

41833B A mon ancien professeur,  
En hommage de cordiale gratitude  
P. Swings  
10.5.33

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN ET Cie  
6, rue de la Sorbonne, Paris V<sup>e</sup>

*Actualités Scientifiques et Industrielles*

**Série 1929 :**

- I. L. DE BROGLIE. La crise récente de l'optique ondulatoire. . . . . 35 fr.
- II. G. FOEX. Les substances mésomorphes, leurs propriétés magnétiques.
- III. BLOCH EUGÈNE. Les atomes de lumière et les quanta.
- IV. L. DUNOYER. La cellule photo-électrique et ses applications.
- V. G. RIBAUD. Le rayonnement des corps incandescents.
- VI. Lt. Colonel JULLIEN. Applications du courant électrique à la réalisation d'instruments de musique.
- VII. BROCH LÉON. Structure des spectres et structure des atomes.
- VIII. V. KAMMERER. Les hautes pressions de vapeur.
- IX. R. MESNY. Les ondes dirigées et leurs applications.  
*Conférences réunies en un volume* . . . . . 35 fr.

**Série 1930 :**

- X. G. RIBAUD. Température des flammes . . . . . 5 fr.
- XI. J. CABANNES. Anisotropie des molécules. Effet Raman . . . . . 8 fr.
- XII. P. FLEURY. Couleurs et colorimétrie . . . . . 5 fr.
- XIII. G. GUTTON. Les ondes électriques de très courtes longueurs et leurs applications . . . . . 4 fr.
- XIV. P. DAVID. L'électro-acoustique . . . . . 5 fr.
- XV. L. BRULLOIN. Les statistiques quantiques . . . . . 5 fr.
- XVI. F. BALDET. La constitution des comètes . . . . . 5 fr.
- XVII. G. DARMOIS. La structure et les mouvements de l'univers stellaire. . . . . 3 fr.

**Série 1931 :**

- XIX. A. PÉRAND. La haute précision des mesures de longueur . . . . . 5 fr.
- XX. P. AUGER. L'effet photo-électrique des rayons X dans les gaz . . . . . 5 fr.
- XXII. F. PERRIN. Fluorescence, durée élémentaire d'émission lumineuse.
- XXIII. M. DE BROGLIE. Désintégration artificielle des éléments par bombardement des rayons alpha . . . . . 5 fr.
- XXV. J.-J. TRILLAT. Les applications des rayons X à l'étude des composés organiques . . . . . 5 fr.
- XXVI. J.-J. TRILLAT. L'état liquide et les états mésomorphes . . . . . 5 fr.
- XXVII. Ph. LE CORBEILLER. Les systèmes auto-entretenus et les oscillations de relaxation . . . . . 8 fr.
- XXVIII. F. BEDEAU. Le quartz piézoélectrique, ses applications à la T. S. F. . . . . 5 fr.
- XXIX. E. DARMOIS. L'hydrogène est un mélange : Ortho et parahydrogène . . . . . 5 fr.
- XXX. R. AUDUBERT. Les piles sensibles à l'action de la lumière . . . . . 8 fr.

**Série 1932 :**

(Voir quatrième page de la couverture).

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES  
L  
EXPOSÉS DE PHYSIQUE MOLÉCULAIRE

Publiés sous la direction de  
**M. VICTOR HENRI**  
Professeur à l'Université de Liège

I  
**LES BANDES MOLÉCULAIRES**  
DANS LES  
**SPECTRES STELLAIRES**

PAR  
**P. SWINGS**  
Chargé de Cours à l'Université de Liège



PARIS  
**HERMANN & C<sup>ie</sup>, ÉDITEURS**  
6, Rue de la Sorbonne, 6

1932





## PRÉFACE



Le développement de la chimie physique dans ces vingt dernières années s'est orienté de plus en plus vers l'étude des réactions élémentaires, vers toutes les questions relatives à la structure des molécules et, d'une façon générale, à la physique moléculaire.

Cette orientation de la chimie physique moderne a conduit à la création, d'une part, d'un périodique spécial qui est la partie B du Zeitschrift für physikalische Chemie, dont le premier volume a commencé en 1925 et qui est maintenant à son dix-huitième volume.

Pour marquer cette orientation nouvelle, Eucken a appelé la dernière édition de son traité de chimie physique du nom de « physique chimique » (chemische Physik). De plus, un groupe de savants allemands a entrepris, en 1932, la publication d'un grand traité de « physique chimique » sous la direction d'Eucken et de Wolf. Pour ce traité sont déjà annoncés 12 volumes.

En Russie, en 1932, un institut spécial de « physique chimique » a été créé à Léninegrad sous la direction des Prof. Semenov, Frenkel et Kondratjew. Cet institut comporte 6 sections et publie des travaux relatifs à la physique moléculaire.

En Angleterre, la Faraday Society a consacré, dans ces dernières années, toute une série de réunions aux problèmes de la physique moléculaire.

En Amérique un périodique le « Journal of chemical physics » est publié par Birge, G. N. Lewis, I. Langmuir, A. Noyes, Tate et Urey.

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

COPYRIGHT 1932 BY LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN ET C<sup>o</sup>,  
PARIS.



Il ne me semble pas qu'il y ait lieu d'introduire un nom nouveau « physique chimique » dont le sens serait différent de celui de chimie physique. Je crois que l'on doit maintenir le nom de physique moléculaire qui est celui qui avait été choisi par les auteurs anciens tels que Tyndall (1870), O. Lehmann (Molekular-physik, 2 volumes, Leipzig 1888). C'est ce nom qui caractérise le mieux l'orientation moderne des recherches de physique appliquée à la chimie.

J'ai entrepris la direction d'une collection de monographies relatives à la physique moléculaire. Dans cette collection seront traités les problèmes d'actualité. La première brochure est celle de M. Swings sur les spectres moléculaires dans les étoiles.

M. Swings s'est spécialisé dans l'étude de cette question qu'il a étudiée d'un façon très personnelle, d'abord pendant son séjour à l'observatoire Yerkes à Chicago et ensuite ici à Liège.

La présence de spectres moléculaires dans les spectres de différentes étoiles apporte des vues particulièrement importantes pour la connaissance des atmosphères stellaires, ainsi que pour la connaissance de la formation des molécules et de l'évolution des étoiles.

Cette première monographie est un type de collaboration de physique, astro-physique et de chimie physique.

Ce travail de M. Swings n'est qu'un commencement qui sera suivi de plusieurs monographies du même auteur.

VICTOR HENRI.



## INTRODUCTION

L'APPLICATION des équations d'équilibre d'ionisation aux intensités des raies atomiques dans les spectres stellaires a fait de grands progrès ces dernières années, à la suite des travaux de M. N. Saha, C. H. Payne, etc. Ces équations ont permis de rendre compte, en gros, de l'évolution de l'intensité des raies des atomes et ions au sein de la séquence spectrale.

Certes, diverses difficultés ont été soulevées les mois derniers par O. Struve et W. W. Morgan (1), qui ont trouvé que le rapport des intensités de certaines raies d'absorption ayant même potentiel d'activation ou faisant partie d'un même multiplet peut varier d'une étoile à l'autre, ce qui semblerait indiquer que la simple application des équations d'équilibre d'ionisation n'est pas toujours suffisante pour l'interprétation spectrophotométrique. D'autre part, il reste encore sûrement beaucoup à faire dans le domaine de la spectrophotométrie atomique stellaire, comme par exemple l'étude systématique de l'absorption continue au delà de la limite de la série de Balmer; l'étude quantitative soigneuse des variations des intensités et contours des raies des Céphéïdes des divers types ( $\delta$  Cephei,  $\zeta$  Geminorum,  $\beta$  Cephei, ...); celle des lignes des étoiles variables à longue période; la photométrie des raies d'émission des étoiles de la classe Be et du type Mira Ceti, etc. Il n'en est pas moins vrai que la grosse partie du travail est faite et qu'elle constitue, en général, un succès pour les équations d'équilibre d'ionisation.

