

Astrophysique théorique

M. Jean-Claude PECKER, professeur

Les régions H II. Aspects dynamiques

Ce cours fait suite à celui des années précédentes. Les phénomènes qui suivent la formation d'une étoile massive et chaude sont complexes, et à l'étude, en équilibre, des régions H II entourant l'étoile massive et chaude, il faut ajouter l'étude de l'évolution, avant l'équilibre, de ces régions : cette évolution est essentielle pour la compréhension de l'interaction entre l'étoile (et son milieu circumstellaire) d'une part, et d'autre part le milieu galactique.

A. Après un rappel des principaux résultats du cours de l'année précédente, et de la bibliographie essentielle [1], quelques résultats nouveaux sur les régions en équilibre sont démontrés.

(1) La masse totale d'une région H II est $M_i = \frac{4\pi}{3} \mu R_i^3 N_i$ où, évi-

demment, R_i est le rayon de la sphère de Strömgen, N_i le nombre d'électrons (en supposant chaque atome ionisé une seule fois) par centimètre cube, μ la masse moléculaire moyenne — de l'ordre de la masse protonique.

A l'équilibre on a (après l'expansion de la région H II) : $N_i T_i = N_n T_n$, l'indice n correspondant au milieu neutre. Avec $T_n \sim 7\,000^\circ - 10\,000^\circ$ et $T_i \sim 100^\circ$, on a $N_i = 0,02 N_n$.

De plus, la relation entre R_i et T_* (température stellaire) peut se représenter par une loi empirique du type : $R_i N_i^{2/3} = 3 \cdot 10^{-8} T_*^2$ (si T_* est très grand, $R_i N_i^{2/3}$ est proportionnel à T_*).

Il vient alors une relation $M_i \sim \frac{1}{100} T_*^6 \frac{1}{N_n} M_\odot$ (ou proportionnel à T_*^3 si T_* est très grand).

La masse de l'étoile centrale elle-même est liée à sa température :

$$M_* = 2.510^{-5} T_*^{1.3} M_\odot$$

Le rapport M_i/M_* varie donc très vite avec T_* . La proportionnalité entre M_i et $1/N_n$ est par ailleurs évidente.

(2) Le rayon de la région H II en équilibre est aussi calculable. On a :

$$R_i = N_n^{-2/3} 1.310^{12} T_*^2$$

La valeur de ce rayon atteint des dimensions comparables à celles de la galaxie si T_* est assez grand.

Ces considérations permettent de traiter le cas des régions H II dans des galaxies jeunes ou des quasars, objets denses (N_n grand) où se forment des étoiles chaudes (T_* grand). L'utilisation de la dimension apparente des régions H II pour déterminer la constante de Hubble doit donc être faite avec précaution, pour que les effets d'âge ne puissent pas l'affecter.

(3) Lorsque l'on tient compte de l'ionisation de l'hélium, et de sa seconde ionisation, la dimension des régions H II est modifiée. Il est remarquable de noter que *si la température de l'étoile centrale est assez élevée, alors la région d'hélium ionisé est aussi grande que la région d'hydrogène ionisé*. Ce phénomène se produit pour les étoiles des « premières générations » ($T > 150\,000^\circ$) et a pour effet que la raie de résonance de He I, à 584 Å, sort de la région H II et peut contribuer à expulser de l'hélium d'une galaxie jeune.

(4) L'étude de la région de transition entre le milieu H I et le milieu H II montre, dans le détail, comment varient les populations des niveaux en fonction du degré d'ionisation. Une méthode détaillée d'analyse physique de la région de transition est proposée.

B. La bibliographie essentielle [2] concernant l'évolution dynamique des régions H II est étudiée ensuite.

Les équations gouvernant le front d'ionisation, et celles gouvernant le choc qui se propage dans le milieu neutre sont étudiées. Dans ce traitement très général, la classification des « chocs » est importante ; de façon formelle, on distingue les chocs « R » (correspondant à une onde de raréfaction), les chocs « D » (correspondant à une onde de compression), et les chocs « M ». Mais, bien évidemment, c'est le choix des conditions initiales qui commande les phénomènes.

Le coefficient $\alpha = \frac{1}{4Q} \left[3 \frac{I}{Q} - 5 \frac{p}{I} \right]$ joue un rôle essentiel dans l'étude

du front d'ionisation : Q y désigne la vitesse quadratique moyenne des atomes ionisés (protons) après l'ionisation (avant la redistribution des vitesses), I est le flux de masse, Q la densité, p la pression. Si $\alpha \geq 1$, on a un front R ; si $1 > \alpha > -1$, on a un front M ; si $\alpha \leq -1$, on a un front D.

Les conditions dans lesquelles un front de choc se propage devant le (à partir du) front d'ionisation, sont d'un intérêt particulier. Il faut, en général, que le gaz calme soit dans les conditions « D » pour que les deux fronts existent. Dans les cas M ou R, un choc ne peut précéder l'ionisation. L'utilisation de diagrammes p , Q permet une discussion simple de ces phénomènes. Les solutions numériques données par divers auteurs sont successivement étudiées en détail.

Enfin on a traité le problème posé par le développement d'irrégularités géométriques du front d'ionisation (« bright rims »). Deux types d'instabilité sont possibles : le type Rayleigh-Taylor, qui se forme à la limite entre deux milieux de densité différente, lorsque le plus dense se trouve poussé vers l'autre par le champ gravitationnel ; ou le type Schatzman-Kahn (dépassement des fluctuations de densité et augmentation de ces fluctuations par l'avancée du front d'ionisation). Pottasch montre que les effets de ce second type sont les seuls admissibles ; dans les « bright rims », les conditions sont voisines de la condition D critique ($\alpha = -1$).

C. L'effet de la présence de poussières cosmiques dans l'extension d'une région H II a fait l'objet des derniers cours (bibliographie [3]).

