

Astrophysique théorique

M. Jean-Claude PECKER, membre de l'Institut
(Académie des Sciences), professeur

COURS

ÉVOLUTION DES GALAXIES

III. Evolution dynamique des amas de galaxies

Au cours des années précédentes, on a d'abord traité de l'évolution d'une galaxie (considérée comme isolée) du fait de l'évolution stellaire (réactions thermonucléaires, pertes de masse), puis des nécessaires interactions entre la galaxie et le milieu qui l'entoure, interactions dont le rôle évolutif est aujourd'hui devenu évident.

L'étude des systèmes fait évidemment intervenir les interactions, principalement gravitationnelles, entre les galaxies au sein des groupes ou amas. Ce problème a une importance majeure, en raison de son incidence sur la détermination des âges des amas et des galaxies, donc sur l'évolution d'échelle cosmologique : il est en effet fondamental de savoir si les galaxies se sont formées avant de *se grouper en amas*, ou si les amas se sont au contraire, après leur formation, *fragmentés en galaxies*. Malheureusement, dans ce domaine, nous ne pouvons qu'amorcer l'étude d'un domaine difficile, et nous ne pourrions encore atteindre aucune conclusion sérieuse d'intérêt cosmologique.

I. Traitement classique d'un amas de N galaxies supposé en équilibre

Avant d'entrer dans la description classique de l'étude des amas, nous devons en effet prononcer une mise en garde sévère, qui s'applique, il faut bien le dire, à la quasi-totalité des recherches publiées sur ces sujets. *Rien* dans nos observations ne permet en effet d'affirmer que nous ayons affaire

à des systèmes stationnaires, ni même en évolution d'équilibre (succession d'états d'équilibre). Or le caractère d'évolution d'équilibre est presque toujours supposé réalisé. On verra quelles peuvent être les conséquences de cette hypothèse, certainement souvent abusive.

On peut dans une certaine mesure, comparer cette situation à celle de l'étude thermodynamique des milieux astrophysiques. Certes, dans ce domaine, on doit aboutir à des traitements entièrement hors équilibre (hors équilibre thermodynamique, notamment); mais des considérations telles que celles qui conduisent à chercher à rendre minimum le taux de génération d'entropie, par exemple, peuvent elles-mêmes être inapplicables, car il faudrait pour cela avoir affaire à des systèmes à physique *linéaire*; on sait que tel n'est que rarement le cas; les recherches « linéaires » manquent de réalisme, et la plupart des phénomènes astrophysiques doivent, à cet égard, être traités comme *non-linéaires*. *Mutatis mutandi*, la dynamique stellaire est peut-être, à grande échelle en tous cas, celle des amas de galaxies, également difficile. Mais nous suivrons un chemin banal, plutôt que les voies nouvelles qui commencent seulement à émerger de l'analyse critique de ces résultats classiques.

Considérons un système de N galaxies G_i de masse m_i . On supposera d'abord N invariable au cours de l'évolution. Les forces agissantes sont d'une part les forces gravitationnelles, d'autre part les forces dues aux interactions physiques (perte de masse, marées, etc.) plus ou moins équivalentes à des forces de viscosité.

En se limitant aux interactions gravitationnelles, on peut pousser assez loin le traitement de problèmes à N corps.

Ces hypothèses (N invariable, forces purement gravitationnelles, évolution d'équilibre), généralement faites pour traiter l'évolution d'un amas, sont très semblables à celles que font les théoriciens de l'évolution stellaire lorsqu'ils supposent valables les hypothèses de l'équilibre hydrostatique, ou de l'équilibre thermodynamique local. Nous les considérons évidemment comme provisoires.

La bibliographie du problème est considérable. Nous renverrons, à ce stade, aux ouvrages fondamentaux de Poincaré et de Chandrasekhar, aux symposiums de l'U.A.I. n° 69 et 79, à l'article de Bahcall dans *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1977, au cours de Hénon à Saas-Fee en 1973.

Le théorème de base (utilisé jusqu'à l'usure !), est évidemment le *théorème du Viriel*, dû à Poincaré et très général (valable même si les forces ne dépendent pas d'un potentiel). Nous le formulerons comme suit.

Soient N galaxies, chacune de masse m_i , de position définie par le vecteur $\mathbf{r}_i(t)$, et de vitesse $\mathbf{v}_i(t)$: pour chaque valeur de i on représente ainsi la galaxie par un point dans un espace de phase à 7 dimensions. Dans cet espace, le système est donc représenté par N points, admettant une fonction de distribution $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, m, t)$ représentant la distribution de la densité ρ , en nombre, de ces N points dans l'espace des phases. L'étude de la fonction $f(t)$ est celle de l'évolution du système en fonction du temps t . On utilisera bien sûr une densité lissée dans l'espace \mathbf{r}, t , et un potentiel gravitationnel U lissé également, afin d'éviter les singularités locales (coïncidant avec chaque galaxie) de ces fonctions. Les accidents des fonctions ρ et U non lissées ont une importance très grande dès lors que l'on veut tenir compte des « rencontres », c'est-à-dire de l'effet de ces puits locaux de potentiel sur les trajectoires des autres galaxies.

Si A est, dans l'espace \mathbf{r}, t , le centre de masse des N galaxies, le moment d'inertie du système, en A , est $J = \sum_{i=1}^{i=N} m_i r_i^2$. $J(t)$ est alors une fonction du temps, qui, comme $f(t)$, décrit l'évolution du système. *Sans préciser ici les échelles de temps*, et de façon donc *très qualitative*, on peut distinguer cinq situations typiques qui serviront à définir une nomenclature commode, sinon rigoureuse :

$$(a) \left. \begin{array}{l} \dot{J} = 0 \\ \ddot{J} = 0 \end{array} \right\} \text{« équilibre stationnaire »}$$

$$(b) \quad \ddot{J} = 0 \quad \text{« évolution d'équilibre »}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{J} > 0 \quad \text{« expansion »} \\ \dot{J} < 0 \quad \text{« contraction »} \end{array} \right.$$

$$(c) \quad \ddot{J} > 0 \quad \text{« explosion »}$$

$$\ddot{J} < 0 \quad \text{« implosion »}$$

C'est la condition d'évolution en équilibre, $\ddot{J} = 0$ qui permet d'écrire le théorème du viriel, qui n'est valide qu'à cette condition, et non dans le cas de l'évolution catastrophique $\ddot{J} \neq 0$. Nous parlerons dans ce cas d'« équilibre quasi-stationnaire » (pour le distinguer du cas $\dot{J} = 0$). On exprime facilement \ddot{J} sous la forme :

$$\ddot{J} = 4T + 2(-\sum_i \mathbf{F}_i \mathbf{r}_i)$$

où, dans le premier terme du second membre, T est l'énergie cinétique totale par rapport au centre de masse, et où la parenthèse est le *viriel* (négatif) W

des forces appliquées. Si les forces F_i dérivent d'un potentiel $U(r_i)$, on a $W = -k U$ (identité d'Euler, dans le cas où $U(r_i)$ est une fonction homogène de degré k par rapport aux r_i). Dans le cas de forces gravitationnelles, $k = -1$, si bien que l'on a $\ddot{J} = 4T + 2U$; l'équation $\ddot{J} = 0$ conduit donc à écrire :

(1)

$$2T + U = 0$$

qui caractérise l'équilibre quasi-stationnaire, et exprime le théorème (très classique) du viriel.

On comparera cette équation à l'expression de l'énergie totale du système $E = T + U$. Si $E > 0$, alors *a fortiori* \ddot{J} est positif, et il y a explosion. Si E est négatif, on peut se trouver dans tous les cas possibles pour le signe de \ddot{J} . Nous en concluons que la condition d'énergie négative est une condition nécessaire, mais non suffisante, de stabilité.