Un problème analogue se pose pour les bandes moléculaires et dans ce cas on ne sait que bien peu de chose, comparativement à ce qu'on connaît des atomes. En principe, le problème moléculaire est pourtant analogue à celui qui se pose pour les atomes, en ajoutant cette fois aux équations d'ionisation, celles d'équilibre de dissociation. Mais l'application de ces dernières équations



est compliquée et délicate. En effet, d'abord, on doit introduire dans les équations d'équilibre, les pressions partielles des constituants; or ceux-ci peuvent intervenir dans différentes molécules; d'où une première complication analogue à celle du « problème des  $n$  corps ». D'autre part, dans le cas d'un atome, on ne doit considérer qu'une espèce d'énergie, celle des électrons<sup>1)</sup>. Au contraire, pour les molécules, le niveau énergétique quantique est la somme de trois termes: l'énergie électronique, celle de vibration des noyaux et celle de rotation de l'ensemble du système autour d'un axe d'inertie.

Il y a encore d'autres raisons au fait que nos connaissances sont si peu développées au sujet des composés moléculaires dans les astres. L'Astrophysique est évidemment toujours soumise aux recherches des physiciens. Or les spectres de molécules, tant du point de vue théorique que du point de vue expérimental, n'ont réellement fait de grands progrès et acquis de l'actualité que durant ces quelques dernières années. Notamment, l'établissement des niveaux électroniques est spécialement délicat et ce n'est que depuis les beaux travaux de R. S. Mulliken, F. Hund, E. U. Condon, V. Henri, W. Weizel, R. Mecke, R. T. Birge, A. Christy, etc., qu'on est parvenu à démêler les spectres de quelques composés; on peut dire d'ailleurs que les niveaux électroniques sont encore assez mal connus et qu'on est encore loin de posséder pour les molécules un analogue des représentations graphiques des niveaux atomiques du type de Grotrian<sup>2)</sup>.

On ne doit pas non plus oublier les difficultés techniques qui se présentent. Le domaine spectral couvert par les spectres stellaires est étroit; aucun ne dépasse dans l'ultra-violet 2950 Å; la majeure partie des spectres sont obtenus avec des appareils en verre ne permettant d'atteindre vers les courtes longueurs d'onde que 3800 Å. Vers le rouge, la plupart des spectres ne dépassent guère 5000 Å; une faible minorité en ont été pris sur plaques panchromatiques et atteignent 7500-8000 Å.

D'autre part, les bandes apparaissent dans les étoiles les moins chaudes, c'est-à-dire là où l'on trouve un très grand nombre de

1. Du moins si on ne s'occupe pas de structure hyperfine.

2. Dans le cas des molécules, les traits horizontaux des niveaux électroniques des atomes devraient être remplacés par les courbes de Franck.

Voir R. S. Mulliken, Reviews of Modern Physics, 4, 4, 1932.

raies atomiques. Les très nombreuses raies de rotation viennent se superposer aux non moins nombreuses raies atomiques et leur séparation n'est pas du tout aisée. On reviendra sur cette question au cours de l'exposé.

Il n'en est pas moins vrai que l'étude des bandes moléculaires dans les spectres stellaires présente actuellement un très grand intérêt. C'est un domaine presque complètement inexploré, où l'on peut appliquer les énormes progrès qu'a faits depuis quelques années la Physique moléculaire. De plus, ces recherches sont urgentes; l'Astrophysique en a besoin pour augmenter un peu nos connaissances sur les étoiles froides. Si l'on commence à connaître théoriquement et expérimentalement les étoiles O, P, B, A, F, et G, en revanche, on sait bien peu de chose des classes K, M, S, R et N. Non seulement, il y a encore beaucoup de travail d'identification à faire, mais il faudrait aussi étudier les structures fines du point de vue, par exemple, des isotopes; il y aurait lieu d'examiner la question des intensités des bandes etc.

Le présent travail a pour but de synthétiser les connaissances actuelles sur la question, d'indiquer quelques précautions techniques qui s'imposent au chercheur et de signaler des problèmes qui se posent. Nous n'avons considéré dans ce travail que les spectres d'étoiles. Pour les comètes, nous renvoyons à l'excellente monographie qu'a publiée F. Baldet dans cette collection (n° xvi), ainsi qu'à un bon exposé écrit récemment par J. Genard (2). Pour les planètes, nous renvoyons aux travaux de R. Wildt (3) et à la monographie de J. Genard.

Nous excluons aussi de ce travail les « bandes » brillantes des novae et étoiles de Wolf-Rayet. Ces « bandes » n'ont pas une origine moléculaire; ce sont simplement des raies atomiques élargies par effet Doppler-Fizeau. D'après les recherches récentes de Beals (4) complétées par celles de J. Genard (5), il semble bien que ces « bandes » proviennent d'atomes expulsés par la pression de radiation, l'atmosphère stellaire étant simultanément le siège de puissants courants ou de fortes explosions, se manifestant à nous par l'irrégularité de la répartition de l'intensité à l'intérieur des bandes d'émission.

De même nous excluons les raies atomiques d'absorption ou d'émission, élargies par effet Doppler de rotation de l'ensemble de l'étoile (travaux de O. Struve (6)).



Notre but est de nous occuper exclusivement des bandes moléculaires des spectres stellaires. Nous n'avons pas la prétention d'avoir fait œuvre complète ; nous avons surtout considéré les problèmes modernes et les recherches correspondantes.

Nous avons écrit ce travail à la demande de M. le Professeur V. Henri, à qui nous tenons à exprimer nos vifs remerciements.

### I. — Molécules identifiées dans les spectres stellaires.

Jusqu'à présent, on a identifié avec certitude, dans les étoiles, les composés suivants :

( Oxydes :	BO*, AlO, TiO, ZrO ;
( Combinaisons hydrogénées :	H <sub>2</sub> *, NH***, OH**, CaH*, MgH* ;
( Combinaisons carbonées :	C <sub>2</sub> *, CH, CN ;
( Fluorure :	SiF**.

Les molécules marquées d'un astérisque ne se trouvent que dans les taches solaires ; celles qui sont marquées de deux astérisques se trouvent à la fois dans la surface solaire et dans les taches, mais leur densité est plus grande dans les taches. Les autres molécules se trouvent dans les étoiles.

On remarquera que toutes ces molécules sont diatomiques. Certaines sont étrangères à la nomenclature chimique ; on ne peut pourtant douter de leur identification, à cause des propriétés qu'ont révélées les bandes (moment d'inertie, fréquence de vibration des noyaux, structure fine, effet d'isotopie) ; ce sont des édifices permis dans les conditions physiques régnant dans les atmosphères stellaires, mais qui ne sont pas stables dans la chimie ordinaire.

On n'a jamais observé de spectre moléculaire d'étincelle dans les étoiles<sup>1)</sup>. On ne connaît d'ailleurs que peu de spectres de molécules ionisées (CO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, BeH<sup>+</sup>, MgH<sup>+</sup>, ZnH<sup>+</sup>, CdH<sup>+</sup>, HgH<sup>+</sup>, HCl<sup>+</sup>) et ceux-ci ne peuvent pas être excités thermiquement, les énergies d'ionisation étant supérieures aux chaleurs de dissociation des molécules neutres ; une augmentation de température brise les molécules, mais ne les ionise pas.

