le profil instrumental.

e) Le filtrage spectral peut s'accomplir en appliquant des techniques électriques ou mécaniques.

f) Les mesures de longueurs d'onde des raies observées peuvent être très précises puisqu'elles s'effectuent sans interpolation et sont basées uniquement sur la connaissance de la longueur d'onde d'une raie de référence fournie par un laser, asservi en fréquence (précision de l'ordre de $0,001 \text{ cm}^{-1}$).

En améliorant la construction des interféromètres, en effectuant une mesure chaque fois que la différence de marche varie d'une longueur déterminée (méthode « pas à pas ») et en introduisant une modulation interne, P. Connes a obtenu des résultats spectaculaires concernant les spectres de Vénus et de Mars.

A titre d'exemple, nous rappellerons qu'en 1962, en utilisant un excellent spectromètre à réseau classique au foyer d'un télescope de 2,10 mètres, Kuiper était parvenu à obtenir le spectre de Vénus, à 1.8μ , avec une limite de résolution de 8 cm^{-1} . En employant la méthode par transformée de Fourier, P. Connes obtint, en 1966, dans la même région spectrale, une limite de résolution de $0,08 \text{ cm}^{-1}$, à l'aide du télescope de 1,93 m de l'Observatoire de Haute-Provence, soit une amélioration d'un facteur 100 (cf. P. CONNES, 1970).

Grâce à la qualité des spectres obtenus, les structures fines de bandes de HCl^{35} , de HCl^{37} et de HF ont pu être identifiées dans le spectre de Vénus (cf. P. et J. CONNES, BENEDICT et KAPLAN, 1967).

Depuis lors, M^{me} et M. Connes en collaboration avec Maillard ont publié un « Atlas dans le proche infrarouge de Vénus, Mars, Jupiter et Saturne » (cf. CONNES, J. et P., MAILLARD, 1969).

Notons qu'en 1950, O. Mohler, en employant un grand spectromètre à réseau et les meilleures possibilités techniques existantes, a publié un spectre du soleil de 1 à 2.5μ , avec un pouvoir de résolution de l'ordre de 30.000 (soit $0,3 \text{ cm}^{-1}$ à 1μ).

Récemment, J. P. Maillard, utilisant un interféromètre au foyer coudé du télescope de 1.93 m de l'O.H.P., a obtenu des spectres d'étoiles froides entre 1 et $2,5 \mu$ avec une limite de résolution comprise entre $0,2$ et $0,1 \text{ cm}^{-1}$. Pour α Herculis, un grand nombre de raies de $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ ont été identifiées et leurs largeurs équivalentes, mesurées. Quinze raies ont été attribuées à $^{12}\text{C}^{17}\text{O}$. Par ces observations, il a été possible d'estimer les rapports isotopiques $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$, $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$. La détermination de ces rapports pour différentes classes d'étoiles est importante pour les études de nucléosynthèse et apporte une contribution au vaste domaine de l'astrophysique thermo-nucléaire (cf. CLAYTON et WOOSLEY, 1974).

L'amélioration de la qualité des observations a conduit F. Querci à calculer des modèles d'atmosphères pour les étoiles carbonées géantes et supergéantes en incluant l'absorption par CO , CN et C_2 . Ces modèles ont été utilisés pour calculer des spectres synthétiques entre 1 et 2.5μ . La comparaison avec l'observation permet de déterminer ou de préciser certains paramètres physiques dans les atmosphères en question.

Aux États-Unis, sous l'impulsion de Lary Mertz, la firme Block Engineering, Inc. ⁽¹⁾ s'est spécialisée dans la construction d'interféromètres pour l'astronomie (cf. MERTZ, L., 1965). D'après les renseignements que vient de nous communiquer N. J. JOHNSON (communication privée), une limite de résolution de $0,1 \text{ cm}^{-1}$, de $1,2$ à $5,5 \mu$ a été atteinte à l'aide d'un instrument destiné au télescope de 2,10 mètres de l'Université d'Hawaii, installé à Mauna Kea, à une altitude de 4.200 mètres. Un interféromètre refroidi à l'azote liquide

⁽¹⁾ 19, Blackstone Street, Cambridge, Mass. 02139, U.S.A.

est utilisé par la NASA pour observer, par ballon stratosphérique, le spectre d'émission de l'atmosphère terrestre entre 2 et 14 μ . (cf. ENGEL *et al.*, 1970). Avec un tel instrument, D. G. Murcray est parvenu à obtenir des spectres d'émission de notre atmosphère, entre 6 et 8 μ , au-dessus de 6 et 23 km d'altitude, avec une limite de résolution de 0,5 cm^{-1} . En vue de l'application courante à l'astronomie, la même firme a construit un petit interféromètre, très robuste, pouvant être utilisé dans n'importe quelle position et permettant une résolution de 0,5 cm^{-1} de 1 μ à 20 μ . Une version cryogénique d'un tel instrument peut opérer en dessous de 100°K, dans le vide, de 2 à 14 μ , avec une résolution de 1.0 cm^{-1} .

Notons qu'à 100 μ , une limite de résolution de 0,01 cm^{-1} (soit $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 10^4$) nécessite une différence de marche de 10 mètres dans un interféromètre! Pour obtenir un pouvoir de résolution élevé dans l'infrarouge lointain, la méthode hétérodyne est envisagée. Elle devient possible grâce à l'emploi des lasers et permet d'espérer des pouvoirs de résolution de l'ordre de 10^8 , dans de petits intervalles spectraux et des rapports signal/bruit approchant la limite quantique. De plus, elle permettrait la construction d'un interféromètre spatial pour obtenir un pouvoir de résolution angulaire très élevé dans l'infrarouge lointain. Cependant, l'application pratique de la méthode hétérodyne reste tributaire de la réalisation d'oscillateurs et de mélangeurs adéquats. Des recherches se poursuivent activement à ce sujet.