Pour une étoile jeune, un « cocon » poussiéreux entoure l'étoile et la région H II. Mais à mesure que le front d'ionisation progresse, ce front gagne les poussières et leur durée de vie est rapidement réduite. Dans ce processus, il y a transfert de moment de la poussière (mue par pression de radiation) au gaz. L'étude détaillée, dans le front, des interactions entre poussières et gaz est d'une grande importance, mais est encore embryonnaire. Certains auteurs montrent comment évolue le système, et vont jusqu'à expliquer assez bien la structure actuelle de nébulosités encore riches en poussières, comme la nébuleuse Rosette, dont ils déduisent l'âge probable.

On arrive donc finalement à décrire assez bien l'évolution, jusqu'à la série principale, d'une étoile jeune, chaude, et de son environnement. Un programme de recherches bien défini peut être préparé pour les années à venir. Ces recherches devront porter sur (a) l'amélioration du diagnostic, en y incluant évidemment les données de l'infrarouge ; (b) une solution

correcte du problème de transfert du rayonnement et l'inclusion correcte des termes correspondant aux effets des grains de poussière dans les équations d'énergie et de moment ; (c) l'étude du rôle dans la galaxie du rayonnement ionisant qui a échappé aux régions H II limitées par leur densité (très grandes extensions H II) ; (d) l'évolution de la galaxie, notamment lorsque des étoiles très chaudes s'y forment ; la galaxie elle-même est une région H II... ; (e) l'étude des vieilles régions H II où l'énergie stellaire disponible (UV) a été entièrement transférée, par l'intermédiaire de la région H II, au milieu extérieur (ISM) ; l'étude corrélative de la perte de masse de l'étoile au bénéfice du milieu extérieur. On espère que, après sans doute une interruption de quelques années, il sera possible de reprendre ces problèmes d'une façon nouvelle, et de présenter des solutions meilleures que les solutions actuelles. Le cours de l'année 1973-74 aura une orientation différente et portera sur les abondances des éléments dans les étoiles et les galaxies.

BIBLIOGRAPHIE

[1] — HABING, H. J., Ed., *Interstellar gas dynamics* (IAU Symp. n° 39, Reidel Publ. Co., Dordrecht, 1970).

— KAPLAN, S. A., PICKELNER, S. B., *The interstellar medium* (Harvard Univ. Press, 1970).

— MIDDLEHURST, B. M., ALLER, L. H., Eds., *Nebulae and interstellar matter* (Chicago Univ. Press, 1968).

— SPITZER, L., *Diffuse matter in space* (Interscience Publ., New York, London, 1968).

— TERZIAN, Y., Ed., *Interstellar ionized hydrogen* (Benjamin, New York, Amsterdam, 1968).

— WOLTJER, L., Ed., *The distribution and motion of interstellar matter in galaxies* (Benjamin, New York, Amsterdam, 1962).

[2] — AXFORD, W. I., *Phil. Trans. R. Soc. (London A, 253, 301, 1961).*

— GOLDSWORTHY, F. A., *Phil. Trans. R. Soc. (London A, 253, 278, 1961).*

— HABING, H. J., Ed., *Interstellar gas dynamics* (IAU Symp. n° 39, Reidel Publ. Co., Dordrecht, 1970).

- KAHN, F. D., *Bull. astr. Inst. Netherlands* (12, 187, 1954).
- KAPLAN, S. A., PICKELNER, S. B., *The interstellar medium* (Harvard Univ. Press, 1970).
- LASKER, B. M., *Astrophys. J.* (143, 700, 1966 ; 149, 23, 1967).
- MATTHEWS, W. G., *Astrophys. J.* (142, 1120, 1965).
- MATTHEWS, W. G., dans *Interstellar ionized hydrogen* (Y. Terzian éd., Benjamin, New York, Amsterdam, 1968, p. 189).
- POTTASCH, S. R., *Bull. astr. Inst. Netherlands* (13, 71, 1956 ; 14, 29, 1957).
- SCHATZMAN, E., KAHN, F. D. (*Gas dynamics of cosmic clouds*, IAU Symp. n° 2, North-Holland Publ., Amsterdam, 1955, p. 163).
- SPITZER, L., *Diffuse matter in space* (Interscience Publ., New York, London, 1968).
- VANDERVOORT, P. O., *Astrophys. J.* (139, 889, 1964).
- [3] — DAVIDSON, K., *Astrophys. Space Sci.* (6, 422, 1970).
- DAVIDSON, K., HARWIT, M., *Astrophys. J.* (148, 443, 1967).
- KAHN, F. D., *Leiden Symposium* (1971).
- LASKER, B. M., *Astrophys. J.* (149, 23, 1967).
- MATTHEWS, W. G., *Astrophys. J.* (142, 1120, 1965 ; 143, 173, 1966 ; 144, 206, 1966 ; 147, 965, 1967).

SÉMINAIRES ET CONFÉRENCES

Cette année, le séminaire a été entièrement confié à M. Joachim OXENIUS, Physicien associé à l'Euratom C.E.A., qui a traité, dans une suite d'exposés suivis de discussions, du sujet suivant : *Bases physiques de l'interaction rayonnement-matière dans les atmosphères stellaires* (Présentation du sujet comme la « théorie cinétique des gaz en présence d'un champ de rayonnement », donc comme une partie de la physique. I. Equilibre thermodynamique. II. Equations cinétiques. III. Echange d'énergie matière-rayonnement. IV. Echange du moment linéaire matière-rayonnement).

M. L. V. KUHI, professeur à l'Université de Californie, a donné une série de dix cours (étendue à douze) au Collège de France sur le sujet suivant : *Emission phenomena in stars with extended envelopes*. (I. Detection of extended atmospheres. II. (a) Observations of OB, Of, P Cygni and Be stars. III. (b) Interpretation in terms of expanding and rotating envelopes, theoretical approach to line profiles. IV. (a) Observations of Wolf-Rayet stars. V. (b) Interpretation : stratification, expanding envelopes and evolutionary origin. VI. Infrared radiation and mass-loss : (a) Observations. VII. (b) Interpretation : circumstellar material, dust vs. f-f, mass-ejection. VIII. Observational aspects of pre-main sequence evolution : (a) Observations of young stars and clusters. IX. (b) The lithium problem, chromospheres and rotation. X. (c) The FU Orionis phenomenon (V 1057 Cygni) and its implications on evolution before the main-sequence).

