

Astrophysique théorique

M. Jean-Claude PECKER, professeur

Problèmes d'hydrodynamique en astrophysique des milieux condensés

Une fois détachée du milieu gazeux pré-stellaire, une masse gazeuse de l'ordre de la masse stellaire, à la suite d'une instabilité à la Jeans, se contracte et finit par donner naissance à une étoile de la série principale.

L'objet du cours a été d'étudier les méthodes dont on dispose actuellement pour calculer cette évolution pré-stellaire, et d'analyser la littérature en vue de dégager les caractéristiques fondamentales de cette évolution, et quelques suggestions en vue des développements ultérieurs de la théorie.

Nous nous bornerons, ci-après, à décrire le plan du cours, en rappelant les références étudiées et en signalant seulement en détail les conclusions générales et les aspects prospectifs de cette importante question.

I. Le schéma évolutif de Hayashi

Lire : CAMERON, A.G.W., 1962, *Icarus*, 1, 13.

COLLOQUE DE LIÈGE, *Pre-main sequence stellar evolution*, 1969 (sous presse).

HAYASHI, C., 1966, *A. Rev. Astr. Astrophys.*, 4, 171.

UPTON, E.K.L., dans *Stars and Stellar Systems*, vol. VII : *Nebulae interstellar matter*, p. 771, 1968.

EDDINGTON, A., 1959, *The internal constitution of the stars*, p. 142.

HAYASHI, C., NAKANO, T., 1963, *Progr. theor. Phys.*, 30, 460.

Pour que la contraction ait lieu, il faut que l'énergie gravitationnelle l'emporte sur l'énergie des forces de pression. Il faut que les sources d'énergie (gravitationnelle, plus autres) l'emportent sur les causes de refroidissement (rayonnement).

II. Les conditions initiales de la contraction

Lire : McNALLY, D. 1964, *Astrophys. J.*, 140, 1088.

ROUSCOUL, E.L., 1955, *Astr. Zhurn.*, 32, 244.

McVITHE, G. C., 1956, *Astr. J.*, 61, 451.

On notera le rôle du refroidissement par les poussières. McNally utilise un modèle initial polytropique et montre son évolution vers l'isothermie : cette démonstration est essentielle.

III. Les équations du mouvement selon McNally et Penston

Les traités de base (Lamb, Batchelor, Zeldovich et Raizer) ont été utilisés pour tenter d'unifier la présentation des principaux travaux. On a étudié notamment :

McNALLY, D., 1964, *Astrophys. J.*, 140, 1088.

DISNEY, M.J., McNALLY, D., WRIGHT, A.E., 1968, *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 140, 319.

PENSTON, M.V., 1966, *R. Obs. Bull.*, no. 117, E299.

PENSTON, M.V., 1969, *Mon. Not. R. astr. Soc.*, 144, 159 et 425.

Ces équations diffèrent essentiellement par la façon dont l'équation de l'énergie a été écrite. McNally fait intervenir le bilan des gains d'énergie (gravitationnelle) et des pertes d'énergie (radiative). Penston suppose la contraction isotherme, ce qui simplifie l'équation d'état et, en supprimant une variable, évite d'écrire l'équation de l'énergie.

IV. Etude générale des équations du mouvement

Lire : LAMB, H., *Hydrodynamics* (6th ed., Cambridge Univ. Press, 1932).

BATCHELOR, G.K., *An introduction to fluid dynamics* (Cambridge Univ. Press, 1967).

DRYDEN, MURNAGHAN, BATEMAN (*Hydrodynamics*, Dover ed., 1956).

Plusieurs problèmes se posent :

(a) Les équations sont des équations locales, non différentielles, d'une part, portant sur les relations physiques entre grandeurs (équation d'état, par exemple, ou bilan des gains et pertes d'énergie...). D'autre part, ce sont des équations de conservation, souvent intégrales, et qui diffèrent essentiellement suivant que l'on utilise des variables eulériennes ou lagrangiennes. Enfin, ce sont des équations du mouvement (des particules et des photons) qui font essentiellement intervenir les forces qui perturbent le système — ou le maintiennent en équilibre.