Jusqu'à présent, les observations dans l'infrarouge ont apporté leur contribution à l'étude de la lune, du soleil, des planètes, des étoiles normales et particulières peu ou fortement évoluées. Elles sont de plus en plus utiles pour l'étude de la matière interstellaire, des galaxies et de la matière intergalactique.

Ces observations donnent, en particulier, des informations essentielles sur la nature, la distribution et la température de particules solides dans l'espace. Ces « poussières » jouent un rôle primordial lors de la naissance, de l'évolution et de la mort des étoiles (cf. par ex. BOK, 1972; SALPETER, 1974).

Deux colloques internationaux, organisés à Liège en 1963 et en 1971, ont fait le point sur ces questions (cf. Les spectres infrarouges des astres (1 μ – 3 mm), Mémoires de la Société Roy. des Sci. de Liège, Coll. in-8°, 5^e série, tome 9, 1964, et Les spectres des astres dans l'infrarouge et les microondes, 6^e série, tome 3, 1972).

Cependant, les progrès accomplis durant ces trois dernières années sont tellement nombreux et importants qu'une stricte sélection s'impose. Nous traiterons de trois questions seulement:

1. Le spectre infrarouge du soleil et en particulier les possibilités dont dispose actuellement l'Université de Liège pour étudier ce sujet.
2. L'observation d'excès d'infrarouge.
3. L'observation d'étoiles naissantes.

Voici 40 ans, alors que j'étais étudiant en deuxième licence à l'Université de Liège, Monsieur le Professeur P. Swings attira mon attention sur l'importance de l'étude du spectre infrarouge du soleil.

Après avoir fait construire un spectromètre à réseau adéquat, nous l'avons installé, en 1950, à la Station scientifique internationale du Jungfraujoch, située en Suisse à 3.580 mètres d'altitude. L'année 1950 marque aussi le début d'une fructueuse collaboration avec M. L. Neven, actuellement astronome à l'Observatoire Royal de Belgique, collaboration qui se poursuit encore aujourd'hui.

Les observations ont été publiées, en 1956, dans un atlas photométrique du spectre solaire, couvrant la région de 2,8 à 23,7 μ . D'après la région spectrale étudiée et le réseau utilisé, des raies distantes de 0,3 cm^{-1} à 0,15 cm^{-1} sont encore séparées (cf. M. MIGEOTTE, L. NEVEN et J. SWENSSON, 1956 et 1957).

Le spectromètre en question fut remplacé, en 1958, par un deuxième instrument qui est encore au Jungfraujoch à l'heure actuelle.

Son installation fut réalisée grâce à l'aide de M. L. Delbouille, alors assistant et actuellement professeur associé. Sa collaboration, ainsi que celle de M^{lle} G. Roland, maître de conférence, ont été de toute première importance pour le développement du Laboratoire Solaire de l'Université de Liège au Jungfraujoch ainsi que lors de la construction d'une nacelle stratosphérique destinée à l'observation du spectre solaire.

M. Delbouille et M^{lle} Roland ont considérablement amélioré l'installation datant de 1958. Celle-ci comprenait principalement un spectromètre à réseau, utilisé en simple passage, équipé d'un miroir de 70 cm de diamètre et de 7,3 mètres de distance focale couplé à un télescope de 50 cm de diamètre et de 12,20 mètres de distance focale (cf. MIGEOTTE et DELBOUILLE, 1960). Les principaux perfectionnements consistent

dans l'emploi du double passage sur le réseau avec fente intermédiaire réglable, la mise au point du balayage rapide et le couplage du spectromètre à un ordinateur, utilisé en temps réel. Les observations effectuées en 1959, 1960 et 1961, permirent de publier un Atlas photométrique du spectre solaire de $\lambda 7498$ à $\lambda 12016$, le pouvoir de résolution étant de l'ordre de 300.000 à 8.500 Å (cf. DELBOUILLE et ROLAND, 1963; SWENSSON, BENEDICT, DELBOUILLE, ROLAND, 1970).

Actuellement, L. Delbouille et G. Roland, en collaboration avec L. Neven, ont entrepris la publication du spectre solaire de 0,3 à 1 micron, le profil instrumental du spectromètre permettant d'atteindre un pouvoir de résolution de 10^6 à 0.5μ . Jusqu'à présent, cet atlas couvre la région spectrale comprise entre 4.300 Å et 6.850 Å (cf. DELBOUILLE, ROLAND, NEVEN, 1973). La qualité des spectres est telle qu'il est permis d'étaler l'échelle des intensités d'un facteur 5 sans qu'aucun bruit de fond n'apparaisse. Grâce à cette possibilité, de très nombreuses raies de faible intensité ont pu être mises en évidence pour la première fois.

Une seule autre installation au monde atteint les performances du grand spectromètre du Jungfraujoch. Elle est située à l'Observatoire National de Kitt Peak (U.S.A.), mais l'absorption par la vapeur d'eau au-dessus de cet endroit (altitude: ~ 2.100 mètres) est généralement plus élevée qu'au-dessus du Jungfraujoch d'où une plus grande perturbation du spectre solaire par des raies dues à H_2O , à partir de longueurs d'onde supérieures à $0,6 \mu$.