On peut bien entendu aborder ce problème d'autre manière. Ainsi l'écriture des équations du mouvement pour chaque galaxie, et l'écriture de la conservation de la quantité de mouvement, permettent de calculer la variation de la quantité $g = \sum_i \mathbf{p}_i \mathbf{r}_i$ ($\mathbf{p}_i = m_i \mathbf{v}_i$). On peut, en un temps τ quelconque calculer $[g(\tau) - g(0)]/\tau$ et montrer que cette quantité doit tendre vers zéro pour τ grand. Si les \mathbf{p} , les \mathbf{r} , et g restent toujours finis, alors il est facile de retrouver un théorème du viriel portant sur la *moyenne* des quantités T et U pendant un temps τ suffisamment grand.

Il est d'ailleurs bien clair que, dans une région bornée de l'espace, où les vitesses sont bornées, et où donc \dot{J} est borné, on retrouve le même résultat, (2), même si l'équation (1) n'est pas vérifiée en un instant donné :

$$(2) \quad 2 \langle T \rangle + \langle U \rangle = 0$$

Les causes d'erreur que l'on fait en appliquant le théorème du viriel sont en partie dues à ce que l'on néglige en pratique certaines forces, par exemple les forces dues aux marées, ou aux frictions visqueuses. Mais la source principale d'erreur vient sans doute de ce que l'on ne sait jamais si réellement, et même en moyenne, on a le droit d'écrire $\ddot{J} = 0$.

Temps de traversée

La connaissance des échelles de temps des phénomènes évolutifs affectant les amas de galaxies est fondamentale à la compréhension des applications à l'évolution de l'univers. On est amené à définir plusieurs « temps » dont

la signification physique est toujours en principe assez simple, mais l'estimation le plus souvent tendancieuse...

Si R est une dimension « typique » de l'amas, V une vitesse « typique » des galaxies dans l'amas, le « temps de traversée » est :

$$(3) \quad \boxed{t_c = R/V}$$

L'application du théorème du viriel peut se faire, à condition d'écrire

$$(4) \quad M = \sum_i m_i ;$$

$$(5) \quad T = \sum_i \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} M V^2 \text{ et}$$

$$(6) \quad -U = G \sum_{ij} \frac{m_i m_j}{r_{ij}} = G \frac{M^2}{2 R} \text{ ou}$$

$$(7) \quad -U = G \frac{N(N-1)}{2 R'} \langle m_i^2 \rangle$$

On a alors :

$$(8) \quad t_c = \left[\frac{2 R^3}{G M} \right]^{1/2}, \text{ avec}$$

$$(9) \quad V^2 = \frac{G M}{2 R}$$

On notera que ces équations *définissent* ce que nous avons désigné comme « typique ». Le sens de R ou de R' est assez peu clair ; ce n'est à strictement parler ni un rayon moyen, ni une distance moyenne entre deux galaxies de l'amas.

Mais l'utilisation de cette valeur « typique » de R intervient dans les déterminations. On peut vérifier la signification de la valeur R' définie par l'équation (7), en utilisant des distributions données, par exemple des galaxies disposées en réseaux tridimensionnels réguliers. Si N est le nombre des galaxies d'une configuration, et si L est le rayon de la configuration, supposée sphérique, on peut montrer que R (dédit de l'équation (6)) est à L dans un rapport qui décroît fortement avec N depuis la valeur 2 pour $N = 2$, jusqu'à la valeur $1/3$ pour N très grand. C'est de toutes façons, dès que N est assez grand, une valeur nettement plus élevée que celle de la distance $r_{ij\min}$ d'une galaxie à la plus proche des autres galaxies de l'amas...

L'utilisation, dans les applications, de la dimension mesurée approximative de l'amas sera dans son ensemble une assez bonne approximation.

On peut appliquer ces équations aux amas de galaxies, comme cela a été fait pour les amas stellaires. Pour les amas globulaires d'étoiles, on trouve

10^6 ans — un temps très inférieur à l'âge actuel des amas observés. Ici au contraire, pour le groupe local, avec $R = 0.6$ Mpc et $M = 10^{12} M_{\odot}$, on trouve $9 \cdot 10^8$ ans ; pour un amas plus important ($R = 3$ Mpc, $M = 10^{13} M_{\odot}$) on trouve $3 \cdot 10^9$ ans ; ces âges sont peut-être assez grands par rapport à l'âge présumé des amas, ce qui veut dire que le concept de stabilité est peut-être très abusivement utilisé. On peut montrer néanmoins (nous y reviendrons) que la stabilité d'une famille de N galaxies peut être atteinte assez vite ; mais cela ne saurait résulter des considérations simplistes concernant la valeur de t_c .

Temps de relaxation des amas de galaxies

Si l'on arrive à une époque de la « vie » de l'amas de l'ordre de plusieurs fois le temps de traversée, Poincaré (1911) et Jeans (1915) ont montré que $\delta f / \delta t = 0$; la fonction f est alors une fonction de 6 intégrales indépendantes du mouvement des galaxies (dans le présent contexte). Dans un tel système, on peut calculer les orbites typiques des « particules » — galaxies — ; elles ont la forme d'une rosette, entre une valeur maximum et une valeur minimum de la distance au centre de masse A ; le système est quasiment sphérique. On considérera, dans ce système quasi-stationnaire, ce qui arrive à *une* galaxie, les autres constituant des masses de champ. Notamment quel est l'effet d'une singularité du potentiel sur le mouvement de la galaxie considérée ? Cette rencontre produit évidemment une déflexion, et l'effet cumulatif des déflexions est appelé le phénomène de relaxation. [Notons que ces déflexions ne doivent pas être confondues avec des rencontres *physiques*, ou collisions : dans des amas stellaires, les véritables collisions sont négligeables (caractère hypercondensé et ponctuel des étoiles) ; dans un amas de galaxies, tel n'est pas du tout le problème, et les véritables collisions peuvent jouer un rôle]. Sans collisions, sans déflexions, f est une fonction, on peut le montrer, de seulement 5 intégrales conservatrices, indépendantes du mouvement du point : l'énergie E par unité de masse, le moment angulaire A par unité de masse et la masse m . Ceci n'est plus vrai s'il y a des déflexions dues aux rencontres. La fonction $f(E, A, m)$ est aussi une fonction de t . Une particule i suit dans l'espace (E, A) un mouvement brownien. Dans l'espace des phases déjà considéré (r, v, m) , considérons une petite région pendant un temps $\Delta t < t_c$. Des masses quittent la région, d'autres y entrent. Le terme $\left(\frac{\delta f}{\delta t} \right)_r \Delta t$ est non nul, et f (non nul) est modifié. L'effet des rencontres, proportionnel à la densité, est donc de détruire l'état stationnaire. On peut montrer qu'il y revient après un temps t_r (temps de relaxation), calculé pour la première fois par Jeans. La modification de vitesse, au cours d'une ren-

contre de deux galaxies, est aisée ; on peut calculer la valeur moyenne du temps qui est nécessaire à ce que la valeur moyenne $\langle \Delta v^2 \rangle$, pendant ce temps, soit de l'ordre de grandeur de la dispersion des vitesses v^2 . C'est cette valeur qu'on appellera le temps t_r de relaxation.

