

QUELQUES PROGRES RECENTS EN PHYSIQUE COMETAIRE

PAR P. SWINGS

Institut d'Astrophysique de l'Université de Liège.

Lorsqu'on pense aux contributions astrophysiques du Professeur S. Rosseland, on se tourne tout naturellement soit vers les problèmes de structure interne et d'équilibre des étoiles en état de rotation ou pulsation, soit vers les phénomènes de physique solaire, soit vers les applications de sa théorie des cycles aux nébuleuses gazeuses, aux atmosphères étendues d'étoiles à enveloppe et aux autres astres dans lesquels les conditions d'équilibre thermodynamique ne sont pas réalisées. Sans doute, ne pense-t-on guère souvent aux comètes, quoique le Professeur S. Rosseland se soit fort intéressé aux problèmes soulevés par les molécules, par exemple aux déterminations de températures vibrationnelles et rotationnelles. En fait, des travaux récents sur les comètes ont montré clairement combien féconde est l'application à ces astres de l'idée si simple des états stationnaires appliquée par Rosseland aux nébuleuses gazeuses dès 1926.

Il nous a paru intéressant d'effectuer, pour ce volume dédié au Professeur S. Rosseland, une synthèse des progrès récents des observations sur les spectres cométaires et de souligner le fait que, même dans ce domaine de recherches à première vue fort éloigné des intérêts majeurs du jubilaire, son influence a été importante pour l'interprétation des phénomènes observés.

Lors des Congrès de l'U. A. I. à Dublin, Moscou et Berkeley, la Commission 15 consacrée à l'Etude Physique des Comètes a fortement insisté sur la nécessité de certaines observations, ainsi que de divers travaux expérimentaux et théoriques indispensables à l'interprétation des phénomènes cométaires. Les recommandations essentielles concernent [1]:

- la spectroscopie cométaire à haute résolution;
- les spectres de queue dans le domaine spectral le plus étendu;
- la photométrie photoélectrique ou photographique précise des têtes cométaires, dans des régions spectrales bien définies (d'émissions moléculaires spécifiques, ou du continuum, ou de la raie du sodium), y compris le tracé des isophotes;
- les brillances, couleurs et dimensions des noyaux;
- la photographie monochromatique et, notamment, l'obtention de séquences rapides de photographies de queues couvrant un intervalle de temps assez long pour pouvoir observer la formation des rayons et en suivre le développement;

les mesures de la polarisation du continuum en diverses longueurs d'onde;
 les travaux expérimentaux et théoriques sur les molécules dont la présence dans les comètes est établie ou fort probable.

Bien entendu, il faut aussi que les comètes – notamment les périodiques – soient observées dès que possible et suivies avec précision.

En fait, il devient de plus en plus clair que des observations spatiales sont également désirables, à commencer par l'obtention de spectres (ou, au moins, d'abord, de «couleurs»), dans l'ultraviolet lointain. Pour bien des problèmes, il semble que la solution devra attendre de telles expériences et, surtout, le lancer d'une sonde spatiale [2]. Un tel lancer est à l'étude aux États-Unis et en Europe.

Nous commencerons par résumer les principaux résultats d'observation obtenus depuis 1957, en appliquant aux comètes une résolution géométrique et spectrale plus élevée, dans le sens recommandé par la Commission 15 de l'U. A. I. Le progrès des observations résulte essentiellement des efforts effectués à deux institutions, les Observatoires du Palomar et de Haute Provence; quelques spectres intéressants ont aussi été obtenus récemment à l'Observatoire Radcliffe.

En fait, les premiers spectrogrammes à haute résolution ont été obtenus pour la Comète Mrkos (1957*d*) par J. L. Greenstein [3] au foyer coudé du réflecteur de 200 pouces du Palomar; les dispersions de 18 Å/mm dans le bleu et de 27 Å/mm dans le rouge étaient nettement supérieures aux dispersions obtenues antérieurement.

La distance focale de 152 mètres donnait une échelle originale de 1'',3/mm sur la fente; 1 mm sur la plaque correspondait à 26'', ou 20.000 Km à la comète. La résolution spatiale et spectrale élevée fournissait, pour la première fois, des informations sur les vitesses au voisinage du noyau. Dans les années suivantes, des spectres à haute dispersion ont été obtenus à Palomar pour les comètes Seki-Lines (1962*c*) [4] et Humason (1961*e*) [5] et au Mt. Wilson pour la comète Wilson-Hubbard (1961*d*) [6].

Depuis 1960, les spectrographes au foyer coudé du réflecteur de 193 cm de l'Observatoire de Haute Provence ont été utilisés pour diverses comètes, notamment les comètes Burnham (1959*k*) [7], Encke (1960*i*) [8], Candy (1960*n*) [9], Wilson-Hubbard (1961*d*) [10], Humason (1961*e*) [11], Seki-Lines (1962*c*) [12], Honda (1962*d*) [13] et Ikeya (1963*a*) [14]. La distance focale au coudé est 59 mètres, donnant une échelle originale d'environ 3'',3/mm sur la fente*.

Des spectres des comètes Humason (1961*e*) [15] et Seki-Lines (1962*c*) [16] ont été obtenus à l'Observatoire Radcliffe avec des dispersions assez élevées (86 Å/mm pour 1961*e* et 31 Å/mm pour 1962*c*).

* Pour tirer de telles longues distances focales le profit maximum en ce qui concerne les distributions et les mouvements différentiels, il faut évidemment veiller à ce que le guidage soit aussi précis que possible.