En septembre dernier, R. Malbrouck, assistant dans notre service, a installé au Jungfraujoch un interféromètre à 2 ondes, construit à Liège et permettant une différence de marche d'un mètre, donc une limite de résolution de $0,01 \text{ cm}^{-1}$ et ceci dans tout l'infrarouge. L'instrument est placé au foyer coudé d'un télescope de 76 cm. Il est capable de performances étonnantes; par exemple, les échantillons de l'interférogramme peuvent être mesurés à une cadence de 25 par seconde avec une variation minimum de différence de marche de 0,3 micron, cette variation étant assurée à un angström près ($1\text{Å} = 10^{-8} \text{ cm}$) par un système d'asservissement adéquat. Ce « pas minimum » permet de couvrir, au cours d'un seul enregistrement, le domaine spectral infrarouge compatible avec la lame séparatrice et le détecteur utilisés; mais, pour atteindre des pouvoirs de résolution élevés, il faut de grandes différences de marche. Dans ce cas, pour observer

pendant une durée raisonnable, les domaines spectraux étudiés doivent nécessairement être plus limités, ce qui permet d'utiliser des « pas » plus grands, le « pas » étant inversement proportionnel à l'étendue de la région spectrale observée.

Utilisé vers 2μ pour enregistrer le spectre solaire, l'instrument a déjà donné des résultats très encourageants. Notons qu'entre 1 et $2,5 \mu$ le spectre solaire a été réenregistré récemment au Kitt Peak, avec un spectromètre à réseau, les limites de résolution variant de $0,1 \text{ cm}^{-1}$ à 1μ à $0,06 \text{ cm}^{-1}$ à $2,4 \mu$. Cependant, une limite de résolution de $0,03 \text{ cm}^{-1}$ aurait été atteinte dans les cas les plus favorables (cf. HALL, 1974).

Pour l'étude du spectre solaire, l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège dispose aussi, grâce à la compétence et au dévouement de R. Zander, chef de travaux, d'une nacelle stratosphérique équipée d'un télescope de $37,5 \text{ cm}$ de diamètre de type Cassegrain (distance focale équivalente: 6 m) couplé à un spectromètre à réseau, à double passage, de $2,5 \text{ mètres}$ de distance focale (cf. ZANDER, 1970). Cette nacelle a déjà été lancée 9 fois à partir de la base de Palestine, Texas, (U.S.A.). Vu son poids ($\sim 1100 \text{ kgs}$), ses dimensions et l'intérêt de rester le plus longtemps possible en altitude, le choix de cette base était indiscutable, d'autant plus que les facilités de lancement, du contrôle de vol et de la récupération y sont très satisfaisantes. Jusqu'à présent, l'équipement en question a permis d'enregistrer le spectre solaire, à partir de 25 à 30 km d'altitude dans des régions spectrales inaccessibles du sol et comprises entre $1,8$ et 10μ . Pendant le dernier vol, en novembre 1974, un bolomètre de Low refroidi à l'hélium liquide a été utilisé comme détecteur.

A titre d'exemple, la fig. 1 donne le spectre du soleil de 18.695 \AA à 18.755 \AA observé à 27 km d'altitude, avec une limite de résolution de $0,03 \text{ cm}^{-1}$. Les raies dues à l'atmosphère solaire sont indiquées par un trait et celles provenant de l'atmosphère terrestre par un point. La différence de largeur de ces deux types de raies permet de les distinguer facilement. Notons, en particulier, une raie très large due à l'hydrogène solaire. Il s'agit de P_{α} , la première raie de la série de Paschen. L'identification de deux raies de silicium est tirée de tables de prédiction de Biémont et Grevesse (cf. biblio. b, 1973). Les raies marquées par un point sont dues à la vapeur d'eau.

Dans notre institut, durant ces dernières années, l'identification et l'étude des raies provenant de l'atmosphère solaire ont fait l'objet

des travaux de Grevesse (à partir de 1966) et de Biémont (à partir de 1972). J. P. Swings, le fils de notre confrère P. Swings, y a aussi participé. Nous donnons, dans la bibliographie, les références à leurs publications qui se rapportent à l'infrarouge (cf. BIÉMONT, 1973, 1974; BIÉMONT et GREVESSE, 1973; GREVESSE et J. P. SWINGS, 1972).

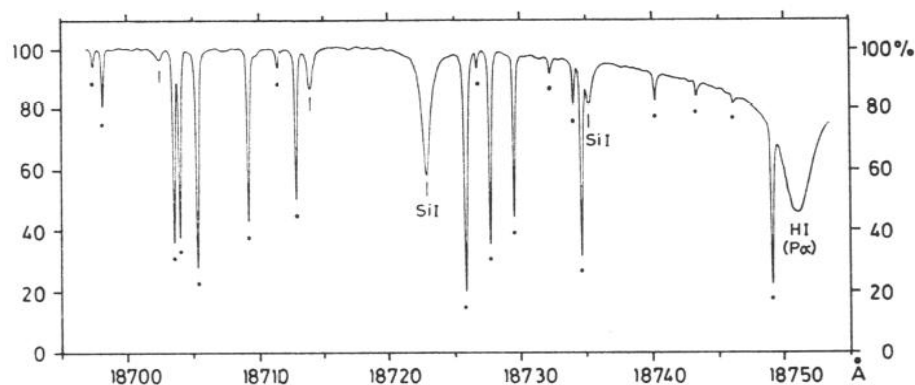


FIG. 1.

R. Zander s'intéresse spécialement aux raies d'absorption dues à l'atmosphère terrestre, en vue de déterminer l'abondance de molécules telluriques au-dessus de 25 à 30 km d'altitude et de collaborer ainsi aux études sur la pollution atmosphérique.

La détermination de ces abondances ne constitue en fait qu'un problème parmi tous ceux posés par l'étude de la haute atmosphère terrestre. Ce vaste sujet est traité en Belgique par l'Institut d'Aéronomie Spatiale, dirigé par notre confrère, M. Nicolet. Qu'il me soit permis de profiter de cette occasion pour lui rendre hommage ainsi qu'à ses collaborateurs. L'importance et la qualité de leurs travaux contribuent incontestablement au renom international de notre pays.

