

issn 0065-3713

INSTITUT D'AERONOMIE SPATIALE DE BELGIQUE

3 - Avenue Circulaire

B - 1180 BRUXELLES

# AERONOMICA ACTA

A - N° 305 - 1986

L'anatomie spectrale d'une comète

par

M. NICOLET

BELGISCH INSTITUUT VOOR RUIMTE-AERONOMIE

3 - Ringlaan

B - 1180 BRUSSEL

## AVANT-PROPOS

"L'anatomie spectrale d'une comète" est le texte d'une conférence faite au Planétarium de Bruxelles dans le cadre d'un cycle de conférences consacré au retour de la comète de Halley en 1986.

Une bibliographie limitée à un certain nombre de travaux pouvant se rapporter à l'étude de problèmes liés à l'examen spectral cométaire est également reproduite à la fin du texte.

## VOORWOORD

"L'anatomie spectrale d'une comète" is de tekst van een voordracht gegeven in het Planetarium van Brussel in het kader van een voordrachtcyclus gewijd aan de terugkeer van de komeet van Halley in 1986.

Een bibliografie beperkt tot een aantal werken die kunnen betrekking hebben op de studie van de problemen verbonden aan de kometaire spectrale analyse werd eveneens aan het einde van de tekst weergegeven.

## FORWORD

"L'anatomie spectrale d'une comète" is the text of a conference given at the Brussels Planetarium in the framework of a conference cycle dedicated to the return of the Halley comet in 1986.

A bibliography limited to a number of works which can refer to the study of the problems linked to the cometary spectral analysis is also present at the end of the text.

## VORWORT

"L'anatomie spectrale d'une comète" ist der Text einer Konferenz gegeben im Planetarium von Brüssel im Rahmen einen Konferenzzyklus der Rückkehr des Halley Kometes in 1986 gewidmet.

Eine Bibliographie beschränkt auf einer Reihe von Werken die sich können beziehen auf der Studie der Problemen verbunden mit der kometären Spektralanalyse wurde auch vorgestellt am Ende des Textes.

# L'ANATOMIE SPECTRALE D'UNE COMETE

par

M. NICOLET

## Résumé

Toute comète - au départ noyau solide de quelques kilomètres de diamètre correspondant à une boule glacée d'agrégats poussiéreux et caillouteux - se transforme lors de son approche du Soleil. Une atmosphère est créée sous l'effet de la volatilisation ou de l'éjection des constituants des couches supérieures du noyau. L'analyse spectrale de la fluorescence cométaire permet de déterminer la composition des gaz qui constituent la tête recouvrant le noyau et d'arriver à une conception physique de la nature des queues associées à sa chevelure. Grâce à l'identification spectrale des composants gazeux (de l'ordre de 35) allant de l'atome simple tel que l'hydrogène ou l'oxygène jusqu'aux molécules neutres ou ionisées telles que la vapeur d'eau et l'anhydride carbonique, on peut tenter de se faire une certaine image de l'importance des divers composants potentiels du noyau. Enfin, l'anatomie spectrale détaillée des diverses parties d'une comète brillante complètement développée conduit à une meilleure compréhension des effets du vent et de la radiation solaire dans les processus de photodissociation et de photoionisation moléculaires dans le milieu interplanétaire.

## Samenvatting

Elke komeet - aanvankelijk een vaste kern met een diameter van enkele kilometers, en overeenstemmend met een ijsbol van stoffige en kiezelige aggregaten - verandert van gedaante bij het naderen van de Zon. Een atmosfeer wordt gecreëerd als gevolg van de verdamping of de uitstoting van de bestanddelen van de bovenste lagen van de kern. De spectrale analyse van de kometaire fluorescentie laat toe de samenstelling te bepalen van de gassen die de kop uitmaken, die de kern bedekt, en tot een fysische conceptie te komen van de aard van de staarten die met de coma geassocieerd zijn. Dank zij de spectrale identificatie van de gasbestanddelen (van de orde van 35) gaande van het eenvoudig atoom zoals waterstof of zuurstof tot de neutrale of geïoniseerde moleculen zoals waterdamp en kooldioxyde, kunnen we proberen ons een zeker beeld te vormen van het belang van de diverse mogelijke bestanddelen van de kern. Tenslotte, leidt de gedetailleerde spectrale ontleding van de verschillende delen van een volledig ontwikkelde schitterende komeet tot een beter begrip van de gevolgen van de wind en de zonnestraling in de processen van fotodissociatie en moleculaire foto-ionisatie in het interplanetair milieu.

## Abstract

Each comet - at first a solid nucleus with a few kilometres diameter, and corresponding with an ice-ball of dusty and stony aggregates - changes when approaching the Sun. An atmosphere is created as a result of the volatilization or the ejection of the components of the superior layers of the nucleus. The spectral analysis of the cometary fluorescence allows to determine the composition of the gases forming the head, which covers the nucleus, and to come to a physical conception of the nature of the tails associated with the coma. Owing to the spectral identification of the gas components (of the order of 35), going from the simple atom such as hydrogen or oxygen to the neutral or ionized molecules water vapour and carbon dioxide, we may try to form an idea of the importance of the various possible components of the nucleus. Finally, the detailed spectral analysis of the different parts of a completely developed brilliant comet leads to a better understanding of the effects of the wind and the solar radiation in the photodissociation and molecular photo-ionisation processes in the interplanetary environment.

## Zusammenfassung

Jeder Komet - anfänglich ein fester Kern mit einem Diameter von einigen Kilometern, und übereinstimmend mit einem Eisball von staubigen und kiesigen Aggregaten - verändert bei der Annäherung der Sonne. Eine Atmosphäre wird kreiert infolge die Verdampfung oder die Ausstossung der Bestandteilen der obersten Schichten des Kernes. Die Spektralanalyse der kometären Fluoreszenz erlaubt die Zusammensetzung zu bestimmen der Gasen der der Kopf formen, der der Kern bedeckt, und eine physische Konzeption zu bekommen der Natur der Schweifen assoziiert mit der Koma. Dank die Spektralidentifikation der Gasbestandteilen (von der Ordnung von 35), gehend vom einfachen Atom wie Wasserstoff oder Sauerstoff zu den neutralen oder ionisierten Molekülen wie Wasserdampf und Kohlensäure, können wir versuchen eine Idee zu formen der Wichtigkeit der verschiedenen möglichen Bestandteilen des Kernes. Schliesslich, führt die detaillierte Spektralanalyse der verschiedenen Teilen eines komplett entwickelten strahlenden Kometes zu einem besseren Verständnis der Effekten des Windes und der Sonnenstrahlung in den Prozessen von Foto-dissoziation und molekularer Foto-Ionisation im interplanetaren Milieu.

## LE DOMAINE DU VISIBLE

L'étude physique des comètes a débuté dès que l'on a pu s'attacher à l'analyse spectrale de ce que l'oeil détecte généralement : une chevelure masquant un noyau central et pouvant être suivie de l'apparition d'une queue.

Ce fut un Florentin, Donati qui, en 1864, fut le premier observateur d'un spectre cométaire. Ce spectre détecté visuellement se présentait sous forme de trois bandes que Huggins (1881), grâce à des observations photographiques, mit en correspondance avec une émission de carbone analogue à celle d'une décharge dans un gaz tel que l'éthylène ( $C_2H_2$ ). L'analyse expérimentale subséquente permit, en fin compte, l'identification de ces bandes dominant l'émission cométaire dans le visible vers 516 nm, au système de Swan de la molécule diatomique  $C_2$ . Alors que Janssens photographiait la queue de la grande Comète de 1881, Huggins observait spectrographiquement, outre l'émission de la molécule  $C_2$ , celle des raies jaunes D du sodium à 589 nm lors de son approche du soleil alors qu'il décelait, parmi d'autres bandes non identifiées à l'époque, une composante de lumière solaire réfléchie résultant, comme on le sait aujourd'hui, d'une réflexion par des particules solides. Du côté des courtes longueurs d'onde du spectre obtenu par Huggins, les bandes violettes (388 nm) furent associées au spectre de laboratoire résultant de l'excitation (et de la dissociation) du cyanogène  $C_2N_2$ , c'est-à-dire en fait du radical CN.

Il semble bien que Copeland ait détecté au spectroscopie (Copeland et Lohse, 1882), l'émission spectrale propre à des atomes tels que le fer et le nickel lors de l'approche à environ un million de km du soleil de la Grande Comète de 1881. (Comète Teblutt). Mais, aujourd'hui, on se réfère surtout aux études datant seulement de quelque vingt ans effectuées par Preston (1967) et Slaughter (1969) de la Comète Ikeya-Seki 1965-f lors de son passage au périhélie à moins de 0.2 unités astronomi-

ques (30 millions de km) du Soleil. Cette faible distance héliocentrique a permis une émission généralisée de radiations monochromatiques d'éléments métalliques dans le domaine observable allant de 300 nm à 800 nm, car lorsque les températures de radiation sont supérieures à 1000 K, les atomes sont susceptibles d'être vaporisés à partir des grains de poussière. Ce sont, en particulier, les raies du sodium (NaI) à 589 et 330 nm, du calcium ionisé (CaII) à 393 nm, du chrome (CrI) à 358 nm, du manganèse (MnI) à 403 nm, du fer (FeI) à différentes longueurs d'onde de 344, 357, 358, 372, 375, 381, 382, 386 à 405 nm, du nickel (NiI) de 388, 345, 346, 352, 357 à 362 nm et du cuivre (CuI) à 325 nm.

