

## Astrophysique théorique

M. Jean-Claude PECKER, professeur

### LES ENVELOPPES CIRCUMSTELLAIRES

Ce cours, consacré à la physique de la composante poussiéreuse des enveloppes circumstellaires, prolonge celui de l'année précédente, où l'on avait examiné les aspects observationnels de cette question. Notre point de vue général est dominé par l'idée que les enveloppes circumstellaires sont partie intégrante de l'atmosphère stellaire, et que des méthodes très voisines doivent permettre de calculer les conditions physiques qui y règnent — pourvu que ces méthodes aient reçu, dès le départ, assez de généralité. Or, si la physique des atmosphères stellaires a fait large usage de la physique atomique, elle admet *a priori* que les poussières — mises en évidence par l'observation — sont absentes. La physique de l'interaction entre ces poussières et le milieu ambiant (gaz, rayonnement) est donc essentielle à la solution ultérieure des problèmes les plus généraux des enveloppes circumstellaires.

Après avoir rappelé les principes généraux de conservation eulérienne (des particules, de l'énergie, des photons, du moment cinétique, de la masse, de la charge et des caractéristiques électromagnétiques locales) qui caractérisent l'état stationnaire, et avoir posé les prémisses du problème spécifique des régions circumstellaires, nous avons donc dû, avant toute solution, étudier l'équilibre des poussières.

#### *Équations intéressant l'équilibre des poussières*

##### *1. Processus élémentaires de charge des particules et conservation des charges*

Les poussières dont la charge est caractérisée par la fonction  $y = e \frac{V}{kT}$  ( $e$  charge élémentaire,  $V = - \frac{x e^2}{r}$  potentiel de la poussière,  $T$  température

du gaz,  $k$  constante de Boltzmann,  $xe$  charge de la poussière,  $r$  rayon de la poussière supposé sphérique) ;  $y > 0$  si les charges sont négatives, et  $y < 0$  dans le cas contraire.

(a) Les poussières se chargent positivement par accréation des protons et des ions positifs, et par effet photoélectrique du rayonnement ; elles se chargent négativement par accréation des électrons et des ions négatifs. On écrit dans le détail des équations différentielles qui commandent ces différents processus. On aboutit d'abord aux équations suivantes, répercutant les taux d'accréation.

Si  $y < 0$       taux d'accréation

$$(1) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{des électrons : } \frac{d N_e}{N_e dt} = K_e (1 - y) \pi r^2 \\ \text{des protons et ions positifs : } \frac{d N_{i+}}{N_{i+} dt} = K_{i+} (e^y) \pi r^2 \end{array} \right.$$

Si  $y > 0$

$$(1 \text{ bis}) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{d N_e}{N_e dt} = K_e e^{-y} \pi r^2 \\ \frac{d N_{i+}}{N_{i+} dt} = K_{i+} (1 + y) \pi r^2 \end{array} \right.$$

avec

$$K = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{2 k T}{m} \right)^{1/2} \xi$$

où  $m$  est dans chaque cas la masse de la particule accrétée,  $T$  la température du gaz et  $\xi$  la probabilité ( $< 1$ ) pour que, après collision, le grain de poussière retienne effectivement la particule entrée en collision avec la poussière.

(b) L'effet photoélectrique pose des problèmes plus compliqués que l'accréation. Notamment la charge de la poussière, quand elle est négative, influence nettement le seuil photoélectrique. On pourrait penser cependant que, aussitôt éjectés, les électrons sont absorbés par les collisions dans le gaz, avant d'être ré-attirés sur les grains de poussière : dans les conditions astrophysiques, les collisions sont trop peu fréquentes pour qu'il en soit ainsi. Le seuil réel est alors

$$v_k = v_c - \frac{y k T}{h} \quad (y < 0)$$

Si  $y > 0$ , alors  $v_k = v_c$ .

Cet effet de charge modifie la distribution des énergies des électrons arrachés — de toutes façons, quel que soit le signe  $y$ , ainsi que la loi élémentaire  $\varphi(\nu)$  de probabilité pour un photon  $\nu$  d'extraire un électron.

Ces modifications ont des conséquences astrophysiques très notables.

L'expression du taux d'éjection photoélectrique est

$$(2) \quad \frac{dN_e}{dt} = \int_{\text{directions}} \frac{d\omega}{4\pi} \int_{h\nu_k}^{\infty} N_{\nu}(\omega) \varphi(\nu) \pi r^2 d\nu = \pi r^2 K_{\varphi}(y)$$

où  $N_{\nu}(\omega)$  représente le nombre de photons d'énergie comprise entre  $h\nu$  et  $h(\nu + d\nu)$ , provenant d'une direction déterminée, définie par  $\omega$ , et intérieure à un cône de directions d'angle solide  $d\omega$ , rencontrant  $1 \text{ cm}^2$  de la surface du grain, par seconde.