Deux découvertes, datant de 1965 et 1966, ont beaucoup contribué à focaliser l'attention sur l'infrarouge, en astronomie. Il s'agit de l'observation d'excès d'infrarouge et de celle de « protoétoiles », c'est-à-dire d'étoiles naissantes.

La fig. 2 donne la répartition de la distribution de l'énergie de l'étoile HD 45677 en fonction de la longueur d'onde (cf. SWINGS, J. P. et ALLEN, 1971). Dans le visible et le proche infrarouge, ainsi que pour l'extrapolation dans l'ultra-violet (traits interrompus), la courbe correspond à l'émission thermique d'une étoile à 18.000°K rougie en tenant compte des observations dans le visible.

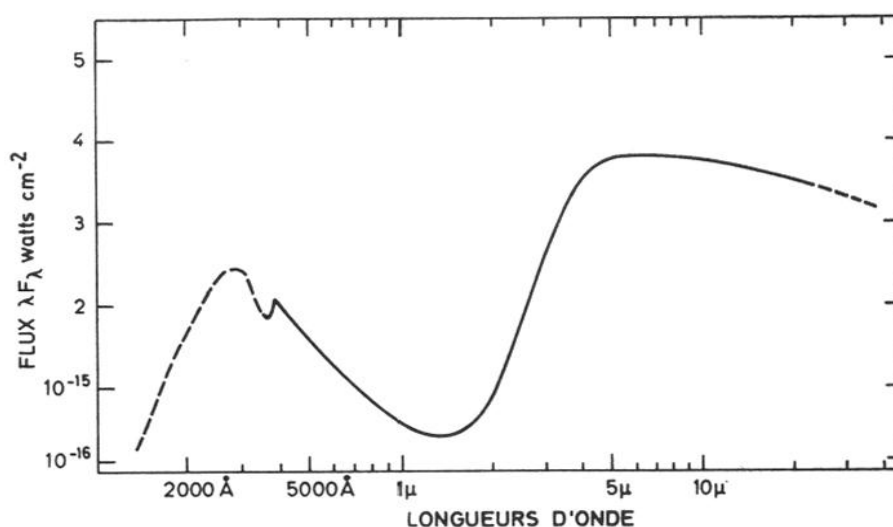


FIG. 2.

D'après les auteurs cités, l'excès important du rayonnement infrarouge de l'étoile en question ne semble pas pouvoir être expliqué ni par la présence d'un compagnon infrarouge ni par du rayonnement « free-free », mais bien par le rayonnement thermique d'une enveloppe de poussières circumstellaires. Cette enveloppe serait située à environ 30 U.A. ⁽¹⁾ de l'étoile centrale, la température des particules solides étant égale ou inférieure à 700°K.

Notons que les mêmes auteurs ont trouvé une corrélation entre l'excès dans le proche infrarouge et certains objets célestes ayant des spectres d'émission contenant des raies interdites de [O I], [S II] et [Fe II]. La photométrie dans cette région spectrale peut donc fournir un critère très utile pour sélectionner rapidement de tels astres (cf. ALLEN et SWINGS, 1972). L'objet HD 45677 a été choisi, parmi beaucoup d'autres, pour illustrer l'excès d'infrarouge émis par une étoile chaude.

Notons qu'à 20 μ, l'objet céleste le plus brillant est η Carinae. Cette étoile, située dans l'hémisphère sud, a été observée dans le visible depuis 300 ans. Repérée pour la première fois, au 17^e siècle, comme une étoile relativement faible (magnitude + 4), elle a révélé des éruptions spectaculaires dans la première moitié du 19^e siècle,

⁽¹⁾ Une Unité Astronomique est définie comme étant la moitié du grand axe de l'ellipse que décrit la terre autour du soleil.

devenant en 1843 une des étoiles les plus brillantes du ciel (magnitude -1). Son spectre observé en 1892 a été classifié par Bok (1930) comme celui d'une étoile F supergéante. Actuellement, une nébulosité fort intense cache l'objet central. Des photographies prises depuis 1950 révèlent que les condensations observées s'éloignent radialement l'une de l'autre à partir du noyau central.

Les informations que nous donnons ci-après concernant le comportement de η Carinae dans l'infrarouge ont été tirées des publications suivantes: GEHRZ *et al.*, 1973; SUTTON *et al.*, 1974.

η Carinae présente un important excès d'infrarouge. Par exemple, à 10μ , il est de l'ordre de 100 fois plus intense que celui de HD 45677. Entre 1 et 40μ , la luminosité de cette étoile serait de $4 \times 10^6 L_{\odot}$ (en supposant une distance de 7.500 A.L. ⁽¹⁾); celle-ci correspondrait à 90 % de la luminosité totale de l'astre en question.

Observée à 2,2 et $3,4 \mu$, cette source a un diamètre de 2 sec. d'arc tandis qu'à 10, 20 et 34μ , celui-ci est de 6 sec. d'arc.

Ces observations peuvent s'interpréter en supposant qu'une étoile centrale (à une température d'au moins 10.000°K) chauffe deux couches de poussières qui émettraient thermiquement dans l'infrarouge. La couche intérieure correspondant au diamètre de 2" (R: 2600 U.A.) serait à une température de 425°K tandis que la couche extérieure (diamètre 6" \rightarrow R: 8000 U.A.) serait à 250°K . Cette couche contiendrait des silicates dont la densité serait de $3 \times 10^{-20} \text{ gr/cm}^3$. Dans ce cas, la masse totale des poussières autour de η Carinae serait de $0,03 M_{\odot}$.