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE DU LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE THÉORIQUE

Le laboratoire d'Astrophysique théorique est depuis cette année effectivement installé, dans ses meubles, à l'Institut d'Astrophysique. M^{me} Françoise PRADERIE, astronome-adjoint à l'Observatoire de Paris, chargée au sein de l'Institut d'Astrophysique de la direction scientifique de ce laboratoire, sous la responsabilité du Professeur, rapporte l'activité du laboratoire comme suit :

Le groupe Atmosphères stellaires de l'Institut d'Astrophysique (dit aussi laboratoire d'Astrophysique théorique du Collège de France) s'est constitué au cours de l'année 1971-1972, après la nomination de J.-C. PECKER comme directeur de l'Institut d'Astrophysique. Sa composition est la suivante :

Chercheurs permanents :

Simone DUMONT, astronome adjoint ; Monique GROS, assistante Observatoire (mi-temps I.A.P., mi-temps Observatoire) ; Nicole HEIDMANN, aide astronome ; Ralph KRİKORIAN, maître-assistant, Collège de France ; Christian MAGNAN, maître-assistant, Collège de France ; Jean-Claude PECKER, professeur, Collège de France ; Françoise PRADERIE, astronome adjoint ; Eduardo SIMONNEAU, boursier E.S.R.O.

Chercheurs associés :

Roger BONNET, maître de recherches, directeur du L.P.S.P. ; Alain OMONT, professeur, Université Paris VII ; Joachim OXENIUS, physicien Euratom.

Chercheurs étrangers invités :

Leonard V. KUHI, professeur, Université de Berkeley (année 1972-73);
Richard N. THOMAS, Senior Research Fellow, J.I.L.A., Boulder (1972-73).

Stagiaire D.E.A. :

Rubens FREIRE.

I. Orientation générale du groupe :

Le groupe Atmosphères stellaires est essentiellement orienté vers l'étude des atmosphères conçues comme une région de transition entre l'intérieur stellaire en E.T.L. et le milieu interstellaire complètement hors E.T.L. L'objet plus particulier des travaux est d'une part l'attaque des processus physiques qui déterminent les différentes sous-régions de l'atmosphère, d'autre part la mise au point de méthodes de diagnostic permettant d'utiliser les observations à la connaissance de ces différentes régions. Comme il nous semble que cette transition entre les réservoirs en équilibre (intérieurs) et les déversoirs loin de l'équilibre (milieu interstellaire) se manifeste à tous les degrés de la hiérarchie astronomique, nous envisageons de généraliser la notion de région de transition à celle des régions des galaxies extérieures aux noyaux. A une phase ultérieure, ces différents aspects constitueront une étude cohérente, en astrophysique, de l'évolution universelle, dans le cadre d'une thermodynamique non linéaire des phénomènes hors équilibre.

Pratiquement, environ la moitié des chercheurs du groupe sont théoriciens, les autres interprètent des données qu'ils ont obtenues au cours de missions d'observations, ou qui leur sont attribuées dans le cadre de programmes « d'observateurs invités » (données spatiales).

Le groupe est neuf, en tant que tel, bien qu'il rassemble un certain nombre de chercheurs très confirmés (en particulier les chercheurs associés et les visiteurs étrangers). Il bénéficie de la compétence acquise par ceux-ci en d'autres lieux et circonstances, et on s'efforce, par des discussions d'orientation (trop rares) et des échanges à l'occasion de l'enseignement du Collège de France et de Physique des Atmosphères à l'I.A.P., d'amener tous les chercheurs à une vue d'ensemble sur le problème de la structure des atmosphères. On ne peut dire qu'à l'heure actuelle cet objectif soit complètement atteint, parce que l'expérience est jeune, mais un certain nombre d'éléments favorables permettent d'augurer bien de l'avenir à court terme ; ceux-ci seront notés dans le rapport qui suit, ainsi que les points faibles.

Les travaux effectués en 1972, les projets entrepris en 1972, et les programmes prévus pour l'avenir seront regroupés sous quatre rubriques :

(1) étude théorique des sous-régions atmosphériques ; (2) transfert du rayonnement en présence de champs de vitesses macroscopiques ; (3) diagnostic à partir des observations ; (4) évolution des galaxies. La première rubrique regroupe les travaux concernant l'approche synthétique au problème de la structure des atmosphères, la seconde les travaux donnant les outils du diagnostic des champs de vitesses, la troisième les travaux d'interprétation de certaines observations spécifiques (essentiellement liées aux chromosphères, à la perte de masse, à la polarisation de résonance, et aux déterminations d'abondances), la quatrième les travaux consacrés aux régions extérieures des galaxies et aux redshifts anormaux.

II. Travaux effectués en 1972

(1) *Etude théorique des sous-régions atmosphériques*

Suivant la voie ouverte par l'article de Gebbie et Thomas (1971) « The temperature Control Bracket », l'exploration systématique des régions de l'atmosphère définies d'une part par l'évolution du flux de rayonnement, d'autre part par l'évolution du flux de masse, a été poursuivie ou entreprise.

(a) Photosphère

Les conditions de possibilité d'une remontée de température en E.T.L. ont été étudiées par S. Dumont et N. Heidmann dans le cas d'une atmosphère où les opacités sont dues à $H I$ et H^- (Dumont et Heidmann, 1973). L'extension au cas multiopacités, en E.T.L., est en cours (à l'aide du programme de calcul de modèles de Feautrier, qui a été modifié pour inclure les opacités continues métalliques).

L'importance de l'aile rouge de Lyman α , considérée comme due à un processus moléculaire, a été mise en évidence dans certaines zones du diagramme HR (Praderie et Stecher, 1973).