On trouve dans la littérature plusieurs expressions, presque équivalentes, de t_r . Le calcul dépend de plusieurs calculs de détail : l'un d'entre eux est celui de l'intégrale $\int dl/l$, où l est le paramètre d'impact dans les rencontres : il faut borner cette intégration et introduire une valeur minimum et une valeur maximum du paramètre d'impact ; l_{\max} sera le rayon de la configuration ; l_{\min} la valeur qui conduit à un changement complet de direction (v passe de $+v$ à $-v$) ; le rayon de la configuration est souvent pris égal à celui déduit de l'expression (6) : ce n'est pas évident. De plus le calcul de l_{\min} dépend de certaines hypothèses sur la distribution de densités dans la configuration. Les formules obtenues diffèrent par le numérateur — et nous ne nous en alarmerons pas trop, tant que nous ne cherchons (et nous devons nous limiter à cela !) que des ordres de grandeur. On trouve :

$$(10) \quad t_r = \frac{v^3}{8MG^2m \langle \varrho \rangle \Phi(N)} = 8 \cdot 10^5 \frac{N^{1/2}R^{3/2}}{m^{1/2}F(N)}$$

où $F(N) = \log N - 0.5$ (Spitzer)

$$= \log N - 0.45 \text{ (Chandrasekhar)}$$

$$= \log N \text{ (Hénon)}$$

Quoi qu'il en soit, le rapport t_r/t_c est de l'ordre de $N/(4\pi \ln N)$. On notera que ce rapport dépend fortement de N . Pour $N = 10$ (groupe) on trouve 0.5 ; pour $N = 100$ (petit amas), 2 ; pour $N = 1\,000$ (amas de galaxies important), 12.6. Pour les groupes de galaxies, le temps de relaxation est donc assez faible pour qu'un écart momentané à la stabilité ne soit pas une catastrophe ; c'est moins évident pour de grands amas de galaxies.

L'hypothèse d'une certaine stabilité des amas implique des âges de l'ordre de 10^{10} ans au moins.

Application du théorème du viriel

Si l'on connaît, dans un amas de galaxies, tous les membres de l'amas, leurs positions et vitesses respectives, alors la masse totale de l'amas peut se déduire sans mal de l'expression (1), une fois celle-ci explicitée. En revenant aux définitions (4), (5) et (6), on écrira :

$$(5) \quad 2T = \sum_i m_i v_i^2 = MV^2$$

$$(6) \quad -U = G \sum_{ij} \frac{m_i m_j}{r_{ij}} = \frac{G}{2} \frac{M^2}{R}$$

Mais la sommation sur i et j concernant des couples de N objets pris deux à deux, contient $N(N-1)/2$ objets, si bien que l'on peut aussi écrire, en utilisant (7) :

$$(11) \quad -U = \frac{N(N-1)G}{2} \langle m_i^2 \rangle \frac{1}{R'}$$

On aboutit de ce fait à deux expressions ; l'une à partir de (5) et (11) s'écrit :

$$(12) \quad M = \frac{N(N-1)}{2} G \langle m_i^2 \rangle \frac{1}{V^2 R'}$$

L'autre, à partir de (5) et (6) :

$$(13) \quad M = \frac{2}{G} R V^2$$

La différence entre ces deux expressions vient de l'intervention dans (6) de la masse *totale de l'amas*, dans (7) de la masse *moyenne d'une galaxie* ; le sens de R et celui de R' sont légèrement différents dans la mesure où (6) implique l'approximation $N(N-1) \cong N^2$; pour des valeurs grandes de N , R et R' tendent l'un vers l'autre.

Mais ces expressions ne peuvent encore s'appliquer directement. Une complication vient de ce qu'on ne connaît que la vitesse *radiale* v_{ri} des galaxies G_i . De même on ne connaît que la valeur *projetée sur le ciel* des distances mutuelles r_{ij} . Enfin, la distance des amas n'est pas toujours déterminée objectivement ; et la valeur réelle des r_{ij} projetés se déduit donc de leur mesure angulaire et de la valeur H du rapport de Hubble.

Les expressions (12) et (13) doivent donc être transformées. Pour ce faire, on supposera d'abord une distribution isotrope des vitesses, ce qui est sans doute correct pour les grandes valeurs de N , peut-être moins évident pour les petites ; le problème de la projection des r_{ij} est plus délicat, et l'on a vu des erreurs dans la littérature. Certains (c'est inexact !) supposent simplement que $\langle r_{ij}^2 \rangle = \langle r_{mes}^2 \rangle \times 3/2$, r_{mes} étant la valeur projetée de r sur le plan du ciel, en admettant que la valeur quadratique moyenne de $\langle r_{ij}^2 \rangle$ se distribue également entre les trois composantes. Mais si l'on considère l'angle θ du plan du ciel et du vecteur \mathbf{r} , il faut admettre que la distribution de θ est parfaitement isotrope, et l'on aboutit alors à :

$$\langle r_{ij} \rangle = \langle r_{mes} \rangle \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

La relation utilisable est donc, après transformation, la suivante :

$$(12)' \quad M \text{ (amas)} = \frac{G N (N - 1) \sqrt{2}}{6 \sqrt{\pi}} \langle m_i^2 \rangle \frac{1}{\langle v_{\text{rad}}^2 \rangle \langle r_{\text{mes}} \rangle}$$

où la masse m_i est déduite des relations masse-luminosité connues pour les galaxies.

On pourrait aussi écrire, plus simplement :

$$(13)' \quad M = \frac{6}{G} \langle r_{\text{mes}} \rangle \sqrt{\frac{\pi}{2}} \langle v_{\text{rad}}^2 \rangle$$

C'est évidemment cette relation, très simple en principe, qui est le plus couramment utilisée ; on désigne souvent cette masse d'amas par M_{VT} (masse fournie par le théorème du viriel), par opposition avec la masse $M_{\mathcal{L}}$ fournie par l'application stricte de la relation masse-luminosité aux galaxies de l'amas, dûment dénombrées et cataloguées.

On aurait cependant tort de croire que la relation (13)' ne fait intervenir aucune hypothèse sur la masse des galaxies de l'amas, dans la mesure même où l'on utilise ces masses m_i, m_j pour calculer R ; mais on peut considérer qu'alors interviennent seulement les *rappports* des masses à leur somme, ou qu'en d'autres termes, le M du premier terme est M_{VT} tandis que dans le second, par l'intermédiaire de $\langle r_{\text{mes}} \rangle$, c'est $M_{\mathcal{L}}$ qui intervient.

De toutes façons, il est nécessaire de connaître une relation masse-luminosité pour les galaxies, que ce soit pour calculer M_{VT} par la relation (13)' ou, directement, $M_{\mathcal{L}}$.

II. La relation masse-luminosité concernant les galaxies

La relation M - \mathcal{L} pour les galaxies est appliquée très généralement et pourtant, il faut reconnaître qu'elle n'est déterminée correctement qu'à partir des galaxies proches, et de façon assez médiocre. De façon générale, on trouvera presque toujours une différence entre la masse des galaxies déterminée par la dynamique pure, et celle déterminée par des évaluations, dénombrements stellaires, etc. En d'autres termes, le phénomène de la « masse manquante » (la masse dynamique étant supérieure à la masse dénombrée) est général, pour des galaxies individuelles.

Ce phénomène a été mis en évidence depuis des années (on peut citer le travail de F. Nahon) dans *notre propre Galaxie*. L'étude seule du voisinage solaire, au sein de notre Galaxie ne pose guère pourtant de problèmes graves. D'une part, on décompte les étoiles plus brillantes que la magnitude 15,

et d'un auteur à l'autre, on trouve pour ces astres, des densités allant de $0.046 M_{\odot}/\text{pc}^3$ (Wielen) à 0.064 (Luyten), en utilisant la relation masse-luminosité établie pour les étoiles froides et massives et la fonction de luminosité observée ; les étoiles « de faible masse » (naines rouges) contribuent pour $0.02 M_{\odot}/\text{pc}^3$; les naines blanches pour 0.004 à $0.007 M_{\odot}/\text{pc}^3$; au total, sous forme stellaire, on trouve donc 0.05 à $0.09 M_{\odot}/\text{pc}^3$. Dans le milieu interstellaire, $0.03 M_{\odot}/\text{pc}^3$ se trouve à l'état d'hydrogène neutre, et l'on considère comme négligeable (mais ?..) les autres composantes, si bien que les valeurs inspirées de l'observation sont $0.08 < \rho < 0.12 M_{\odot}/\text{pc}^3$. L'analyse dynamique qui tient compte de la distribution des vitesses et de la variation de la densité avec la distance au plan galactique, aboutit à une valeur de $0.14 M_{\odot}/\text{pc}^3$. La luminosité (stellaire) par pc^3 étant estimée à 0.049 à $0.063 \mathcal{L}_{\odot}/\text{pc}^3$, le rapport M/\mathcal{L} est de 1.1 à 2.4 à partir des dénombrements, de 2.3 à 3.3 à partir de la dynamique. Un facteur d'incertitude est de plus lié à la contribution des étoiles jeunes et protoétoiles. On voit que l'accord n'est pas très mauvais...