C'est au début de ce siècle lors de l'observation de la Comète Daniel (1907) et de la Comète Morehouse (1909) que le spectre d'une queue cométaire révéla la présence (Fowler, 1910; Baldet, 1911) de molécules ionisées, le monoxyde d'azote ( $\text{CO}^+$ ) à 427 nm et l'azote ( $\text{N}_2^+$ ) à 391 nm.

Les observations de Huggins (1881) avaient déjà indiqué la présence d'émissions caractéristiques vers 430 nm et 400 nm. L'identification ne fut définitive que par l'étude de la structure de rotation de la molécule CH (Nicolet, 1938) à 431.5 nm et de la molécule  $\text{C}_3$  (Douglas 1951) à 404 nm.

#### VERS L'ULTRAVIOLET

Lorsque le miroir du télescope fut soumis à l'aluminisage, il permit l'observation spectrale jusqu'à 300 nm. De là, la découverte dans le spectre de la Comète Cunningham (1940) des émissions (Swings, Elvey et Babcock, 1941) des molécules NH et OH respectivement à 336 nm et 309 nm.

Un nouveau bond dans l'observation spectrale des comètes fut accompli après 1970 grâce à l'utilisation des techniques spatiales permettant de détecter le spectre au-dessous de 300 nm, en particulier de

la région s'étalant de 300 nm à 100 nm. Les deux comètes brillantes Tago-Sata-Kosaka (1969) et Bennett (1970) furent l'occasion d'observations spectrales nouvelles de première importance. Ainsi, la détection (Code, Houck et Lillie, 1972) de la radiation Lyman-alpha de l'hydrogène (HI) à 121.6 nm indiquait que l'hydrogène était un important constituant des atmosphères cométaires (Bertaux et Blamont, 1970). De là, une enveloppe d'atomes d'hydrogène émettant à 121.6 nm pouvait s'étendre à plusieurs dizaines de millions de km et ainsi couvrir un domaine équivalent à celui de l'ensemble des chevelures et des queues associées, observé dans le visible. Au-delà de la raie de résonance Lyman-alpha de l'hydrogène, l'analyse spectrale de la Comète Kohoutek (1973) permit (Feldman, Tabacs, Fastie et Donn, 1974) de reconnaître la présence de l'oxygène atomique neutre (OI) à 130.4 nm, celle du carbone atomique neutre (CI) à 156.1 et 165.7 nm et, dans le cas de la Comète West (1975), la présence, entre autres choses, (Feldman et Brune, 1976) du carbone ionisé (C II) à 133.5 nm. Enfin, le soufre atomique neutre (SI) fut détecté, également dans le spectre de la Comète West (1975) par la raie apparaissant à 181.4 nm (Smith, Stecher and Casswell, 1980). D'ailleurs, la détection simultanée des bandes de CO à 151 nm, de CS à 257.6 nm et de CN<sup>+</sup> à 218.1 nm permit d'ajouter ces trois constituants neutres ou ionisés à la liste des molécules dont le spectre était déjà connu dans le visible et le proche ultraviolet.

#### PRINCIPAUX ELEMENTS DU SPECTRE COMETAIRE

Comme il n'est pas possible de détailler ici toute l'anatomie spectrale d'une comète, un tableau regroupe en fonction de la longueur d'onde, les principales radiations observées, à l'exception des raies métalliques citées plus haut dans le texte.

On peut constater qu'une série de molécules ionisées dont nous n'avons pas signalé la présence doit être rappelée à l'attention. Il

s'agit des molécules ionisées de la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}^+$ ) observée vers 620 nm (Herzberg and Lew, 1974), du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2^+$ ) observé vers 350 nm (Swings et Page, 1950), du radical CH ( $\text{CH}^+$ ) vers 422.5 nm (Swings, 1941) et du radical OH ( $\text{OH}^+$ ) vers 366.5 nm (Swings et Page, 1950). On notera également dans ce tableau la présence de transitions interdites de l'oxygène neutre atomique [OI] à 630, 557.7 et 297 nm et du carbone neutre atomique [CI] à 193 nm.

Enfin, on retiendra encore la présence dans le spectre cométaire de la molécule triatomique  $\text{NH}_2$  se manifestant vers 570 nm (Swings, McKellar et Minkowski, 1943) de même que celles très probables résultant de l'observation radio de l'acétonitrile ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ) vers 6 mm (Ulich et Conklin, 1975) et de l'acide cyanhydrique (HCN) vers 3.3 mm (Hueber, Snyder et Buhl, 1974).

#### PROCESSUS AERONOMIQUES

L'anatomie spectrale révèle donc la présence de molécules polyatomiques telles que  $\text{CH}_3\text{CN}$ , HCN,  $\text{H}_2\text{O}$ ,... de radicaux comme OH,  $\text{C}_2$ , CN,  $\text{C}_3$ , CH, NH et  $\text{NH}_2$ , dans la chevelure d'une comète, d'ions tels que  $\text{CH}^+$ ,  $\text{CN}^+$ , et en particulier  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{CO}_2^+$  et  $\text{H}_2\text{O}^+$  dans les queues cométaires, de transitions interdites de l'oxygène et du carbone atomiques, sans oublier les raies des éléments métalliques (Fe, Ni, Cr, etc.) pour une comète approchant le soleil (0,1 unité astronomique).

En vue d'une interprétation globale des divers processus aéronomiques intervenant dans une atmosphère cométaire, il est requis d'interpréter son anatomie spectrale en considérant l'ensemble des éléments qui constituent la structure générale d'une comète.

Le point de départ doit être, en tout cas, l'existence d'un noyau solide en rotation, à peu près sphérique de quelques kilomètres de

diamètre (5 à 15 km). Celui-ci est constitué d'un conglomerat glacé appelé souvent "boule de neige sage" (Whipple 1950). Au fur et à mesure que le noyau s'approche du soleil, la sublimation se manifeste. De là les divers gaz et les poussières couvrent une région de plus en plus étendue de l'ordre de 10.000 à 100.000 km formant ainsi la tête (coma) de la comète alors que peut apparaître dans la direction antisolaire, une queue de plusieurs dizaines de millions de km constituée généralement de deux composantes : l'une caractérisée par la poussière, l'autre constituée par le gaz ionisé. Néanmoins, la persistance des gaz après le passage au périhélie exige que les divers produits volatils puissent subsister. De là, l'idée essentielle (Delsemme et Swings, 1952) que la sublimation générale est pratiquement celle résultant de la glace d'eau. Ainsi, les substances qui se trouvent dans le noyau, doivent être sous forme d'hydrates (ou clathrate, par exemple  $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) contrôlant la vaporisation générale. A la distance d'une unité astronomique, une telle vaporisation correspondrait à quelque 30 tonnes par seconde, ce qui correspond à un total de l'ordre de  $10^{30}$  molécules par seconde.

Il apparaît donc que la tête d'une comète doit d'abord être constituée d'une zone restreinte (de 1000 à 10000 km suivant diverses estimations) entourant le noyau où les collisions entre atomes et molécules définissent encore les propriétés du gaz comme dans l'atmosphère terrestre. De là, la radiation solaire donne lieu aux divers processus aéronomiques subséquents à la photodissociation et à la photoionisation comme des réactions chimiques et ioniques. Au-delà d'une distance critique, les processus radiatifs doivent dominer et donner lieu, par exemple, à la photodissociation des constituants primaires et secondaires où les produits (radicaux et atomes) possèdent des énergies cinétiques liées à la longueur d'onde photolytique de la radiation ultraviolette solaire. Cette région diffère toutefois de l'exosphère terrestre, car le champ de la pesanteur n'intervient pas. Dans le cas de la photoionisation, il faut introduire l'action simultanée du vent

solaire se manifestant par ses protons à grande vitesse (plusieurs centaines de km par seconde) qui interagissent par des échanges de charge avec des éléments neutres et dirigent les éléments ionisés dans une direction antisolaire. Certains rapprochements peuvent donc être faits avec les conditions que l'on retrouve dans l'étude de la queue magnétique de la Terre.

C'est dans un tel contexte qu'il faut s'attaquer au problème de l'interprétation de l'ensemble des émissions spectrales cométaires.