Bien plus, pour la plupart des bandes (notamment de BO, C<sub>2</sub>, CH, CN, OH et TiO), les spectres proviennent de passages

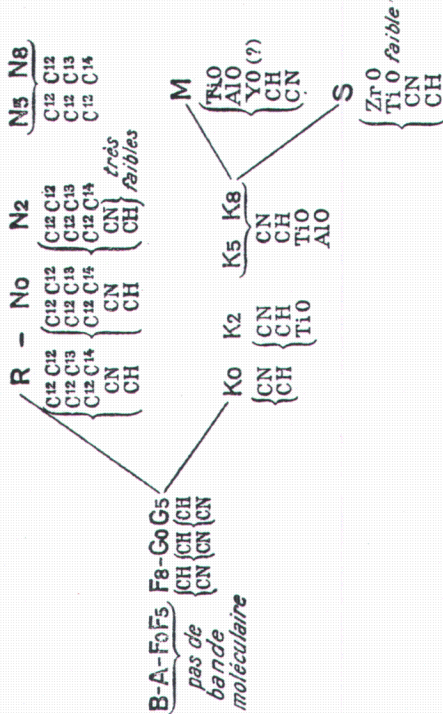
1. On a trouvé les bandes de CO<sup>+</sup> et N<sub>2</sub><sup>+</sup> dans les comètes ; ces spectres sont probablement excités par chocs de rayons corpusculaires issus du soleil ; ils ne rentrent pas dans le cadre du présent travail.



d'absorption à partir du niveau fondamental et c'est probablement aussi le cas pour les autres.

On trouvera au tableau I, les molécules présentes dans les différents types spectraux stellaires.

TABLEAU I  
Combinations moléculaires intervenant dans les différentes classes de la séquence spectrale.



- REMARQUES.
1. Soleil (main GO) : CH, CN, OH, NH.
  2. Taches solaires (KO) : CH, CN, C<sub>2</sub>; H<sub>2</sub>, OH, NH, MgH, CaH, AlH (?); TiO, BO, AlO (?); SiF.
  3. Plusieurs bandes des étoiles R et N n'ont pas encore pu être interprétées; c'est le cas notamment des bandes intenses dont les têtes ont pour longueurs d'onde 4979 et 4868 Å et des bandes faibles 5035, 4932, 4905, 4642, 4572 et 4540 Å.

II. — Oxydes.

Les oxydes des éléments relativement abondants dans les étoiles sont :

BO*	CO	NO	AlO*	SiO	PO	SO	CaO
TiO*	VO	CrO	MnO	SrO	YO	ZrO*	BaO.

Parmi ces composés, seuls ceux qui sont marqués d'un astérisque existent avec certitude dans les astres. Pour les autres, il se

peut que leur présence ne soit pas décelable parce que, d'après la position de leurs niveaux électroniques, il n'existe pas dans le domaine spectral astronomique, de bande correspondant à une énergie d'activation qui ne soit pas trop élevée; c'est sûrement le cas de NO, SiO, PO et SO.

D'autres remarques sont à faire :

1° D'après l'abondance de l'oxygène relativement à l'azote et étant donné le fait que la chaleur de dissociation de CO (260 Kcal/mol) est supérieure à celle de CN (210 Kcal/mol), on devrait théoriquement s'attendre à voir les bandes d'Angström<sup>1</sup> de CO apparaître vers F8-G0. Mais on ne les a jamais observées.

2° Il est possible que VO (chaleur de dissociation 120 Kcal/mol) soit présent (7), la bande (0-0) de cette molécule coïncidant avec une bande faible λ 5738 Å de  $\alpha$  Ceti.

3° Certaines coïncidences semblent aussi indiquer la présence d'oxyde d'yttrium (8) YO et de chaux CaO.

4° Les éléments Cr et Mn sont, tout comme le vanadium, relativement abondants dans les atmosphères stellaires et les bandes les plus intenses de leurs oxydes tombent dans le domaine visible. On n'a cependant jamais observé la présence de ces bandes.

En examinant le tableau I, on verra dans quelles classes on a trouvé les oxydes examinés. Nous allons maintenant ajouter quelques détails au sujet de TiO, AlO et ZrO.

A. — Oxyde de titane TiO. — Les bandes de TiO constituent la caractéristique des étoiles M<sup>2</sup>. Elles furent d'abord attribuées à la molécule TiO<sub>2</sub> par Fowler (9) qui les avait retrouvées en laboratoire. C'est Birge et Christy (10) qui, les premiers, ont montré que les bandes considérées doivent être attribuées à la molécule diatomique TiO.

Il y a deux systèmes de bandes électroniques distincts : l'un

1. Les niveaux électroniques de CO sont bien connus; le niveau fondamental est 1<sup>1</sup> Σ. Les seules bandes du domaine astronomique sont les bandes d'Angström 2<sup>1</sup> Σ - 2<sup>1</sup> Π, le niveau 2<sup>1</sup> Σ comportant environ 8 vols.

2. Les bandes d'absorption des étoiles M, tout comme celles des étoiles S dont il sera parlé plus loin, sont dégradées vers le rouge, tandis que celles des étoiles R et N sont dégradées vers le violet. C'est par ce caractère que l'on classait les spectres d'étoiles froides avant l'identification des bandes.





dans le vert, l'autre dans le rouge ; ce sont deux systèmes de résonance dont les passages électroniques sont vraisemblablement  $^3\Pi - ^3\Pi$  et  $^3\Pi - ^3\Sigma$ , le niveau initial  $^3\Pi$  étant le même pour les deux transitions. Le moment d'inertie dans l'état  $^3\Sigma$  a été trouvé égal à environ  $55.10^{-40}$  gr. cm<sup>2</sup> et la distance des noyaux, à 1,66.  $10^{-8}$  cm. La chaleur de dissociation vaut environ 160 Kcal/mol.

Ces bandes ont été surtout étudiées dans le spectre de Mira Ceti (Ceti (Ceti), qui est le type des étoiles variables à longue période (14). Hogg (11 bis), partant des théories de Condon sur les intensités des bandes, a donné quelques résultats relatifs aux intensités relatives des bandes de TiO ; mais il y aurait lieu de reprendre ce travail en prenant de grandes précautions au point de vue photométrie photographique.

B. — *Oxyde d'aluminium* AlO. — Dans le spectre de Mira Ceti, plusieurs bandes étaient restées non identifiées jusqu'en 1928 ; elles ont été récemment interprétées par Baxandall (12), qui a montré qu'elles étaient dues vraisemblablement à AlO ; l'accord entre les longueurs d'onde des têtes de bande mesurées au laboratoire et dans les spectres stellaires n'est d'ailleurs pas encore parfait.

La chaleur de dissociation de AlO n'est que 95 Kcal ; cette énergie est notablement plus faible que celle de TiO et ZrO. Il est curieux de constater que les oxydes de Cr, V et Mn dont les chaleurs de dissociation <sup>1)</sup> sont intermédiaires entre celles de AlO et de TiO et dont les bandes d'absorption les plus intenses tombent dans le spectre visible, n'ont pas encore pu jusqu'à présent être repérées avec certitude ; les atomes Cr, V et Mn existent pourtant en abondance dans les atmosphères d'étoiles froides.

C. — *Oxyde de zirconium* ZrO. — Les travaux expérimentaux et astronomiques de P. W. Merrill (13) ont montré que les bandes de ZrO se retrouvent dans un certain nombre d'étoiles froides, appelées étoiles S où les bandes de TiO sont généralement faibles ou absentes. Une seule étoile présente à la fois les bandes de TiO et ZrO intense ; c'est  $\chi$  Cygni qu'on hésite encore actuellement à classer comme étoile S ou étoile M.

1. Ces énergies sont respectivement 115, 120 et 100 Kcal/mol.

Comme dans le cas des étoiles M, les astres caractérisés par les bandes d'absorption de ZrO présentent aussi en émission les raies de H et Fe<sup>+</sup>.