La fonction  $N_{\nu}(\omega)$  dépend de la couleur du rayonnement (type spectral de l'étoile excitatrice) et de la dilution du rayonnement (distance à l'étoile excitatrice), lorsque l'on peut considérer que cette représentation du champ de rayonnement est assez proche de la réalité; notre expression est en fait beaucoup plus générale.

(c) Les équations (1) et (2) étant écrites, on peut exprimer la conservation des charges par deux équations :

$$(3) \quad \begin{cases} K_{\varphi}(y) = N_e K_e (e^{-y}) - \sum_i N_{i+} (1+y) K_{i+} Z_{i+} & (y > 0) \\ K_{\varphi}(y) = N_e K_e (1-y) - \sum_i N_{i+} e^y K_{i+} Z_{i+} & (y < 0) \end{cases}$$

où  $Z_{i+}$  est la charge (en unité de la valeur absolue de charge électronique) des ions positifs considérés.

L'expression  $K_{\varphi}(y)$  est difficile à calculer, en raison des incertitudes sur  $\nu_k$  et sur  $\varphi(\nu)$ ;  $K_e$ ,  $K_{i+}$  sont difficiles à calculer en raison des incertitudes sur les probabilités  $\xi$ . Les équations (3), en tout cas, permettent de calculer  $y$  en toute généralité.

Si  $N_e = N_p$ , et, dans le cas où l'effet photoélectrique est négligeable, on a  $y = + 2.51$ ; c'est la solution classique de Spitzer.

Nous avons évidemment poussé plus loin la solution, notamment dans le cas particulier des régions H I et H II.

Comme le rayonnement continu de Lyman d'une région H II est à peine dilué, l'effet photoélectrique est essentiel et, contrairement aux autres auteurs, nous trouvons  $y < 0$  dans toutes les régions H II, et à peu près indépendant du choix de la région H II et de la localisation dans la région H II (de l'ordre de  $y = -10$  à  $-40$ , suivant la nature des poussières). Dans les régions H I, les électrons proviennent du carbone et alors  $y = 3,6$ ; à de plus grandes distances, le carbone est neutre et les électrons proviennent des métaux ( $y \sim 4,1$ ).

En fait, on ne trouve nulle part la valeur calculée par Spitzer !

### 2. Conservation de l'énergie des électrons

On admettra, suivant en cela l'analyse de Bhatnagar, Krook, Menzel, Thomas, qu'il y a équipartition de l'énergie dans le gaz entre protons et électrons. De plus, les termes de l'équation de conservation d'énergie, et qui concernent principalement la contribution des transitions « free-free », « bound-free » et « bound-bound » des atomes, sont classiques et interviennent notamment, dûment groupés, dans l'équation de conservation écrite par Gebbie et Thomas. Nous ne nous préoccupons donc ici que de l'intervention du terme relatif aux échanges d'énergie entre gaz et poussières.

L'accrétion des électrons, celle des protons interviennent en retirant à l'énergie du gaz une fraction non négligeable de cette énergie. L'effet photoélectrique joue un rôle important lui aussi : là où la charge des grains est positive, les électrons injectés dans le gaz sont relativement « froids » ; dans le cas contraire, ils sont relativement « chauds ». Des calculs assez élaborés conduisent aux résultats suivants : la contribution à l'énergie de l'accrétion des électrons s'écrit sous la forme

$$(4) \quad \frac{dE}{dt} = - N_g N_e \pi r^2 T^{3/2} \Phi(y)$$

où  $\Phi$  est une fonction toujours positive

$$\left. \begin{array}{l} \Phi^+ = 2 - y \quad (y < 0) \\ \Phi^- = e^{-y} (y + 2) \quad (y > 0) \end{array} \right\}$$

De même, l'accrétion des protons conduit à un terme complémentaire, en général faible. L'effet photoélectrique conduit à un terme assez petit.

On peut alors montrer que la contribution des poussières à la température des électrons est loin d'être négligeable ; elle a notamment pour effet d'atténuer les différences entre la température de la région H II (dont elle abaisse sensiblement la température) et celle de la région H I. Mais il s'agit là de résultats essentiellement provisoires, qu'une analyse numérique détaillée devrait préciser.