(b) Hylosphère

L'existence de sous-régions déterminées par les propriétés du flux de masse a été suggérée par R. N. Thomas (1972), et reprise par Pecker, Praderie et Thomas (1973). La nécessaire corrélation entre la présence d'une chromosphère et celle d'un flux de masse à moyenne temporelle non nulle a été montrée par R. N. Thomas (1973).

(2) *Transfert du rayonnement en présence de champs de vitesses*

L'étude de la formation des raies spectrales dans les milieux en mouvement a été menée avec succès via deux méthodes de résolution de l'équation de

transfert : la première est une méthode de simulation numérique de la marche du photon, elle a été appliquée en particulier à un disque en rotation différentielle (C. Magnan, 1972) ; la seconde est une méthode matricielle qui conduit à la fonction-source sous forme intégrale et a été appliquée au cas d'une expansion uniforme (E. Simonneau, 1972 a et b). R. Krikorian a par ailleurs utilisé la méthode Feautrier pour traiter le problème de la formation d'une raie dans une atmosphère finie, avec gradient de vitesse constant.

(3) *Observations. Diagnostic. Interprétations*

(a) Mise en évidence de chromosphères stellaires

— Via le continu ultraviolet dans les étoiles, A. M. Gros a analysé toutes les observations existantes pour Sirius (AI V) dans l'UV et a trouvé l'indice d'une remontée de température vers l'extérieur (Gros, 1972).

— Via la raie K de Ca II, A. Krikorian a observé à l'O.H.P. une série d'étoiles tardives ayant une forte émission dans la raie K. F. Praderie, avec J. Linsky et R. Shine, a observé trois étoiles A brillantes à la tour solaire de Kitt Peak. Les résultats, présentés à l'A.A.S. (Linsky *et al.*, 1973) montrent une émission dont la raie H de Véga et dans la raie K de Deneb ; ces émissions doivent être confirmées avant que l'on puisse conclure à une remontée de température, car une seconde série d'observations sur Véga n'a pas montré le même phénomène.

(b) Polarisation du rayonnement de résonance. L'étude théorique de la polarisation de la raie 4 227 de Ca I dans le Soleil a permis de prédire la variation du taux de polarisation le long du profil (Dumont *et al.*, 1973).

(4) *Evolution galactique*

L'environnement d'une galaxie, comme l'atmosphère stellaire, est une région de transition. La conservation de la quantité de mouvement, appliquée au voisinage d'une galaxie, fait apparaître que, si cette galaxie est riche en sources de rayonnement UV, l'hydrogène est expulsé très violemment dans les directions polaires. Un modèle de jeune galaxie, qui attribue cet effet à la formation d'étoiles de $T_{\text{eff}} = 2 \cdot 10^5$ K, peut être développé (Pecker, 1972 a). On peut mettre en évidence des phénomènes d'éjection différentielle, expliquant la faible abondance des métaux dans le halo d'une galaxie évoluée et l'existence de deux masses d'hydrogène, symétriques, et à grande distance (peut-être assimilables aux radio-sources doubles). Cette phase d'expulsion de l'hydrogène correspond à un « flash » de luminosité ; nous avons

tendance à admettre qu'il s'agit de la phase « quasar » d'une galaxie en évolution. Ceci nous conduit à admettre que les quasars sont 100 à 1 000 fois plus proches que leur distance « cosmologique ».

Cet effet est à rapprocher des « redshifts anormaux » découverts par de nombreux observateurs, et dont Pecker et Vigier ont donné une interprétation (provisoire, tant que le mécanisme fondamental de l'interaction n'est pas mieux compris) par les interactions entre photons de la source et photons du champ (Pecker *et al.*, 1972 a, b, c ; Pecker, 1972 a, b ; Pecker et Vigier, 1973). Le « redshift » non cosmologique serait de la forme :

$$Z = A \int_L N_\nu(l) dl \sim A' \int_L T^3(l) dl$$

l'intégration ayant lieu suivant la ligne de visée, N_ν étant le nombre de photons par centimètre cube sur le trajet parcouru par le photon issu de la source. T est la température équivalente de corps noir des photons du champ.

Des expériences astrophysiques et physiques sont en cours pour vérifier ces théories.

III. Travaux commencés en 1972 ou en projet

(1) *Etude théorique des sous-régions atmosphériques*

Les travaux commencés en 1972 se poursuivent : dans la photosphère, par l'application de la méthode T.C.B. au cas multiopacités et hors E.T.L. (travail commencé à J.I.L.A., F. Praderie) ; par l'étude du blanketing, comparaison du cas E.T.L. et du cas non E.T.L. (S. Dumont, M. Gerbaldi), afin de comprendre la convergence des résultats de Athay et de Peytremann et ultérieurement de calculer des modèles en ER ; par l'adaptation aux étoiles A du programme de calcul d'atmosphères en ER de Mihalas (M. Gros).

(2) *Transfert du rayonnement en présence de champs de vitesses*

C. Magnan a présenté une discussion générale du problème de la formation des raies dans une atmosphère en mouvement lors de la soutenance de sa thèse (1973 a) ; parmi d'autres résultats, il a obtenu la valeur analytique de la fonction-source à la surface d'un milieu semi-infini en mouvement (Magnan, 1973 b).

E. Simonneau a soutenu sa thèse à Madrid (1973 a) ; il a étudié systématiquement et montré l'équivalence de trois méthodes analytiques de solution de l'équation de transfert (1973 b) et développé l'une de celles-là pour obtenir

la fonction-source et le profil émergent d'une raie dans le cas non-statique, couches plan parallèles (1973 c). Ce travail est étendu au cas de couches sphériques.

Une mise au point de méthodes de diagnostic nouvelles (obtention à partir du profil observé de la fonction-source *et* de la vitesse à une profondeur caractéristique) est en cours.