Les chaleurs de dissociation de TiO et ZrO sont, d'après Wildt, sensiblement égales ; on comprend donc que les deux espèces de molécules apparaissent simultanément comme dans le cas de  $\chi$  Cygni. Mais quelle peut-être la différence d'état physique causant cette séparation nette entre étoiles M à oxyde de titane et étoiles S à oxyde de zirconium ? On ne peut encore répondre à cette question. D'une part, Wildt déclare que la chaleur de dissociation de ZrO est très légèrement inférieure <sup>1)</sup> à celle de TiO ; alors que d'après les expériences de King (14), il semble que les bandes de ZrO exigent pour apparaître dans le four électrique, des températures plus élevées que TiO. D'autre part, d'après P. W. Merrill (15), les étoiles S seraient un peu plus chaudes que les étoiles M, car il apparaît dans les premières, certaines raies d'arc de Zr, que l'on ne trouve pas dans les secondes. A moins qu'il n'y ait à envisager une question de densité en Zr différente pour les deux espèces d'astres ; Merrill déclare en effet que les étoiles S montrent plusieurs raies de Zr qualifiées par H. N. Russell, de raies « ultimes », alors que ces raies manquent dans les étoiles M. Il est possible d'ailleurs qu'il y ait aussi un effet de magnitude absolue, les étoiles S observées ayant, d'après Merrill, des densités plus faibles que les étoiles M. Bref, la question reste à élucider.

On peut remarquer que si les porteurs des bandes étaient TiO<sub>2</sub> et ZrO<sub>2</sub>, les faits observés seraient plus faciles à interpréter, les chaleurs de dissociation de ces deux composés étant respectivement 218 et 266 Kcal/mol. Mais il ne paraît pas possible de douter, après les travaux de A. Christy que les porteurs soient diatomiques.

### III. — Combinaisons hydrogénées

Nous placerons plutôt CH dans la catégorie des composés carbonés, à cause de sa similitude complète avec CN. Les molécules OH et NH existent dans le Soleil, surtout dans les taches ; MgH

1. Il se pourrait que cette détermination soit erronée dans le cas de ZrO, dont on ne connaît pas les niveaux électroniques.



isotopes : l'une de longueur d'onde  $\lambda$  4744 Å est émise par C<sup>12</sup> C<sup>2</sup>, l'autre  $\lambda$  4752 Å est due à C<sup>13</sup> C<sup>14</sup>.

Dans le laboratoire, la bande C<sup>12</sup> C<sup>12</sup> est de loin la plus intense, C<sup>12</sup> C<sup>13</sup> étant d'ailleurs notablement plus intense que C<sup>12</sup> C<sup>14</sup>. Au contraire, dans certains spectres stellaires, la bande due à C<sup>12</sup> C<sup>14</sup> est presque aussi intense que celle due à C<sup>12</sup> C<sup>13</sup>. Ceci provient vraisemblablement des conditions physiques des étoiles qui sont différentes de celles des laboratoires.

B. — *Molécule CH.* — Cette combinaison donna lieu dans les spectres stellaires à deux bandes, l'une située vers  $\lambda$  4300, l'autre vers  $\lambda$  3900 Å. La première se trouve dans une région contenant de nombreuses raies atomiques fortes, et la superposition de toutes ces raies (atomiques et moléculaires) constitue la « bande G » de Fraunhofer, très intense dans le Soleil. Les bandes voisines de 4300 et 3900 Å résultent respectivement des passages électroniques  $^2\Pi - ^2\Delta$  et  $^2\Pi - ^2\Sigma$ ; le niveau le plus bas  $^2\Pi$  est probablement le niveau fondamental de la molécule CH. L'attribution de ces bandes à la combinaison CH a été faite par Newall, Baxandall et Butler (19). De remarquables recherches ont été faites par R. S. Mulliken sur l'analyse de leur structure (19 bis).

C. — *Molécules CN.* — Les bandes de CN observables dans les astres se trouvent dans deux régions spectrales différentes ; les

TABLEAU II

n'	n''	0	1	2	3	4	5	6	7
0	3883		4216	4606					
1	3590			4197	4578				
2					4181	4553			
3							4532		
4								4515	
5									4503

unes correspondant au passage électronique  $^2\Sigma - ^2\Sigma$  tombent entre  $\lambda$  3590 et  $\lambda$  4610 Å; les autres dues à une transition  $^2\Sigma - ^2\Pi$  sont dans le rouge vers  $\lambda$  7000 Å. Le niveau le plus bas  $^2\Sigma$  des deux transitions électroniques est le même pour les deux systèmes

et CaH ne se trouvent que dans les taches (16). Joy a aussi cru observer MgH dans o Ceti; mais c'est très peu certain. L'hydride AlH est peut-être aussi présent dans Mira Ceti, une faible bande d'absorption mesurée par Joy coïncidant avec une bande  $\lambda$  4242 Å de AlH obtenue en absorption par Hulthén; mais les autres bandes de AlH manquent. D'après les observations de Richardson, AlH est peut-être aussi présent dans les taches solaires.

Les énergies de dissociation de ces molécules sont assez faibles. Pour MgH, la formule des bandes est bien connue et donne pour la chaleur de dissociation  $D = 50$  Kcal/mol; pour CaH, la valeur de  $D$  est sensiblement la même. Pour OH et NH,  $D$  est de l'ordre de 120 Kcal/mol. Il paraît assez remarquable que MgH et CaH subsistent encore pour la température des taches solaires. Ce fait est probablement dû à la pression relativement élevée existant dans les taches et à l'extrême abondance en hydrogène dans tous les astres, ce qui cause un ralentissement du processus de décomposition des combinaisons hydrogénées.

IV. — Combinaisons carbonées

A. — *Molécule C<sub>2</sub>.* — Le spectre de Swan, caractéristique des classes R et N est dû (17) à la molécule C<sub>2</sub> et non comme on l'avait cru jusque tout récemment, à l'oxyde de carbone CO<sup>(1)</sup>. Les travaux de Heisenberg et Hund ont montré que lorsque les noyaux d'une molécule diatomique homopolaire ne possèdent pas de spin, il manque une raie sur deux dans les bandes de rotation (il y a seulement des termes ortho ou para); quand il y a un spin, aucune raie ne manque, mais on observe une variation alternée des intensités des raies, les termes ortho et para étant cette fois présents simultanément, mais inégalement fréquents. Dans le cas des bandes de Swan intenses, on constate très bien cette variation alternée des intensités des raies de rotation.

Les recherches de King, Birge, Menzel et Sanford (18) ont montré qu'à côté de la bande  $\lambda$  4737 Å due à la molécule diatomique C<sup>12</sup> C<sup>12</sup>, apparaissent deux autres bandes dues aux

1. Pour interpréter la structure de rotation des bandes de Swan, on doit admettre que le passage électronique est  $^2\Pi - ^2\Pi$ .

2. C<sup>13</sup> signifie atome C de masse 12.



tés, la chaleur de dissociation de CH étant notablement moindre que celle de CN.

La chaleur de dissociation de CN a été déterminée spectroscopiquement, la valeur trouvée 220 Kcal/mol étant en excellent accord avec celle qu'on déduit des méthodes thermochimiques (210 Kcal/mol, nombre que nous utiliserons dans la suite). Quant à la chaleur de dissociation de CH, on n'en a aucune détermination spectroscopique ; les valeurs obtenues chimiquement sont très diverses (30), allant de 90 à 120 Kcal/mol (nous emploierons la valeur 110 Kcal/mol).

D'où proviennent les contradictions dans les limites d'appariation des bandes ?