Depuis que le mécanisme des émissions cométaires a été attribué (Zanstra, 1928) à la fluorescence des gaz sous l'effet de la radiation solaire, c'est-à-dire à un processus par lequel une molécule (ou un atome) absorbant un photon solaire à une certaine longueur d'onde peut réémettre ce photon isotropiquement dans l'espace à la même longueur d'onde (résonance) ou à une longueur d'onde différente (fluorescence), les déductions de l'analyse spectrale ont été poussées dans leurs conséquences jusqu'à l'extrême limite de leurs possibilités. Tout d'abord, le mécanisme d'excitation par absorption de radiations monochromatiques solaires dépend de la structure fine du spectre de Fraunhofer (Swings 1941) qui détermine ainsi la distribution au sein d'un bande moléculaire de l'intensité des diverses rotations. De plus, la vitesse radiale de la comète par rapport au soleil modifiant les correspondances spectrales provoque des changements dans la distribution d'intensité des raies de rotation au sein d'un bande. Au surplus, comme la vitesse radiale est un paramètre variable, elle doit être considérée avec attention, en particulier lorsque la résolution spectrale étant bien définie permet une analyse détaillée de chaque raie de rotation.

Enfin, il faut tenir compte de la variation de la distance de la comète au soleil, car le carré de la distance détermine, dans des conditions spectrales identiques, le nombre de processus d'absorption par

unité de temps lié à chaque atome ou à chaque molécule en fonction de leurs propres paramètres spectroscopiques (probabilités des transitions d'absorption et d'émission, durée de vie,...)

Donc, les conditions aéronomiques d'une comète exigent en vue de leur interprétation, une connaissance détaillée de tous les aspects de la photochimie. L'irradiance solaire doit être connue avec une haute précision, ce qui n'est pas encore le cas surtout si l'on doit utiliser la structure spectrale de l'irradiance pour l'étude des problèmes de fluorescence dans l'ultraviolet. En outre, la dépendance en fonction de la longueur d'onde des différents mécanismes photochimiques primaires devrait être connue avec beaucoup plus de précision. En effet, il se pose encore des questions liées à la nature exacte et des proportions relatives des molécules-mères qui donnent lieu par voie directe ou indirecte aux éléments observés par leur spectre. Ainsi, le spectre visible où apparaissent simultanément les émissions de  $C_2$ ,  $C_3$ , CH et CN se caractérise par des bandes d'aspects différents. Alors que les bandes de Swan de  $C_2$  se manifestent par une distribution de raies de rotation imitant quasi une distribution boltzmannienne équivalente à 3000 - 3500°K, les raies de bandes de CN ont une tendance à se distribuer suivant une température qui serait au voisinage de 300 K et la molécule CH est caractérisée par la présence de quelques raies de rotation individuelles. Le radical  $C_2$  est une molécule diatomique homonucléaire et ne peut émettre dans l'infrarouge par passage entre deux états de rotation. Il en résulte que les états de rotation de l'état électronique fondamental sont peuplés par pompage radiatif après chaque processus d'absorption de la radiation solaire. En d'autres termes, lors de son processus de fluorescence, après une émission dans le visible s'effectuant par le passage d'un état déterminé de rotation de l'état électronique supérieur vers un état (différent de celui de départ) de rotation de l'état électronique normal, la molécule  $C_2$  ne peut émettre dans l'infrarouge en vue de retrouver son état de rotation de départ.

Dans le cas de la molécule CN, il semble que la durée de vie sur un état de rotation de l'état électronique fondamental serait de l'ordre de quelque centmillième de seconde. En conséquence, si le mécanisme d'absorption de la radiation solaire par le radical CN requiert plus de  $10^{-5}$  secondes, il n'y aura pas de phénomène de pompage radiatif. Dans le cas du radical CH, on sait que, les conditions spectroscopiques des hydrures s'appliquant, la durée de vie sur un état de rotation est très courte.

S'il n'est pas possible de passer en revue, au cours de cette conférence, l'ensemble des processus aéronomiques jouant un rôle au sein d'une multi-atmosphère cométaire, il est peut-être utile de rappeler brièvement quels sont les types de processus qui peuvent être envisagés a priori. Tout d'abord, la photodissociation d'une molécule XY en ses produits X + Y est un processus où X ou (et) Y peuvent être non seulement dans des états excités, mais acquièrent, en fonction de la longueur d'onde, un excès d'énergie qui est distribuée parmi les divers degrés de liberté des produits. De là, des énergies cinétiques spécifiques à chaque longueur d'onde agissant dans le cadre de la photodissociation et des vitesses caractéristiques dans la tête cométaire des radicaux et des atomes provenant d'une certaine molécule-mère.

La photoionisation, XY + radiation ultraviolette de courte longueur d'onde, donnant lieu à un ion moléculaire  $XY^+$  + e ou à un ion atomique X +  $Y^+$  + e peut amener dans les régions les plus proches du noyau à un transfert de charge  $XY^+ + VZ \rightarrow VZ^+ + XY$  ou à un interchange-ment d'ions  $XY^+ + VZ \rightarrow VX + ZY^+$ . Une molécule  $XY^+$  peut être également dissociée par le processus dit de recombinaison dissociative  $XY^+ + e \rightarrow X^* + Y^*$  où les atomes  $X^*$  et  $Y^*$  peuvent être dans un état excité généralement métastable comme  $O(^1D)$  émettant à 630 nm. Au voisinage du noyau, il est même possible d'envisager pour l'un ou l'autre constituant des réactions chimiques rapides du type X + YZ → XY + Z. Un processus enfin dont il faut tenir compte est celui qui est lié à l'action (transfert de charge)

des protons solaires  $H^+$  sur les produits moléculaires ou atomiques neutres de la tête cométaire. Un tel processus est toujours à mettre en parallèle avec les processus de photoionisation et de photodissociation qui sont différents suivant la nature des molécules-mères. En conséquence, la composition chimique des comètes est reflétée dans le comportement dynamique d'une comète. Mais, il faut insister sur le fait que trop de paramètres sont loin d'être connus avec certitude. De nombreux travaux de laboratoire sont requis en vue d'arriver à une estimation précise des probabilités de dissociation et d'ionisation par la radiation ultraviolette solaire ou par collision avec les particules constituant le vent solaire.

Il n'est pas possible au cours de cet exposé d'entrer dans les détails, mais en terminant nous voudrions souligner quelques aspects des principaux processus aéronomiques en considérant les mécanismes liés à la présence d'une molécule-mère telle que la vapeur d'eau.

Tout d'abord, sous l'effet de la radiation ultraviolette solaire l'eau vaporisée provenant du noyau peut être photodissociée ou photoionisée sous diverses formes en fonction du domaine de longueurs d'onde intervenant dans l'un ou l'autre processus. Les mécanismes qui peuvent apparaître dans le processus de photodissociation sont les suivants :

à partir de 256 nm,  $H_2O \rightarrow H_2 + O(^3P)$ ,

c'est-à-dire une molécule d'hydrogène et un atome d'oxygène à l'état normal;

de 242 nm,  $H_2O \rightarrow H + H$ ,

un radical OH et un atome H, à l'état normal;

de 176 nm,  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}(^1\text{D})$ ,

une molécule d'hydrogène et un atome d'oxygène dans le premier état métastable;

de 136 nm,  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}(^3\Sigma) + \text{H}$ ,

un radical OH excité et un atome d'hydrogène à l'état normal;

de 130 nm,  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O} + \text{H} + \text{H}$ ,

deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène

ou

$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}(^1\text{S})$

une molécule d'hydrogène et un atome d'oxygène dans le second état métastable

La photoionisation peut apparaître à des longueurs d'onde inférieures à 100 nm, c'est-à-dire

à partir de 98 nm,  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{e}$

et de 69 nm,  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H} + \text{e}$

Il n'est pas possible actuellement de déterminer avec une précision suffisante quelles sont les probabilités relatives des divers mécanismes dans chaque domaine de longueur d'onde, sauf dans un cas, celui du domaine de la radiation solaire Lyman-alpha de l'hydrogène à 121.6 nm. Les résultats expérimentaux indiquent que les pourcentages respectifs suivants peuvent être adoptés (Nicolet, 1984) :

$\text{OH}(^3\pi) + \text{H}$ ,	70%
$\text{OH}(^3\Sigma) + \text{H}$ ,	8%
$\text{H}_2 + \text{O}(^1\text{D})$ ,	10%
et $\text{O} + \text{H} + \text{H}$ ,	12%

Comme Lyman-alpha est une émission solaire intense dont l'irradiance varie d'environ  $2.5$  à  $5 \times 10^{11}$  photons  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  à la distance d'une unité astronomique pour les diverses conditions d'activité solaire, elle joue un rôle essentiel dans la photodissociation de  $\text{H}_2\text{O}$  avec la proportion des produits que nous venons d'indiquer. En même temps, l'apport à la photodissociation de la région spectrale 200-175 nm qui donne lieu essentiellement à  $\text{OH} + \text{H}$  n'est pas négligeable. En tous cas, la durée de vie de la molécule  $\text{H}_2\text{O}$  avant photodissociation, dans le champ de la radiation solaire, à la distance héliocentrique d'une unité astronomique, est de l'ordre de 1 à 2 jours en fonction des conditions de l'activité solaire. Le radical  $\text{OH}$  a également une durée de vie relativement courte dans le champ de radiation du soleil du même ordre de grandeur que celle de  $\text{H}_2\text{O}$ . En effet, le radical  $\text{OH}$  absorbe fortement vers 150 nm et à Lyman alpha. Les différents processus donnent lieu à des atomes d'oxygène à l'état normal  $\text{O}(^3\text{P})$  et dans les états métastables  $\text{O}(^1\text{D})$  et  $\text{O}(^1\text{S})$  alors que les atomes d'hydrogène acquièrent des vitesses respectives  $v_{\text{H}} = 8, 26$  et  $17$  km par seconde. En simplifiant, on peut dire qu'on obtient

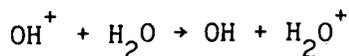
à 150 nm,  $\text{O}(^3\text{P}) + \text{H}$ , avec  $v_{\text{H}} = 8 \text{ km s}^{-1}$

à Lyman-alpha  $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}$ , avec  $v_{\text{H}} = 26 \text{ km s}^{-1}$   
et environ 10 fois moins,

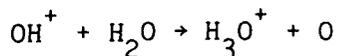
$\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}$ , avec  $v_{\text{H}} = 17 \text{ km s}^{-1}$ .