(3) *Observations. Diagnostic. Interprétation*

(a) Chromosphères stellaires ; atmosphères étendues

— Continu UV des étoiles A. L'étude comparative de 7 étoiles A observées par le satellite OAO-2 a été achevée (Gros, Sacotte, Praderie, Bonnet, 1973) ; la qualité des données n'a pas permis de répondre à la question de l'existence d'un minimum de température dans ces étoiles, minimum que l'on devrait pouvoir détecter comme dans le Soleil dans les régions spectrales très opaques (en particulier $\lambda < 1\,400 \text{ \AA}$).

L'extension de ce programme, à l'aide des observations photométriquement calibrées et couvrant le domaine complet des étoiles A, obtenues par Malaise et le groupe spatial de Liège sur le satellite TD 1, a débuté en janvier 1973.

En vue de l'étude des raies ultraviolettes, dans les mêmes étoiles, N. Heidmann et S. Sahal ont calculé les largeurs dues aux collisions électroniques pour un grand nombre de raies entre 1 000 et 2 500 \AA . (Publication en préparation.)

— Une étoile sous-naine de type G0, montrant une forte émission dans la raie K (Foy) est étudiée par Krikorian, qui établit un modèle semi-empirique de sa chromosphère.

— Etude de la raie K de Ca II dans les étoiles très jeunes, en particulier les étoiles T Tau et les étoiles de NGC 2 264. A partir d'observations au scanner du flux total dans la raie K pour les étoiles jeunes et pour les étoiles des Hyades, utilisées à la fin de calibration, Kuhl (1973 a) trouve que les étoiles sans émission en $H\alpha$ dans NGC 2 264 ont des flux $F(K)$ compatibles avec la relation âge-intensité de Ca II de Skumanich. Les étoiles T Tau ont une émission en Ca II beaucoup plus intense, et le domaine de variation de $F(K)$ est plus grand que pour les étoiles sans émission. Donc, ou les étoiles T Tau sont beaucoup plus jeunes que les autres, ou la relation de Skumanich ne s'applique pas, et le déclin de l'activité chromosphérique avec l'âge ne commence pas avant la fin de la phase T Tau.

— Un programme d'interprétation des particularités spectrales remarquables des étoiles T Tauri a débuté par l'étude de l'émission dans le continu de Balmer et la raie $H\alpha$. (Kuhl, Heidmann, Dumont, Thomas.)

Les observations au scanner de Kuhl (1973 b) (distribution de l'énergie continue et flux dans les raies pour les étoiles T Tau entre λ 3 300 et 11 000 Å) montrent que T (Balmer) est supérieur à T (Paschen) de façon cohérente, et qu'il y a une bonne corrélation entre $T = T_B - T_P$ et le flux total en $H\alpha$; le travail théorique entrepris par Kuhl, Heidmann, Dumont, Thomas a permis de prédire cette corrélation.

— Raie He I 10 830. Dans les étoiles O et Of, les observations au tube-image (32 Å/mm) de Kuhl montrent que la raie n'apparaît que pour les étoiles Of les plus extrêmes, usuellement en absorption, occasionnellement en émission. Dans les étoiles T Tau, la raie n'est souvent pas présente. Quand elle l'est, elle apparaît souvent en émission, mais pas toujours avec un profil P Cyg, alors que les raies photosphériques normales ont un profil P Cyg.

— L'étoile radio MWC 349 a un large excès d'IR. A l'aide de mesures de flux dans les raies d'émission (obtenues au scanner) et de flux radio, Kuhl (1973 d) a montré que le flux IR observé n'est pas dû à l'émission free-free; il faut sans doute faire appel à la réémission par les poussières pour interpréter les particularités de cette étoile B très rouge.

(b) Facules

Une étude des facules chromosphériques (recherche d'un modèle « moyen » de facule « moyenne » et de modèles plus élaborés) sera basée sur les observations de 6 raies chromosphériques dans l'UV, obtenues par le satellite OSO I dont le lancement est prévu en 1974 et sur l'observation simultanée, au sol, des raies de résonance du triplet IR de Ca II (Pecker, Mouradian, Dumont, Artzner).

(c) Détermination d'abondances

— Abondance du titane dans le Soleil.

Afin d'éviter les difficultés de convergence de la méthode semi-empirique de détermination des abondances (méthode Pecker *et al.*), difficultés dues en partie à la dispersion des mesures, une méthode critique est appliquée à un atome artificiel dans une atmosphère connue. Dumont, Heidmann, Jefferies, Pecker ont montré que la méthode classique E.T.L. donne des abondances trop fortes d'un facteur 2 à 5 suivant les multiplets considérés.

L'étude N.E.T.L. est poursuivie actuellement et la méthode sera appliquée au titane et à d'autres éléments.

— Abondances des terres rares dans les étoiles Ap.

Un programme d'observation de raies de terres rares à la caméra électronique a été établi (Groupe Caméra Meudon, Steinitz, Spector, Praderie).

Une revue critique des déterminations d'abondances dans les étoiles fait l'objet d'un stage de D.E.A. (R. Freire).

IV. Perspectives

Nul ne peut dire actuellement si le groupe Atmosphères de l'I.A.P. vivra dix ans, alors que ce groupe est encore dans la phase où il recherche sa propre cohérence. Cependant un certain nombre des travaux engagés sont des projets à long terme, dont on peut affirmer qu'ils se développeront pendant quelques années, et dont on peut essayer de dégager les directions fortes.

Plusieurs tendances se dessinent, et ont été exprimées lors d'une réunion de prospective interne au groupe (avril 1973). A l'occasion de cette réunion, chaque chercheur fut invité, non seulement à dire ce sur quoi lui-même travaillerait à court et moyen terme, mais aussi quels lui paraissent être les problèmes importants à résoudre pour acquérir une connaissance panoramique des atmosphères, quelle est sa vue d'ensemble de l'évolution des travaux sur les atmosphères stellaires, et quel est le futur de la recherche dans ce secteur. Ce dernier aspect a, en fait, sous-tendu toute la réunion, quoique ses résonances plus particulièrement politiques aient été délibérément laissées de côté. C'est parce que nous nous sommes questionnés sur l'avenir de notre recherche, et plus en terme d'idées à développer qu'en terme de crédits et de postes à rassembler, que nous pensons pouvoir contribuer à la préparation de l'Assemblée générale de l'UAI, à Sydney.