Nous avons indiqué dans l'introduction, la source facile d'erreurs provenant de la superposition de raies atomiques. Prenons par exemple la région de 4250 à 4320 Å qui est relativement très riche en CH et comptons les raies atomiques et moléculaires se trouvant dans le spectre solaire (31) (nain GO) ; nous obtenons le tableau III montrant combien la contribution des raies moléculaires à la « bande G » de Fraunhofer est faible par rapport à celle des raies atomiques.

TABEAU III

Intensité Rowland	15	8	7	6	5	4	3	2,3, superpositions
Nombre de raies atomiques	1	3	1	2	3	8	18	48
Nombre de raies de CH	—	—	—	—	—	1	3	16
								12

On en déduit de suite que sur des plaques à faible dispersion ou à gros grain ou prises au prisme-objectif, la région d'absorption aux environs de 4300 Å est presque entièrement due aux raies atomiques.

TABEAU IV

Intensité Rowland	8	6	5	4	3	2	1	0
Nombre de raies atomiques	1	1	2	5	8	7	17	17
» CN (certaines)	—	—	—	—	—	—	—	—
» CN (incertaines)	—	—	—	—	—	—	—	—

LES BANDES MOLÉCULAIRES.

de bandes. On connaît peu de chose des bandes rouges. Quant aux autres, leurs longueurs d'onde sont indiquées dans le tableau II<sup>1)</sup>.

Dans les spectres stellaires, ces bandes ont été observées par Shane ; par Hale, Ellerman et Parkhurst et par Rufus (20).

Dans les chapitres suivants, nous allons nous étendre un peu plus longuement sur les bandes de CH et CN.

V. — Propriétés générales des bandes de CH et CN dans les spectres stellaires.

Les bandes de CH sont observées dans les deux branches G — K et G — N de la séquence spectrale. D'après W. C. Rufus (21), la bande λ 4300 atteint son intensité maximum respectivement en RO et KO. Dans la branche G-N, C.D. Shane (22) place son maximum en R3. A partir de N3 et Mb, la bande devient extrêmement faible. Pour les bandes du cyanogène CN, B. Lindblad (23), place le maximum entre G5 et K5 et C. D. Shane trouve un autre maximum vers R5 dans la branche secondaire G — N.

Pour ce qui concerne les limites supérieures du type spectral où les bandes de CH et CN sont à la limite de perceptibilité, les différentes estimations faites étaient jusque tout récemment, plutôt contradictoires (23 bis). Pour CN, la limite supérieure est généralement (24) placée entre F5 et GO, toutfois certains auteurs (25) ont cru suivre la bande jusque AO. Il semble bien certain pourtant à l'heure actuelle que les molécules CN ne puissent subsister à une température aussi élevée ; la bande continue voisine de λ 4200 Å observée dans certaines étoiles de type chaud est vraisemblablement d'origine instrumentale (absorption par le verre du système optique (26)). Quant à la bande CH, certains auteurs (27) placent la limite supérieure en AO, d'autres (28) en F2.

En général (29), on croyait aussi jusque tout récemment que les bandes de CH subsistent à des températures beaucoup plus élevées que celles de CN ; ce qui conduisait à de grosses difficultés.

1. Pour les détails sur les niveaux électroniques et les formules des termes, voir Weizel, Bandenspektren, pp. 340 et suiv.



La même remarque peut se faire pour les bandes de CN, pour lesquelles nous examinerons par exemple la région de  $\lambda$  4190 à  $\lambda$  4210 Å; nous obtenons le tableau IV.

La seule méthode logique consiste, soit à travailler à dispersion élevée, soit à opérer à dispersion moyenne avec fente étroite et plaques à grain fin et dans ce deuxième cas à repérer avec soin une étroite zone spectrale où l'on soit sûr de ne pas avoir de superposition de raies atomiques.

Ce travail a été fait (32) pour un nombre important de spectres stellaires échelonnés de G5 à F0; il a montré que les bandes de CH et CN disparaissent sensiblement à la même place dans la séquence spectrale, savoir en F8. La décroissance d'intensité est extrêmement rapide lorsqu'on passe de GO à F5, alors que la différence de température est à peine de 1000 degrés<sup>1)</sup> (on va de 6000 à 7000°K environ); par exemple dans le Soleil (rain GO), les bandes sont relativement fortes et elles sont disparues dans Procyon (rain F5).

Les chaleurs de dissociation des molécules CH et CN étant très différentes, il peut encore paraître étrange que les bandes de ces deux espèces de molécules disparaissent à la même température<sup>2)</sup>. Nous allons montrer que ceci peut être expliqué par l'énorme abondance en hydrogène dans les atmosphères stellaires, ce qui cause un ralentissement du processus de décomposition de CH.

Considérons une molécule AB; désignons par  $p_A$ ,  $p_B$  et  $p_{AB}$  les pressions partielles des constituants, exprimées en atmosphères et par  $K_p$  le coefficient d'équilibre à pression constante

$$K_p = \frac{p_A p_B}{p_{AB}}$$

1. Ceci peut s'expliquer aisément en appliquant les équations d'équilibre de dissociation.

2. Nous prendrons pour la classe F8 où disparaissent les bandes de CH et CN, la température 6500° K (nombre de Brill); les conclusions seraient les mêmes pour une autre valeur de la température de F8, légèrement différente de 6500° K.

Les équations d'équilibre sont<sup>1)</sup>

$$(1) \text{ CN} \rightarrow \log K_p = -\frac{210000}{4,541 T} + 1,5 \log T + \log \left( 1 - e^{-\frac{2940}{T}} \right) + 0,07,$$

$$(2) \text{ CH} \rightarrow \log K_p = -\frac{110000}{4,541 T} + 1,5 \log T + \log \left( 1 - e^{-\frac{4000}{T}} \right) - 0,40.$$

Le calcul pour  $T = 6500^\circ \text{ K}$  (classe F8) donne

$$\log K_p^{\text{CN}} = -1,7 \text{ et } \log K_p^{\text{CH}} = 1,3.$$

D'après la définition du coefficient  $K_p$ , on a

$$\log \frac{p_{\text{CH}}}{p_{\text{CN}}} = \log \frac{K_p^{\text{CH}}}{K_p^{\text{CN}}} + \log \frac{p_{\text{H}}}{p_{\text{N}}}$$

On ne connaît pas bien la valeur du rapport  $\frac{p_{\text{H}}}{p_{\text{N}}}$ ; mais on peut en faire une estimation plus ou moins correcte en partant des considérations suivantes: H. N. Russell (33) a trouvé que dans la couche renversante du Soleil, l'hydrogène est à peu près  $10^4$  fois plus abondant (en nombre d'atomes) que l'azote. La masse totale des atomes d'H, par unité d'aire, est donc environ  $10^3$  fois plus forte que celle des atomes N. Les pressions partielles résultant simplement des concentrations, on peut donc probablement poser

$$\log \frac{p_{\text{H}}}{p_{\text{N}}} \approx 3;$$

Ce qui donne

$$p_{\text{CH}} = p_{\text{CN}},$$

pour  $T = 6500^\circ \text{ K}$  (classe F8).

La disparition simultanée des bandes de CH et CN peut donc être ainsi expliquée.

On doit ajouter le fait que le coefficient d'absorption de CH est probablement plus grand que celui de CN. Les bandes violettes du cyanogène résultent d'une transition électronique  ${}^2\Sigma - {}^2\Sigma$ , alors que la bande de CH correspond à  ${}^2\Pi - {}^2\Pi$ . La probabilité de ce dernier saut quantique est supérieure à celle du premier, ce qui peut être la cause du fait que dans les classes GO et F8, la bande de CH est plus intense que celle de CN (34).