Mais une autre détermination est issue de la rotation de la Galaxie, telle qu'on peut la déterminer à partir des observations de l'hydrogène neutre à 21 cm. La vitesse de rotation du Soleil (par rapport aux galaxies « lointaines ») varie, d'un auteur à l'autre, de 200 à 300 km/sec. Cette valeur, associée à la distribution mesurée de masses dans la galaxie conduit à une valeur de la masse assez élevée ; on a en effet $M/\mathcal{L} = 70 \pm 20$, une valeur cinquante fois supérieure à celle qui règne au voisinage du Soleil — ce qui prouve simplement la grande concentration de matière peu brillante dans les régions centrales d'une galaxie.

Cette difficulté montre bien aussi la nature des difficultés que l'on rencontrera pour les autres galaxies, suivant que la courbe de rotation sera déterminée à partir de régions très étendues ou seulement des régions centrales des galaxies étudiées.

La *rotation des spirales* est connue, depuis Wolf et Slipher (1914) à partir des spectres optiques ; la radioastronomie a ajouté des informations sur les régions plus externes. Actuellement, une cinquantaine de galaxies ont des courbes de rotation assez bien connues (voir Faber, Gallagher, 1979).

Dans le cas des *galaxies elliptiques*, le problème est plus difficile, la rotation étant plus lente ; on fait appel au théorème du viriel, $\langle v^2 \rangle$ étant identifié à la dispersion des vitesses le long de la ligne de visée, ce qui suppose cette dispersion constante dans la galaxie, ce qui est loin d'être évident, et ce qui est même en général faux. La distribution d'éclat permet de calculer le viriel, en supposant qu'elle est liée à la distribution de masse ; la luminosité varie comme, à peu près, la puissance $1/4$ du rayon ; le

potentiel U est estimé à $0.33 G M^2 R_{1s}$, où R_{1s} est le rayon de l'isophote entourant les régions centrales, responsables de la moitié de la luminosité totale, et supposées contenir la moitié de la masse totale. D'autres méthodes plus raffinées ont été utilisées, et nous renvoyons à l'article de revue cité.

Le résultat clair, à ce stade, est que les elliptiques ont une valeur de M/L de l'ordre de 20, souvent inférieure dans leur région centrale, contre une valeur de l'ordre de 10 pour les SO. La valeur trouvée pour les autres spirales est nettement plus faible, et une relation assez irrégulière entre le rapport M/L et le type morphologique galactique est assez bien établie, la valeur moyenne semblant passer de 12-15 pour les O, Oa, à 5 pour les Sc et 2 pour les Irr.

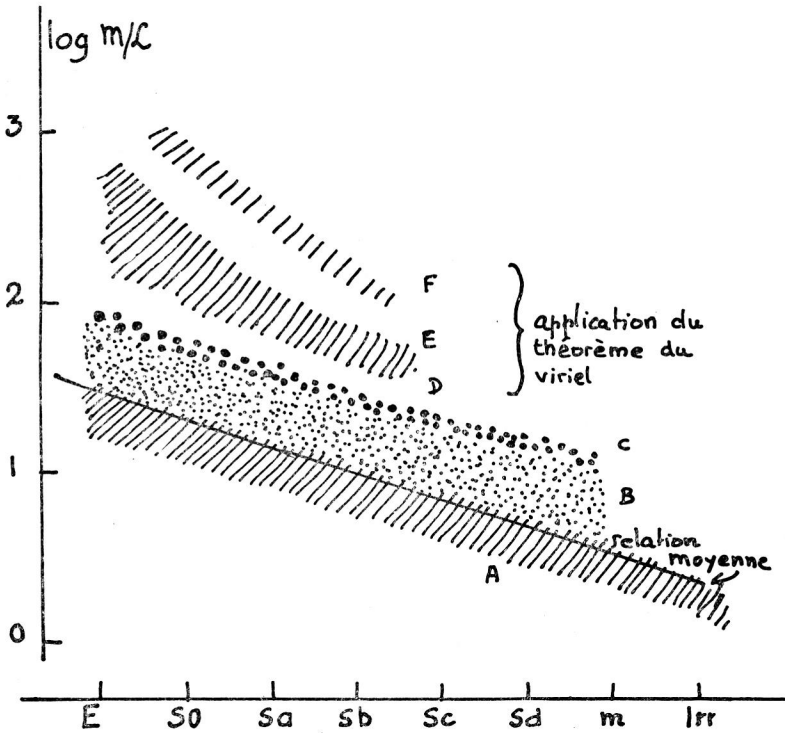


FIGURE 1 : La relation Masse-Luminosité pour des galaxies et des groupes de galaxies.

En ordonnées le rapport $K = \log M/L$ (unité $M/L = 1$ pour le Soleil). En abscisse, le « type morphologique » des galaxies.

On notera la différence entre les déterminations issues de mesures de rotation (A), ou de mesures orbitales (B, et C pour les galaxies en interaction physique) et celles qu'indique la stricte application du théorème du viriel (D groupes pauvres, E groupes riches, F amas riches). Nous avons représenté ici seulement des données très schématisées, sans nous référer aux différentes publications, et en tenant compte de leur dispersion.

Pour les étoiles binaires, les rapports M/\mathcal{L} peuvent être déterminés grâce à l'étude du mouvement orbital. Le théorème du viriel, dans ce cas particulier, est essentiellement identique aux lois de Képler... Mais pour les *galaxies binaires*, on ne dispose pas du mouvement orbital, seulement de la valeur de la vitesse radiale, en un point donné de la trajectoire, des deux galaxies étudiées. Il est nécessaire de supposer le système gravitationnellement lié, que l'interaction est identique à celle de deux points matériels (donc négliger les effets de marée), de supposer qu'il n'y a ni matière intergalactique associée, ni interaction avec des tiers corps, il faut enfin faire quelques hypothèses sur l'inclinaison de l'orbite, ou sur la distribution des inclinaisons d'orbites, ainsi que sur la distribution des phases.

De nombreux auteurs ont abordé ces études avec succès, en classant les galaxies étudiées à partir de critères morphologiques (voir l'article de revue de Karachensev, 1977). Après discussion, le rapport M/\mathcal{L} est de 18 ± 5 pour les 148 couples les mieux connus. Une séparation entre elliptiques, spirales, etc., montre à nouveau la tendance (déjà évoquée) obtenue à partir des masses déterminées par la mesure des rotations et des dispersions internes des vitesses. Pour les galaxies formant des couples sans interaction mutuelle évidente, on trouve, pour les elliptiques, $M/\mathcal{L} = 12 + 4$, et pour les spirales, $M/\mathcal{L} = 7 + 3$; d'autres auteurs trouvent des valeurs un peu plus fortes (d'un facteur 2 à 3); pour les galaxies en interaction évidente (jets, effets de distorsion...), le rapport M/\mathcal{L} peut dépasser 100.

On notera le rôle que certains auteurs (comme Einasto) attribuent à des halos importants (0.1 à 10 Mpc) autour des composantes, voire de l'ensemble de deux composantes, la valeur importante de la masse trouvée dans certains cas. Mais alors (et ce ne semble pas être le cas), le rapport M/\mathcal{L} devrait croître avec la distance qui sépare les deux composantes...