On peut rappeler ici que l'atome  $\text{O}(^1\text{D})$  donne lieu à la transition interdite  $^1\text{D} - ^3\text{P}$  correspondant à une émission à 630 nm dans le rouge et l'atome  $\text{O}(^1\text{S})$  à  $^1\text{S} - ^1\text{D}$  correspondant à 557 nm dans le vert et également à  $^1\text{S} - ^3\text{P}$  dans l'ultraviolet à 297 nm.

L'atome d'hydrogène, étant également soumis au champ de radiation solaire est photoionisé à des longueurs d'onde inférieures à 91 nm dans un laps de temps de l'ordre de 6 mois à une unité astronomique. Dans le cas du transfert de charge avec un proton solaire,  $H + H^+ \rightarrow H^+ + H$ , l'ionisation est plus rapide, moins d'un mois, dès que la concentration des protons solaires dépasse 1 électron par  $cm^3$ . La recombinaison de l'ion d'hydrogène,  $H^+ + e \rightarrow H + \text{ultraviolet}$ , est beaucoup moins rapide et ne peut être qu'un processus secondaire dans l'ensemble des réactions aéronomiques. Par exemple, le transfert de charge  $H^+ + H_2O \rightarrow H + H_2O^+$  peut apparaître en moins de 10 jours si la concentration dans une certaine région de la tête de la comète des molécules de vapeur d'eau est de quelque 100 molécules par  $cm^{-3}$ . La photoionisation directe de  $H_2O$  requiert environ un mois à une unité astronomique et celle conduisant à  $OH^+$  environ dix fois plus de temps. L'ion  $OH^+$  peut réagir avec la vapeur d'eau et donner lieu soit à un transfert de charge

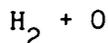
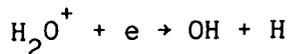
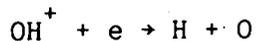


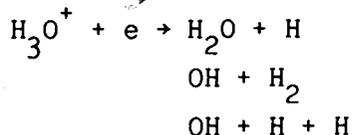
ou à la formation d'un ion triatomique (Aikin 1974)



qui vient d'être détecté récemment (1985).

Ces différents ions  $OH^+$ ,  $H_2O$  et  $H_3O^+$  peuvent disparaître par recombinaison dissociative :





Une concentration électronique au-delà de 20 électrons par  $\text{cm}^3$  n'accorde à ces ions qu'une durée de vie inférieure à un jour.

Ces quelques exemples liés au comportement cométaire de  $\text{H}_2\text{O}$  dont la concentration au voisinage du noyau peut atteindre  $10^{10}$  molécules par  $\text{cm}^3$  montrent qu'un réseau complexe de processus aéronomiques intervient et que celui-ci se modifie profondément lorsqu'on passe de la région proche du noyau à l'extrémité de la chevelure de la comète.

En fin de compte, s'il apparaît que l'anatomie spectrale d'une comète conduit à la détermination de la nature des produits résultant de l'évaporation de son noyau et permet ainsi de déduire un ensemble de propriétés générales définissant l'évolution d'une atmosphère cométaire, elle souligne néanmoins les limites des connaissances actuelles et, de là, la nécessité d'un examen plus approfondi des propriétés spectrales. Un tel examen est lié à des progrès qui doivent être accomplis à la fois dans le cadre d'observations plus quantitatives dépendant d'un calibrage absolu et dans le domaine expérimental ou théorique une meilleure connaissance photochimique des principales molécules cométaires. C'est, en tout cas, ce que requiert l'aéronomie quantitative d'une atmosphère cométaire.

Une information de base et des références générales et détaillées peuvent être obtenues dans "Comets" édité par L.L. Wilkening, The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1982, 766 pages et dans "Les Comètes et la Comète de Halley", Ciel et Terre, Vol. 101, pp. 105-229, 1985.

Radiations observées dans les spectres cométaires

Longueur d'onde (nm)	Atome Molécule	Désignation	Constituant
121.6	HI	Lyman-alpha	Hydrogène atomique neutre
130.4	OI	Multiplet fondamental	Oxygène atomique neutre
133.5	CII	Multiplet fondamental	Carbone atomique ionisé
151	CO	4e système positif	Monoxyde de carbone neutre
156	CI	Multiplet fondamental	Carbone atomique neutre
166	CI		
182	SI	Multiplet fondamental	Soufre atomique neutre
218	CN <sup>+</sup>	2e système de résonance	Radical CN ionisé
219	CO <sup>+</sup>	Premier système négatif	Monoxyde de carbone neutre
231	C <sub>2</sub>	Bandes de Mulliken	Molécule de carbone neutre
258	CS	Bandes fondamentales	Sulfite de soufre
289	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Bandes ultraviolettes	Dioxyde carbone ionisé
297.2	[OI]	Raie ultraviolette	Oxygène atomique neutre
309	OH	Bande fondamentale	Hydroxyle neutre
318	CN <sup>+</sup>	1er système de résonance	Radical CN ionisé
336	NH	Système fondamental	Radical NH neutre
351	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Système fondamental	Dioxyde de carbone ionisé
357	OH <sup>+</sup>	Système fondamental	Radical OH ionisé
389	CN	Système UV fondamental	Radical CN neutre
391.5	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Système fondamental	Molécule d'azote ionisée
395	CO <sup>+</sup>	Système fluorescence	Monoxyde de carbone ionisé
404	C <sub>3</sub>	Système fondamental	Carbone triatomique neutre
422	CH <sup>+</sup>	Système fondamental	Radical CH <sup>+</sup> ionisé

Radiations observées dans les spectres cométaires (suite)

---

427	$\text{CO}^+$	Système principal	Monoxyde de carbone ionisé
431.5	CH	Système principal	Radical CH neutre
516	$\text{C}_2$	Bandes de Swan	Molécule $\text{C}_2$ neutre
557.7	[OI]	Raie verte	Atome d'oxygène neutre
620	$\text{H}_2\text{O}^+$	Système principal	Vapeur d'eau ionisée
630	[OI]	Raie rouge	Atome d'oxygène neutre
656.3	HI	Raie H-alpha	Hydrogène neutre
785	CN	Système infrarouge	Radical CN neutre
110.7 GHz	$\text{CH}_3\text{CN}$	Radio observation	Acétonitrile
88.6 GHz	HCN	Radio observation	Acide cyanhydrique

## BIBLIOGRAPHIE

Deux nombreux livres ont été publiés récemment à l'occasion du retour de la comète de Halley. On peut retenir les livres suivants qui couvrent la plupart des aspects scientifiques et toutes les formes de description.

1. The Mystery of Comets par Fred. L. Whipple, Smithsonian Institution Press, Washington D.C. 276 pages, 1985.
2. The Comet Book. A book for the return of Halley's Comet par Robert D. Chapman et John C. Brandt, Jones and Bartlett Publ., Boston, 168 pages, 1984.
3. Le retour de la comète par Jean Marie Homel, Editions Imago, Paris, 208 pages 1985.
4. Le guide de la Comète de Halley, L'histoire terrifiante des comètes par Isaac Asimov, Editions du Rocher, Monaco, 123 pages, 1985.
5. Les Comètes, Mythes et Réalités par Michel Festou, Philippe Veron, Jean-Claude Ribes, Flammarion, Paris, 320 pages, 1985.

Parmi la multiplicité des articles parus, on peut consulter les suivants où d'autres références peuvent être trouvées.

- A' HEARN, M.F., 1975. Spectrophotometry of Comet Kohoutek (1973f = 1973 XII), Astron. J., 80, 861-875.
- A' HEARN, M.F., and COWAN, J.J. 1975. Molecular production rates in Comet Kohoutek, Astrophys. J., 80, 852-860.
- A' HEARN, M.F., and FELDMAN, P.D. 1980. Carbon in Comet Bradfield 1979I. Astrophys. J., 242, L187-L190.
- A' HEARN, M.F., HANISCH, R.J. and THURBER, C.H. 1980. Spectrophotometry of Comet West, Astron. J., 85, 74-80.
- A' HEARN, M.F. and MILLIS, R.L. 1980. Abundance correlations among comets, Astron. J., 85, 1528-1537.