### 3. Processus affectant la masse des poussières

On peut se rendre compte ici que les collisions avec les protons auront plus d'importance que celles avec les électrons ; que celles avec les atomes neutres et les autres grains de poussière devront aussi entrer en considération.

Naturellement, nous devons tenir compte aussi bien des processus de croissance que des processus de destruction.

Les collisions des protons posent un problème délicat ; en effet trois processus sont possibles. Si le proton a une énergie  $\varepsilon$  assez faible, mais suffisante pour atteindre la poussière (au cas où celle-ci serait positive), il peut, ou bien se coller et apporter au grain sa masse, son énergie cinétique, sa charge

(avec une probabilité  $\xi(\epsilon)$ ), ou au contraire subir une collision élastique de probabilité  $1 - \xi(\epsilon)$ . Si l'énergie  $\epsilon$  du proton est supérieure à  $\epsilon_t$ , énergie suffisante pour détruire une valence, alors il peut effectivement détruire cette valence, et des atomes sont libérés (probabilité  $\alpha(\epsilon)$ ), ou il peut simplement se coller ou subir une collision élastique (probabilité  $1 - \alpha(\epsilon)$ ). Malheureusement, les valeurs de  $\xi$  et de  $\alpha$  que l'on trouve dans la littérature sont assez mal déterminées ;  $\epsilon_t$  est de l'ordre de 2 eV, ce qui permet d'évaluer quelques cas limites.

Sans faire intervenir les autres processus d'érosion et en admettant pour  $\alpha$  la valeur 1/4 proposée et utilisée par divers auteurs, notamment Matthews, on aboutit dans les régions H II à la détermination d'une valeur  $\xi_1 \sim 0.55$  d'équilibre. Si  $\xi < \xi_1$ , il y a érosion et le grain perd sa masse ; si  $\xi > \xi_1$ , la masse augmente, car le processus dominant est l'accrétion. La vitesse du processus dépend évidemment de la valeur  $\xi - \xi_1$ . Les taux de croissance et de destruction peuvent être très lents, même dans une région H II.

Mais ce calcul néglige deux causes importantes de destruction : « l'érosion optique » (excitation, par absorption d'un photon, d'un électron du grain d'un état de liaison à un état de non-liaison) et la vaporisation pure et simple, due au chauffage par les rayons cosmiques, par l'absorption de rayonnement, par les collisions avec des grains de masse comparable à celle du grain considéré.

L'étude préliminaire de ces processus (et du processus de nucléation), selon Donn et Wickramasinghe, est à peine entreprise ; des conclusions quantitatives sont difficiles à atteindre pour l'instant.

#### 4. Processus affectant la température des poussières

Le problème de la température d'équilibre des poussières a été traité par un grand nombre d'auteurs. Sans exception, ils ont conçu le problème d'une façon quelque peu simpliste. Ayant défini le champ de rayonnement (visible), ils admettent que les poussières absorbent ce rayonnement et la réémettent aux fréquences IR correspondant à leur température  $T_g$  inconnue. Tout est alors connu dans l'équation

$$(5) \quad \int Q_{v \text{ ext}} B_v(T_g) dv = \int Q_{v \text{ ext}} [J_v + B_{\text{cos}}(T_B)] dv$$

où  $Q_{v \text{ ext}}$  représente l'extinction par le nuage de poussière,  $J_v$  le champ de rayonnement visible  $B_{\text{cosm}}$ , le terme (négligeable le plus souvent) de chauffage par le rayonnement résiduel cosmologique à  $T_B = 3^\circ \text{ K}$ . Cette équation n'est autre que la relation classique de l'équilibre radiatif.

$$\int \alpha_v B_v dv = \int \alpha_v J_v dv$$

La solution de l'équation (5) fournit des températures qui sont, essentiellement, fonction de la variation  $Q(\nu)$  et dépendent donc essentiellement de la nature des poussières et de leurs dimensions. On trouve des températures allant de  $3-4^\circ \text{ K}$  à  $50^\circ \text{ K}$  et même (région H II)  $100^\circ \text{ K}$ .

Le calcul est modifié, selon certains auteurs, lorsqu'on tient compte du transfert du rayonnement dans un nuage de poussières : en effet, au centre de ce nuage, les poussières reçoivent presque autant de rayonnement extérieur, mais leur propre rayonnement « sort » moins facilement : la température est donc très basse — assez proche de la température cosmologique de  $3^\circ$ .