Résultats récents basés sur l'augmentation de la résolution spatiale. Les spectrogrammes de 1957*d* obtenus au Palomar ont, pour la première fois, révélé des phénomènes physiques et dynamiques relatifs aux molécules et aux particules solides de la partie centrale de la tête, à des distances de quelques milliers de kilomètres du noyau, alors que le rayon de la tête de 1957*d* était de l'ordre de $2 \cdot 10^5$ Km et la queue de l'ordre de 10^7 Km. Nous décrivons dans une section suivante «l'effet Greenstein», consistant en variations marquées des intensités relatives de certaines raies de CN ou CH, d'un point à l'autre de la tête; ces variations sont dues à de faibles différences de vitesse radiale relative au soleil. Cet effet a été découvert dans 1957*d* grâce à la grande résolution spatiale et spectrale. Les «poussières» et les atomes de sodium de 1957*d* étaient éjectés plus fortement du côté ensoleillé du noyau. La poussière disparaissait graduellement à une distance de 3 000 à 8 000 Km, du côté ensoleillé du noyau*, mais possédait un bord bien défini à environ 3 000 Km du noyau, du côté de la queue. Les raies de NaI atteignaient leur intensité maximum à 2 000 Km du noyau, dans la direction du soleil; elles déclinaient ensuite en intensité et disparaissaient à environ 12 000 Km du côté solaire. Au contraire, du côté de la queue, l'émission D manifestait un gradient d'intensité relativement faible à partir d'environ 4 000 Km du noyau; on l'observait (sur un cliché du Mt. Wilson) jusqu'à, au moins, 50 000 Km. Cette distribution a été interprétée par K. Wurm [18]. Alors que les forces oscillantes des bandes de CN et C₂ sont plutôt faibles (ordre de 10^{-2}), celle de l'émission D est élevée, de sorte que la force répulsive due à la pression de radiation est élevée pour Na. Comme la vie moyenne des atomes Na avant leur ionisation est longue, de l'ordre de 6 heures à $r = 1$ U. A. (unité astronomique), la tête Na est parabolique, alors que les têtes CN et C₂ sont des sphères très peu déformées par la pression de radiation.

Le découverte de la raie interdite rouge de [OI] dans 1957*d* (voir sections suivantes) est aussi due, au moins partiellement, à la grande résolution spatiale et au guidage précis. La distribution de [OI] ressemble à celle de NaI; [OI] s'étend loin dans la queue, à environ 50 000 Km.

Des observations effectuées à l'OHP ont révélé, pour diverses molécules, des différences semblables de distribution d'intensité dans les parties centrales des têtes cométaires; c'est ainsi que CH⁺ n'est présente que d'un côté du noyau de 1959*k*.

Résultats observationnels récents basés sur l'augmentation de la résolution spectrale. Une haute résolution spectrale présente de nombreux avantages: elle révèle ou

* Ce fait peut être rapproché d'une observation de F. Dossin [17] au foyer coudé du réflecteur de 193 cm de l'OHP. Dossin a constaté que la brillance d'étoiles passant très près du noyau de la comète Burnham (1959*k*) était appréciablement affaiblie, si la distance au noyau devenait de l'ordre de 600 Km (ou 4'' d'arc). Cet effet est dû à la diffusion par les poussières. Aucune observation de la largeur du continuum d'un spectre cométaire (dû aux poussières) n'avait jamais été effectuée avec une longueur focale comparable, avant 1957. Dans les observations de Dossin, le champ d'observation était de l'ordre de 9'; le diamètre de la tête était de l'ordre de 30' et le déplacement des étoiles par rapport à la comète était d'environ 20' par heure. La comète Burnham est passée à 0,2 U. A. de la Terre.

améliore les structures rotationnelles des bandes observées, diminue le nombre de superpositions, réduit l'effet du continuum par rapport aux émissions discrètes, révèle des émissions faibles qui seraient noyées dans le continuum ou les émissions plus intenses et accroît la précision des longueurs d'onde mesurées et des vitesses. Ces améliorations s'ajoutent à celles qui résultent de l'augmentation simultanée de la résolution spatiale: par exemple, une longueur d'onde plus précise et une information simultanée sur la longueur de la raie (c'est-à-dire sur l'extension de la molécule ou de l'atome dans la tête) peuvent rendre certaines identifications plus convaincantes ou en permettre de nouvelles.

Les spectres Palomar de 1959*k* ont fait l'objet de nombreuses recherches; pourtant, cette comète qui possédait un continuum très intense n'était guère adaptée à la détection ou la mesure d'émissions faibles, surtout de celles qui se trouvent concentrées dans les régions centrales de la tête, comme NH_2 , C_3 et CH . Nous verrons que d'autres comètes récentes présentaient un continuum faible et, par suite, étaient plus favorables aux études spectroscopiques. Mais comme les spectres Palomar étaient les premiers obtenus à haute résolution et comme leur qualité optique et le guidage étaient superbes, il n'y a rien d'étonnant à ce que plusieurs chercheurs aient essayé d'en tirer le profit maximum. Pour la première fois, les branches R des transitions (0 — 0) et (0 — 1) de CN étaient complètement résolues et une structure partielle pouvait être observée dans les branches P. Les bandes de C_2 et NH_2 étaient beaucoup mieux résolues qu'antérieurement. Il en est résulté de meilleures descriptions de nombreuses bandes d'émission, ce qui a rendu possible une étude plus approfondie des mécanismes d'excitation, comme nous le verrons plus loin. L'effet Greenstein que nous décrirons dans la section suivante était très net. Une bande faible (1 — 0) de la bande isotopique $\text{C}^{12}\text{C}^{13}$ était présente en $\lambda 4744,35$. Des renseignements précieux sur l'émission C_3 ont été recueillis, quoique des spectres obtenus plus tard, à l'OHP, dans le cas de comètes à continuum faible, aient fourni des informations plus complètes et plus précises*.

La comète Burnham (1959*k*) observée spectrographiquement à l'OHP de $r = 0,77$ à $r = 1,09$ U. A. a été le deuxième objet étudié à haute dispersion**; la région $\lambda 3000 - \lambda 8900$ a été couverte avec des dispersions allant de 19,5 A/mm à 78 A/mm. Le continuum était faible et étroit, de sorte que cette comète était mieux adaptée que la comète Mrkos à la détection de raies faibles. 1959*k* appartient à la famille assez rare de comètes dans lesquelles l'émission de OH est nettement plus intense que celle de NH ; de plus, NH s'étend à des distances du noyau moins longues que OH qui semble même s'étendre plus loin que C_2 . Un tel comportement est très anormal à $r = 1$ U. A. En fait, nous connaissons seule-

* Nous nous contentons de décrire ici les résultats spectroscopiques obtenus à haute dispersion. Etant donné la grande brillance de la comète Mrkos, de nombreux spectres en ont été obtenus à divers observatoires. La présence du système rouge de CN près de $\lambda 7900$ et de $\lambda 8100$ a été établie de façon convaincante au moyen de spectrogrammes obtenus à l'OHP [19].