Depuis 1965, des excès d'infrarouge ont été observés dans le rayonnement continu, émis par des étoiles ou des objets particuliers de types variés: peu évolués et chauds, intermédiaires et plus froids, plus évolués et froids. La découverte des excès d'infrarouge est d'autant plus importante que la théorie des atmosphères stellaires ne permettait pas de les prévoir. Dans certains cas, ces « excès » peuvent s'interpréter par du rayonnement f.f. ou par un rougissement dû à l'opacité de l'atmosphère stellaire; dans d'autres, il faut nécessairement admettre l'existence d'une ou plusieurs enveloppes circumstellaires à des distances relativement grandes par rapport au diamètre de l'étoile centrale.

⁽¹⁾ Une Année Lumière correspond à la distance que parcourt la lumière pendant une année, à la vitesse de 300.000 km par sec.

Ces enveloppes seraient constituées de poussières éjectées par l'étoile, le rayonnement ultraviolet et visible de celle-ci continuant d'assurer le chauffage des particules solides en question.

Des excès d'infrarouge ont aussi été observés dans la plupart des régions H II trouvées dans notre galaxie (cf. WYNN-WILLIAMS et BECKLIN, 1974). Il s'agit de vastes régions d'hydrogène ionisé. En 1971, les seules régions H II décrites dans la littérature étaient la nébuleuse d'Orion (M42), M17 et M8. Depuis lors, plus de 50 régions H II ont été détectées et la plupart d'entre elles émettent intensément à des longueurs d'onde supérieures à 5μ , l'excès d'infrarouge observé étant probablement dû à l'émission thermique de poussières.

De 5 à 20μ , les radiations proviennent surtout de l'endroit, où une concentration maximum du gaz ionisé est observée; l'émission à de plus grandes longueurs d'onde pourrait provenir de poussières mélangées à du gaz neutre, en dehors de la région H II. Des arguments indirects suggèrent que ce serait en particulier le cas vers 100μ , maximum de l'émission pour plusieurs régions H II.

D'autres sources infrarouges, de très faible diamètre angulaire ($< 2''$), sont observées non seulement dans des régions H II mais aussi à proximité de celles-ci. Elles se situent dans des nuages moléculaires et montrent une certaine corrélation avec des masers H_2O et OH repérés dans leur voisinage. Certaines de ces sources seraient des « proto-étoiles », c'est-à-dire des étoiles naissantes ou des étoiles un peu plus évoluées qui seraient loin d'atteindre la séquence principale dans le diagramme H-R.

Parmi les régions H II, la nébuleuse d'Orion a été la plus étudiée dans l'infrarouge, probablement à cause de sa proximité par rapport à la terre (~ 1600 A.L.). Six sources infrarouges de faible diamètre angulaire y ont été détectées alors qu'elles ne sont observables ni dans le visible ni dans le domaine radio. Notons en particulier l'objet « BN » (BECKLIN, NEUGEBAUER) ayant un diamètre angulaire inférieur à 2 sec. d'arc. La distribution d'énergie qu'il émet correspond à celle d'un corps noir à $530^\circ K$ avec une forte absorption à 10μ et $3,1 \mu$. A $12''$, au sud de cette source, se trouve la nébuleuse « KL » (KLEINMAN-LOW). Bien que son diamètre soit de $30''$, on peut observer un noyau central ayant un diamètre d'environ $2''$ émettant à 20μ , 10% du flux total de l'objet. Ce noyau a une température de $\sim 200^\circ K$ alors que son entourage est à $\sim 130^\circ K$.

La source B-N serait probablement constituée d'au moins trois protoétoiles à différents stades de leur évolution, entourées d'un nuage de poussières plus diffus.

Les émissions et les absorptions observées vers $10\ \mu$ et $20\ \mu$ seraient dues à des silicates. Notons qu'en décembre 1973, une émission laser SiO, à $3,48\ \text{mm}$, a été repérée dans la nébuleuse d'Orion. Depuis lors, cette observation a été confirmée et d'autres émissions laser SiO ont été trouvées, non seulement dans Orion mais aussi dans des étoiles variables du type M, assez avancé, donnant aussi des émissions OH et H₂O (cf. par ex. *Physics Today* 27, 17, 1974).

Le pompage de certaines raies masers nécessite une température d'excitation aussi élevée que 3.520°K . Sans doute les étoiles géantes rouges possèdent l'énergie nécessaire, mais certainement pas les nuages interstellaires!

Récemment, les premières observations spectroscopiques d'Orion ont été effectuées entre 20 et $40\ \mu$ (cf. HOUCK *et al.*, 1974) et entre 80 et $125\ \mu$ (cf. WARD et HARWIT, 1974). Elles s'interprètent par une émission thermique de poussières à une température d'environ 100°K .

Des sources infrarouges de faible diamètres ($< 2''$) ayant des températures de l'ordre de 100 à 200°K ont été repérées dans plusieurs régions H II. Ce serait aussi des protoétoiles.

Grâce à de puissants ordinateurs, il est possible de se faire une idée de l'évolution pré-stellaire permettant de guider les observations (cf. LARSON, 1973). A partir de la matière interstellaire et sous l'effet de la gravité, des objets de différentes masses solaires pourraient se former. Pour un objet d'une masse solaire, après 100 ans, l'enveloppe aurait une température de 60°K . L'évolution s'effectuerait ensuite de la façon suivante: 10^3 ans $\rightarrow 90^\circ\text{K}$; 10^4 ans $\rightarrow 125^\circ\text{K}$; 10^5 ans $\rightarrow 300^\circ\text{K}$; 10^6 ans \rightarrow l'enveloppe deviendrait optiquement transparente! Il faudrait alors environ 30.10^6 années pour que l'objet en question arrive sur la séquence principale. Les astronomes le considèrent alors à « l'âge zéro ». En adoptant cette convention, notre soleil est âgé de $4,3$ milliards d'années. Il peut encore vivre aussi longtemps dans les mêmes conditions avant d'évoluer vers le stade des étoiles rouges géantes. Nous voilà donc tout à fait rassurés.