On peut rassembler cette discussion d'avril 1973 sous trois têtes de chapitre :

- (1) structure des atmosphères, et extension des concepts à d'autres objets ;
- (2) observations et diagnostic ; (3) problèmes de physique associés.

(1) *Structure des atmosphères, et extension des concepts à d'autres objets*

Le schéma de représentation et d'étude de l'atmosphère stellaire comme *région de transition* entre l'intérieur stellaire et le milieu interstellaire sera exploré systématiquement à court terme.

Alors que, par certains aspects, les régions de l'atmosphère les moins bien comprises sont les plus extérieures (chromosphère, couronne, enveloppe),

nous n'avons pas, en réalité, une compréhension complètement cohérente et globale d'une seule région de l'atmosphère. Au cours des dix dernières années, on a réalisé que la photosphère possède une région, significative du point de vue de l'observation, qui doit être analysée via la méthodologie non-E.T.L. Aujourd'hui, il est clair qu'une description réellement adéquate de la photosphère requiert une compréhension de l'origine et de la structure des champs de vitesse dits « turbulents ». Se borner à les représenter empiriquement n'est pas suffisant. Et il apparaît maintenant que le facteur de base dans l'origine de ces champs de vitesse est le même que celui qui est responsable de la structure des régions atmosphériques externes. Autrement dit, quand nous discutons les propriétés de l'atmosphère, nous recherchons d'abord quelle est la quantité dont l'étoile dans son ensemble est un réservoir, et dont l'évolution (du « stockage » à la « propagation ») définit la zone de transition identifiée à l'atmosphère.

Si on approche le problème de la structure atmosphérique de cette façon, deux possibilités se présentent. Ou bien l'étoile est une concentration de masse et d'énergie thermique seulement, ou elle est de plus une concentration d'énergie non-thermique. Si l'on explore les conséquences de cette alternative, des résultats préliminaires suggèrent qu'une étoile ne peut avoir une photosphère, et seulement une photosphère, que si elle est une concentration de masse et d'énergie thermique. S'il existe une concentration d'énergie non-thermique, on peut obtenir toutes les régions atmosphériques extérieures à la photosphère. Les caractéristiques de ces régions extérieures dépendent des modes de stockage de l'énergie non-thermique. Tout mode de stockage, à l'exception du mode à symétrie sphérique conduit à la création d'inhomogénéités latérales dans la structure atmosphérique, et aux caractéristiques des champs de vitesses dits de « turbulence astronomique » que nous avons mentionnés plus haut. Par conséquent ces modes non-thermiques de concentration d'énergie et de stockage influencent fortement la structure de la photosphère.

Il est probable que les recherches sur la spécification des modes de stockage non-thermiques se développeront par un effort pour lier les études de l'intérieur stellaire aux études sur l'atmosphère, et l'atmosphère considérée, dans sa structure complète, comme la condition aux limites du type « région de propagation » pour l'intérieur. Parallèlement nous chercherons à suivre l'évolution des paramètres décrivant la structure atmosphérique, depuis les paramètres E.T.L. dégénérés, valables dans l'intérieur, jusqu'aux paramètres microscopiques de la région de propagation atmosphérique.

Cette étude purement théorique devrait être menée en connection étroite avec les observations, et ce de deux points de vue :

— l'étude de quelques objets bien choisis par leurs propriétés « excessives » (étoiles T Tau) ou par leur position dans le diagramme HR (étoiles A, i.e. type spectral où l'on passe d'indices chromosphériques à une absence de tels indices dans le spectre visible) ;

— l'exploration systématique du diagramme HR, à la recherche de la variation en température effective et gravité de certains effets essentiels, comme (a) la perte de masse : la reconnaissance de la perte de masse comme un troisième paramètre caractéristique d'une étoile, à côté de la température effective et de la gravité, engage à tenter de déterminer avec plus de confiance cette quantité qui repose sur un diagnostic des profils de raies formées dans un milieu en mouvement ; (b) la présence de raies d'émission : quelles raies sont chromosphériques, lesquelles sont coronales, lesquelles enfin reflètent une atmosphère étendue au sens classique (i.e. sans chauffage) ? Sont-elles un corollaire nécessaire des champs de vitesses, et plus généralement indiquent-elles l'existence de vents stellaires ? (c) l'influence au sens large d'une étoile sur le milieu interstellaire, via l'énergie et la quantité de mouvement qu'elle y déverse, les caractères de cette interaction en fonction du type spectral de l'étoile.

En vue de soutenir et d'alimenter les travaux théoriques sur la structure des atmosphères, il paraît indispensable de mener de façon totalement parallèle un effort de *diagnostic*, qu'il s'agisse des caractéristiques d'objets particuliers, ou des raies d'émission, et un effort de *prédiction* des observations, afin de tester les modèles, de repérer leurs faiblesses, et de relier les phénomènes observés dont le siège est dans l'atmosphère (caractéristiques spectrales) aux propriétés d'ensemble de l'étoile (contenu de masse et d'énergie).

Si l'on admet que dans l'optique précédemment exposée, l'étude de la structure d'une atmosphère réfère simplement aux caractéristiques d'une concentration de matière et d'énergie et à son interaction avec l'environnement dans lequel cette concentration s'est formée, alors plusieurs possibilités d'extension et d'application de ses concepts apparaissent. Un exemple en est donné par les galaxies : on peut rapprocher le noyau d'une galaxie de l'intérieur stellaire et les autres régions de la galaxie sont analogues à l'atmosphère. Le stockage non-thermique dans ce cas est lié aux mouvements dont est le siège le noyau de la galaxie. On note à ce propos qu'il existe, du point de vue des caractéristiques observées, une ressemblance entre les étoiles T Tau et les galaxies de Seyfert ; ceci suggère l'idée que l'atmosphère stellaire est le *prototype* d'une région comprise entre une condensation (intérieur de l'étoile ou noyau d'une galaxie) et une région ténue extérieure. La constitution et l'évolution subséquente d'une telle région, et le problème préalable

de la formation d'une condensation à partir d'une fluctuation dans un milieu hors équilibre, renvoient à un problème de physique fondamentale à explorer (cf. § 3).