** La comète Burnham est passée assez près de la terre ($\Delta \sim 0,2$ U. A.). De nombreuses photographies en ont été obtenues, notamment à l'OHP (voir D. Malaise) [20].

ment une autre comète où l'émission de OH s'est comportée de façon assez semblable; il s'agit de 1943 I, mais sa distance héliocentrique était plus grande (1,55). Dans 1941 VIII, OH était plus intense que NH dans la partie centrale de la tête, mais était plus courte; r variait de 1,52 à 1,28. Le comportement relatif de NH et OH se révélera certainement très important pour la classification des comètes. Il est essentiel de couvrir la région λ 3070 — λ 3375 chaque fois que c'est possible, et de tenir soigneusement compte des effets de l'absorption atmosphérique et instrumentale. Les spectrogrammes OHP de 1959*k* révèlent une structure rotationnelle de la bande (0 — 0) de OH plus détaillée que dans toute observation antérieure. Ce profil diffère considérablement de celui des comètes 1941 I et 1948 I, ces différences pouvant, d'ailleurs, être attribuées aux différences de vitesse radiale du rayonnement solaire excitateur. En fait, une variation de vitesse radiale de 3 ou 4 Km/sec modifie fortement le profil de l'émission OH.

L'émission de C_3 dans 1959*k* est très intense (λ 4051 plus forte que la tête de la bande 1 — 0 de C_2). Quoique sa structure soit la meilleure que l'on ait observée jusqu'en 1959, elle a encore été dépassée sur les clichés OHP de la comète Ikeya (1963*a*). Le système $B^2\Sigma^- \rightarrow X^2II$ de CH est bien résolu. En fait, les documents spectroscopiques OHP obtenus pour 1959*k* mériteraient une étude plus approfondie, notamment en ce qui concerne les bandes de C_2 et C_3 ainsi que les émissions non identifiées; nous espérons qu'une telle étude sera effectuée bientôt.

La comète périodique d'Encke (1960*i*) a été observée à l'OHP ($r = 0,78 - 0,69$) avant le passage au périhélie ($dr/dt = -31,5$ Km/sec). Comme lors des passages antérieurs, la comète Encke était caractérisée par un continuum extrêmement faible et une émission C_3 très intense. Cette intensité anormalement élevée de C_3 n'a pas, jusqu'ici, reçu d'explication convaincante. C_3 résulte peut-être de la photodissociation d'une molécule organique comme le diacétylène $HC \equiv C - C \equiv CH$, ou bien d'un mécanisme de polymérisation; ou bien encore, il pourrait provenir du bombardement du noyau par des protons solaires. Il a encore été suggéré que C_3 pourrait avoir été emprisonné dans les couches superficielles glacées du noyau. Quelle que soit l'origine du C_3 , il est, en tout cas, certain que la comète Encke appartient à la famille des comètes riches en C_3 . Les spectrogrammes OHP de 1960*i* ont une résolution supérieure à celles des passages antérieurs*; ceci est particulièrement vrai pour les bandes C_2 , C_3 , CN et CH. Des spectrogrammes sous-exposés obtenus par A. D. Thackeray à l'Observatoire Radcliffe après passage au périhélie ($r = 0,467$ et $0,485$; $dr/dt = +31,7$ Km/sec) semblent indiquer que le rapport des intensités de CN et C_2 est plus grand avant le passage au périhélie qu'après. Toutefois, cette comparaison

* La comète Encke a aussi été observée à l'OHP, à plus faible résolution, lors de son passage antérieur (1957*c*) [21]. La comparaison des spectrogrammes à fente de 1947 XI, 1957*c* et 1960*i* révèle de légères variations des intensités relatives des bandes; quant aux différences très marquées des profils, elles sont explicables par les différences en r et dr/dt . La comparaison des brillances de 1957*c* et 1960*i* semble indiquer une diminution de la brillance de l'émission de C_2 [22].

entre spectres pré- et postpérihéliques – la seule qui existe à l'heure actuelle – devrait être répétée en prenant de grandes précautions en ce qui concerne le guidage.

Les comètes Candy (1960*n*), Wilson-Hubbard (1961*d*) et Honda (1962*d*) observées à haute résolution à l'OHP ont fourni quelques résultats intéressants. Dans Candy (1960*n*), observée à $r = 1,15 - 1,10$ (dispersion 39 Å/mm), le continuum est nettement plus intense que dans Encke (1960*i*) ou Burnham (1959*k*), mais beaucoup plus faible que dans Arend-Roland (1956*h*) ou Mrkos (1957*c*). Le rapport des intensités de C_2 et CN est anormalement faible, beaucoup plus faible que dans 1960*i* et 1959*k*. NH est beaucoup plus intense que OH. Les structures des émissions de CH et C_3 pouvaient être mesurées aisément, car le continuum était fortement concentré près du noyau; la structure des bandes de C_2 était partiellement résolue.

La comète Wilson-Hubbard (1961*d*) a été observée à $r = 0,425$ après passage au périhélie ($dr/dt = +61,5$ Km/sec). La vitesse radiale élevée suffisait pour déplacer les raies Fraunhofer de Na en dehors des longueurs d'onde excitatrices, ce qui explique la très grande intensité de l'émission D cométaire. Les bandes de C_2 étaient partiellement résolues; C_3 était extrêmement faible; NH_2 était présent. Le continuum intense était dû exclusivement à la comète et non au ciel, comme on a pu le montrer de façon convaincante par les vitesses radiales (déplacement de l'ordre de 1Å). De même, grâce à la haute dispersion, les mesures des longueurs d'onde pouvaient aisément confirmer que l'émission NaI était d'origine purement cométaire. La comète 1961*d* a été observée au foyer coudé du réflecteur de 100 pouces au Mt Wilson, le même jour (26 juillet 1961). La région $\lambda 5200 - \lambda 6400$ y a été couverte avec une dispersion de 60 Å/mm. Les émissions caractéristiques étaient le doublet D et la raie interdite rouge de [OI] $\lambda 6300$. Ces raies étaient deux fois plus intenses du côté de la queue que du côté du soleil; d'ailleurs, dans la zone la plus faible, elles étaient nettement inclinées vers les courtes longueurs d'onde.

La comète Humason (1961*e*) a été un objet extrêmement anormal. Malgré la grande distance héliocentrique au moment des observations spectrographiques ($r \sim 2,6$), 1961*e* a montré une émission extrêmement intense de CO^+ et N_2^+ , alors que le continuum, CN, C_3 et CO_2^+ étaient faibles et CH^+ présent seulement à l'état de trace. En même temps, la queue présentait une activité considérable. Il faut remarquer que CO^+ , N_2^+ et CO_2^+ résultent de l'ionisation des molécules chimiquement stables CO, N_2 et CO_2 , alors que CN est un radical dont la formation exige, sans doute, la photodissociation d'une molécule parente. Il n'est pas interdit de penser que l'ionisation de CO, N_2 et CO_2 résulte, en fait, de collisions avec des particules solaires. Quant à la photodissociation, étant proportionnelle à r^{-2} , elle est beaucoup moins efficace à $r = 2,6$ qu'au voisinage du soleil. Il serait fort utile de continuer l'étude spectrographique de la comète Humason en 1964. La plupart des spectres de 1961*e* pris au Palomar, à l'OHP et à Radcliffe ont une résolution assez faible. Néanmoins, un cliché du Palomar de dispersion 18 Å/mm a révélé, pour la première fois, les structures rotationnelles des bandes (3 — 0) et (2 — 0) de CO^+ ; on a ainsi pu discuter le mécanisme d'excitation (voir section suivante).