- A'HEARN, M.F., MILLIS, R.L. and THOMPSON, D.T. 1983. The disappearance of OH from Comet P/Encke, Icarus, 55, 250-258.
- AIKIN, A.C. 1974. Cometary coma ions. Astrophys. J., 193, 263-264.
- AIKMAN, C.C.L., BALFOUR, W.J. and TATUM, J.B. 1974. The cyanogen bands of Comet Bennett 1970 II, Icarus, 21, 302-316.
- ARPIGNY, C. 1965. A study of molecular and physical processes in comets, Mémoires Acad. Roy. Belgique, Cl. Sci., XXXV, fasc. 5, 1-157.
- ARPIGNY, C. 1965. Spectra of comets and their interpretation. Ann. Rev. Astron. Astrophys., 3, 351-376.
- ARPIGNY, C. 1976. Interpretation of comet spectra : A review. In The Study of Comets, Eds. B. Donn, M. Mumma, W. Jackson, M. A'Hearn, and R. Harrington, (Washington, NASA SP-393), pp. 797-838.
- ARPIGNY, C. 1978. On the nature of comets. In Proc. Welch Conf. on Cosmochemistry, ed. W.O. Milligan (Houston : Welch Foundation), pp. 9-57.
- ARPIGNY, C. 1979. Relative abundances of the heavy elements in Comet Ikeya Seki. In Elements and Isotopes in the Universe, 22d Colloq. Astrophys. Liège, (Univ. Liège).
- ARPIGNY, C., and WOSZCZYK, A. 1962. Mécanisme d'émission du radical  $NH_2$  dans les comètes, Bull. Soc. Roy. Sci. Liège, 31, 390-395.
- ASHIHARA, O. 1978. Photoelectron fluxes in cometary atmospheres, Icarus, 35, 369-384.
- BAPPU, M.K.V., PARTHASARATHY, M., SIVARAMAN, K.R. and BABU, G.S.D. 1980. Emission band and continuum photometry of Comet West (1975n). II. Emission profiles of the neutral coma, lifetimes of molecules and distribution of the molecules and dust within the coma, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 192, 641-650.
- BARBIERI, C., COSMOVICI, C.B., MICHEL, K.W., NISHIMURA, T. and ROCHE, A.E. 1974. Near infrared observations of the dust coma of Comet Kohoutek (1973f) with a tilting-filter Fabry-Perot photometer, Icarus, 23, 568-576.

- BECKER, K.H., TATARCZYK, T. and RADIC-PERIC, J. 1979. Lifetime measurements of electronically excited  $C_3(^1\pi_u)$  radicals in different vibrational states. Chem. Phys. Letts., 60, 502-506.
- BENNETT, R.G. and DALBY, P.W. 1959. Experimental determination of oscillator strength of the first negative band of  $N_2^+$ . J. Chem. Phys., 31, 434-441.
- BENNETT, R.G. and DALBY, F.W. 1960. Experimental oscillator strength of CH and NH. J. Chem. Phys., 32, 1716-1719.
- BENNETT, R.G. and DALBY, F.W. 1962. Experimental oscillator strength of the violet system of CN. J. Chem. Phys., 36, 399-405.
- BENEVUTI, P. and WURM, R. 1974. Spectroscopic observations of Comet Kohoutek (1973f). Astron. Astrophys., 25, 121-122.
- BERTAUX, J.L., BLAMONT, J.E. and FESTOU, M. 1973. Interpretation of hydrogen Lyman-alpha observations of Comets Bennett and Encke. Astron. Astrophys., 25, 415-430.
- BIRAUD, F., BOURGOIS, G., CROVISIER, J. FILLIT, R., GERARD, E. and KAZES, I. 1974. Discovery of 18-cm OH emission in Comet Kohoutek. Astron. Astrophys., 34, 163-166.
- BLACK, J.H., CHAISSON, E.J., BALL, J.A., PENFIELD, H., LILLEY, A.E. 1974. A radio frequency emission from CH in Comet Kohoutek (1973f). Astrophys. J., 191, L45-L47.
- BLAMONT, J.E. and FESTOU, M. 1974. Observation of Comet Kohoutek (1973f) in the resonance light the OH radical. Icarus, 23, 538-544.
- BOBROVNIKOFF, N.T. 1931. Halley's comet in its apparition of 1909-1911. Publ. Lick Observ., 17, 309-482.
- BROZOWSKI, J., ERMAN, P. and LYRRA, M. 1978. Precision estimates of the predissociation rates of the OH A  $^2\Sigma$  states ( $v' \leq 2$ ). Phys. Scripta., 17, 507-511.
- BUTLER, J.D., DROZDOSKI, W.S. and McDONALD, J.R. 1980. 193 nm laser dissociation of  $CS_2$ : Prompt emission from CS and internal energy distribution of CS ( $X^1\Sigma^+$ ), Chem. Phys., 50, 413-421.

- CARRUTHERS, G.R., OPAL, C.B., PAGE, T.L., MEIER, R.R. and PRINZ, D.K. 1974. Lyman- $\alpha$  imagery of Comet Kohoutek. Icarus, 23, 526-537.
- CARLSON, T.A., COPLEY, J., DURIC, N., ERMAN, P. and LARSSON, M. 1979. Time resolved studies of collisional transfer and radiative decay of the CS A<sup>2</sup> $\Pi$  state. Chem. Phys., 42, 81-87.
- COMBI, M.R. and DELSEMME, A.H. 1980a. Neutral cometary atmospheres I. An average random walk model for photodissociation in comets. Astrophys. J., 237, 633-640.
- COMBI, M.R. and DELSEMME, A.H., 1980b. Neutral cometary atmospheres II. The production of CN in comets. Astrophys. J., 237, 641-645.
- COMBI, M.R. and DELSEMME, A.H. 1980c. Neutral cometary atmospheres. III. Acceleration of cometary CN by solar radiation pressure. Astrophys. J., 241, 830-837.
- COMBI, M.R. and DELSEMME, A.H. 1980d. Brightness profiles of CO<sup>+</sup> in the ionosphere of Comet West (1976 VI). Astrophys. J., 238, 381-384.
- CONLEY, C., HALPERN, J.B., WOODS, J., VAUGHN, C. and JACKSON, W.M. 1980. Laser excitation of the CN B<sup>2</sup> $\Sigma^+$  + A<sup>2</sup> $\Pi_0-0$  and 1-0 bands. Chem. Phys. Letts., 73, 224-227.
- COPELAND, R. and LOHSE, J.G. 1882. Spectroscopic observation of Comets III and IV 1881, Comet I 1882, and the Great Comet of 1882, Copernicus, 2, 225-244.
- CRAVENS, T.E. and GREEN, A.E.S. 1978. Airglow from the inner comas of comets. Icarus, 33, 612-623.
- CROVISIER, J. 1984. The water molecule in comets : fluorescence mechanisms and thermodynamics of the inner corona, Astron. Astrophys., 130, 361-372.
- CROVISIER, J. and LE BOURLOT, J. 1983. Infrared and microwave fluorescence of carbon monoxide in comets, Astron. Astrophys., 123, 61-66.

- CROVISIER, J., DESPOIS, D., GERARD, E., IRVINE, W.M., KAZES, I., ROBINSON, S.E. and SCHLOERB, F.P. 1981. A search for the 1.35 cm. line of  $H_2O$  in comets Kohler (1977 XIV) and Meier (1978 XXI). Astron. Astrophys., 97, 195-198.
- CURTIS, L., ENGMAN, B. and ERMAN, P. 1976. High resolution lifetime studies of the  $d^3\Pi_g$  and  $D^1\Sigma_u^+$  states in  $C_2$  with applications to estimates of the solar carbon abundances, Phys. Scripta., 13, 270-274.
- DANKS, A.C. and DENNEFELD, M. 1981. Near-infrared spectroscopy of Comet Bradfield 1979L, Astron. J., 86, 314-317.
- DANKS, A.C., LAMBERT, D.L. and ARPIGNY, C. 1974. The  $^{12}C/^{13}C$  ratio in Comet Kohoutek (1973f), Astrophys. J., 194, 745-751.
- DANKS, T. and ARPIGNY, C. 1973. Relative band intensities in the red and violet systems of CN. Astron. Astrophys., 29, 347-356.
- DANYLEWYCH, L.L., NICHOLLS, R.W., NEFF, J.S. and TATUM, J.B. 1978. Absolute spectrophotometry of comets 1933 XII and 1975 IX II. Profiles of the Swan bands, Icarus, 35, 112-120.
- DELSEMME, A.H. 1980. Pristine nature of comets as revealed by their UV spectra, Applied Optics, 19, 4007-4014.
- DELSEMME, A.H. 1980. Photodissociation of  $CO_2$  into  $CO + O(^1D)$ . In Les Spectres des Molécules Simples, 21st Colloq. Astrophys. Liège, (Univ. Liège), pp. 515-524.
- DELSEMME, A.H. and COMBI, M.R. 1979.  $O(^1D)$  and  $H_2O^+$  in Comet Bennett, 1970 II. Astrophys. J., 228, 330-337.
- DELSEMME, A.H. and MOREAU, J.L. 1973. Brightness profiles in the neutral coma of Comet Bennett (1970II). Astrophys. Letters, 14, 181-185.
- DELSEMME, A.H. and SWINGS, P. 1952. Hydrates de gaz dans les noyaux cométaires et les grains interstellaires. Ann. d'Astrophys., 15, 1-6.