III. Application du théorème du viriel aux amas de galaxies

Nous revenons donc aux expressions précédentes (12)' et (13)'. Elles supposent la mesure, ou au moins l'estimation, d'un certain nombre de quantités relatives à l'amas.

La première est la définition même de l'amas par N objets bien déterminés (plutôt que $N - 1$ ou $N + 1$: telle galaxie est-elle, ou non, « membre » de l'amas ? Et comment définir cette appartenance sans ambiguïté ?). Un exemple est celui du Quintet (peut-être Quartet) de Stephan, étudié en 1978 au Laboratoire d'Astrophysique Théorique du Collège de France par Friès et Metz. Soit N le nombre d'objets définissant un amas donné, et considérons un $(N + 1)$ -ème objet, dont l'appartenance est douteuse. Soit M_0 , v_0 , r_0 les

caractéristiques de cet objet par rapport au centre de masse A de l'amas de N objets. Sans détailler ici les calculs, il vient pour la masse du viriel (équation (13)') :

$$M_{N+1} = M_N \frac{1 + q/N\alpha}{1 + 2p/(N-1)\alpha}$$

où $\alpha = (M/N)/m_0$; $q = v_0^2 / \langle v^2 \rangle$; $p = \langle r \rangle / r_0$; et où l'on a supposé $m_0 < M$.

On en déduit que l'erreur faite en négligeant le N + 1-ème objet est de :

$$\Delta M / M_{VT} = \frac{q - 2p}{N\alpha} \quad (\text{si } N \text{ est assez grand}).$$

Pour $p = q = \alpha = 1$, $\Delta M = -M/N$: le N + 1-ème objet appartient clairement à l'amas. Pour $p = q = 0$ au contraire, l'objet doit être considéré comme isolé (essentiellement, r_0 est très grand).

L'exemple du Quintet (ou Quartet !) de Stephan est intéressant. L'objet NGC 7320 a un décalage spectral 8 fois plus faible que celui des 4 autres objets. L'hypothèse « sage », c'est qu'il est proche, et que le Quartet est lointain ; une hypothèse moins sage c'est que les 4 objets les plus affectés par le décalage sont à une distance non cosmologique, la cause du décalage supplémentaire étant à chercher ; mais les 5 objets peuvent alors être associés physiquement et constituer un véritable Quintet. Si l'amas est supposé en équilibre à 10 Mpc (distance cosmologique de NGC 7320), on arrive à un rapport M/\mathcal{E} de l'ordre de $2 \cdot 10^5$, peu vraisemblable. L'hypothèse sage, au contraire, aboutit à une valeur de 10, plus raisonnable.

On voit l'importance de clairement discuter, dans chaque cas, les valeurs introduites dans les calculs.

Quoi qu'il en soit, de nombreux auteurs, prenant dûment leurs précautions, ont appliqué aux amas de galaxies le théorème du viriel et ont systématiquement comparé la masse du viriel M_V à la masse $M_{\mathcal{E}}$ déduite des dénombrements et de l'application, à ces dénombrements, de relations raisonnables.

Un résultat général est que M_{VT} est supérieur à $M_{\mathcal{E}}$: une masse non directement visible existe : c'est la « *masse manquante* ».

Si l'on désigne par $K = \log k$ le logarithme du rapport $M_{VT}/M_{\mathcal{E}}$, on trouve pour divers groupes, des relations entre K et diverses caractéristiques physiques de ces groupes. Ainsi K varie-t-il de -0.5 à +2.8 (Rood et Dickel), mais pas au hasard : le nombre k semble proportionnel à $R^{1.1}$, à $V^{1.5}$: les groupes « lâches » semblent « manquer de masse » plus que les groupes serrés ; les groupes à forte dispersion des vitesses sont aussi ceux qui « manquent » le plus de masse. Mais des effets de sélection n'expliquent-ils pas un peu ces résultats ? Ainsi, les groupes lâches peuvent être mal dénombrés,

et ceci peut suffire ; en revanche le fait que l'interaction (favorisée dans les amas serrés) semble augmenter la masse du viriel, joue dans l'autre sens... La valeur de la constante de Hubble influence la valeur de la dispersion des vitesses dans le groupe, et si le groupe est en expansion, cette dispersion prend un sens qui n'est plus guère celui du viriel... Mais cette discussion ne permet guère d'expliquer le comportement observé de la « masse manquante » en fonction des propriétés du groupe.

On notera, entre divers auteurs, des divergences intéressantes. Ainsi Materne et Tammann trouvent-ils systématiquement des effets plus faibles que, par exemple, Rood et Dickel. Pourquoi ? Materne et Tammann critiquent les données mesurées, et sélectionnent différemment les membres des groupes. Selon eux, la majorité des groupes est stable et le coefficient k est assez proche de l'unité pour que la différence soit attribuée à des causes accidentelles et à la dispersion des données, ou à des éliminations insuffisantes d'objets du champ — mais pas nécessairement à l'existence d'une masse manquante.

Une remarque intéressante est faite par Gott et Turner. Ils notent la valeur élevée de K pour les *amas* riches (et retrouvent incidemment la différence obtenue directement entre les elliptiques et les spirales isolées). Pour les amas riches, K a une valeur moyenne de 200, pour les pauvres de 65 seulement.

Un essai intéressant est celui d'Aarseth qui calcule, par simulation numérique, le comportement de N corps, et cherche, en modifiant les paramètres du calcul, à faire coïncider les modèles obtenus pour la distribution des vitesses, etc., avec les modèles observés. Les simulations montrent que dans le cadre des modèles usuels d'univers, on arrive sans mal à faire coïncider le comportement théorique des amas et les observations.

Le comportement des *très grands amas* (Coma, Virgo) est encore plus excessif. Depuis longtemps, Zwicky avait trouvé pour Virgo $K = 500$. Pour A194, on trouve 36, pour Coma 170. On notera que ces amas contiennent de nombreuses galaxies elliptiques, que les mesures faites en rayons X prouvent l'existence de 10 % (au moins) de masse sous forme de gaz intergalactique ionisé...

Quoi qu'il en soit, il y a, pour presque tous les auteurs, une masse manquante ($k > 1$) associée à certaines caractéristiques du groupe ou de l'amas. Les explications données dans la littérature sont nombreuses. Les unes (Zwicky par exemple) pensent à une composante neutronique très importante ; d'autres à des étoiles faibles non détectées, ou à des poussières, planètes, comètes... des espaces interstellaires ou intergalactiques. Une théorie très « à la mode » est l'intervention (en nombre *ad hoc* !) de « trous noirs ». Nous penserions plutôt que les mesures montrent simplement (et sans cette « nouvelle physique » que constituent les formes modernes de la théorie des

trous noirs) que dans l'univers réel, les amas, pas plus que les galaxies, ne sont dans un état proche de l'équilibre.

A ce stade, peut-on rappeler la discussion initiale portant soit sur l'équilibre du viriel, soit sur l'équilibre énergétique? Dans le plan U, T , les droites $2T + U = \text{constante}$ (dont la droite d'équilibre quasi-stationnaire $2T + U = 0$) et les droites $E + U = \text{constante}$ forment deux réseaux. La droite $2T + U = 0$ coupe en P toute droite D telle que $T + U < 0$; en ce point P , il y a à la fois équilibre quasi-stationnaire, et système d'énergie négative. L'énergie étant conservative, tout système se déplace, au cours de son évolution, sur la droite D . Mais on peut montrer (A. Hayli, communication privée) que l'équilibre est stable; le système reviendra en P très rapidement s'il n'y est pas, ce qui veut dire qu'un amas tend à ajuster ses conditions (dimensions...) pour satisfaire au théorème du viriel, qui définit un équilibre stable. Le temps de retour au viriel est de l'ordre de t_c — ce qui rend important le calcul de cette quantité : et ce qui, dans le cas des amas de galaxies, montre que, peut-être, t_c est-il assez grand pour que l'on ne puisse effectivement pas atteindre l'équilibre du viriel, malgré le théorème de stabilité, pendant la durée de vie supposée de l'Univers.