La comète Seki-Lines (1962*c*) a été observée au Palomar et à l'OHP ($r = 0,55 - 1,01$) ainsi qu'à l'Observatoire Radcliffe ($r = 0,51 - 0,41$). Pour la première fois, la branche P de la transition (0 — 0) de CN a été résolue en grande partie, sur un cliché OHP de dispersion 10 Å/mm. Le continuum avait une intensité moyenne*. La bande (1 — 0) de CN révèle un rudiment de structure; il semble qu'il y ait une trace d'émission OH⁺ du côté des courtes longueurs d'onde de (1 — 0) CN. La comparaison de 1962*c* avec 1959*k* présente un grand intérêt: les profils de diverses bandes sont tout à fait différents, par suite des différences en r et dr/dt . Un examen comparatif détaillé des spectrogrammes Palomar de Seki-Lines (1962*c*) et Mrkos (1957*c*) révèle aussi des différences très marquées imputables aux valeurs de r et dr/dt . Les deux clichés de l'Observatoire Radcliffe couvrent le domaine visuel avec une dispersion de 31 Å/mm; les émissions de NaI, NH₂ et [OI] apparaissent clairement.

La comète Ikeya (1963*a*) a été étudiée à l'OHP avec les dispersions de 20 et 40 Å/mm. Le continuum était pratiquement absent, de sorte que les émissions discrètes pouvaient être étudiées dans d'excellentes conditions. Chacune des séquences $\Delta v = 1$ et 0 de C₂ révèle environ 100 composantes résolues; la bande de C¹²C¹³ (λ 4744) est présente, mais l'abondance de C¹³ est de beaucoup inférieure (ordre de 100) à celle de C¹². Les profils de CN diffèrent considérablement sur les spectrogrammes pris le 4 mars 1963 ($r = 0,726$; $dr/dt = -18,6$ Km/sec) et le 13 mars 1963 ($r = 0,654$; $dr/dt = -9,7$ Km/sec). La transition B ² $\Sigma \rightarrow$ X ² Π de CH apparaît plus nettement que dans tout spectre antérieur; on a aussi mesuré la bande (0 — 0) de CH⁺. Le résultat le plus important concerne l'émission de C₃, qui est mieux résolue qu'antérieurement et permettra une comparaison beaucoup plus fructueuse avec les spectres de laboratoire. OH était absent et NH très faible: les abondances de ces deux radicaux sont anormalement faibles. Une émission en λ 4838,30 (également observée dans 1957*c*) est, peut-être, attribuable à HCO.

Le doublet interdit de [OI] a été identifié pour la première fois dans la comète Mrkos (1957*d*) [23]. L'attribution d'une émission cométaire à [OI] est difficile pour les raisons suivantes. La plus forte émission de NH₂ (branche Q de 0, 8, 0 \rightarrow 0, 0, 0) a presque la même longueur d'onde que la composante la plus intense du doublet [OI], λ 6300,23, tandis que la transition plus faible de [OI], λ 6363,79, se trouve assez près de la raie de NH₂, λ 6360,43. Quant à la raie verte de [OI], λ 5577, elle tombe au sein de la bande (1-2) de C₂. D'ailleurs, l'émission crépusculaire ou nocturne de [OI] peut apparaître dans le cas de longs temps de pose; ces raies du ciel devraient avoir la même intensité sur toute la longueur de la fente, mais des effets photographiques dus au continuum cométaire peuvent causer l'impression d'un gradient d'intensité le long des raies.

Des mesures de longueurs d'onde dans plusieurs comètes (surtout Mrkos et Seki-Lines) ont montré que les émissions cométaires en λ 6300 et λ 6364 ne peuvent être attribuées au rayonnement du ciel, mais il est difficile, sur la base des longueurs d'onde, d'exclure

* Des expériences faites à cette occasion ont montré combien le rapport *apparent* d'intensité du continuum et des émissions discrètes dépend de la dispersion et de la largeur de fente.

la possibilité que λ 6300 soit, au moins partiellement, due à la superposition de plusieurs composantes Q de NH_2 . On est alors aidé par la «longueur» de l'émission λ 6300 qui, parfois, s'étend dans la tête et la queue à des distances beaucoup plus grandes que les autres émissions de NH_2 . Dans le cas de la comète Mrkos, une émission faible mesurée à λ 6363,87 ne peut appartenir à NH_2 et est vraisemblablement due à λ 6363,79 [OI]. Quant à la raie verte de [OI], il semble bien qu'elle soit présente, mais très faible, dans 1957*d*.

Sur les spectres à faible dispersion, l'attribution éventuelle d'émissions cométaires à [OI] ne peut être basée que sur leur extension dans la tête et sur le gradient d'intensité suivant leur longueur. De telles attributions requièrent de très grandes précautions à cause de l'effet photographique possible, dû aux émissions du crépuscule et du ciel nocturne. Un examen critique des meilleurs spectrogrammes avec ou sans fente dont nous disposons semble bien prouver que des raies de [OI], présentes sur ces spectrogrammes et autrefois attribuées au rayonnement du ciel nocturne ou du crépuscule, sont, en fait, parfois d'origine cométaire. Il semble bien que [OI] soit surtout caractérisé par le doublet rouge, mais il n'est pas impossible que la raie verte soit parfois émise fortement par la comète [24]. Il ne semble pas qu'il y ait une corrélation entre les phénomènes solaires (flares intenses, taches) ou terrestres (indices géomagnétiques, aurores) et la présence ou les intensités relatives des raies cométaires de [OI] [25]. Il serait hautement désirable qu'il soit procédé à un nouvel examen plus détaillé des spectrogrammes cométaires existants, en y introduisant des considérations photométriques plus précises, afin d'arriver à une conviction réelle en ce qui concerne le comportement des émissions [OI] cométaires. Nous espérons qu'une telle étude sera effectuée bientôt à Liège. En attendant cette nouvelle investigation, nous préférons nous abstenir de discussions théoriques détaillées sur les mécanismes d'excitation de [OI] et sur leurs conséquences.