- DESPOIS, D., GERARD, E., CROVISIER, J. and KAZES, I. 1981. The OH radical in comets : Observation and analysis of the hyperfine microwave transitions at 1667 MHz and 1665 MHz, Astron. Astrophys., 99, 320-340.
- DESSLER, K. and RAMSAY, D.A. 1959. The electronic absorption spectra of  $\text{NH}_2$  and  $\text{ND}_2$ , Phil. Trans. Roy. Soc. London A, 251, 553-602.
- DONN, B. 1977. Comparison of the compositions of new and evolved comets. In Comets, Asteroids, Meteorites, ed. A.H. Delsemme (Toledo, Ohio : Univ. Toledo), pp. 15-23.
- DONN, B., and CODY, R.J. 1978. On the detection of newly created CN radicals in comets, Icarus, 34, 436-440.
- DONN, B. and UREY, H. 1957. Chemical heating of comet nuclei, Astrophys. J., 123, 339-342.
- DOSSIN, F.V. 1966. Emission spectrum of a comet at large heliocentric distance, Astron. J., 71, 853-854.
- DOUGLAS, A.E. 1951. Laboratory studies of the  $\lambda$  4050 group of cometary spectra, Astrophys. J., 114, 466-468.
- ERMAN, P. and Larsson, M. 1979. Time resolved studies of the interaction between the A and B states in molecular nitrogen ( $1^+$ ), Phys. Scripta., 20, 582-586.
- FELDMAN, P.D. 1978. A Model of carbon production in a cometary coma. Astron. Astrophys., 70, 547-553.
- FELDMAN, P.D. and BRUNE, W.H. 1976. Carbon production in Comet West (1975n). Astrophys. J., 209, L145-L148.
- FELDMAN, P.D., OPAL, C.B., MEIER, R.R. and NICOLAS, K.R. 1976. Far ultraviolet excitation processes in comets. In The Study of Comets, eds. B. Donn, M. Mumma, W. Jackson, M. A'Hearn, and R. Harrington, (Washington, D.C., NASA SP-393), pp. 773-795.
- FELDMAN, P.D., TAKACS, P.Z., FASTIE, W.G. and DONN, B. 1974. Rocket ultraviolet spectrophotometry of Comet Kohoutek (1973f), Science, 185, 705-707.

- FELDMAN, P.D., WEAVER, H.A., FESTOU, M.C., A'HEARN, M.F., JACKSON, W.M., DONN, B., RAHE, J., SMITH, A.M. and BENVENUTI, P. 1980. IUE observations of the UV spectrum of Comet Bradfield, Nature, 286, 132-135.
- FELDMAN, P.D., WEAVER, H.A. and FESTOU, M.C. 1984. The ultraviolet spectrum of periodic comet Encke (1980 XI), Icarus, 60, 455-463.
- FESTOU, M.C. 1981a. The density distribution of neutral compounds in cometary atmospheres, Astron. Astrophys., 95, 69-79; 96, 52-57.
- FESTOU, M.C. 1981b. Monochromatic observations of Comet Kobayashi-Berger-Milon (1975 IX), Astron. Astrophys., 96, 52-61.
- FESTOU, M.C. and FELDMAN, P.D. 1981. The forbidden oxygen lines in comets, Astron. Astrophys., 103, 154-159.
- FESTOU, M.C., FELDMAN, P.D. and WEAVER, H.A. 1982. The ultraviolet bands of the  $\text{CO}_2^+$  ion in comets, Astrophys. J., 256, 331-338.
- FESTOU, M., JENKINS, E.B., KELLER, H.U., BARKER, E.S., BERTAUX, J.L., DRAKE, J.F. and UPSON, W.L. 1979. Lyman-alpha observations of Comet Kobayashi-Berger-Milon (1975 IX) with Copernicus Astrophys. J., 232, 318-328.
- FOWLER, A. 1910. Investigations relating to the spectra of comets, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 70, 484-496.
- GARY, G.A., FOUNTAIN, W.F. and O'DELL, C.R. 1977. Spectrographic observations of Comet West (1975n), Publ. Astron. Soc. Pacific, 89, 97-103.
- GAUSSET, L., HERZBERG, G., LAGERQUIST, A. and ROSEN, B. 1965. Absorption spectrum of  $\text{C}_3$ , Astrophys. J., 143, 45-76.
- GIBSON, D.M. and Hobbs, R.W. 1981. On the microwave emission from comets, Astrophys. J., 248, 863-866.
- GIGUERE, P.T. and HUEBNER, W.F. 1978. A model of comet Comae. I. Gas-phase chemistry in one dimension, Astrophys. J., 223, 638-654.

- GIGUERE, P.T., HUEBNER, W.F. and BANIA, T.M. 1980. Radio observations of Comet Meier (1978f) in 18-cm OH lines, Astron. J., 85, 1276-1280.
- GREENSTEIN, J.L. 1962. The spectrum of Comet Humason (1961e). Astrophys. J., 136, 688-690.
- GREENSTEIN, J.L. and ARPIGNY, C. 1962. The visual region of the spectrum of Comet Mrkos (1957d) at high resolution, Astrophys. J., 135, 892-905.
- HALPERN, J., HANCOCK, G., LENZI, M. and WELGE, K.H. 1975. Laser induced fluorescence from  $\text{NH}_2(^2A_1)$ , State selected radiative lifetimes and collisional de-excitation rates, J. Chem. Phys., 63, 4808-4816.
- HASER, L. 1957. Distribution d'intensité dans la tête d'une comète, Bull. Acad. Roy. Belgique. Classe des Sciences, 43, 740-750.
- HASER, L. 1966. Calcul de distribution d'intensité relative dans une tête cométaire, Mém. Soc. Roy. Liège, Ser. 5, 12, 233-241.
- HERBIG, G. 1976. Review of cometary spectra, In The Study of Comets, eds. B. Donn, M. Mumma, W. Jackson, M. A'Hearn and R. Harrington, (Washington, NASA SP-393), pp. 136-158.
- HERZBERG, G. 1976. Cometary spectra and related topics, Mém. Soc. Roy. Sci. Liège, Sér. 6, 9, 115-132.
- HERZBERG, G. and LEW, L. 1974. Tentative identification of the  $\text{H}_2\text{O}^+$  ion in Comet Kohoutek, Astron. Astrophys., 31, 123-124.
- HOBBS, R.W., BRANDT, J.C. and MARAN, S.P. 1977. Microwave continuum radiation from Comet West 1975n, Astrophys. J., 218, 573-578.
- HOBBS, R.W., MARAN, S.P., BRANDT, J.C., WEBSTER, W.J. Jr., KRISHNA SWAMY, K.S. 1975. Continuum radiation from Comet Kohoutek 1973f, Emission from the icy-grain halo? Astrophys. J., 201, 749-755.
- HOLLAND, R.F. and MAIER, W.B. 1972. Study of the  $A \rightarrow X$  transitions in  $\text{N}_2^+$  and  $\text{CO}^+$ , J. Chem. Phys., 56, 5229-5246.

- HOLLIS, J.M., BRANDT, J.C., HOBBS, R.W., MARAN, S. and FELDMAN, P.D. 1981. Radio observations of Comet Bradfield (19791), Astrophys. J., 244, 355-357.
- HOUPIIS, H.L.F. and MENDIS, D.A. 1980. Physicochemical and dynamical processes in cometary ionospheres. I. The basic flow profile, Astrophys. J., 239, 1107-1118.
- HOUPIIS, H.L.F. and MENDIS, D.A. 1981. On the development and global oscillations of cometary ionospheres, Astrophys. J., 243, 1088-1102.
- HUEBNER, W.F., SNYDER, L.E. and BUHL, D. 1974. HCN radio emission from Comet Kohoutek (1973f), Icarus, 23, 580-584.
- HUEBNER, W.F. and GIGUERE, P.T. 1980. A model of comet comae. II. Effects of solar photodissociative ionization, Astrophys. J., 238, 753-762.
- HUGGINS, W. 1882. Preliminary notes on the photographic spectrum of Comet 1881b, Proc. Roy. Soc., 33, 1.
- HUNAERTS, J. 1945. Sur la présence de la molécule  $\text{OH}^+$  dans les Comètes, Bull. Astronom. Observ. Roy. Belgique, 3, 9.
- HUNAERTS, J. 1950. Le spectre de Swan de la molécule  $\text{C}_2$  dans les comètes, Ann. Obs. Roy. Belgique, III, Tome V, Fascicule 1, pp. 1-50.
- HUNAERTS, J. 1951. Le problème de l'identification des radiations cométaires à partir de spectres synthétiques, Ciel et Terre, 67, n° 11, 1-11.
- HUNAERTS, J. 1953. Interpretation du spectre d'émission de OH dans les comètes, Mém. Soc. Roy. Sci. Liège, 14e Sér. 13, 99-136.
- HUNAERTS, J. 1954. Interprétation du système d'émission du spectre  $^3\Pi-^3\Sigma$  de NH dans les comètes, Mém. Soc. Roy. Sc. Liège, IV, 18, 84-101.
- HUNAERTS, J. 1959. Etude de la bande 3883 de CN dans le spectre de la comète Mrkos 1957d, Ann. Astrophys., 22, 790-811.
- HUNAERTS, J. 1959. La vie moyenne des états de rotation de l'état fondamental de la molécule CN, Ann. Astrophys., 22, 812-819.