Les étoiles naîtraient donc entourées d'un cocon de poussières, à l'abri des regards indiscrets, à partir de la matière interstellaire, le diamètre des poussières variant de $0,03$ à $0,2$ micron.

Notons qu'à l'échelle cosmique, un temps de 10^6 années est très court. Rappelons en particulier que notre soleil, situé à 30.000 A.L. du centre de notre galaxie, met 200.10^6 années pour accomplir une seule révolution autour de ce centre!

Actuellement, certains astronomes, possédant les moyens d'observation nécessaires, organisent la chasse aux étoiles naissantes (cf. STROM *et al.*, 1974).

Concernant la matière interstellaire, P. Swings a rappelé récemment que c'est notre regretté collègue L. Rosenfeld et le groupe de Liège qui ont constaté, en 1937, qu'une raie interstellaire très fine, λ 4300.3, correspondait à une absorption par le radical CH. Cette première identification d'une molécule interstellaire a été rapidement confirmée, puis suivie des identifications d'autres raies de CH, CN et CH^+ (cf. P. SWINGS, 1974).

Depuis lors, des observations dans l'ultraviolet, le visible et surtout le domaine radio ont permis de découvrir trente molécules différentes dans l'espace interstellaire. Des observations dans l'infrarouge pourraient aussi apporter leur contribution à l'étude de ces nuages moléculaires.

A cause de sa proximité par rapport à la terre, le centre de notre galaxie apparaît comme étant le centre galactique le plus brillant dans l'infrarouge, bien que sa luminosité intrinsèque soit relativement faible.

Étant caché par des poussières, ce centre n'est pas observable dans le visible, mais sa structure se révèle dans l'infrarouge. Cinq sources ayant un diamètre $< 2''$ y ont été observées, entourées d'un nuage diffus qui lui-même comprend trois parties. Ce résultat est tiré d'observations effectuées du sol, dans les fenêtres atmosphériques entre 3 et 21μ , avec une résolution spatiale de $5''5$ (cf. RIEKE et LOW, 1973). La partie centrale ($30''$) du noyau galactique (qui contient les sources à 10μ) émet aussi intensément à 34μ (cf. SUTTON *et al.*, 1974).

En 1971, grâce à des observations par ballon effectuées à 100μ , Hoffman *et al.* (cf. biblio.) ont mis en évidence certaines structures du centre de notre galaxie, mais le télescope utilisé (30 cm) ne permettait d'atteindre à cette longueur d'onde qu'une résolution spatiale de 6 minutes d'arc.

Placées au centre de notre galaxie, des étoiles ayant une température de 4.200°K , pourraient émettre pratiquement tout le flux observé

pour $\lambda < 3,5 \mu$. La luminosité totale de ces étoiles, dans un rayon d'environ 5,0 A.L. (30"), est de l'ordre de $3 \cdot 10^6 L_{\odot}$. Entre 5 et $10,5 \mu$, la luminosité totale de toutes les sources serait de $1,5 \cdot 10^6 L_{\odot}$ et, à 21μ , le flux excède toute extrapolation plausible du flux à 5 et 10μ . Entre 40 et 150μ , le spectre du centre galactique correspondrait à un corps noir à 60°K ! Des précisions sur un modèle du centre de notre galaxie ont été publiées récemment (cf. MEZGER, 1974).

Rappelons que la galaxie qui ressemble le plus à la nôtre est la nébuleuse d'Andromède, mais elle est située à $2 \cdot 10^6$ A.L.

En 1972, Rieke et Low (cf. biblio.) ont publié des observations de 57 sources extragalactiques effectuées à 10μ , les plus intenses étant étudiées de 2 à 25μ . Ils les ont classées en 4 catégories: quasars, galaxies ayant une luminosité infrarouge ultra-élevée, galaxies de Seyfert et celles qui leur sont associées, galaxies normales.

Le noyau d'un grand nombre de galaxies normales, la nôtre par exemple, a une luminosité dans l'infrarouge au moins égale à $10^8 L_{\odot}$. Cette luminosité atteint $10^{15} L_{\odot}$, pour la source extragalactique la plus lumineuse dans l'infrarouge, le quasar 3C273, soit une gamme de luminosité s'étendant sur $10^7 L_{\odot}$ environ.

Il est aussi intéressant de considérer le rapport des luminosités infrarouge et visible: 1:30 pour les galaxies normales, 100:1 pour la galaxie radio M82, 300:1 pour les galaxies Seyfert, 1000:1 pour 3C273. Cet objet a été détecté, pour la première fois, par Johnson en 1964, à $2,2 \mu$. En mentionnant les autres observations effectuées dans l'infrarouge à partir du sol, F. Low a écrit dès 1966: « Il est intéressant de noter que probablement les sources les plus intenses de l'univers émettent la plus grande partie de leur énergie dans l'infrarouge, c'est-à-dire dans la partie du spectre la moins étudiée ». La situation s'est sans doute améliorée depuis; mais, jusqu'à présent, les possibilités d'observation du ciel dans l'infrarouge par engins spatiaux restent encore très réduites.

Les luminosités énormes des galaxies dites « anormales » restent inexplicables et ce problème est un des plus grands défis posé à l'intelligence humaine par l'astronomie moderne.