Considérant la très forte émission D dans certaines comètes récentes (Mrkos, Wilson-Hubbard), on peut se demander pourquoi d'autres raies de résonance ne sont pas observées dans les comètes à faible distance héliocentrique. En fait, on s'attendrait à trouver aussi, par exemple, la raie de résonance λ 4227 de CaI. Il faut toutefois remarquer que les abondances relatives des atomes cométaires peuvent dépendre de phénomènes de dissociation de molécules parentes ou d'autres mécanismes et, par conséquent, ne pas être identiques à celles qui existent dans d'autres astres. En tout cas, il paraît de plus en plus certain que les émissions observées par Copeland et Lohse dans la fameuse comète 1882 II – qui était visible au milieu du jour à un degré du soleil ($q = 0,008$) – étaient bien dues à des métaux, notamment au fer [26]; pendant longtemps, des doutes avaient été exprimés au sujet de la réalité de cette observation de Copeland et Lohse.

Par suite des progrès récents des mesures micrométriques et microphotométriques des émissions cométaires de C_3 , il y a tout lieu d'espérer que la structure du fameux groupe λ 4050 sera bientôt complètement interprétée. En effet, de grands progrès sont aussi effectués dans l'analyse, en laboratoire, du spectre de C_3 [27]. En fait, il est probable que

l'émission cométaire la plus intense de C_3 en λ 4051 pourrait être obtenue avec une résolution encore beaucoup plus haute dans des comètes brillantes futures; une dispersion de 4 Å/mm, qui paraît possible, aiderait grandement à discuter le mécanisme d'excitation de l'émission cométaire de C_3 .

Les mécanismes physiques. Les spectrogrammes cométaires à faible résolution obtenus jusqu'en 1957 avaient fourni des preuves convaincantes que les bandes de CN (systèmes bleu et rouge), CH, OH et NH étaient bien excitées par un pur mécanisme de fluorescence. Les observations récentes ont permis d'étudier, avec beaucoup plus de détail, ce mécanisme d'excitation de CN, CH, OH et NH, de découvrir un important effet de second ordre («effet Greenstein») et de fournir des arguments de poids en faveur du mécanisme de fluorescence dans les cas de C_2 , NH_2 et CO^+ . Le cas de C_3 reste douteux et dépend des analyses de laboratoire. Il est aussi certain qu'une interprétation plus détaillée des profils cométaires exige des enregistrements micro-intensitométriques solaires de plus grandes résolution et précision que l'Atlas d'Utrecht. Quant à l'excitation des raies interdites de [OI], elle reste plutôt énigmatique et exige, d'ailleurs, de nouveaux travaux d'observation.

La discussion du mécanisme de fluorescence est basée sur les distributions rotationnelles d'intensité au sein des transitions de vibration et sur les intensités relatives des différentes transitions de vibration. Ces intensités relatives résultent de l'excitation par le rayonnement solaire, en tenant compte des raies de Fraunhofer, y compris leur décalage dopplérien dû au mouvement radial de la comète par rapport au soleil et aux mouvements à l'intérieur de la comète elle-même.

L'effet des raies de Fraunhofer est parfois très spectaculaire, comme dans les bandes violettes de CN. Dans d'autres cas, on ne peut le mettre en évidence qu'après une recherche soigneuse, comme dans les émissions de C_2 , NH_2 ou CO^+ . Ce comportement différent résulte, avant tout, des probabilités de transition; le nombre et l'intensité des raies de Fraunhofer jouent aussi un rôle important.

Dans le cas des radicaux hétéronucléaires CN, CH, OH et NH, les transitions de rotation pure et de vibration-rotation sont permises. Il en résulte, comme K. Wurm l'a montré il y a longtemps, que, par suite des densités très faibles, les radicaux hétéronucléaires ont une tendance à s'accumuler sur les niveaux de vibration et de rotation les plus bas. Au contraire, les transitions de rotation pure et de vibration-rotation des molécules diatomiques homonucléaires comme C_2 sont interdites, de sorte que les populations sur les niveaux vibrationnels et rotationnels de C_2 , dans les états électroniques normal et excités, simulent des distributions à haute température. Dans tous les cas, les distributions sur les niveaux de vibration et de rotation diffèrent de distributions boltzmanniennes pures, et les concepts de «température de vibration» ou de «température de rotation» sont purement artificiels. La distribution sur les niveaux de vibration et de rotation des états électroniques inférieurs résulte de conditions stationnaires dans lesquelles l'absorption

du rayonnement solaire (compte tenu du profil et du décalage dopplérien des raies de Fraunhofer) est équilibrée par les transitions de rotation pure et de vibration-rotation. Dans le cas des bandes violettes les plus intenses de CN, les courbes d'énergie potentielle des états électroniques inférieur et supérieur sont telles que l'excitation s'effectue presque exclusivement suivant la transition (0 — 0); d'ailleurs, la structure rotationnelle de la transition ${}^2\Sigma \rightarrow {}^2\Sigma$ est très simple. Comme il existe de très fortes raies de Fraunhofer dans le spectre solaire au voisinage de λ 3870, on peut s'attendre à des anomalies spectaculaires dans les profils rotationnels des bandes cométaires (0 — 0) et (0 — 1) de CN. La situation est tout à fait différente dans le cas de C_2 . Les niveaux de vibration de l'état électronique supérieur peuvent être atteints par plusieurs transitions d'intensités comparables et la structure de rotation des bandes de Swan ($A {}^3\Pi_g \rightarrow X {}^3\Pi_u$) est complexe. D'ailleurs, le spectre solaire est moins riche dans la région des bandes de Swan. Il en résulte que les profils rotationnels des bandes de Swan ne présentent que des anomalies peu spectaculaires et que ces dernières ne peuvent être trouvées qu'après une étude assez compliquée.

Les profils remarquables des bandes de CN sur les spectrogrammes des comètes Mrkos, Burnham, Seki-Lines et Ikeya ont été soigneusement étudiées; la discussion la plus complète est due à Arpigny [28]. Le premier point à élucider est la distribution des radicaux CN sur les niveaux de rotation du niveau électronique normal ${}^2\Sigma$. Dans des travaux publiés il y a vingt ans [29], on a déjà mentionné que cette distribution dépend des raies de Fraunhofer et ne peut, par suite de la rareté des collisions*, être représentée par une simple formule de Boltzmann. En fait, on a montré en 1943 [30] que le problème de l'excitation fluorescente devrait être traité par un système d'équations exprimant l'état stationnaire, tout comme S. Rosseland a traité le cas des nébuleuses gazeuses en 1926.** Ce point de vue ne pouvait guère être appliqué au cas des comètes jusqu'à ce qu'on dispose de calculatrices électroniques. En fait, le traitement de Carrington [32] est essentiellement le même.