1. Pour l'établissement de ces formules, voir R. Wildt, *Zs. für Ph.*, 54, 856, 1929. Nous avons simplement remplacé la chaleur de dissociation de CH par la valeur plus moderne 110 Kcal/mol.



### VI. — Les bandes de CH et CN dans les étoiles variables du type $\delta$ Cephei (35)

Puisque les bandes moléculaires varient d'intensité le long de la séquence spectrale, on doit s'attendre aussi à ce qu'elles varient dans le spectre d'une étoile variable céphéide, en fonction de la phase. Prenons par exemple le cas de  $\delta$  Cephei qui est l'étoile typique de ce genre ; sa période est d'environ 5 jours et demi ; en même temps que sa magnitude passe de 3.62 à 4.27, son type spectral va, selon H. Shapley et C. H. Payne (36), de F4 à G6. Il y correspond une variation importante de température ; il y a d'ailleurs simultanément des changements de pression. L'hypothèse qui paraît le mieux interpréter les phénomènes est celle des pulsations, d'après laquelle l'étoile subirait des variations périodiques et continues de volume ; on constate en effet que, en même temps que la magnitude de l'étoile varie, sa vitesse radiale se modifie également. En particulier, dans le cas de  $\delta$  Cephei, si l'on associe l'hypothèse des pulsations à la courbe des vitesses radiales, on trouve que :

- 1° lors du maximum et du minimum de lumière, l'étoile est à peu près à son volume moyen ;
- 2° son volume atteint son maximum pour la phase 0.38 et son minimum pour la phase 0.90.

Le maximum et le minimum de lumière correspondent sensiblement au type spectral le plus chaud et au type le plus froid.

Les bandes de CH et CN manifestent des variations importantes, d'ailleurs semblables pour les deux espèces de molécules. Elles apparaissent à peu près à la phase 0.16 (soit 0.85 jour après le maximum de lumière) ; leur intensité va en croissant, atteint son maximum vers les phases 0.70-0.75 (minimum de lumière), puis décroît et s'annule vers la phase 0.90. Les microphotogrammes de la figure 1 montrent l'absence d'absorption CH au maximum de lumière (enregistrement supérieur) et l'absorption appréciable au minimum (tracé inférieur).

Dans l'hypothèse des pulsations, chaque point de la partie descendante de la courbe de lumière devrait correspondre à une température plus basse que le point de même luminosité sur la

LES BANDES MOLÉCULAIRES DANS LES SPECTRES STELLAIRES 21  
branche ascendante <sup>1)</sup>. Ceci se vérifie sur les bandes de CH et CN qui sont les plus intenses sur la branche descendante.

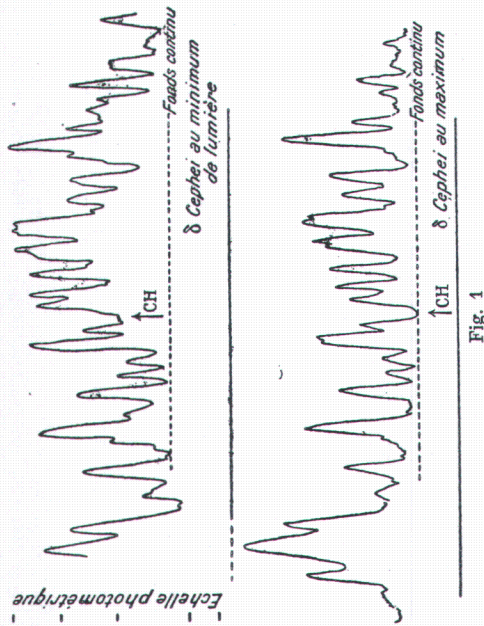


Fig. 1

Considérons dans le spectre une étroite région d'absorption, qu'on puisse attribuer sans aucune crainte exclusivement aux molécules CH et déterminons pour quelques phases les pourcentages d'absorption <sup>2)</sup> à la longueur d'onde considérée (sur la figure 1, cette région est indiquée par une flèche). Nous obtenons le tableau suivant.

TABLEAU V

Phase	Absorption en %	N	Classe spectrale <sup>3)</sup>
0,38	12,5	39	G 3
0,55	17	72	G 5
0,71	20	100	G 6
0,75	20	100	G 6

1. Ceci compense le fait que sur la branche descendante, le volume est toujours supérieur au volume moyen, alors que le contraire se présente sur la branche ascendante.

2. Ceci implique une standardisation très soignée des plaques photographiques utilisées.

3. D'après H. Shapley et C. H. Payne.



Dans la 3<sup>e</sup> colonne, nous avons indiqué le nombre N de molécules donnant lieu à l'absorption inscrite dans la 2<sup>e</sup> colonne et en prenant pour les phases 0.71 et 0.75 la valeur N = 100. Cette colonne indique donc la variation de la concentration en molécules CH. Nous ne reproduirons pas ici les calculs qui nous ont fourni les valeurs des nombres N<sup>1)</sup>; ils sont basés sur les théories de Unsöld relatives aux contours des raies spectrales stellaires. Nous nous contenterons de montrer qu'ils sont en parfait accord avec ceux que l'on tire des équations de dissociation.

Reprenons l'équation (2) et appliquons-la pour différentes températures<sup>2)</sup>.

TABLEAU VI

T	log K <sub>p</sub>	N
4.600° K	9,6267	100
4.700	9,7461	76
4.800	9,8606	59
4.900	9,9708	45
5.000	0,0764	36
5.100	0,1781	28
5.200	0,2758	23

Les nombres N observés étant 100, 72 et 39 correspondent aux températures 4600, 4720 et 4975° K, c'est-à-dire aux classes spectrales G6, G5 et G3 (37); l'accord entre les mesures et les calculs est donc très satisfaisant.

Remarquons en passant combien la plupart des recherches relatives aux bandes — et même aux raies atomiques! — dans les Céphéïdes sont imprécises ou même fautives. En particulier, pour ce qui concerne les bandes de CH et CN, presque tous les travaux (38) sont viciés par la superposition de raies atomiques beaucoup plus intenses que les raies de molécules. Cela a conduit à émettre toutes sortes d'hypothèses: par exemple que les molé-

1. On les trouvera dans le mémoire original; P. Swings, *Monthly Notices of the R. A. S.*, 92, 140, 1931.

2. On suppose constantes les pressions partielles en carbone et hydrogène, ce qui est exact avec une assez bonne approximation, étant donné la très faible concentration relative en CH.

cules CN sont ionisées dans les atmosphères stellaires, etc. Il est d'ailleurs regrettable qu'à l'heure actuelle on dispose encore de si peu de documents quantitatifs sur les variations d'intensité des raies des spectres de Céphéïdes. Ces documents seraient pourtant d'une importance fondamentale pour la discussion de l'hypothèse des pulsations, l'étude des modifications des conditions physiques des atmosphères en fonction de la phase (température, pression, ionisation), etc.

VII. — Influence de la magnitude absolue sur les bandes de CH et CN (39)

Cette influence résulte nettement, par exemple, des deux observations suivantes:

1<sup>o</sup> Dans le soleil (nain GO), les bandes de CH sont plus intenses que dans α Aquarii (géant GO) (40);

2<sup>o</sup> Les bandes solaires sont aussi plus fortes que celles de δ Cephei à son minimum (supergéant G6) (41).