Outre le noyau des galaxies, un autre extrême dans la recherche de cas astrophysiques de condensations analogues à une étoile est celui de la formation d'une particule de poussière dans une atmosphère où le solide et son halo représentent la condensation et la région de transition extérieure.

(2) *Observations et méthodes de diagnostic*

Du point de vue de l'acquisition des données, il nous semble que d'une part le groupe de l'I.A.P. est faible dans ses capacités d'observation, d'autre part les astronomes en général ne prêtent pas assez d'attention ni à une réduction des données significative pour le problème posé, ni aux méthodes de diagnostic utilisées.

— Acquisition de données. Les régions extérieures des atmosphères ne sont accessibles à l'observation que par la mise en œuvre des techniques raffinées et performantes ou par l'exploration de domaines non visibles du sol. Le groupe Atmosphère de l'I.A.P. n'a pas d'autonomie propre en matière d'observations, il doit donc soit s'associer à de bons observateurs, soit participer à des programmes acceptant des observateurs invités. En ce sens, des collaborations sont déjà initiées : avec le Groupe Caméra de Meudon (terres rares), avec l'Institut astronomique d'Hawaii (raies K), avec Bjurakhan ; la participation à des programmes spatiaux est en cours (expérience S 58 sur TD 1, Liège), acceptée (OSO-I) ou projetée (propositions soumises sur le satellite IUE, sur la plateforme Pégase...).

Un programme d'observations des étoiles T Tauri à résolution élevée devrait imminemment débiter ou être préparé en vue de l'observation avec le télescope de 3,60 m.

— De l'intérêt d'un bon diagnostic. La valeur des quantités tirées des observations dépend de façon décisive de la méthode d'analyse des données utilisée. Un des rôles d'un groupe de théoriciens doit être de poursuivre un travail *critique* par rapport à l'usage fait couramment des données observées. C'est ainsi qu'une fois résolu synthétiquement le problème de la formation d'un spectre, on peut se demander inversement quelles vitesses, quelles abondances conduisent au spectre observé, mettre des barres d'erreur sur ces quantités, et attirer l'attention des observateurs sur le problème self-consistant de l'influence de ces quantités sur les modèles qui ont servi de point de départ à l'analyse. De nouvelles questions peuvent surgir, pour les observateurs et pour les théoriciens, de cette étude critique de l'exploitation des

données ; l'objectif ultime est évidemment l'abandon des diagnostics réputés mauvais, et s'il paraît naïf d'y insister, il nous semble pourtant que cet aspect de l'astrophysique est couramment trop négligé.

(3) *Problèmes de physique associés*

La présence dans le groupe de physiciens comme Omont et Oxenius lui assure des ouvertures vers la microphysique de phénomènes d'échange radiatif et vers la considération des propriétés purement plasma des atmosphères. Cependant, au cours de la discussion d'avril 1973, nous avons constaté qu'au premier abord et par rapport aux préoccupations actuelles du groupe, la microphysique cède le pas à la macrophysique ; en effet, les problèmes de physique pure qui se posent de façon urgente en fonction des projets ci-dessus ne renvoient plus à la mécanique statistique, ni à la physique atomique ou moléculaire. Ils concernent :

(a) La physique des concentrations, au sens où une étoile est vue comme une condensation en quasi équilibre formée dans un milieu hors-équilibre, et où elle dure.

(b) La physique de l'interaction matière-rayonnement dans la mesure où le rôle de la pression de radiation doit être approfondi, et où le couplage ondes sonores-rayonnement doit encore être exploré en vue du problème de chauffage. Par ailleurs, l'interaction poussières-rayonnement, qui domine l'étude des régions circumstellaires et interstellaires, n'a sans doute pas été suffisamment poussée.

Néanmoins, compte tenu de ce qui a été noté plus haut sur le rôle structural des flux de masse, nous nous heurterions à une limitation conceptuelle de taille, si la perspective d'une description microscopique ultime des phénomènes était provisoirement laissée de côté. En effet, l'établissement d'un pont entre macrodescription et microdescription dans les phénomènes où l'aérodynamique est impliquée (flux de masse, chauffage) reste totalement à établir ; or, si l'on veut parvenir à une description microscopique de toutes les interactions subies localement par le gaz stellaire avec les photons et avec les champs de vitesses systématiques, on peut considérer que le milieu « atmosphère stellaire », c'est-à-dire un plasma à basses densités, basses énergies, n'est encore connu que de façon grossière.

PUBLICATIONS

S. DUMONT, N. HEIDMANN, 1973, *Effects of the Absorbers upon thermal Structure of an LTE Atmosphere* (Soumis à *Astr. and Astrophys.*).

S. DUMONT, A. OMONT, J.-C. PECKER, *Theoretical study of the Fraunhofer Lines Polarization : The Case of Ca I 4227* (*Solar Physics*, 28, p. 271, 1973).

M. GROS, *Sur le spectre ultraviolet de Sirius* (Thèse de 3^e cycle, Université de Paris, 1972).

M. GROS, D. SACOTTE, F. PRADERIE, R. M. BONNET, *Analysis of the Ultraviolet Spectrum of A type Stars observed by the OAO-II Satellite* (Sous presse, *Astr. and Astrophys.*, 1973).

N. HEIDMANN, Éditeur, *Atmosphères solaire et stellaire et observations spatiales* (Compte rendu du Colloque d'Aussois).

L. V. KUHI, *Stellar Chromospheres and Envelopes* (Colloque U.A.I. n° 17, septembre 1972 : *L'âge des Etoiles*).

— *Ca II Emission in very young Stars* (1973, en préparation).

— *Continuous Energy Distributions of T Tauri Stars* (en préparation).