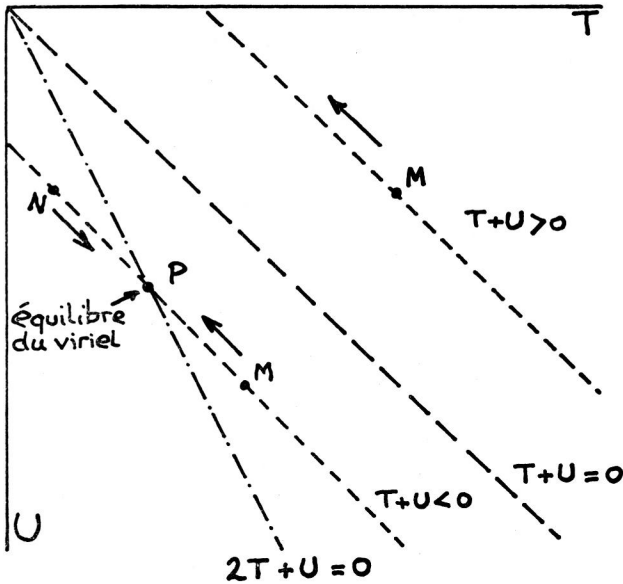


FIGURE 2 : Systèmes à énergie positive et négative, et systèmes stables au sens du théorème du viriel.

L'évolution du système, à partir de points tels que M ou N vers P est rapide; les oscillations autour de P semblent rapidement amorties, en un temps comparable au temps de traversée. Dans le cas de systèmes à énergie positive, le système représenté par le point M évolue vers la dispersion ($U > 0$).

IV. *Le calcul de l'évolution des amas considérés comme des ensembles de N galaxies*

Nous ne partons plus ici de la considération de l'équilibre quasi-stationnaire, mais nous essayons de voir comment évolue un amas de N galaxies. Le problème est celui, général, des N corps, appliqué lorsque N est de l'ordre de 10 à 1 000. De très nombreux travaux y ont été consacrés. Quelles que soient les méthodes choisies, analytiques ou numériques, on peut montrer que les régions centrales (noyau) se contractent sous l'effet des rencontres nombreuses. L'évolution fréquente du noyau vers des systèmes du genre « trapèze » ou « binaire serrée », n'est qu'un aspect de son effondrement. On peut expliquer ce comportement de façon schématique, en disant que les collisions « chauffant » le gaz des galaxies dans le noyau, celui-ci perd de l'énergie par dissipation, se contracte donc, et se « réchauffe » encore, comme simple conséquence du théorème du viriel. L'énergie négative du système est donc prise en charge par le noyau. L'enveloppe, elle, peut prendre une énergie positive, au cours de ce processus évolutif ; et elle aura tendance à la dispersion. Ces travaux permettent de décrire un amas comme on décrit une étoile : au centre, une source d'énergie, entourée de couches au sein desquelles un mécanisme de transfert d'énergie joue un rôle important, aux échelles de temps impliquées par la durée de vie probable des amas ; le mécanisme de transfert de l'énergie est alors, comme l'a fait remarquer Hénon, contrôlé non par la singularité centrale, mais par l'ensemble du système.

Cette remarque explique *a posteriori* pourquoi la méthode de Monte-Carlo, par contraste avec l'intégration numérique des N mouvements, ne donnait pas, dans les premières applications, de bons résultats : pour y arriver, il fallut introduire une source centrale d'énergie.

On notera qu'un amas n'est pas isolé, et que ces problèmes dynamiques se doivent de tenir compte de l'existence d'autres amas autour de lui ; ceci doit augmenter l'instabilité des régions extérieures des amas ; on doit sans doute aboutir à la théorie (d'importance cosmologique, compte tenu de la durée des phénomènes en jeu) d'un « vent d'amas galactique » — similaire, *mutatis mutandi*, au « vent stellaire » et au « vent galactique ».

Il n'est pas exclu qu'un traitement de nature thermodynamique ne se révèle le plus approprié dans ces gigantesques familles, tout comme dans l'étude des milieux continus du laboratoire — ou celle des étoiles.

V. *Définition objective des amas et groupes de galaxies*

Nous avons abordé, à la fin du paragraphe précédent, le fait que l'existence de structures autour des amas pouvait contribuer à leur instabilité.

La distribution des galaxies dans l'univers n'est pas très simple. L'existence de certains des amas est incontestable, même si l'on peut, dans des cas particuliers, ne pas être très sûr de l'appartenance à tel amas de telle ou telle galaxie. Mais celle des superamas est contestable — d'autant que la différence de densité moyenne entre une condensation et le milieu extérieur à cette condensation décroît sensiblement à mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie universelle des condensations de matière (étoile dans milieu interstellaire ; galaxie dans milieu intergalactique ; amas de galaxies dans milieu interamas...).

S'il importe donc de prendre d'extrêmes précautions quand il est question des superamas, il n'en reste pas moins que la définition des groupes et des amas pose elle-même des problèmes. Où s'arrête tel amas ? Deux amas voisins peuvent-ils, ou non, être considérés comme un seul amas ?.. A cette question, on peut apporter plusieurs réponses.

Des simulations numériques peuvent apporter des éléments d'appréciations utiles. On pourrait par exemple considérer les amas comme résultat de processus statistiques ; des constructions variées proposées par Paul Lévy, par exemple, et systématisées par Benoît Mandelbrot, suggèrent que les amas pourraient bien ne résulter que de variations aléatoires d'une distribution sans groupements physiques. En poussant cette suggestion à la limite, il n'y aurait pas d'amas réel ; ou, du moins, leur origine aurait un caractère peu astrophysique. Mais d'autres techniques montrent au contraire la réalité des amas, leur réalité physique.

Deux articles récents (Materne, 1978, Paturel, 1979) éclairent cette question d'une façon intéressante.

On considère une population Π de N éléments, caractérisés chacun par m paramètres (position, vitesse...). Peut-on trouver une partition Γ_k de cette population en k classes $Q_1 \dots Q_k$? Autrement dit, N galaxies données peuvent-elles être réparties entre k amas, d'une façon non ambiguë ?

Les auteurs éliminent l'idée d'une intersection non nulle entre deux classes ; ils éliminent aussi l'introduction d'amas « vides » ; en d'autres termes, la partition est exhaustive. Le nombre k est, *a priori*, cependant, inconnu. L'idée est de partir d'une partition initiale, Γ_{k_0} , qui peut être tirée de l'intuition du chercheur, et de l'améliorer en appliquant correctement des critères bien choisis. On évaluera pour chaque élément Q_i de Γ_{k_0} la dispersion, définie d'une façon convenable (nous renvoyons à la littérature) ; et on cherchera, en changeant l'appartenance de telle ou telle galaxie à tel ou tel amas, à minimiser la somme des dispersions étendue à la partition entière.

Ceci étant fait, un autre critère permet, comme le suggère Materne, de grouper deux éléments de la partition pour passer à une partition d'ordre hiérarchique supérieur (de Γ_k à Γ_{k-1} à $\Gamma_{k-2} \dots$ etc.), jusqu'à ce qu'on

arrive à une partition ne contenant plus qu'un seul élément. Le critère de fusion de deux amas, permettant cette opération, peut être aussi défini de façon très diverse, à partir des dispersions, ou à partir des distances entre les amas de la partition de rang k . On aboutit à un « dendrogramme », représentation graphique du système hiérarchisé de partition. L'application de cette méthode à des régions choisies sans idée préconçue, aboutit à un nombre d'amas *a priori* indéterminé, et qui dépend de l'ordre de la partition hiérarchique auquel on a décidé de s'arrêter. Un test physique du choix de cette valeur limite de k est donc nécessaire. Materne cherche à voir si les vitesses moyennes des amas sont corrélées avec des critères indépendants de distance de ces amas (loi de Hubble prise comme test) ; il cherche à vérifier que les valeurs de t_c sont inférieures à l'âge de Hubble (si elles sont supérieures, l'amas est instable — dans l'hypothèse de l'univers du Big Bang —) ; il cherche à vérifier que les amas sélectionnés ne sont pas d'énergie positive. Un résultat assez remarquable, sur la région étudiée par Materne, est que la fragmentation la plus grande possible (raisonnablement) de 39 galaxies de la région de Léo aboutit à 5 groupes, et seulement 4 galaxies isolées ; mais sur ces 5 groupes, 3 seulement ont une énergie clairement négative...