Cet effet de pression se comprend aisément si l'on examine les seconds membres des équations (1) et (2), qui ne dépendent que de T. Pour deux étoiles de même température et de pressions différentes, le coefficient K<sub>p</sub> est évidemment le même. Mais d'après sa définition on a

$$(3) \quad \frac{p_{\text{CH}}^0}{p_{\text{CN}}^0} = \frac{p_0^0}{p_0^0} \cdot \frac{p_{\text{N}}^0}{p_{\text{C}}^0}$$

les indices g et n se rapportant respectivement à la géante et à la naine. Les pressions étant plus fortes dans la naine, la relation (3) conduit à

$$p_{\text{CH}}^0 > p_{\text{CN}}^0$$

Mais il faut prendre des précautions lorsque l'on discute cet effet de magnitude absolue. Car pour les classes plus froides que F, il y a entre une géante et une naine de même type spectral non seulement une grande différence de densité, mais aussi une différence appréciable de température qui ressort du tableau VII<sup>1)</sup>.

1. D'après le traité de Russell, Dugan and Stewart, *Astronomy*, II.



TABLEAU VII

Type spectral	Etoiles géantes	Etoiles naines
G0	5.600° K	6.000° K
G5	4.700	5.600
K0	4.200	5.100
K5	3.400	4.400
M	3.000	3.400

Considérons par exemple une géante et une naine KO et calculons au moyen de l'équation (1), les coefficients  $K_p^{CN}$  correspondant à  $T = 4200$  et  $5100^\circ$  K. On trouve

$$\log K_p^2 = -5.803 \text{ et } \log K_p^n = -3.797.$$

D'où l'on tire

$$\frac{P_{CN}^0}{P_C^0 P_S^0} = 6,35 \cdot 10^5 \text{ et } \frac{P_{CN}^n}{P_C^n \cdot P_S^n} = 9,10^3.$$

A pressions  $P_C$  et  $P_S$  égales, il y aurait dans la géante 70 fois plus de molécules CN que dans la naine. En fait, on a

$$\frac{P_{CN}^0}{P_{CN}^n} = 70 \cdot \frac{P_C^0 P_S^0}{P_C^n P_S^n}.$$

C'est ainsi que si l'on examine (42) les bandes de CN de l'étoile naine  $\tau$  Ceti et de la géante  $\beta$  Sagittae (2 étoiles KO), on trouve que les bandes sont plus intenses dans l'étoile géante que dans la naine. Ce fait correspond simplement à ce que, dans ce cas, le rapport  $\frac{P_C^0 P_S^0}{P_C^n P_S^n}$  est supérieur à  $\frac{1}{70}$ , ce qui est très plausible.

VIII. — Quelques remarques complémentaires.

A. — *Utilisation des bandes pour les déterminations de parallaxes.*  
 — La méthode des parallaxes spectroscopiques est d'habitude basée sur des raies atomiques. On choisit des couples de raies dont le rapport des intensités est fortement fonction de la pression. Moyennant le tracé préalable de « courbes de calibrage » partant d'étoiles connues, on peut alors, en mesurant les rapports d'in-

tensité des composantes de ces couples dans les différents spectres, déterminer avec une certaine approximation les parallaxes, donc les magnitudes absolues.

Les bandes moléculaires sont très sensibles aux facteurs physiques : température et pression. Elles pourraient donc, étant soigneusement étudiées, fournir des renseignements précieux concernant les magnitudes absolues. Mais les paragraphes qui précèdent montrent qu'il faut être très prudent et éviter les superpositions de raies atomiques. On a déjà tenté d'utiliser par exemple les bandes ultra-violettes de CN comprises entre  $\lambda$  3750 et  $\lambda$  3884 Å. Or dans le soleil où ces bandes sont déjà assez intenses, leur contribution dans la zone spectrale indiquée est extrêmement faible, comparée à celle des atomes (43).

Il y a lieu soit d'utiliser une dispersion assez élevée, soit une moyenne dispersion avec plaques bien standardisées, à grain très fin et en choisissant une étroite zone spectrale, ne comportant que des raies de la molécule considérée, sans superposition de raie atomique ; le prisme-objectif est à déconseiller. Sinon, les mesures photométriques ne correspondent à rien de physique.

B. — Il faudrait effectuer pour les étoiles froides, au moyen de clichés de dispersion suffisante, une étude systématique de toutes les raies et bandes présentes, du genre de celle qu'Otto Struve a faite pour les étoiles B. Une telle recherche serait fondamentale pour notre connaissance des astres froids. Cette investigation devrait comporter aussi l'étude quantitative très précise des raies d'émission et des bandes d'absorption dans les étoiles M (type Mira Ceti) ; tout ce qu'on sait jusqu'ici de ces étoiles à raies d'émission est qualitatif <sup>1)</sup>.

C. — Un gros effort devrait être dirigé vers l'étude de la région rouge et rouge extrême des astres froids ; il s'y présente de nombreuses bandes — notamment des bandes de CN (44) — dont on ne sait presque rien.

Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège (Belgique).

1. La méthode qui nous paraît la plus sûre pour ce problème est celle qu'ont élaborée O. Struve and Schwede, pour leurs déterminations des contours des raies de Balmer émises par les étoiles B (*Phys. Review.*, 38, 1195, 1931).



## BIBLIOGRAPHIE

- (1) W. MORGAN, *Astrophysical Journal*, 1932 ; O. STRUVE and W. MORGAN, (*Proc. of Nat. Ac., Washington*) 1932, travail en voie de publication.
- (2) J. GENARD, *Mém. Soc. Royale Sciences, Liège*, 3<sup>e</sup> série, t. XVII, 34.
- (3) R. WILDT, *Gött. Nachr.* 1931 et 1932 ; *Zs. für Astroph.* 2, 164, 1931.
- (4) BEALS, *Monthly Notices of the R. A. S.*, 90, 202, 1929 ; 91, 966, 1931 ; 92, 677, 1932 ; *Publ. of the Astroph. Obs. D.*, 4, 17, 1930.
- (5) J. GENARD, *M. N. R. A. S.*, 92, 396, 1932 ; *Bull. Soc. R. Sc. Lg.*, 1, 9, 1932.
- (6) Nombres travaux publiés dans *Ap. J.* depuis 1929, soit seul, soit en collab. avec SHARN, ELVEY, SWINGS ou SCHWEDE.
- (7) C. D. SHANE, *Lick. Obs. Bull.*, No 385, 1922.
- (8) C. D. SHANE, *loc. cit.*, référence 7.
- (9) FOWLER, *M. N. R. A. S.*, 69, 508, 1909.
- (10) BIRGE and CHRISTY, *Physical Review*, 29, 212, 1927 ; A. CHRISTY, *Ap. J.* 70, 4, 1929.
- (11) JOY, *Ap. J.* 63, 281, 1926.
- (12) *bis*) HOCC, *Popular Astronomy*, 36, 236, 1928.
- (13) BAXANDALL, *M. N. R. A. S.*, 88, 679, 1928.
- (14) P. W. MERRILL, *Contrib. from the Mt Wilson Observ.*, No 252, 1922 ; *Publ. of the Astron. Soc. of the Pacific*, 35, 217, 1923.
- (15) KING, *Publ. of the Ast. S. of the Pac.*, 36, 140, 1924.
- (16) MERRILL, *Ap. J.*, 63, 48, 1925.
- (17) RICHARDSON, *Ap. J.*, 73, 216, 1931 ; WATSON and RUDNIK, *Phys. Rev.*, 29, 413, 1927 ; HULTHÉN, *id.*, 29, 97, 1927.
- (18) KING and BIRGE, *Contr. from Mt W. Obs.*, No 402, 1930.
- (19) KING and BIRGE, *loc. cit.*, réf. 17 ; MENZEL, *Publ. of the Astr. Soc. of the Pac.*, 42, 84, 1930 ; R. SANFORD, *id.*, 41, 271, 1929.
- (20) NEWALL, BAXANDALL and BUTLER, *M. N.*, 76, 640, 1916.
- (21) *bis*) R. S. MULLIKEN, *Physical Review*, 30, 735, 1927.
- (22) C. D. SHANE, *Lick Obs. Bull.*, 10, 79, 1919 ; G. E. HALE, F. ELLERMAN and J. A. PARKHURST, *Publ. of the Yerkes Obs.*, 2, 251, 1903 ; W. C. RUFUS, *Publ. of the Obs., Univ. of Michigan*, 3, 258, 1923.
- (23) W. C. RUFUS, *loc. cit.*, référence 20.
- (24) C. D. SHANE, *loc. cit.*, réf. 20.
- (25) B. LINDBLAD, *Ap. J.* 55, 85, 1922.
- (26) *bis*) P. SWINGS and O. STRUVE, *Phys. Review*, 39, 142, 1932.
- (27) B. LINDBLAD, *loc. cit.*, réf. 23 ; R. WILDT, *Zs. für Ph.* 54, 856, 1929.
- (28) H. SHAPLEY, *Harvard Obs. Bull.*, No 805, 1924 ; A. V. DOUGLAS, *M. N.* 90, 798, 1930 ; C. H. PAYNE, *Stellar Atmospheres*, p. 168, 1925.
- (29) H. SHAPLEY, *H. Obs. Bull.*, No 862, 1928 ; C. T. ELVEY and R. ZUG, *Ap. J.* 70, 243, 1929.