- HUPPLER, D., REYNOLDS, R.J., ROESLER, F.L., SCHERB, F. and TRAUGER, J. 1975. Observations of Comet Kohoutek (1973f) with a ground-based Fabry-Perot spectrometer, Astrophys. J., 202, 276-282.
- IP, W.H. 1980. Cometary atmospheres. I. Solar wind modification of the outer ion coma, Astron. Astrophys., 92, 95-100.
- IP, W.H. and MENDIS, D.A. 1974. Neutral atmospheres of comets : A distributed source model, Astrophys. Space Sci., 26, 153-166.
- IP, W.H. and MENDIS, D.A. 1976a. The structure of cometary ionospheres. 1. H<sub>2</sub>O dominated comets, Icarus, 28, 389-400.
- IP, W.H. and MENDIS, D.A. 1977. The structure of cometary ionospheres. 2. CO-rich comets, Icarus, 30, 377-384.
- JACKSON, W.M. 1972. Photochemistry in the atmospheres of comets, Mol. Photochem., 4, 135-151.
- JACKSON, W.M. 1974a. Laboratory observations of the photochemistry of parent molecules : A review, The Study of Comets, eds. B. Donn, M. Mumma, W. Jackson, M. A'Hearn and R. Harrington (Washington : NASA SP-393), pp. 670-702.
- JACKSON, W.M. 1974b. Laser measurements of the radiative lifetime of the B<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup> state of CN, J. Chem. Phys., 61, 4177-4182.
- JACKSON, W.M. 1976. The photochemical formation of cometary radicals, J. Photochem., 5, 107.
- JACKSON, W.M. 1980. The lifetime of the OH radical in comets at 1 A.U. Icarus, 41, 147-152.
- JACKSON, W.M., CLARK, T. and DONN, B. 1976. Radio detection of H<sub>2</sub>O in Comet Bradfield (1974b), In The Study of Comets, eds. B. Donn, M. Mumma, W. Jackson, M. A'Hearn and R. Harrington (Washington : NASA SP-393), pp. 272-280.
- JACKSON, W.M., RAHE, J., DONN, B., SMITH, A.M., KELLER, H.U., BENEVENUTI, P., DELSEMME, A.H. and OWEN, T. 1979. The ultraviolet spectra of Comet Seargent 1978m, Astron. Astrophys., 73, L7-L9.

- JACKSON, W.M., HALPERN, J., FELDMAN, P.D. and RAHE, J. 1982. Production of CS and S in Comet Bradfield (1979X), Astron. Astrophys., 107, 385-389.
- JEUNEHOMME, M. 1965. Oscillator strength of the CN red system, Chem. Phys., 57, 4086-4088.
- KANEDA, E., HIRAO, K., TAKAGI, M., ASHIHARA, O., ITOH, T. and SHIMIZU, M. 1986. Strong breathing of the hydrogen coma of comet Halley, Nature, 320, 140-141.
- KELLER, H.U. 1976. The interpretation of ultraviolet observations of comets, Space Sci. Rev., 18, 641-684.
- KELLER, H.U. and LILLIE, C.F. 1974. The scale length of OH and the production rates of H and OH in Comet Bennett (1970 II), Astron. Astrophys., 34, 187-196.
- KELLER, H.U. and LILLIE, C.F. 1978. Hydrogen and hydroxyl production rates of Comet Tago-Sato-Kosaka (1969 IX), Astron. Astrophys., 62, 143-147.
- KELLER, H.U. and MEIER, R.R. 1976. A Cometary hydrogen model for arbitrary observational geometry, Astron. Astrophys., 52, 272-281.
- KELLER, H.U. and MEIER, R.R. 1980. On the  $L\alpha$  isophotes of Comet West (1976 VI), Astron. Astrophys., 81, 210-214.
- KELLER, H.U. and THOMAS, G.E. 1975. A Cometary hydrogen model : Comparison with OGO-5 measurements of Comet Bennett (1970 II), Astron. Astrophys., 39, 7-19.
- KITAMURA, Y., ASHIHARA, O. and YAMAMOTO, T. 1985. A model for the hydrogen coma of a comet, Icarus, 61, 278-295.
- KRISHNA SWAMY, K.S. 1978. On the observed polarization of Comet Keya-Seki (1965 VIII), Astrophys. Space Sci., 57, 491-497.
- KRISHNA SWAMY, K.S. 1981. Intensities of various bands of the molecules CN,  $CN^+$ , and CS in comets, Astron. Astrophys., 97, 110-113.
- KRISHNA SWAMY, K.S. 1983. Fluorescence excitation of CO in comets, Astrophys. J., 267, 882-885.

- KRISHNA SWAMY, K.S. and O'DELL, C.R. 1977. Statistical equilibrium in cometary  $C_2$ . I. Astrophys. J., 216, 158-164.
- KRISHNA SWAMY, K.S. and O'DELL, C.R. 1981. Statistical equilibrium in cometary  $C_2$  III. Triplet-singlet, Philips, Ballik-Ramsay, and Mulliken bands, Astrophys. J., 251, 805-810.
- LAMBERT, D. and DANKS, A.C. 1983. High-resolution spectra of  $C_2$  Swan bands from Comet West 1976 VI., Astrophys. J., 268, 428-446.
- LANZEROTTI, L.J., ROBBINS, M.F., TOLK, N.H. and NEFF, S.H. 1974. High resolution scans of Comet Kohoutek in the vicinity of 5015, 5890, 6563 Å, Icarus, 23, 618-622.
- LARSON, S.M. 1980.  $CO^+$  in Comet Schwassman-Wachmann 1 near minimum brightness, Astrophys. J., 238, L47-L48.
- LARSON, M., SIEGBAHN, P.E.M. and AGREN, H. 1983. A Theoretical investigation of the radiative properties of the CN red and violet systems, Astrophys. J., 272, 369-376.
- MAAS, R.W., NEY, E.P. and WOOLF, N.J. 1970. The 10 micron emission peak of Comet Bennett 1969i. Astrophys. J., 160, L101-L104.
- MALAISE, D.J. 1970. Collisional effects in cometary atmospheres. I. Model atmospheres and synthetic spectra, Astron. Astrophys., 5, 209-227.
- MASANET, J., LALO, C., DURAND, G. and VERMEIL, C. 1978. Radiative lifetimes of the  $b^1\Sigma^+$  state of NH, ND radicals, Chem. Phys., 33, 123-130.
- MASUOKA, T. and SAMSON, J.A.R. 1980. Dissociative and double photoionization of  $CO_2$  from threshold to 90 Å, J. Chimie Physique, 77, 623-630.
- MAYER, P. and O'DELL, C.R. 1968. Emission band ratios in Comet Rudnicki (1966e), Astrophys. J., 153, 951-962.
- MEIER, R.R. and KELLER, H.U. 1985. Prediction of the hydrogen Lyman-alpha Coma of Comet Halley, Icarus, 62, 521-537.

- MEIER, R.R., OPAL, C.B., KELLER, H.U., PAGE, T.L. and CARRUTHERS, G.R. 1976. Hydrogen production rates from Lyman- $\alpha$  images of Comet Kohoutek (1973 XII), Astron. Astrophys., 52, 283-290.
- MENDIS, D.A., HOLZER, T. and AXFORD, W.I. 1972. Neutral hydrogen in cometary comas, Astrophys. Space Sci., 15, 313-325.
- MENDIS, D.A., HOUPIS, H.L.F. and MARCONI, M.L. 1985. The physics of comets, Fundamentals of Cosmic Phys., 10, 1-380.
- MIES, F.H. 1974. Ultraviolet fluorescent pumping of OH 18-cm radiation in comets, Astrophys. J., 191, L145-L148.
- MILLER, F.D. 1980.  $H_2O^+$  in the tails of 13 comets, Astron. J., 85, 468-473.
- MITCHELL, G.F., PRASAD, S.S. and HUNTRESS, W.T. 1981. Chemical model calculations of  $C_2$ ,  $C_3$ , CH, CN, OH and  $NH_2$  abundances in cometary comae, Astrophys. J., 244, 1087-1093.
- NICOLET, M. 1938. Les bandes de CH et la présence de l'hydrogène dans les comètes, Zs. Astrophys., 15, 154-159.
- NICOLET, M. 1984. On the photodissociation of water vapour in the mesosphere, Planet. Space Sci., 32, 871-880.
- OLIVERSEN, R.J., HOLLIS, J.M. and BROWN, L.W. 1985.  $C_2$  imagery of the inner coma of Comet Iras-Araki-Alcok, Icarus, 63, 339-346.
- OPAL, C.B. and CARRUTHERS, G.R. 1977a. Carbon and oxygen production rates for Comet Kohoutek (1973 XII), Astrophys. J., 211, 294-299.
- OPAL, C.B. and CARRUTHERS, G.R. 1977b. Lyman-alpha observations of Comet West (1975n), Icarus, 31, 503-509.
- OPAL, C.B., CARRUTHERS, G.R., PRINZ, D.K. and MEIER, R.R. 1974. Comet Kohoutek : Ultraviolet images and spectrograms, Science, 185, 702-705.
- OPPENHEIMER, M. 1975. Gas phase chemistry in comets, Astrophys. J., 196, 251-259.
- OPPENHEIMER, M. 1980. Sodium D-line emission in Comet West (1975n) and the sodium source in comets, Astrophys. J., 240, 923-928.

