

L'ABSORPTION CONTINUE PRODUITE PAR LES MOLÉCULES DANS LES ATMOSPHÈRES STELLAIRES

I. — Le problème.

Dans deux notes récentes ⁽¹⁾, nous avons parlé du rôle joué en astrophysique par les bandes moléculaires d'absorption et d'émission des étoiles. Tout comme les atomes (neutres ou sous forme d'ions positifs ou négatifs) présentent des continua d'absorption en même temps que des raies discrètes, les molécules (neutres ou ionisées) donnent aussi lieu à une absorption continue dans certaines régions spectrales ; celle-ci doit nécessairement affecter les étoiles froides. En fait, on connaît encore très peu de chose au sujet de l'opacité continue des molécules et de son rôle dans les étoiles froides. Et, pourtant, une des difficultés majeures pour l'interprétation théorique des observations spectroscopiques des étoiles avancées est l'absence de « modèles » pour leurs atmosphères : nous ne connaissons pas la distribution de la température et de la pression dans ces atmosphères à cause de notre ignorance de leur coefficient d'absorption continue. Les meilleurs calculs du coefficient d'absorption stellaire s'arrêtent à $T_e = 4\,700^\circ\text{K}$ (ou $T_0 = 3\,840^\circ$; dK2 ou gK5) ; les bons modèles d'atmosphère s'arrêtent donc aussi à cette température. Cette limite reflète, sans doute, l'opinion habituelle que l'opacité d'origine moléculaire, autre que celle de H_2^+ , devient rapidement dominante au-delà de $T_e = 4\,700^\circ$. L'ion H_2^+ , certes, joue déjà un rôle dans les étoiles plus chaudes ⁽²⁾. K. Osawa ⁽³⁾ a dû considérer l'absorption continue de H_2^+ , en plus de celles de H et H^- , pour établir ses modèles d'atmosphère d'étoiles A ($T_e = 8\,900$ et $7\,560^\circ$) ; il a constaté que l'absorption par H_2^+ est importante dans le visible et le violet et que son introduction améliore l'accord entre la théorie et l'observation.

On s'est aussi demandé récemment s'il suffisait de limiter les sources d'opacité continue dans les étoiles froides, aux atomes et molécules à l'état gazeux. Il est permis de penser que les atmosphères les plus froides contiennent des particules solides ou liquides ⁽⁴⁾ causant, par diffusion, une opacité s'ajoutant à celle qui est due aux molécules gazeuses. A quelle température se forment ces particules liquides ou solides ? Le moment est venu pour le théoricien d'appliquer les données récentes sur les tensions de vapeur, de façon plus approfondie qu'on ne l'a fait jusqu'ici.

⁽¹⁾ *L'Astronomie*, 71, et , 1957.

⁽²⁾ D. R. BATES, M. N., 112, 40, 1952.

⁽³⁾ Kiyoteru OSAWA, Ap. J., 123, 513, 1956.

⁽⁴⁾ Pour références récentes, voir « Les particules solides dans les astres », Colloque, Liège, 1954, notamment O. STRUVE, p. 193.

Premières références :

P. W. MERRILL, Pub. Obs. Michigan, 2, 70, 1916 ;

R. WILDT, Zs. f. Ap., 6, 345, 1933 ;

J. O' KEEFE, Ap. J., 90, 294, 1939.

Il faut, d'ailleurs, envisager deux problèmes bien distincts. Le maximum du flux de rayonnement des étoiles froides se place aux environs de 10 000 Å. C'est donc l'opacité continue dans le domaine infrarouge proche qui concerne les « modèles » de distribution de température et pression ; nous l'examinerons un peu plus loin sous l'aspect théorique. Dans le domaine photographique et visuel habituel d'observation, la présence de bandes croissant en intensité lorsqu'on considère des étoiles de plus en plus avancées complique fortement par « effet de couverture », le problème du coefficient monochromatique d'absorption. Nous allons d'abord examiner les observations se rapportant à ce deuxième point.

II. — Observations relatives à l'opacité dans le domaine photographique et visuel.

On sait depuis longtemps que la présence de bandes intenses dans les étoiles M, S ou C avancées empêche pratiquement de fixer la position du vrai continuum. P. P. Dobronravin ⁽¹⁾ a encore examiné cette question récemment pour la région λ 4 000 — λ 8 000 d'étoiles M à fortes bandes de TiO. Il a comparé les étoiles β Peg (M2 II-III), ρ Per (M4 II-III) et α Her (M5 II) à α Ari (K2 III) et constaté que l'effet des bandes de TiO est beaucoup plus fort qu'on ne l'admet d'habitude dans les travaux de spectrophotométrie.