(b) Les conditions initiales et les conditions aux limites posent en astrophysique les vrais problèmes. Les conditions initiales : faut-il remonter jusqu'au « big bang » ? Non, car on n'a pas su résoudre nombre d'étapes intermédiaires entre le « big bang » et la proto-étoile. Il faut donc s'inspirer des observations, d'une part, et, d'autre part, faire évoluer une grande quantité de configurations initiales plus ou moins arbitraires, et sélectionner les plus réalistes en fonction de l'évolution ultérieure des modèles ainsi construits.

V. Etude des solutions de Penston et de McNally

Il faut remarquer que la solution du premier article de Penston, par sa simplicité, donne des solutions homologues ; on peut passer aisément de l'une à l'autre et donc traiter aussi bien le cas des proto-galaxies ou des proto-étoiles. Dans les articles ultérieurs, une équation d'énergie est introduite, et l'homologie n'existe plus ; on s'occupe donc exclusivement de masses stellaires. McNally, au contraire, est plus préoccupé des proto-galaxies.

A noter l'importance de ce que Penston nomme le « nombre de Jeans » (rapport de l'énergie d'autogravitation à l'énergie thermique) qui est de l'ordre du carré du rapport du temps que le son met à traverser l'étoile au temps de chute libre.

Il est important de noter que, *localement*, les forces de pression peuvent dominer, même si $J \gg 1$.

Penston et McNally étudient tous deux le problème analytique et numérique, dans le but de tester la validité des méthodes utilisées.

La conclusion essentielle de ces travaux, c'est que le noyau de l'étoile (limité par la couche de profondeur optique égale à l'unité) se contracte très vite, devient presque isobare (en tous cas à peu près adiabatique) ; au contraire, les régions extérieures, où la loi $\rho \sim r^{-12/7}$ semble établie, se contractent fort lentement.

La chute libre est stoppée au centre d'abord par l'intervention de l'opacité (qui limite les pertes d'énergie), puis par celle de la pression (qui crée un noyau hydrostatique). Ordre de grandeur pour $1 M_{\odot}$: 10^5 ans pour l'apparition d'un noyau opaque contenant la quasi-totalité de la masse stellaire.

Cette apparition d'un noyau provoque des épiphénomènes, étudiés en détail par Larson.

VI. Etude du travail de Larson : ondes de choc dans la contraction préstellaire

Lorsque la contraction des régions extérieures se heurte au noyau hydrostatique, une onde de choc se forme — dont Larson (*Mon. Not. R. astr. Soc.*,

145, 271 et 197, 1969) analyse la structure. Cette onde peut progresser vers l'extérieur, en masse (elle contient une masse croissante de gaz), mais vers l'intérieur en position réelle (eulérienne).

Le travail de Larson utilise toujours les équations de l'hydrodynamique, mais pour l'équation de l'énergie, il suppose le milieu opaque, même lorsqu'il ne l'est pas, en montrant toutefois que cela ne change guère les résultats : il nous semble nécessaire de reprendre ce calcul avec une rigueur accrue.

Larson montre que deux noyaux se forment consécutivement à une contraction rapide, donnant lieu chaque fois à une onde de choc. D'abord c'est l'apparition de l'opacité, puis celle de la convection, qui provoque, elle, une expansion, et un « éclair » dans l'éclat de la proto-étoile. D'où des trajets évolutifs concernant le noyau et présentant dans un diagramme HR une boucle vers les grandes luminosités après 10^3 - 10^5 années de formation du noyau opaque.

VII. *Conclusions*

L'étude faite cette année débouche sur un certain nombre de suggestions dont le caractère est malheureusement encore nettement qualitatif.