La procédure mathématique consiste à écrire une série d'équations exprimant que le nombre de transitions à partir d'un niveau (v' , k') est égal au nombre de transitions arrivant à ce niveau, et de même pour (v'' , k''). De graves difficultés apparaissent immédiatement. Nous ne connaissons guère les moments électriques dipolaires et ne pouvons déterminer les probabilités des transitions de rotation pure. Hunaerts a estimé ces probabilités en supposant que la dernière raie observée dans une bande cométaire correspond au nombre quantique de rotation tel que la durée de vie relative à une transition rotationnelle pure à partir de ce niveau est égale à la durée de vie relative à un processus d'absorption. Toutefois, comme l'a montré Arpigny, la durée de vie relative à l'absorption devrait tenir compte des raies de Fraunhofer. Certaines raies sont faibles, non à cause de la courte durée de vie relative à la transition de rotation pure, mais bien à cause de l'affaiblissement du rayonne-

* On constate aisément que les processus d'absorption sont beaucoup plus fréquents que les collisions avec des particules solaires.

** Houziaux [31] a appliqué la théorie des transitions cycliques à la détermination des densités dans la comète 1955 e.

ment excitateur par une raie de Fraunhofer! Arpigny a montré que les profils calculés de (0 — 0) CN sont en accord à peu près parfait avec les profils observés, si l'on tient compte des raies de Fraunhofer aussi bien dans le calcul de la distribution des radicaux sur les niveaux de rotation du niveau électronique et vibrationnel inférieur que dans l'examen des processus d'absorption eux-mêmes. Il subsiste certes encore quelques différences mineures entre les profils calculés et observés. Celles-ci sont dues, en partie, au fait que les populations rotationnelles de l'état électronique normal sont aussi affectées — quoique de façon secondaire — par l'autre transition électronique ($A \ ^2\Pi \leftarrow x \ ^2\Sigma$, système rouge) dans laquelle les raies de Fraunhofer ne jouent qu'un rôle très peu important. De plus, Arpigny a utilisé l'Atlas Photométrique d'Utrecht du Spectre Solaire; il est à présent nécessaire d'employer des profils solaires plus précis et de plus haute résolution. De tels profils peuvent être obtenus au spectrographe solaire de Liège installé à la Station Scientifique du Jungfraujoch, ou à l'installation solaire de l'Observatoire McMath.

L'étude d'Arpigny montre clairement qu'aucune distribution boltzmannienne ne coïncide avec les populations rotationnelles résultant des équations d'état stationnaire. Néanmoins, si on veut, quand même, trouver une température rotationnelle fictive telle que la répartition boltzmannienne correspondante ressemble le mieux possible à la distribution rotationnelle réelle, on peut adopter une température rotationnelle $T = 300/r$ degrés K, r étant la distance héliocentrique (Arpigny).

Dans les considérations qui précèdent, on a supposé que le déplacement dopplérien du rayonnement solaire excitateur était le même pour l'ensemble de la comète. En fait, des différences de profil rotationnel peuvent se présenter en diverses régions de la comète si celles-ci ne possèdent pas la même vitesse radiale. Un tel effet, appelé «effet Greenstein» a été trouvé pour la première fois dans la bande (0 — 0) CN des spectrogrammes de la comète Mrkos [3]. Les raies sensibles à l'effet Greenstein sont celles qui sont les plus sensibles à de faibles décalages dopplériens, c'est-à-dire celles qui tombent sur la partie raide d'une aile de forte raie de Fraunhofer. Par exemple, le rapport d'intensité $R(10)/R(9)$ varie considérablement d'une région à l'autre de la tête cométaire; la différence de vitesse radiale requise pour interpréter les observations est de l'ordre de 4 Km/sec sur 4000 Km. On a observé l'effet Greenstein dans les parties centrales de plusieurs comètes, pour diverses raies de CN: $R(12)/R(11)$; $R(11)/R(10)$; $R(10)/R(9)$; $R(3)/R(2)$; $P(5)/P(4)$;... et aussi pour des raies de CH. Les observations ne peuvent être complètement interprétées par une simple rotation du noyau; une distribution plus complexe des vitesses est requise. De nouvelles observations, utilisant une longue fente placée à une série de positions angulaires, fourniraient d'importantes informations sur la distribution des vitesses au sein de la tête; bien entendu, il faudrait guider soigneusement en utilisant un rotateur de champ et des profils solaires précis.

Dans le cas de CN, l'effet des raies de Fraunhofer sur les profils rotationnels est très sensible à la vitesse radiale; d'ailleurs, la largeur totale de la branche R dépend de r (à peu près selon $T = 300/r$). Il en résulte que la bande (0 — 0) CN peut présenter un aspect

fort différent dans diverses comètes et varie même considérablement en fonction de la distance héliocentrique pour une comète déterminée. En fait, les profils pré- et post-périhéliques sont tout à fait différents. Au voisinage immédiat du périhélie, l'émission CN totale peut même devenir faible par suite de l'absorption par les raies non déplacées d'absorption de CN du rayonnement solaire.

Des travaux semblables, mais moins détaillés, ont été effectués pour les profils rotationnels de bandes de OH, NH et CH. Dans tous les cas, l'effet de fluorescence s'est manifesté, même sur les spectrogrammes de résolution moyenne. Les spectrogrammes récents de haute résolution seront étudiés à l'aide de nouveaux profils du spectre solaire. Des comètes différentes montrent des écarts considérables dans les profils de OH et NH; leur interprétation à partir de différences de vitesse radiale et de température est convaincante.

Les cas de C_2 et NH_2 requièrent une haute résolution.* Nous avons montré plus haut que les effets ne pourraient être aussi spectaculaires que pour CN. Le cas de C_2 a été étudié surtout sur les spectrogrammes Palomar des comètes Mrkos et Seki-Lines.**

Des anomalies d'intensité trouvées dans diverses séquences des bandes de Swan ($\Delta v = 0, +1$ et -1) peuvent être attribuées sans ambiguïté à l'effet de raies de Fraunhofer [33]. Ce cas est spécialement intéressant car le niveau électronique inférieur 3I_u de C_2 n'est pas l'état électronique normal ($^1\Sigma_g^+$). Plusieurs hypothèses peuvent être émises pour expliquer l'abondance de C_2 sur l'état 3I_u . On peut, par exemple, imaginer que les molécules C_2 sont formées à l'état 3I_u par photodissociation de molécules parentes C_2X ; C_2 pourrait vivre un temps très long sur 3I_u étant donné que la transition $^3I_u \rightarrow ^1\Sigma_g^+$ est fortement interdite. Peut-être C_2 est-il sublimé directement dans l'état triplet, à partir de la matrice de glaces?