C'est surtout dans les étoiles carbonées que d'intéressantes observations relatives à l'opacité continue ont été effectuées. Il existe dans la région jaune, une « fenêtre » où les bandes d'absorption non résolues interfèrent peu avec les raies atomiques ou moléculaires discrètes. W. Buscombe ⁽²⁾ y a mesuré les largeurs équivalentes de nombreuses raies atomiques pour six étoiles de C1 à C5. L'intensité des raies devient généralement plus grande dans les types plus avancés ; ceux-ci sont moins opaques au rayonnement continu dans le jaune que les étoiles plus chaudes. D'ailleurs, une étoile C1 déficiente en hydrogène, HD 182 040 possède des raies atomiques beaucoup plus intenses qu'une étoile C1 normale : une diminution d'abondance en hydrogène diminue l'opacité de l'atmosphère dans la région visible.

La présence d'une opacité sélective se manifeste clairement par le comportement des bandes de CN et de C₂ dans le bleu-violet, le visible et l'infrarouge. Si on examine des bandes d'égale potentiel d'excitation et de même probabilité de transition, celles qui sont dans le bleu-violet sont nettement plus faibles que celles de plus grande longueur d'onde, ce qui indique que l'opacité sélective augmente frottement du rouge au violet ⁽³⁾.

Depuis longtemps, on sait que les étoiles carbonées les plus froides présentent une absorption continue dans le domaine $\lambda < 4\,500$; ce continuum est si intense dans les astres comme Y CVn, RY Dra, U Hya, qu'il

⁽¹⁾ P. P. DOBRONRAVIN, *Pub. Observ. Crimée*, **5**, 59, 1950.

⁽²⁾ W. BUSCOMBE, *Ap. J.*, **118**, 459, 1953.

⁽³⁾ A. S. KING et P. SWINGS, *Ap. J.*, **101**, 13, 1945 ;

A. MCKELLAR, *Pub. A. S. P.*, **66**, 312, 1954, voir p. 320.

est extrêmement difficile d'observer leur spectre dans la région de λ 4 000. De nombreuses études ont été consacrées à ce continuum ; il semble bien que son intensité évolue parallèlement à celle des bandes des deux molécules triatomiques C_3 et SiC_2 et qu'il soit, en fait, dû à une molécule polyatomique. La suggestion qu'il est causé par des poussières de graphite a aussi été émise ⁽¹⁾.

En fait, les molécules C_3 et SiC_2 présentent, toutes deux, un continuum dans le violet et l'ultraviolet. La distribution spectrale d'intensité dans le continuum de SiC_2 n'a pas encore été étudiée en laboratoire, alors que celle du continuum de C_3 a fait l'objet d'études de J. G. Phillips ⁽²⁾. La distribution d'intensité du continuum de C_3 en laboratoire est fort semblable au continuum des étoiles N avancées, tel qu'il a été déterminé par A. McKellar et E. H. Richardson ⁽³⁾. Il reste cependant quelque hésitation à attribuer le continuum des étoiles C à la molécule C_3 , car, au laboratoire, le continuum et le groupe λ 4 050 n'apparaissent pas dans les mêmes conditions expérimentales. Par exemple, le continuum n'apparaît pas en émission dans une décharge sans électrode donnant le groupe λ 4 050, mais tous deux sont présents dans une flamme acétylène-oxygène avec excès d'acétylène. Dans les comètes, le continuum n'apparaît pas, même lorsque λ 4 050 est intense. Les travaux expérimentaux de J. G. Phillips ⁽⁴⁾ sur les coefficients de température du groupe λ 4 050 et du continuum sembleraient indiquer que le continuum a un niveau inférieur qui est, au moins, 2,6 eV au-dessus de l'état normal de la molécule C_3 (niveau inférieur du groupe λ 4 050). Si cette conclusion de Phillips était confirmée, on ne pourrait continuer à attribuer le continuum des étoiles C avancées à la molécule C_3 .

Une autre difficulté avait été soulevée par M. W. Feast ⁽⁵⁾ qui a observé un continuum violet intense dans les étoiles AM Cen et GP Ori qui n'ont guère de bandes de Swan. Des observations spectrophotométriques récentes du même auteur ont toutefois montré que la distribution d'intensité du continuum dans AM Cen et GP Ori n'est pas la même que dans l'étoile carbonée avancée typique Y CVn. Les sources d'opacité dans la région violette de AM Cen et de Y CVn sont donc probablement différentes.