La technique de Paturel est tout à fait différente. Il construit ses dendrogrammes par le haut et non par le bas... On part d'un seul ensemble, que l'on scinde en 2, 3 ... k morceaux. On passe directement de la partition Γ_k à la partition suivante Γ_{k+1} : pour cela on détermine l'élément le plus distendu de cette partition Γ_k , et on le scinde entre un ou plusieurs des autres éléments. Bien entendu, cette progression utilise des critères objectifs qui définissent le caractère « distendu » des amas, et l'attraction exercée par tel ou tel amas sur les éléments de l'amas à scinder. Ici aussi, le choix du niveau k auquel on arrêtera la fragmentation est difficile à faire : on remarque que le passage d'un certain niveau k à un autre $k + 1$ n'affecte qu'un très petit nombre de galaxies : c'est à ce niveau « stable » qu'on arrêtera la participation.

Ce genre de méthodes est très prometteur, car il doit permettre de mettre en évidence des groupements réellement physiques, et éviter que l'on ne considère comme homogène des familles que seul le hasard constitue sur le ciel. Mais il serait bon de veiller à ce que les tests effectués sur la partition choisie infinie d'un échantillon donné, ne prennent pas un appui trop grand sur des hypothèses liées à la stabilité des amas (des amas instables peuvent être réels !), ou à la durée de vie des amas par rapport à celle de l'univers, que l'on ignore, ou au modèle de cosmologie que l'on pourrait préférer...

VI. Structure à grande échelle de l'univers

Nous avons abordé, dans les sections précédentes de ce cours, le problème très fondamental de l'équilibre des groupes et amas de galaxies, éléments

les plus élevés de la hiérarchie universelle que nous puissions étudier d'une façon suffisamment systématique. De l'existence, suggérée par de nombreux auteurs, d'une « masse manquante », nous aurions plutôt tendance à conclure que ces groupes et amas sont tous loin de l'équilibre du viriel, malgré la rapidité avec laquelle les amas peuvent tendre vers cet équilibre.

Pour aller plus loin, il conviendrait, c'est évident, de se situer dans le cadre d'une cosmologie existante, et d'en déduire ce qu'elle peut prévoir quant à l'évolution des groupes et amas de galaxies.

Pourtant, des éléments importants continuent à être apportés par l'observation sur les groupements en amas, sur la distribution des galaxies ou des quasars, et ces informations ne laissent pas de suggérer d'importantes remarques aux cosmologistes. Sans entrer donc ici dans les considérations à proprement parler cosmologiques, nous voudrions mentionner rapidement ces quelques faits nouveaux — les derniers à avoir reçu le statut de « faits d'importance cosmologique » (une notion dont le caractère subjectif n'échappera évidemment à personne).

La première question à poser est, à ce stade : Existe-t-il des amas d'amas (ou superamas, ou supergalaxies) ? Existe-t-il même, au delà des superamas, des échelons supérieurs de la hiérarchie ?

La découverte de la Supergalaxie (superamas local) est issue de travaux déjà anciens de Holmberg (1937) et de Reiz (1941), et est devenu indiscutable après ceux de Vaucouleurs (1953). C'est un groupe aplati de galaxies de champ, de groupes, et d'amas, centré à peu près autour de Virgo. Ce disque a un diamètre de 20 à 30 Mpc, une épaisseur de 10 à 15 Mpc ; il est renflé en ses régions centrales. La stabilité ou l'évolution dynamique de ce superamas a été étudiée de façon très partielle ; on connaît à peu près bien le mouvement de notre Galaxie par rapport au reste de la Supergalaxie, et l'on suppose le superamas animé d'un mouvement combiné de rotation et d'expansion. On notera que t_c peut être estimé, comme nous l'avons fait ci-dessus pour les amas, et l'on trouve un temps de l'ordre de 10^{11} ans, ce qui tendrait à prouver que, si l'on se trouve dans l'univers de la cosmologie expansionniste classique après une grande explosion, le « big bang », le superamas local est encore très loin de l'équilibre. Dans cette cosmologie, ou dans toute autre, nous serions tentés de croire que toute hypothèse d'équilibre ou de stationnarité est sans aucun fondement.

On a étudié beaucoup les propriétés des galaxies et des amas au sein du superamas local, en fonction de leur position dans ce superamas ; les résultats (nous renvoyons, pour plus de détails, à la littérature) mettent en évidence, néanmoins, le caractère physique du superamas local. Il ne s'agit pas d'une fluctuation statistique dans le nombre des amas.

D'autres superamas ont été mis en évidence. L'analyse actuelle permet d'en considérer au moins trois comme réels : le nôtre, celui de Persée, et celui d'Hercule. Leur luminosité est de l'ordre de 10^7 à $5 \cdot 10^7 \mathcal{L}_{\odot} / \text{Mpc}^{-3}$. Nous ne pousserons pas plus loin cette discussion, prématurée actuellement.

A très grande échelle toutefois, le contraste entre les condensations de matière et les milieux qui les entourent étant de plus en plus faible, l'idée d'un univers qui serait, à la limite, homogène et isotrope, s'est imposée à la plupart des cosmologistes (peut-être à tort !); Peebles fait néanmoins de l'existence des amas une véritable « pierre de Rosette » de la cosmologie ; en étudiant la distribution des galaxies, il a mis en évidence d'intéressantes propriétés, grâce à l'exploration des catalogues de galaxies jusqu'à la magnitude 19 (catalogue de Shane-Wirtanen). Le calcul des corrélations au sein de cette distribution de galaxies, par tranche de distance, montre que le coefficient ξ , qui mesure ces corrélations,

$$\xi(r) = [\langle \rho(\mathbf{x}) \rho(\mathbf{x} + \mathbf{r}) \rangle / \langle \rho^2 \rangle] - 1$$

peut se représenter (jusqu'à une dizaine de Mpc) par une loi $\xi = (r_0/r)^\gamma$, où $r_0 = 5 h^{-1} \text{Mpc}$ (*) et où $\gamma = 1.77 \pm 0.04$; ce coefficient est essentiellement le même que celui de la décroissance hiérarchique de de Vaucouleurs, qui exprime la densité sous la forme $\rho = k d^{-1.7}$ (on reconnaîtra ici l'intervention d'un « nombre fractal » égal à $D = 1.3$ dans la distribution de matière ; voir Mandelbrot). Mais à des distances plus élevées, le coefficient de corrélation tombe au-dessous de toute valeur significative, ce qui peut signifier simplement que l'échantillon est trop petit. Les problèmes posés par la confusion des diverses sortes de galaxies ne sont pas simples ; leur degré d'évolution, peut-être fonction de la distance, complique encore l'interprétation des résultats.

Une caractéristique importante de la distribution des amas, y compris ceux dont le groupement suggère un superamas (Persée), c'est l'aspect *cellulaire* de leur distribution découvert également par Peebles. Souriau et Fliche suggèrent que des « bulles » peu denses sont en expansion rapide dans un univers en expansion plus lente, et repoussent à leurs frontières les amas — un peu à la façon dont les abeilles construisent les cellules de leurs ruches.