En réalité, il est clair que le problème est plus complexe ; l'évaporation joue un rôle essentiel, et crée autour de chaque grain de poussière comme une petite atmosphère dense, où l'on devrait traiter le problème de transfert correctement. De plus, l'opacité du gaz (molécule notamment) doit jouer un rôle dans l'ensemble du problème.

Le cours de l'année suivante sera consacré essentiellement à l'équilibre de la composante gazeuse des régions circumstellaires.

#### SÉMINAIRES ET CONFÉRENCES

Les cours ont été complétés par une série de séminaires dont le thème général était : *Milieu interstellaire et enveloppes circumstellaires*, et qui ont donné lieu aux exposés suivants :

*La Nébuleuse Rosette, selon Matthews*, par M. J.-C. PECKER.

*La loi d'absorption interstellaire et les observations spatiales*, par M. M. SCHNEIDER.

*Anomalies de l'absorption interstellaire dans la Nébuleuse d'Orion*, par M<sup>lle</sup> L. DIVAN.

*Inhomogénéités des régions H II*, par M<sup>lle</sup> N. BEL.

*Température du milieu interstellaire*, par M<sup>me</sup> S. SOUFFRIN.

*Tentative de distinction entre nébuleuses planétaires et petites régions H II*, par M<sup>lle</sup> STASINSKA.

*Raies de recombinaison radio dans les régions H II*, par M. J. LEQUEUX.

*L'évolution des étoiles à cocon*, par M<sup>lle</sup> G. EYMARD.

*La formation des étoiles*, par M<sup>lle</sup> N. BEL.

De plus, M. le professeur John T. JEFFERIES, de l'Université de Hawaïi, a fait, en novembre et décembre 1970, une série de 9 conférences sur le thème : *Analysis of spectral line profiles*.

Enfin, M. le professeur R. J. TAYLER, de l'Université du Sussex, a donné le 6 janvier 1971 une conférence sur le sujet suivant : *The helium abundance in the universe.*

#### ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

Le « laboratoire » de la Chaire d'Astrophysique théorique n'a encore porté ce nom que sur le papier. Si le professeur a, à Meudon, ou à Boulder (comme « non-résident fellow du Joint Institute for Laboratory Astrophysics »), effectué des recherches en coopération avec divers chercheurs (notamment M<sup>lles</sup> DÉBARBAT, DUMONT, EYMARD, M<sup>me</sup> HEIDMANN, MM. JEFFERIES, THOMAS, DUCHESNE, KRİKORIAN, LE CONTEL), et, en partie au moins, dirigé plusieurs jeunes chercheurs, le présent rapport ne peut couvrir cette activité collective de façon complète, car la plupart de ces travaux sont décrits dans les rapports de divers laboratoires ou observatoires (Observatoire de Paris, Observatoire de Saint-Michel l'Observatoire, J.I.L.A., L.P.S.P. du C.N.R.S. à Verrières-le-Buisson, etc.).

L'activité personnelle du professeur a couvert deux domaines essentiels.

(a) L'étude de la polarisation du disque solaire, poursuivie avec M<sup>lles</sup> DÉBARBAT et DUMONT, et que les mesures (visibles) de M. LEROY, et (UV) de M<sup>lle</sup> de SAINTE-LORETTE permettront de compléter, a conduit à une estimation de l'abondance des métaux dans l'atmosphère solaire, dont les valeurs usuelles sont des sous-estimations — d'un facteur au moins égal à 5.

(b) L'étude de l'équilibre des poussières dans les différents cas du milieu circumstellaire a permis de préciser un certain nombre de points importants, par exemple le fait que la charge des poussières reste positive dans l'ensemble des régions H II, et que sa valeur dépend peu de l'étoile excitatrice.

M. HAYLI, maître-assistant, a également, dans le domaine de la dynamique des familles stellaires, progressé très notablement. De plus il a entrepris :

— avec L. MARTINET (de l'Observatoire de Genève) une exploration des propriétés des orbites galactiques, notamment la recherche d'une troisième intégrale ;

— avec Ivan KING, de l'Université de Californie à Berkeley, l'étude du problème gravitationnel des  $N$  corps dans le champ galactique ;

— avec R. CAYREL et J. JUNG, de l'Observatoire de Paris, l'étude de la dynamique d'un amas globulaire intergalactique dans le groupe local.

DISTINCTIONS, NOMINATIONS

M. J.-C. PECKER, professeur, a été élu, en octobre 1970, président du Comité national français d'Astronomie.

M<sup>lle</sup> S. DUMONT et M. A. HAYLI ont été nommés membres de l'Union Astronomique internationale.