III. — L'opacité continue dans le domaine infrarouge.

Nous devons l'analyse théorique la plus poussée de cette question à R. Wildt ⁽⁶⁾ ; nous ne possédons malheureusement guère d'observations spectrophotométriques stellaires dans le domaine infrarouge.

On est porté à croire que l'ion H^- reste l'agent principal d'opacité dans le proche infrarouge, au moins dans les atmosphères pas trop froides. L'absorption de H^- possède un minimum à $1,6 \mu$; il serait important d'examiner des

⁽¹⁾ B. ROSEN et P. SWINGS, Ann. d'Ap., **16**, 82, 1953.

⁽²⁾ J. G. PHILLIPS et L. BREWER, Coll. Liège, 1954, p. 341.

⁽³⁾ A. MCKELLAR et E. H. RICHARDSON, Coll. Liège, 1954, p. 256.

⁽⁴⁾ J. G. PHILLIPS, Coll. Liège, 1956.

⁽⁵⁾ M. W. FEAST, Coll. Liège, 1954, p. 280 et Coll., 1956.

⁽⁶⁾ R. WILDT, Coll. Liège, 1956.

étoiles froides dans cette région. Si le minimum était absent, il faudrait bien rechercher un mécanisme autre que H^- . Peut-être les ions C^- , O^- , Si^- et S^- ont-ils une importance astrophysique? Nous ne savons encore rien à ce sujet.

Comment les molécules peuvent-elles affecter l'opacité dans le proche infrarouge? Il faut évidemment tenir compte de la diffusion Rayleigh par les molécules abondantes H_2 tout comme par les atomes H . En dehors de la diffusion, il faut distinguer deux sources moléculaires d'opacité stellaire dans l'infrarouge : 1° l'opacité due aux bandes de vibration-rotation (correspondant, pour les molécules, aux raies discrètes des atomes) ; 2° l'opacité due aux vrais continua moléculaires (correspondant aux continua d'ionisation atomiques).

L'effet de couverture des bandes de vibration-rotation ne revêt de l'importance que pour les molécules polyatomiques. En effet, les spectres de vibration-rotation des molécules diatomiques ne comportent que la fréquence fondamentale de vibration, plus des bandes faibles dues aux harmoniques ; d'ailleurs les molécules homonucléaires comme H_2 , C_2 ou O_2 n'ont pas de spectre infrarouge, puisqu'elles ne possèdent pas de moment dipolaire. Au contraire, les molécules polyatomiques manifestent, outre plusieurs fréquences fondamentales, leurs harmoniques et de nombreuses combinaisons. Ces bandes couvrent tout l'infrarouge qui transporte la majeure partie du flux d'énergie. L'effet de couverture des molécules polyatomiques est donc beaucoup plus grand que celui des molécules diatomiques, pour autant que les composés polyatomiques existent. Il est difficile d'estimer où cet effet devient significatif ; peut-être serait-ce aux environs de M2 dans la séquence à oxygène.

Les continua d'ionisation de toutes les molécules abondantes se trouvent dans l'ultraviolet lointain. Quant aux continua de dissociation, il n'y en a guère qui puissent affecter les spectres stellaires dans l'infrarouge, car les énergies de dissociation requises sont très faibles.

La molécule qui présente le plus d'intérêt est l'ion H_2^- formé de H ($1s^2S$) et H^- ($1s^2^1S$). Ces deux atomes donnent lieu à deux états de H_2^- , l'un stable $(\sigma_g 1s)^2 (\sigma_u 1s) ^2 \Sigma_u^+$, l'autre instable $(\sigma_g 1s) (\sigma_u 1s) ^2 ^2 \Sigma_g^+$, entre lesquels une transition est permise. On n'a pas encore calculé le continuum d'absorption résultant de cette transition, mais il est certain qu'il doit s'étendre sur une vaste région infrarouge. Si les ions H_2^- étaient abondants, on s'attendrait donc à ce que le continuum soit intense. Mais le rapport des abondances $H_2^- : H^-$ est petit, probablement inférieur à 0,01 dans toutes les étoiles. Il est donc probable que la contribution du continuum à l'opacité stellaire est faible.

Il y a lieu de considérer en outre le continuum associé aux transitions free-free d'un électron dans le champ d'une molécule H_2 neutre. On n'en connaît pas les probabilités de transition, mais il n'est pas impossible que ce mécanisme soit important, car l'importance relative des transitions free-free de H^- et de H_2^- est proportionnelle au rapport des pressions partielles de H et H_2 .