(a) Il nous semble que les instabilités du type de Jeans sont loin d'être satisfaisantes pour expliquer la formation actuelle des étoiles. Cette formation a toujours lieu (dans des nébulosités Herbig-Haro par exemple), ce qui prouve, puisqu'elle est rapide, que le milieu interstellaire a été perturbé par un événement localisé récent — pour chaque formation. Nous suggérons l'étude systématique des perturbations apportées au potentiel d'un mélange étoile-gaz par les mouvements mutuels (rotation différentielle, etc.) des étoiles, et notamment de l'apparition ou de la disparition de puits de potentiel, et de l'apparition ou de la disparition de singularités de Lagrange.

b) Les enveloppes stellaires se contractant fort lentement alors que le noyau des proto-étoiles se contracte rapidement, il est vraisemblable que ces enveloppes existent encore autour d'étoiles déjà arrivées sur la série principale. S'il s'agit d'étoiles O-B, l'enveloppe circumstellaire existera dans une importante proportion de ces étoiles, et même, pour les O5, si l'étoile a quitté la série principale. Dans le cas des étoiles M, la proportion serait faible, 10^{-3} ou 10^{-4} , à avoir retenu une telle enveloppe : il s'agirait des étoiles dMe ou des T Tauri.

c) Les poussières étant, selon McNally, un élément essentiel à la contraction proto-stellaire, elles doivent être un élément essentiel de l'enveloppe circumstellaire ; il convient certainement d'en étudier la dynamique, le tri (gravitation contre pression de radiation) modéré par les forces de viscosité...

Inutile d'insister sur l'importance de cette étude au point de vue de l'interprétation des objets infrarouges et des rougissemments dans les très courtes longueurs d'onde. Ces différentes recherches (notamment (b) et (c)) sont entreprises au sein des équipes associées à la chaire.

SÉMINAIRES

Les cours ont été complétés par une série de séminaires sur les problèmes de physique et d'astrophysique dans un essai de confrontation entre physiciens et astronomes.

Les exposés ont été les suivants :

M. VO KY LAN, *Progrès récents en théorie de la photoionisation et de l'excitation des raies interdites des nébuleuses* ;

MM. R. MCCARROLL et HOANG BINH DY, *Problèmes liés au rayonnement radio-électrique des régions H II* ;

M. A. SALIN, *Progrès récents dans l'étude des excitations atomiques par collisions inter-atomiques* ;

M^{lle} Y. CUNY, *Interprétation du spectre UV solaire (continua) entre 500 et 900 Å* ;

M. KAPLAN, *High resolution infrared spectroscopy in astrophysics* ;

M. J. LEQUEUX, *Molécules complexes en radioastronomie* ;

M^{me} L. VIENNOT, *Enveloppes circumstellaires* ;

M. J. LEFÈVRE, *Astrophysique de laboratoire dans le domaine de l'étude des poussières interstellaires* ;

MM. J.-P. BALUTEAU, N. CORON et J. GAY, *Projets de recherches entrepris à Meudon dans le domaine de l'infrarouge, en vue des applications à la connaissance de notre Galaxie.*

ACTIVITÉS DES ÉQUIPES DE RECHERCHE

Le Professeur ayant quitté la direction de l'Observatoire de Nice, seuls sont mentionnées ci-après les activités des équipes parisiennes dépendant de la chaire.

M^{11e} Dumont et M. Pecker ont calculé le taux de polarisation du rayonnement continu au bord solaire par une nouvelle méthode et montré que les approximations faites précédemment (résultats de M^{11e} Débarbat) étaient valables au moins dans le visible. Les résultats obtenus montrent qu'il est nécessaire d'évaluer l'influence des raies (travail en cours).

M^{11e} Dumont a mis au point (pour l'ordinateur 360/65 de l'INAG) les programmes de M. Feautrier : calcul de modèles d'atmosphères stellaires en équilibre radiatif. Ce travail, terminé en décembre 1969, a fait l'objet d'un séminaire (début janvier 1970). Travail en cours : établissement d'un fichier de modèles d'étoiles de température effective de 5 000 à 30 000° ; amélioration du programme.

M^{11e} Dumont a étudié l'effet de blanketing dû à une raie hors ETL.

Le programme de M^{11e} Dumont : calcul hors ETL des raies de Ca II, a été utilisé par M. Mein pour l'étude dans la basse chromosphère du triplet infrarouge.