CONGRÈS, COLLOQUES, MISSIONS

*Congrès, colloques*

Quatorzième Assemblée générale de l'Union Astronomique internationale, Brighton, août 1970 (M<sup>lle</sup> DUMONT, M. HAYLI, M. PECKER).

Colloque sur *Les atmosphères stellaires*, Ile d'Yeu, octobre 1970 (M<sup>lle</sup> DÉBARBAT, M<sup>lle</sup> DUMONT, M<sup>me</sup> GROS, M<sup>me</sup> HEIDMANN, M. JEFFERIES, M. KRİKORIAN, M. PECKER, M. SIMONNEAU).

Colloque sur *Les processus physiques dans les atmosphères stellaires*, Nice, décembre 1970 (M. PECKER).

Ecole sur *Les atmosphères stellaires*, Saas-Fee, Suisse, mars-avril 1971 (M<sup>lle</sup> DUMONT, M. HAYLI).

Colloque *solaire* de Santa Fé, U.S.A., mai 1971 (M. PECKER).

Colloque international sur *Astronomical spectra in the infrared and microwave regions*, Liège, juin 1971 (M. PECKER).

*Missions*

M. KRİKORIAN, M. PECKER : Observatoire de Haute-Provence, octobre 1970 (Observations d'étoiles brillantes de type spectral G à M au centre de la raie K du calcium ionisé, à la caméra électronique).

M. HAYLI : Plusieurs missions à l'Observatoire de Genève, en 1970 et 1971.

*Séjours à l'étranger*

M. HAYLI : Université de Californie, à Berkeley (avril-juillet 1971).

M. PECKER : Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder, Colorado (février-juin 1971).

PUBLICATIONS

S. DÉBARBAT, S. DUMONT, J.-C. PECKER, *Interpretation of optical solar polarization (Astrophys. Letters, 6, p. 251-256, 1970).*



— *La polarisation du spectre continu au bord du disque solaire* (*Astr. Astrophys.*, 8, p. 231-242, 1970).

S. DUMONT, *Numerical solution of the transfer equation for polarized radiation* (*J. quant. Spectrosc. radiat. Transfer*, sous presse).

S. DUMONT, J.-C. PECKER, *Influence de l'absorption dans les raies sur la polarisation du spectre continu* (*Astr. Astrophys.*, 10, p. 118-127, 1971).

A. HAYLI, *Numerical experiments on the escape from non-isolated clusters* (*Astr. Astrophys.*, 7, p. 17, 1970).

— *La comparaison des intégrations numériques dans le problème gravitationnel des N corps* (*Astr. Astrophys.*, 7, p. 249, 1970).

— *Dynamics of RR Lyrae stars* (*IAU Minutes of Commission 33 Meetings*).

— *Trois ans de progrès en astronomie* (*La Recherche*, n° 6, novembre 1970).

— *Dynamique stellaire et expérimentation numérique* (*La Recherche*, n° 7, décembre 1970).

— *Une ou deux nouvelles galaxies ?* (*La Recherche*, n° 11, avril 1971).

— *Numerical experiments on the escape rate from non-isolated clusters and the formation of multiple stars* (*Colloque UAI n° 10*, Reidel, sous presse).

— *Galactic orbits and integrals of motion for « high-velocity » stars* (*Astr. Astrophys.*, à paraître).

J.-C. PECKER, *Concluding remarks* (in *Spectrum formation in stars with steady-state extended atmospheres*, IAU Colloquium n° 2, Commission 36 IAU, Munich, 1969. *NBS Special Publ.*, 332, p. 323, 1970).

— *Some considerations from the direct comparison between the observations and the theory of solar disk polarization* (*Solar Physics*, 15, p. 88-96, 1970).

— *La quatorzième Assemblée générale de l'Union astronomique internationale à Brighton* (*Astronomie*, mars 1971).

— *Processus physiques intéressant les grains de poussière circumstellaires : charge et effet photoélectrique* (*C. R. Acad. Sci.*, Paris, 272, p. 69-73, 1971).

— *Papa, dis-moi, l'astronomie, qu'est-ce que c'est ?* (Collection dirigée par le Palais de la Découverte, Ophrys, Gap, 1971).

— Ed. *La nouvelle astronomie, science de l'univers* (ouvrage collectif, Hachette, Paris, sous presse).

J.-C. PECKER, R. N. THOMAS, *Saturation in Fraunhofer lines* (*Observatory*, 90, p. 207, 1970).