28 LES BANDES MOLÉCULAIRES DANS LES SPECTRES STELLAIRES

- (27) S. ROSSELAND, *Astrophysik*, p. 181, 1931 ; C. H. PAYNE, *Stellar Atmospheres*, pp. 63 et 168, 1925.
- (28) W. C. RUFUS, réf. 20 ; R. WILDT, réf. 24 ; A. J. CANNON, *Harvard Annals*, 91, 7, 1918.
- (29) S. ROSSELAND, réf. 27 ; R. WILDT, réf. 24.
- (30) K. FAJANS, *Ber. der deutschen Chem. Gesellschaft.*, 53, 643, 1920 (90 Kcal/mol) ; R. MECKE, *Nature*, 125, 526, 1930 (107 Kcal dans formaldéhyde, 93 dans acétaldéhyde, 110 dans benzaldéhyde et 115 dans méthane) ; J. W. ELLIS, *Phys. Rev.*, 33, 27, 1929 (97 Kcal dans l'hexane et d'autres valeurs allant de 97 à 117 Kcal pour d'autres molécules).
- (31) D'après : C. E. ST. JOHN, C. E. MOORE, L. M. WARE, E. F. ADAMS, H. D. BABCOCK, *Revision of Rowland's Preliminary Table of Solar Spectrum Wavelengths*, 96, 1928.
- (32) P. SWINGS and O. STRUVE, réf. 23 bis.
- (33) H. N. RUSSELL, *Ap. J.*, 70, 56, 1929 ; l'auteur indique que les valeurs données pour H et N ne constituent qu'un ordre de grandeur.
- (34) R. WILDT, réf. 24.
- (35) P. SWINGS, *M. N. R. A. S.*, 92, 140, 1931.
- (36) H. SHAPLEY, *Ap. J.*, 44, 290, 1916 ; C. H. PAYNE, *The Stars of High Luminosity*, p. 309, 1931.
- (37) RUSSELL, DUGAN and STEWART, *Astronomy*, t. II, p. 753.
- (38) A. V. DOUGLAS, *M. N. R. A. S.*, 90, 798, 1930 ; F. HENROTEAU and A. V. DOUGLAS, *Publ. of the Dom. Obs. Ottawa*, 9, No 7, tableau III et fig. 9, 1929 ; G. TIERCY, *Publicazioni Oss. Arcetri*, fasc. 44, 7, 1927 ; P. TEN BRUGGE, *NGATE, Annalen v. d. Bosscha Sterrenwacht, Lembang*, 5, 1<sup>re</sup> partie, 1931, *Die Veränderlichen Sterne (Ergebnisse der exakten Naturw.*, 10, 33-44, 1931).
- (39) P. SWINGS, *Bull. Soc. R. Sc., Lg.*, 1, 77, 1932.
- (40) P. SWINGS and O. STRUVE, réf. 23 bis.
- (41) P. SWINGS, réf. 35.
- (42) RUSSELL, DUGAN and STEWART, *Astronomy*, t. II, p. 728.
- (43) Voir table de raies dans P. SWINGS, réf. 39.
- (44) P. W. MERRILL, *Scientific Papers of the Bureau of Standards*, No 318, 1918.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION .....	5
I. — Molécules identifiées dans les spectres stellaires .....	9
II. — Oxydes .....	10
III. — Combinaisons hydrogénées .....	13
IV. — Combinaisons carbonées .....	14
V. — Propriétés générales des bandes de CH et CN dans les spectres stellaires .....	16
VI. — Les bandes de CH et CN dans les étoiles variables du type $\delta$ Cephei .....	20
VII. — Influence de la magnitude absolue sur les bandes de CH et CN .....	22
VIII. — Quelques remarques complémentaires .....	24
BIBLIOGRAPHIE .....	27



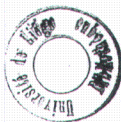
Saint-Amand (Cher). — Imprimerie R. Bussière. — 14-12-1932



LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE HERMANN ET C<sup>ie</sup>

6, rue de la Sorbonne, Paris Ve

P. AUGER. L'effet photo-électrique des rayons X .....	5 fr.
E. BLOCH. L'ancienne et la nouvelle théorie des quanta.....	90 fr.
MARCEL BOLL. Exposé électronique des lois de l'électricité.....	15 fr.
— L'idée générale de la mécanique ondulatoire et de ses premières applications .....	15 fr.
— L'électron et les phénomènes chimiques.....	5 fr.
— La synthèse des ondes et des corpuscules, d'après l'ou- vrage de K. DARROW, 1931.....	10 fr.
LÉON BRILLOUIN. Les nouvelles statistiques quantiques. Les électrons dans les métaux.....	5 fr.
L. DE BROGLIE Recueil d'exposés sur les ondes et corpuscules, broché..	20 fr.
Relié .....	30 fr.
— Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire, broché	85 fr.
Relié.....	95 fr.
— Théorie de la quantification dans la nouvelle mécanique.	70 fr.
CAMPBELL. La théorie électrique moderne. Théorie électronique.....	50 fr.
— La relativité. Théorie quantique des spectres.....	25 fr.
— La structure de l'atome.....	28 fr.
CHWOLSON. Traité de physique en 14 fascicules et deux suppléments...	823 fr.
EDDINGTON. Étoiles et atomes.....	35 fr.
RENÉ FORTRAT. Introduction à l'étude de la physique théorique, 7 fasci- cules. Chaque fascicule broché.....	10 fr.
Relié.....	14 fr.
VICTOR HENRI. Structure des molécules.....	30 fr.
MIRÉ. Principe de la théorie Einsteinienne et de la gravitation.....	10 fr.
H. OLLIVIER. Cours de physique générale (3 <sup>e</sup> édition):	
Tome I .....	85 fr.
Tome II .....	65 fr.
Tome III .....	100 fr.
MAX PLANCK. Thermodynamique.....	45 fr.
PERRY. Mécanique appliquée, en 2 volumes.....	100 fr.
RICHARD P. La gamme.....	28 fr.
THOMPSON (S.). Radiations visibles et invisibles.....	25 fr.
THOMPSON (Sir J. J.). Les rayons d'électricité positive.....	30 fr.
VAN'T HOFF. Leçons de chimie-physique, en 2 parties. Chaque partie..	35 fr.
WOLFFERS. Éléments de la physique des rayons X.....	25 fr.
— Sur quelques nouvelles propriétés de la lumière et des rayons X	14 fr.



U.G. - C. I. C. B.



\*709913604\*