Avant de traiter les possibilités instrumentales futures, nous croyons utile de mentionner que le rayonnement continu cosmique nécessite aussi des observations dans l'infrarouge. Ce « fond continu », déduit de la théorie de l'expansion de l'univers de Monseigneur Lemaître,

émettrait thermiquement comme un « corps noir », à 2,7°K, c'est-à-dire de 500 μ à 5 mètres, avec un maximum d'émission à environ 1 mm. Une telle courbe d'émission a en fait été observée d'environ 1 mètre à 1 mm, mais il importe de préciser la distribution spectrale de 1 mm à 500 μ .

Venons-en maintenant à quelques possibilités actuelles et futures concernant l'utilisation de télescopes pour l'infrarouge, afin d'augmenter dans ce domaine, les pouvoirs de résolution spatiaux et spectraux.

Dans notre exposé, nous avons attiré l'attention sur l'intérêt de l'utilisation de grands télescopes, même à partir du sol. Le télescope de Hale de 5 m a déjà fourni des résultats fort importants. Plusieurs grands télescopes, spécialement conçus pour l'infrarouge, sont en construction. Nous citerons, en particulier, un télescope de 3,8 mètres destiné à Mauna Kea (Hawaii) qui, rappelons-le, est à une altitude de 4.100 mètres.

A partir d'un avion, le télescope NASA-Ames de 91 cm sera bientôt opérationnel.

En février 1974, un télescope de 102 cm a été utilisé pour la première fois avec succès à partir d'un ballon stratosphérique, pour des observations dans l'infrarouge lointain ($\lambda > 40 \mu$) (FAZIO *et al.*, 1974). Lancé de Palestine (Texas), ce télescope a permis d'observer, à 28 km d'altitude, les régions H II dans Orion et W₃, entre 40 μ et $\sim 250 \mu$, la sensibilité maximum se situant à 69 μ . Une cartographie de ces régions a été obtenue avec une résolution spatiale de 1 min. d'arc, certaines observations permettant d'atteindre 0,5 min. d'arc. De nouvelles structures ont ainsi été découvertes. Leurs positions ont été déterminées à environ 0,5 min. d'arc.

Des fusées ont été utilisées à 4, 11 et 20 μ par les « Air Force Cambridge Research Laboratories » (AFCRL), pour réaliser une cartographie du ciel, mais nous ne possédons pas de détail à ce sujet.

En ce qui concerne l'observation astronomique dans l'infrarouge par satellite, un groupe de chercheurs (cf. MARAN *et al.*, 1974) vient de publier la courbe de variation de flux de l'étoile MIRA, observée à 2,7 μ au moyen d'un satellite de l'AFCRL, entre le 13 février 1972 et le 12 mai 1974. De telles observations ouvrent l'ère spatiale à l'infrarouge.

Pour l'avenir, les télescopes suivants sont envisagés:

— Dans des satellites:

Diamètres: 2,4 mètres (Large Space Telescope, NASA); 0,5 m. (ESRO); 0,6 m. (HOLLANDE).

— Dans le SPACELAB:

Diamètres: 1 à 1.5 m. (NASA); 2 à 3 m. (ESRO).

Ces télescopes seraient spécialement équipés pour les observations dans l'infrarouge.

En préparant cette « lecture », nous avons relu, toujours avec beaucoup d'intérêt, plusieurs chapitres du livre de R. Jastrow et M. H. Thompson intitulé: *Astronomy, Fundamentals and Frontiers* (Ed. John Wiley, 2^e éd., 1974). Permettez-nous de le recommander à votre attention.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN, D. A. and SWINGS, J. P., Infrared excesses and forbidden emission lines in early-type stars. *Astrophys. Letters* **10**, 83, 1972.
- BELL, R. T., Introduction Fourier transform spectroscopy. Academic Press, 1972.
- BIEMONT, E.
- a) Oscillator strengths for $2pnd-2pn'f$ transitions of CI and identifications in the infrared solar photospheric spectrum ($1 \leq \lambda \leq 3\mu$). *Solar Phys.* **32**, 117, 1973.
 - b) Probabilités de transition dans la configuration $3d^{10}(^1S)nl$ de CuI et identifications dans le spectre solaire. *Bull. Soc. Roy. Sci. Liège* **5-6**, 206, 1973.
 - c) Computation of oscillator strengths by a semi-empirical method for some elements of the iron-group and their solar photospheric abundance. I. Results for Ti I. *Solar Phys.* **38**, 15, 1974.
- BIEMONT, E. et GREVESSE, N.
- a) Atomic wavelengths and transition probabilities in the infrared. *Astron. Astrophys.* **27**, 163, 1973.
 - b) Raies atomiques dans l'infrarouge. Longueurs d'onde, probabilités de transition et identifications dans le spectre solaire. *Bull. Soc. Roy. Sci. Liège* **7-8**, 307, 1973.
 - c) Infrared wavelengths and transition probabilities for atoms, $3 \leq Z \leq 20$. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **12**, 217, 1973.
- BOK, B. J., The birth of stars. *Scient. Am.* **227**, 49, 1972.
- CLAYTON, D. D. and WOOSLEY, S. E., Thermonuclear astrophysics. *Rev. mod. Phys.* **46**, 755, 1974.