On a observé deux radicaux triatomiques dans les têtes cométaires: C_3 et NH_2 . L'analyse du spectre de laboratoire de C_3 n'est pas encore connue avec assez de précision et de détail pour pouvoir discuter le mécanisme de l'émission C_3 cométaire; mais cette analyse fait, en ce moment, de grands progrès.*** Quant aux bandes de NH_2 , elles manifestent des anomalies peu spectaculaires, mais suffisantes pour qu'on puisse aussi attribuer l'émission à un mécanisme de fluorescence [34]. Des différences entre les émissions de NH_2 dans les comètes Mrkos et Seki-Lines résultent des différences de vitesse radiale.

Depuis longtemps, on a pensé que les bandes de CO^+ des queues cométaires étaient aussi excitées par fluorescence. En particulier, le rapport d'intensité des bandes (3 — 0)

* L'effet de r sur la distribution vibrationnelle d'intensité des bandes de Swan apparaît déjà à dispersion faible et est connu depuis longtemps.

** Une étude des profils rotationnels des bandes de Swan de plusieurs comètes récentes est à présent en progrès à l'Institut d'Astrophysique de Liège. Certaines de ces comètes présentent un continuum très faible et sont, par suite, mieux adaptées que 1957d à l'étude des profils des bandes de Swan.

*** Les différences de profil des émissions de C_3 observées dans diverses comètes semblent bien être dues essentiellement à des différences des températures vibrationnelles et rotationnelles.

et (2 — 0) était beaucoup plus grand dans la comète Bester (1947 *k*) qu'au laboratoire [35]. Toutefois, aucun spectrogramme révélant la structure de rotation n'avait été obtenu jusqu'en 1962. Les spectrogrammes Palomar de la comète Humason, (1961 *e*) ont été examinés par C. Arpigny du point de vue du mécanisme d'excitation de CO⁺ [36]. Les intensités relatives des transitions de vibration ont été étudiées au moyen de spectrogrammes de faible dispersion (180 Å/mm), tandis que le cliché à haute dispersion (18 Å/mm) était utilisé pour discuter les profils rotationnels des deux bandes les plus fortes (3 — 0) et (2 — 0). Arpigny a calculé les populations sur les niveaux v'' dans des conditions stationnaires; des coefficients moyens d'affaiblissement par les raies de Fraunhofer ont été déterminés pour chaque transition (v' , v''). On arrive à un accord satisfaisant entre les intensités relatives calculées et observées des principales transitions de vibration. En particulier, on explique pourquoi la composante «bleue» du doublet (5 — 0) est plus faible que la composante «rouge», pourquoi les deux composantes de (3 — 0), (2 — 0) et (1 — 0) possèdent à peu près la même intensité et pourquoi les composantes «bleues» de (4 — 0) et (3 — 0) sont les plus intenses. Il est aussi possible d'expliquer pourquoi le rapport d'intensité (3 — 0)/(2 — 0) est plus grand dans les comètes qu'au laboratoire. Les profils rotationnels de (3 — 0) et (2 — 0) ont ensuite été discutés: les anomalies observées peuvent être attribuées à l'effet des raies de Fraunhofer. On peut donc conclure que les principales bandes de CO⁺ des queues cométaires sont excitées par un mécanisme de fluorescence tout comme les bandes des têtes. On observe les nombres quantiques de rotation jusqu'à 10 environ dans la comète Humason à $r = 2,6$; il en est de même pour CN dans les têtes cométaires observées à la même distance héliocentrique.

Les estimations des densités au sein des comètes sont encore très incertaines. Arpigny a obtenu les valeurs approximatives suivantes dans la comète Humason à une distance de 10 000 Km du noyau:

$$\begin{aligned} n(\text{CO}^+) &= 1000 \text{ cm}^{-3}; \\ n(\text{CN}) &= 15 \text{ cm}^{-3}; \\ n(\text{N}_2^+) &= 10 \text{ cm}^{-3}. \end{aligned}$$

Dans la comète Bester, à 130 000 Km du noyau, S. Grudzinska [37] avait trouvé un rapport $n(\text{CO}^+)/n(\text{CN})$ égal à 5 (après correction des valeurs f). L'abondance anormale trouvée pour le rapport $n(\text{CO}^+)/n(\text{CN})$ dans la comète Humason est bien conforme aux observations. Diverses estimations des abondances $n(\text{CN})$ et $n(\text{C}_2)$ [38] ont été effectuées récemment: elles varient généralement de 10^4 — 10^5 par cm^3 près du noyau à 1 — 10 par cm^3 à environ 100 000 Km. Toutes ces valeurs sont, d'ailleurs, assez incertaines. Il en est de même des abondances des particules solides produisant le continuum de la tête ou de la queue. Un réel effort est encore requis en ce qui concerne les déterminations d'abondances.

Le processus d'excitation des raies de [OI] n'est pas encore clairement connu. Les mécanismes de fluorescence ou de collision par électrons ou protons ne semblent pas

à même d'interpréter les observations. Si l'émission de [OI] résulte de la photodissociation de composés contenant l'oxygène, on peut déterminer la quantité minimum de matière sublimée requise. Celle-ci est de l'ordre de 10^{30} molécules par seconde ou environ $3 \cdot 10^8$ tonnes par mois. Supposant une densité 0,1 et un rayon de 10 kilomètres, la couche sublimée par mois à environ $r = 1$ aurait une épaisseur de 2,5 mètres. De telles estimations sont extrêmement imprécises, mais indiquent simplement qu'on ne peut exclure la possibilité d'une décroissance rapide du diamètre des noyaux cométaires.