M. Hayli a poursuivi ses recherches sur le problème gravitationnel des N corps et ses applications à l'évolution dynamique des amas ouverts. Il a notamment fait une étude détaillée du phénomène d'évasion qui a permis de mettre en évidence le comportement dynamique des étoiles, très différent selon qu'elles s'évadent du fait des rencontres ou à cause de l'effet de marée galactique. Pour cette étude, il a utilisé les ordinateurs C-11 90-80 du Laboratoire de Physique atomique et moléculaire du Collège de France et IBM 360/65 de l'INAG à l'Observatoire de Meudon.

M. Hayli a passé sa thèse de Doctorat ès Sciences physiques le 13 décembre 1969 avec la mention très honorable, sur le sujet : Contribution à l'étude du problème gravitationnel des N corps. Application à l'évolution dynamique des amas ouverts. Le jury était composé de MM. Schatzman (président), Delhaye, Hénon (rapporteur), Nahon et Pecker.

COLLOQUES ET MISSIONS

Plusieurs membres des équipes de recherche ont participé à des colloques et des séminaires, et ont effectué des missions.

Colloques :

Colloque sur l'*Informatique scientifique*, Nice, décembre 1969 (M. Pecker).

Colloque sur les *Modèles d'atmosphères stellaires*, Observatoire de Paris-Meudon, janvier 1970 (M^{lle} Dumont).

Colloque *Dynamique-Transfert*, Nice, février 1970 (M^{lle} Dumont, M. Pecker).

Séminaires :

M. Hayli a participé à des séminaires à l'Observatoire de Genève (novembre 1969), à l'Observatoire de Lyon (novembre 1969), à l'École Polytechnique (janvier 1970) et à l'Observatoire de Nice (janvier 1970).

Missions :

M^{lle} Dumont : Observatoire de Haute-Provence, septembre 1969 (Observations à très grande résolution de la raie K du Ca II ; étoiles brillantes de type spectral G à M).

M. Hayli : Observatoire de Nice, novembre 1969 et mars 1970.

Observatoire de Haute-Provence, février 1970 (Photométrie en 8 couleurs des étoiles variables) (avec M^{lle} Morguleff).

M. Pecker : Observatoire de Haute-Provence, janvier 1970 (Observations de la raie K d'étoiles G au TGR, à la caméra électronique).

PUBLICATIONS

S. DÉBARBAT, S. DUMONT, J.-C. PECKER, *La polarisation du spectre continu au bord du disque solaire* (à paraître).

S. DUMONT, *Calcul du taux de polarisation du rayonnement continu* (*C. r. Acad. Sci.*, 1969, Paris, 268, p. 1678).

A. HAYLI, *Contribution à l'étude du problème gravitationnel des N corps. Application à l'évolution dynamique des amas ouverts* [Thèse de Doctorat d'Etat, 1969 (sous presse)].

— *Numerical experiments on the escape from non-isolated cluster* [*Astr. Astrophys.*, 1970 (sous presse)].

— *A Comparison of integrations in the gravitational N-body problem* [*Astr. Astrophys.*, 1970 (à paraître)].

— *Le système du monde (les doctrines cosmologiques des origines à Newton)* [*Science de l'Univers*, Ed. J.-C. Pecker, Hachette, Paris (sous presse)].

— *La cosmogonie du système solaire*, en collaboration avec M. FITREMANN (*Ibidem*).

— *Newton, mathématicien, physicien, astronome* (Seghers, 1970, Paris, p. 200).

— *Exercices de physique*, à l'usage des étudiants du P.C.E.M., 4^e éd. [SEDES, Paris (sous presse)].

J.-C. PECKER, *L'Observatoire de Nice (Contacts 3, 1969, Nice)*.

— *Les observatoires spatiaux* (Presses Universitaires de France, 1969, p. 180).

— *Editeur, Science de l'Univers* (ouvrage collectif) [Hachette, Paris (sous presse)].

— *Souvenirs de l'UAI : de Rome 1952 à Rome 1969* (*IAU Inf. Bull.*, 1970, n° 23).

— Préface de l'ouvrage de H. Andrillat, *Introduction à l'étude des cosmologies* [A. Colin, Paris, 1970 (coll. Intersciences)].

J.-C. PECKER, R.N. THOMAS, *Pour une nouvelle politique des publications* (*Atomes*, 1970, n° 272, p. 37).