- CONNES, J., CONNES, P., MAILLARD, J. P., Atlas dans le proche infrarouge de Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Édition du C.N.R.S., 1969.
- CONNES, P., Astronomical Fourier spectroscopy. *Ann. Rev. Astron. Ap.* **8**, 209, 1970.
- CONNES, P., CONNES, J., BENEDICT, W. S. and KAPLAN, L. D. Traces of HCl and HF in the atmosphere of Venus. *Ap. J.* **147**, 1230, 1967.
- DELBUILLE, L. and ROLAND, G., Photometric atlas of the solar spectrum from $\lambda 7498$ to $\lambda 12016$. *Mém. Soc. Roy. Sci. Liège*, Vol. hors série, n° 4, 1963.
- DELBUILLE, L., ROLAND, G. et NEVEN, L., Atlas photométrique du spectre solaire $\lambda 3000$ à $\lambda 10000$. Publié par l'Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège, 1973.
- ENGEL, J., WYNTJES, G. and POTTER, A., A half-wavenumber Michelson interferometer operating at cryogenic temperatures for the spectral region of 5 to $15\mu\text{m}$. In Aspen International Conference on Fourier Spectroscopy, 1970, ed. VANASSE, STAIR and BAKER, AFCRL-71-0019, 5 January 1971, Special Reports, N° 114.
- FAZIO, G. G., KLEINMANN, D. E., NOYES, R. W., WRIGHT, E. L., ZEILIK II M. and Low, F. J., High-resolution maps of HII regions at far-infrared wavelengths. Center for Astrophysics — Preprint Series, n° 118, 1974 (paper submitted to Proc. 8th. ESLAB Symp. June 13, 1974).
- GEHRZ, R. D., NEY, E. P., BECKLIN, E. E. and NEUGEBAUER, G., The infrared spectrum and angular size of Eta Carinae. *Astrophys. Letters* **13**, 89, 1973.
- GREVESSE, N. and SWINGS, J. P., The solar abundance of silicon from forbidden lines. *Ap. J.* **171**, 179, 1972.
- HALL, D. N., An atlas of infrared spectra of the solar photosphere and of sunspot umbrae (region 1.2 to 2.5μ). Kitt Peak National Observatory, 1974.
- HOFFMAN, W. F., FREDERICK, C. L. and EMERY, R. J., 100-micron map of the galactic-center region. *Ap. J.* **164**, L23, 1971.
- HOUCK, J. R., SCHAACK, D. F. and REED, R. A., 20 to 40 micron spectroscopy of the Orion nebula. Submitted to *Ap. J.* (Letters), 1974.
- LARSON, R. B., The evolution of protostars — Theory. *Fundamentals of Cosmic Physics* **1**, 1, 1973.
- LEDOUX, P., La nouvelle astronomie. Acad. Roy. Belg., *Bull. Cl. Sci.* **59**, 1221, 1973.
- MARAN, S. P., HEINSHEIMER, T. F., CHAPMAN, R. D., STOCKER, T. L., SCHAMP, C. J. and HOBBS, R. W., Infrared observations of long period variable stars from earth orbit. Comm. présentée au 143^e Congrès de Am. Ast. Soc., Rochester, N.Y., 21 août 1974.
- MERTZ, L., Transformation in optics. John Wiley and Sons, New York, 1965.
- MEZGER, P. G., The center of the galaxy. Conference of research programmes for the new large telescopes, Genève, Publ. ESO/SRC/CERN, Proceedings edited by A. Reiz, July 1974, p. 79.
- MIGEOTTE, M. and DELBOUILLE, L., Infrared solar spectroscopy at the Jungfraujoch (Switzerland). *J.O.S.A.* **50**, 1305, 1960.
- MIGEOTTE, M., NEVEN, L., SWENSSON, J., Le spectre solaire de 2.8 à 23.7 microns, Première partie: Atlas photométrique. *Mém. Soc. Roy. Sci. Liège*, Vol. hors

- série, n° 1, 1956; Deuxième partie: Mesures et identifications. *Mém. Soc. Roy. Sci. Liège*, Vol. hors série, n° 2, 1957.
- PECKER, J. C., L'astronomie infrarouge. *L'Astronomie* **88**, 57, 1974.
- RIEKE, G. H. and LOW, F. J., Infrared photometry of extragalactic sources. *Ap. J.* **176**, L95, 1972.
- RIEKE, G. H. and LOW, F. J., Infrared maps of the galactic nucleus. *Ap. J.* **184**, 415, 1973.
- SALPETER, E. E., Dying stars and reborn dust. *Rev. mod. Phys.* **46**, 433, 1974.
- STROM, S.E., STROM, K. M. and GRASDALEN, G. L., Young stellar objects and dark interstellar clouds. Kitt Peak Nat. Obs. 1974 (communication privée).
- SUTTON, E., BECKLIN, E. E. and NEUGEBAUER, G., 34-micron observations of Eta Carinae, G333.6-0.2 and the galactic center. *Ap. J.* **190**, L69, 1974.
- SWENSSON, J. W., BENEDICT, W. S., DELBOUILLE, L. and ROLAND, G., Photometric atlas of the solar spectrum from $\lambda 7498$ to $\lambda 12016$. A table of measures and identifications. *Mém. Soc. Roy. Sci. Liège*, Vol. hors série, n° 5, 1970.
- SWINGS, J. P. and ALLEN, D.A., The infrared object HD 45677. *Ap. J.* **167**, L41, 1971.
- SWINGS, P., In mémoires Léon Rosenfeld. Acad. Roy. Belg., *Bull. Cl. Sci.* **60**, 656, 1974.
- WARD, D. B. and HARWIT, M., Observations of the Orion nebula at $100\mu\text{m}$. *Nature* **252**, 27, 1974.
- WYNN-WILLIAMS, C. G. and BECKLIN, E. E., Infrared emission from HII regions. *Publ. astr. Soc. Pacific* **86**, 5, 1974.
- ZANDER, R., Observations, par ballon stratosphérique, du spectre solaire à 1.85 microns avec un pouvoir de résolution de 135.000. *Acad. Roy. Belg., Bull. Cl. Sci.* **56**, 729, 1970.