A part la question du mécanisme d'excitation de [OI], les déterminations quantitatives d'abondances et l'interprétation du continuum, la situation en ce qui concerne les spectres cométaires est satisfaisante, du moins dans le domaine spectral accessible au sol. On peut escompter que les principaux problèmes encore pendants (l'analyse de C_3 et l'observation de OH^+) seront résolus dans un avenir rapproché. On peut aussi espérer que des informations sur le spectre ultraviolet lointain et sur le spectre infrarouge seront obtenues grâce aux observations par fusées, satellites et ballons à haute altitude. D'autre part, les relations entre les atmosphères cométaires et le rayonnement solaire corpusculaire restent énigmatiques. Les bandes cométaires sont excitées par un mécanisme de fluorescence pure; les collisions n'y jouent aucun rôle, au contraire du cas des aurores polaires. Alors que les intervalles de temps entre deux absorptions sont de l'ordre de 10 à 100 secondes pour CN , C_2 ou CO^+ à $r = 1$, les intervalles entre deux collisions avec des particules solaires sont, dans les conditions solaires normales, de l'ordre de 10^6 à 10^7 secondes. Le rayonnement corpusculaire solaire intervient dans l'ionisation des molécules cométaires, par transfert de charge. Ce rôle est plus grand ou du même ordre que la photo-ionisation. Mais ces questions ne seront pas discutées dans le présent exposé.

Manuscrit reçu le 15 janvier 1964.

Bibliographie.

- [1] Transactions of the I. A. U., 9, 228, 1955 (P. Swings); vol. 10, 234, 1958 (P. Swings); 11A, 131, 1961 (K. Wurm).
- [2] Swings, P.: Dans «Space Age Astronomy», Symposium, Pasadena, Calif., éditeurs: A. J. Deutsch et W. B. Klemperer, New York, p. 370, 1962; P. Swings, Smithsonian Institution Astrophysical Observatory, Special Report No. 111, 1962.
- [3] Greenstein, J. L.: Ap. J., 128, 106, 1958; J. L. Greenstein and C. Arpigny, Ap. J., 135, 892, 1962; A. Stawikowski, Bull. Soc. R. Sc. Liège, 31, 414, 1962 (Publ. Liège, n° 436); A. Woszczyk, ibid., 31, 396, 1962 (Publ. Liège n° 435).
- [4] Arpigny, C.: En préparation (communication privée), sur la base de spectrogrammes obtenus par J. L. Greenstein.
- [5] Greenstein, J. L.: Ap. J., 136, 688, 1962; C. Arpigny, en préparation (communication privée).
- [6] Deutsch, A. Transactions of the I. A. U., 11B, p. 232.
- [7] Dossin, F., Ch. Fehrenbach, L. Haser et P. Swings: Ann. d'Ap., 24, 519, 1961.

- [8] Malaise, D.: *Journal des Observateurs*, 44, 144, 1961.
- [9] Andriolat, Y., et D. Malaise: *Journal des Observateurs*, vol. 44, 147, 1961.
- [10] Dufay, J., et A. Baranne: *Ann. d'Ap.*, 25, 301, 1962.
- [11] Dossin, F., et C. Rousseau: *Comptes rendus, Paris*, 255, 2373, 1962.
- [12] Swings, P., et Ch. Fehrenbach: *Comptes rendus, Paris*, 255, 1826, 1962.
- [13] Bretz, M. C.: *Publ. Obs. Haute Provence*, 6, 17, 1962.
- [14] Fehrenbach, Ch.: *Comptes rendus, Paris*, 256, 3788, 1963.
- [15] Warner, B., and G. A. Harding: *Observatory*, 83, 219, 1963.
- [16] Warner, B.: *Observatory*, 83, 223, 1963.
- [17] Dossin, F.: *Journal des Observateurs*, 45, Nos. 1-2, 1962.
- [18] Wurm, K.: *Icarus*, 2, 29, 1963.
- [19] Dufay, J., et P. Swings: *Ann. d'Ap.*, 21, 260, 1958.
- [20] Malaise, D.: *Astronomical Journal*, 68, 561, 1963.
- [21] Swings, P., Ch. Fehrenbach et A. Woszczyk: *Comptes rendus, Paris*, 245, 2152, 1957.
- [22] Malaise, D.: *Bull. Soc. R. Sc. Liège*, 31, 656, 1962 (Publ. Liège n° 441).
- [23] Swings, P., et J. L. Greenstein: *Comptes rendus, Paris*, 246, 511, 1958.
- [24] Swings, P.: *Ann. d'Ap.*, 25, 165, 1962.
- [25] Remy-Battiau, L.: *Ann. d'Ap.*, 25, 171, 1962.
- [26] Swings, P.: Dans «*Vistas in astronomy*», éd. A. Beer (London), 2, 958, 1956; J. L. Greenstein and C. Arpigny, *Ap. J.*, 135, 892, 1962.
- [27] Gausset, L., G. Herzberg, A. Lagerqvist and B. Rosen: *Discussions of the Faraday Society*, 35, 113, 1963.
- [28] Référence 3; J. Hunaerts, *Ann. d'Ap.*, 22, 790, 1959; références 7, 12 et 14; Arpigny, communication privée, 1963.
- [29] Swings, P.: *Rev. of Modern Physics*, 14, 191, 1942; A. McKellar, *ibid.*, 14, 185, 1942.
- [30] Swings, P.: *Monthly Notices R. A. S.*, 103, 105, 1943.
- [31] Houziaux, L.: *Ann. d'Ap.*, 23, 1025, 1960.
- [32] Carrington, T.: *Ap. J.*, 135, 883, 1962.
- [33] Stawikowski, A., et P. Swings: *Ann. d'Ap.*, 23, 585, 1960; A. Woszczyk et C. Arpigny, *Bull. Soc. R. Sc. Liège*, 31, 382, 1962 (Publ. Liège n° 433).
- [34] Arpigny, C., et A. Woszczyk: *Bull. Soc. R. Sc. Liège*, 31, 390, 1962 (Publ. Liège n° 434); A. Woszczyk, *Mém. Soc. Roy. Sc. Liège*, 6, 1962.
- [35] Swings, P., and T. L. Page: *Ap. J.*, 111, 530, 1950.
- [36] Arpigny, C.: Communication privée, 1963.
- [37] Grudzinska, S.: *Ann. d'Ap.*, 23, 797, 1960; *Ciel et Terre*, 76, n° 5, 1960 (Publ. Liège n° 419).
- [38] Référence 27; P. Mianes, S. Grudzinska et A. Stawikowski, *Ann. d'Ap.*, 23, 7, 1960; B. Vorontsov-Velyaminov, *Astron. Zh.*, 37, 709, 1960; F. D. Miller, *Ap. J.*, 131, 1007, 1961; K. Wurm, *Zs. f. Ap.*, 52, 285, 1961.