— *Wolf-Rayet Stars. V. The Atmospheric Stratification* (*Ap. J.*, 180, p. 783-790, 1973).

— *Optical Observations of the Radio Star MWC 349* (*Astrophysical Letters*, 1973, accepté pour publication).

L. V. KUHI, S. KLEINMANN, *Mass loss and Infrared Excesses in hot Stars* (*P.A.S.P.*, 84, p. 766-767, 1972).

J. L. LINSKY, R. A. SHINE, T. R. AYRES, F. PRADERIE, *Discovery of Chromospheres in Early A Stars* (*B.A.A.S.*, 5, p. 3, 1973).

C. MAGNAN, *The Splitting of Lines in Differentially Rotating Slabs* (*Astr. and Astrophys.*, 21, p. 361, 1972).

— *Formation des raies dans des milieux en mouvement* (Résumé des travaux présentés à l'Université de Paris VII, le 2 février 1973).

— *Radiative Transfer in a Moving Medium* (1973, soumis à *J.Q.S.R.T.*).

J.-C. PECKER, *Evolution galactique. I. Effets différentiels de la pression de radiation des étoiles des différents types sur les atomes neutres et les grains de poussière* (*Astr. and Astrophys.*, 18, p. 253-266, 1972).

— *Processus physiques intéressant les poussières circumstellaires. Masse des grains et accréation protonique* (C. r. Acad. Sci., Paris, 274 B, p. 1001-1006, 1972).

J.-C. PECKER, F. PRADERIE, R. N. THOMAS, *A Scheme of Stellar Atmospheric Regions. I. The General Approach* (1973, soumis à *Astr. and Astrophys.*).

J.-C. PECKER, A. P. ROBERTS, J. P. VIGIER, *Non Velocity Redshifts and Photon-Photon Inter-Actions* (*Nature*, 237, p. 227, 1972).

— *Sur une interprétation possible du déplacement vers le rouge des raies spectrales dans le spectre des objets astronomiques* (C. r. Acad. Sci., Paris, 274 B, p. 765-768, 1972).

— *Sur une interprétation possible du déplacement vers le rouge des raies spectrales dans le spectre des objets astronomiques. Suggestions en vue d'expériences directes* (C. r. Acad. Sci., Paris, 274 B, p. 1159-1162, 1972).

J.-C. PECKER, W. TAIT, J. P. VIGIER, *Photon Mass, Quasar Redshifts and other Abnormal Redshifts* (*Nature*, 241, p. 338, 1973).

J.-C. PECKER, J. P. VIGIER, *L'univers est-il vraiment en expansion?* (*Le Monde*, 31 janvier 1973).

F. PRADERIE, *Evidence for Stellar Chromospheres* (Presented by Ground Based spectra of the Sun and Stars, dans *Stellar Chromospheres*, edited by S. Jordan, E. Avrett, N.A.S.A., 1973).

F. PRADERIE, T. P. STECHER, *On Ultraviolet Absorption by Molecular Hydrogen in stellar Atmospheres* (*Astr. and Astrophys.*, 23, p. 49-50, 1973).

F. PRADERIE, R. N. THOMAS, *On Estimates of the Non-Radiative Energy Input to the Solar Chromo-Sphere from the H⁻ emission* (*Ap. J.* 172, p. 485-490, 1972).

E. SIMONNEAU, *Sur une nouvelle méthode pour l'étude de la formation des raies spectrales, quand la fonction-source est indépendante de la fréquence* (C. r. Acad. Sci., Paris, 274, p. 85, 1972).

— *Résolution de l'équation de transfert en présence d'un champ de vitesses* (C. r. Acad. Sci., Paris, 275, p. 169, 1972).

— *Formacion de Lineas Espectrales en Atmosferas de Estrellas no Estacionarias* (Thèse soutenue à l'Université de Madrid, le 10 mars 1973).

— *Formal Methods to treat the Frequency dependence in the Transfer Equation* (soumis à *J.Q.S.R.T.*, 1973).

— *Spectral Line Formation in Expanding Atmospheres* (soumis à *Astr. and Astrophys.*, 1973).

R. N. THOMAS, *Atmosphères solaire et stellaires. Théorie, observations spatiales* (Colloque d'Aussois, 24-28 avril 1972, éd. N. Heidmann).

— *A Scheme of Stellar Atmospheric Regions. II Properties and Significance of Mass Fluxes* (soumis à *Astr. and Astrophys.*, 1973).

NOMINATIONS

Le Professeur a été élu, en juin 1973, Président de la Société astronomique de France, pour une période de trois ans.

CONGRÈS, COLLOQUES, MISSIONS

Plusieurs membres des équipes de recherche ont participé à des colloques et symposiums.

18th International Astrophysical Symposium : *Planetary nebulae*, Liège, 26-28 juin 1972 (M. PECKER).

I.A.U. Symposium n° 54 : *Problems of calibration of absolute magnitudes and temperatures of stars*, Genève, 12-15 septembre 1972 (M. KRİKORIAN, M. PECKER).

Colloque U.A.I. n° 17 : *L'âge des étoiles*, Meudon, septembre 1972 (M. KUHI, M^{me} PRADERIE, M. PECKER).

Struve Memorial Symposium, *Atmosphères étendues et matière circum-stellaire dans les binaires spectroscopiques*, Vancouver, septembre 1972 (M. MAGNAN).

M. KRİKORIAN a effectué deux missions (en octobre 1972 et février 1973) à l'Observatoire de Haute-Provence dans le but de faire des observations des raies H et K.

SÉJOURS A L'ÉTRANGER

M^{me} PRADERIE et M. SIMONNEAU ont séjourné, respectivement deux mois et demi et trois mois et demi, durant l'été 1972, au Joint Institute for Laboratory Astrophysics, Boulder, Colorado.

M. PECKER, dans le cadre des échanges entre le C.N.R.S. et l'Académie des Sciences d'U.R.S.S., a passé six semaines en U.R.S.S., principalement à l'Observatoire de Bjurakan, Arménie, et à Moscou (3 mai - 15 juin 1973).