- OPPENHEIMER, M. and DOWNEY, C.J. 1980. The effect of solar-cycle ultraviolet flux variations on cometary gas, Astrophys. J., 141, L123-L127.
- PIRRONELLO, V., STRAZZULLA, G. and FOTI, G. 1983. H<sub>2</sub> production in comets, Astron. Astrophys., 118, 341-344.
- PLUVINEL, A.B. and BALDET, F. 1911. Spectrum of Comet Morehouse (1908c), Astrophys. J., 34, 89-104.
- PRESTON, G. 1967. The spectrum of Comet Ikeya Seki (1965f), Astrophys., 147, 718-742.
- SAMSON, J.A.R., MASUOKA, T. and HUNTRESS, W.T. 1981. The production rate of C<sup>+</sup> from the photoionization of CO and CO<sub>2</sub>, Geophys. Res. Letters, 8, 405-408.
- SHIMIZU, M. 1975. Ion chemistry in the cometary atmosphere, Astrophys. Space Sci., 36, 353-361.
- SHIMIZU, M. 1976. The structure of cometary atmospheres. II. Ion distribution, Astrophys. Space Sci., 40, 243-251.
- SINGH, P.D., VAN DISHOECK, E.F. and DALGARNO, A. 1983. The photodissociation lifetimes of the OH and OD radicals in comet, Icarus, 56, 184-189.
- SLAUGHTER, C.D. 1969. The emission spectrum of Comet Ikeya-Seki 1965-f at perihelion passage, Astronomical J., 74, 929-943.
- SMITH, W.H., BRZOWSKI, J. and ERMAN, P. 1976. Lifetime studies of the NH molecules : New predissociations, the dissociation energy, and interstellar diatomic recombination, J. Chem. Phys., 64, 4628-4683.
- SMITH, A.M., STECHER, T.P. and CASSWELL, L. 1980. Production of carbon, sulfur, and CS in Comet West, Astrophys. J., 242, 402-410.
- SNYDER, L.E. 1982. A review of radio observations of comets, Icarus, 51, 1-24.
- SPINRAD, H. and MINER, E.D. 1968. Sodium velocity fields in Comet 1965f, Astrophys. J., 153, 355-366.

- SPINRAD, H., STAUFFER, J. and NEWBURN, R.L. 1979. Optical spectrophotometry of Comet Tempel 2 far from the sun, Publ. Astron. Soc. Pacific, 91, 707-711.
- STAWIKOWSKI, A. and GREENSTEIN, J.L. 1964. The isotope ratio  $C^{12}/C^{13}$  in a comet, Astrophys. J., 140, 1280-1291.
- STIEF, L., PAYNE, W. and KLEMM, B. 1975. A flash photolysis-resonance fluorescence study of the formation of  $O(^1D)$  in the photolysis of water and the reaction of  $O(^1D)$  with  $H_2$ , Ar, and He, J. Chem. Phys., 62, 4000-4008.
- SWINGS, P. 1941a. Complex structure of cometary bands tentatively ascribed to the contour of the solar spectrum, Lick Obs. Bull. IXI, 408, 131-136.
- SWINGS, P. 1941b. Considerations regarding cometary and interstellar molecules, Astrophys. J., 95, 270-280.
- SWINGS, P. 1943. Reports on the progress in astronomy : Cometary spectra, Mon. Not. Roy. Astr. Soc., 103, 86-111.
- SWINGS, P. 1965. Cometary spectroscopy, Quart. J. Roy. Astron. Soc., 6, 28-69.
- SWINGS, P. 1962. Comportement des raies interdites de l'oxygène dans les comètes, Ann. d'Astrophys., 25, 165-170.
- SWINGS, P., ELVEY, C.T. and BABCOCK, H.W. 1941. The spectrum of Comet Cunningham 1940c, Astrophys. J., 94, 320-343.
- SWINGS, P. and GREENSTEIN, J. 1958. Presence des raies interdites de l'oxygène dans les spectres cométaires, C.R. Acad. de Paris, 246, 511-513.
- SWINGS, P., McKELLAR, A. and MINKOWSKI, R. 1943. Cometary emission spectra in the visual region, Astrophys. J., 98, 142-152.
- SWINGS, P. and PAGE, T.L. 1948. The spectrum of Comet 1947n, Astrophys. J., 108, 526-536.
- SWINGS, P. and PAGE, T.L. 1950. The spectrum of Comet Bester (1947k), Astrophys. J., 111, 530-534.

- TATUM, J.B. and GILLESPIE, M.I. 1977. The cyanogen abundance of comets, Astrophys. J., 218, 569-572.
- TURNER, B.E. 1974. Detection of OH at 18 cm wavelength in Comet Kohoutek (1973f), Astrophys. J., 189, L137-139.
- ULICH, B.L. and CONKLIN, E.K. 1974. Detection of methyl cyanide in Comet Kohoutek, Nature, 248, 121-122.
- VANYSEK, V. and RAHE, J. 1978. The  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  isotope ratio in comets, stars and interstellar matter, Moon and Planets, 18, 441-446.
- VAN DISHOECK, E.F. and DALGARNO, A. 1984. The dissociation of OH and OD in comets by solar radiation.
- WEAVER, H.A., FELDMAN, P.D., FESTOU, M.C. and A'HEARN, M.F. 1981. Water production models for Comet Bradfield (1979X), Astrophys. J., 251, 809-819.
- WEHINGER, P.A. and WYCKOFF, S. 1974.  $\text{H}_2\text{O}^+$  in spectra of Comet Bradfield (1974b), Astrophys. J., 192, L41-L45.
- WEHINGER, P.A., WYCKOFF, S., HERBIG, G., HERZBERG, G. and LEW, H. 1974. Identification of  $\text{H}_2\text{O}^+$  in the tail of Comet Kohoutek (1973f), Astrophys. J., 190, L43-L47.
- WHIPPLE, F.L. 1950. A comet model. I. The acceleration of Comet Encke, Astrophys. J., 111, 375-394.
- WHIPPLE, F.L. 1951. A comet model. II. Physical relations for comets and meteors, Astrophys. J., 113, 464-474.
- WHIPPLE, F.L. 1963. On the structure of the cometary nucleus, In Moon, Meteorites and Comets, eds. B.M. Middlehurst and G.P. Kuiper (Chicago : Univ. Chicago Press).
- WHIPPLE, F.L. and HUEBNER, W.F. 1976. Physical processes in comets, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 14, 143-172.
- WURM, K. 1963. The physics of comets, In The Moon, Meteorites and Comets, eds. B.M. Middlehurst and G.P. Kuiper (Chicago : Univ. Chicago Press), pp. 573-617.
- WYCKOFF, S. and WEHINGER, P.A. 1976a. Molecular ions in comet tails, Astrophys. J., 204, 604-615.

- WYCKOFF, S. and WEHINGER, P.A. 1967b. On the ionization and excitation of  $H_2O^+$  in Comet Kohoutek (1973f), Astrophys. J., 204, 616-625.
- YAMAMOTO, T. 1981. Molecular distribution in the comae of  $H_2O$  comets : An analytic model, The Moon and Planets, 24, 175-188.
- YAMAMOTO, T. 1981. On the photochemical formation of CN,  $C_2$  and  $C_3$  radicals in cometary comae, The Moon and Planets, 24, 453-463.
- YANG, S.C., FREEDMAN, A., KAWASAKI, M. and BERSHOHN, R. 1980. Energy distribution of the fragments products by photodissociation of  $CS_2$  at 193 nm, J. Chem. Phys., 72, 4058-4062.
- ZANSTRA, H. 1928. The excitation of line and band spectra in comets by sunlight, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 89, 178-.
- ZUCCONI, J.M. and FESTOU, M.C. 1985. The fluorescence spectrum of the CN radicals in comets, Astron. Astrophys., 150, 180-191.