La théorie de Souriau s'est développée depuis et combine à cet aspect intéressant d'autres caractéristiques également observées qui en sont indépendantes. Selon cet auteur, dans l'univers en expansion, une moitié (où nous nous trouvons) est faite de matière, une autre moitié d'antimatière ; les quasars lointains, voisins de l'équateur de cet univers diffusent d'un hémisphère dans

(*) Une distance est exprimée en $h^{-1} \text{Mpc}$, ce qui veut dire que si $H = 100 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, la valeur donnée est exactement exprimée en Mpc, mais que si H est différent, il faudra multiplier cette distance par $100/H = h^{-1}$.

l'autre, et vice-versa : l'annihilation des quasars par des anti-quasars crée une zone d'absence, et un rayonnement gamma important ; Souriau explique de cette façon certaines caractéristiques observables de la distribution des quasars dans l'espace, et du rayonnement gamma de fond de ciel, et ses tests semblent convaincants...

On voit que l'observation de la distribution des amas, des galaxies ou des quasars peut encore jouer un rôle de moteur puissant de l'imagination cosmologique. En ce qui nous concerne, nous pensons que c'est de l'observation qu'en effet doit procéder toute tentative cosmologique, et d'une élimination rigoureuse de ce qui contredit l'observation — sauf à rejeter dans le cadre de l'astrophysique « locale » certains faits considérés antérieurement comme cosmologiques... Et à condition encore que l'astrophysique « locale », celle des objets assez proches, permette d'en rendre compte effectivement de façon raisonnable.

J.-C. P.

RÉFÉRENCES

Références générales

N.A. BAHCALL, *Ann. Rev. Astrophys.*, **15**, 505, 1977.

S. CHANDRASEKHAR, *Principles of Stellar Dynamics*, The Univ. of Chicago Press éd., 1942.

M. HENON, *Collisional Dynamics of Spherical Stellar Systems*, in *Third advanced course of the Swiss Society of Astronomy and Astrophysics*, Ecole d'été de Saas-Fee, p. 182, 1973.

H. POINCARÉ, *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*, Gauthier-Villars éd., Paris, 1899.

G. DE VAUCOULEURS, *Les Galaxies*, cours au Collège de France, Obs. Besançon éd., 1976.

Symposium I.A.U. n° 69, *Dynamics of Stellar Systems*, ed. A. Hayli, Reidel-Dordrecht, 1975.

Symposium I.A.U. n° 79, *The large scale structure of the Universe*, ed. M.S. Longair et J. Einasto, Reidel-Dordrecht, 1978.

Chapitre I

J. JEANS, *MN*, **76**, 70, 1915.

— *Astronomy and Cosmology*, Chap. III, § 61-62, Cambr. Univ. Press ed., 1928.

G. FRIES, S. METZ, Rapport de stage, Ecole Polytechnique, ronéotypé, 1978.

H. POINCARÉ, *Leçons sur les hypothèses cosmogoniques*, p. 100, Libr. Sc. Hermann et fils, Paris, 1911.

L. SPITZER Jr., M.H. HART, *Ap. J.*, **164**, 399, 1971 a.

Chapitre II

J. EINASTO, Symposium I.A.U. n° 79, ed. M.S. Longair et J. Einasto, p. 96, Reidel-Dordrecht, 1978.

S.M. FABER, J.S. GALLAGHER, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **17**, 135, 1979.

W.J. LUYTEN, in *Highlights of Astronomy*, **3**, ed. G. Contopoulos, p. 389, Reidel-Dordrecht, 1974.

F. NAHON, *BA*, **21**, p. 55 et 93, 1957.

V.M. SLIPHER, *Lowell Obs. Bull.*, II, n° 12, 1914.

R. WIELEN, in *Highlights of Astronomy*, **3**, ed. G. Contopoulos, p. 395, Reidel-Dordrecht, 1974.

M. WOLF, *Vierteljahres Schr. Astron. Ges.*, **49**, 162, 1914.

Chapitre III

S.J. AARSETH, W.L. SASLAW, *Ap. J.*, **172**, 17, 1972.

G. CHINCARINI, H.J. ROOD, *Ap. J.*, **214**, 351, 1977.

J.R. DICKEL, H.J. ROOD, *Ap. J.*, **224**, 724, 1978.

G. FRIES, S. METZ, voir I.

J.R. GOTT III, E.L. TURNER, *Ap. J.*, **209**, 6, 1976.

— *Ap. J. Supp.*, **32**, 409, 1976.

— *Ap. J.*, **213**, 309, 1977.

I.D. KARATCHENSEV, *Dynamical state of pairs of galaxies*, in I.A.U. Coll N° 37, *Décalages vers le rouge et expansion de l'Univers*, C.N.R.S., Paris, 1977.

- J. MATERNE, *Astron. Astrophys.*, **33**, 451, 1974.
J. MATERNE, G.A. TAMMANN, *Astron. Astrophys.*, **37**, 383, 1974.
J. MATERNE, *Astron. Astrophys.*, **74**, 235, 1979.
H.J. ROOD, V.C.A. ROTHMAN, B.E. TURNROSE, *Ap. J.*, **162**, 411, 1970.
F. ZWICKY, *Helvetica Phys. Acta*, **6**, 110, 1933.
— *Morphological Astronomy*, Springer, Berlin, 1957.

Chapitre IV

- S.J. AARSETH, *Astroph. Space. Sci.*, **39**, 197 et 208, 1973.
M. HENON, voir références générales.
— *Astroph. Space. Sci.*, **13**, 284, 1971.
D. LYNDEN-BELL, R. WOOD, *MN*, **138**, 495, 1968.
L. SPITZER JR., T.X. THUAN, *Ap. J.*, **175**, 31, 1972.

Chapitre V

- A. AMES, H. SHAPLEY, *Ann. Harvard Coll. Obs.*, **88**, 43, 1932.
J. MATERNE, *Astron. Astrophys.*, **63**, 401, 1978.
G. PATUREL, *Astron. Astrophys.*, **71**, 106, 1979.

Chapitre VI

- H.H. FLICHE, J.M. SOURIAU, *Astron. Astrophys.*, **78**, 87, 1979.
E. HOLMBERG, *Lund Ann.*, **6**, 173, 1937.
P. LEVY, *Ann. Phys.*, **14**, 184, 1930.
B. MANDELBROT, *Les objets fractals*, Flammarion éd., Paris, 1975.
P.J.E. PEEBLES, Symp. I.A.U. n° 79, ed. M.S. Longair et J. Einasto, p. 217, Reidel-Dordrecht, 1978.
A. REIZ, *Ann. Obs. Lund*, **9**, 84, 1941.
J.M. SOURIAU, *Stratification de l'Univers* (preprint), 1979.
G. DE VAUCOULEURS, *Astron. J.*, **58**, 30, 1953.
— *Science*, **167**, 1203, 1970.
— *C.R. Acad. Sci. Paris, Sér. B*, **284**, 227, 1977.
— Coll. U.A.I. n° 37, *Décalages vers le rouge et expansion de l'Univers*, p. 301, éd. C.N.R.S., 1977.

SÉMINAIRES ET CONFÉRENCES

Les séminaires ont eu lieu du 6 novembre 1979 au 22 janvier 1980 sur le thème : *Le Soleil, notre étoile*.

- Poussières interplanétaires (P. LAMY) ;
- Soleil et Etoiles ; chromosphères, couronnes (F. PRADERIE) ;
- Perte de masse (R.N. THOMAS) ;
- Transport d'énergie dans les atmosphères (P. MEIN) ;
- Evolution des régions actives (M.J. MARTRES, J. RAYROLE) ;
- L'effet Hanlé pour le diagnostic du champ magnétique des protubérances (S. SAHAL) ;
- Transport d'énergie dans les éruptions (J.C. HENOUX) ;
- Analyse des éruptions solaires dans le domaine des rayons X (L. STEENMAN-CLARK) ;
- Les champs magnétiques solaires (E. RIBES) ;
- Conclusions générales : Que faire maintenant ? (R. BONNET).

D'autre part, des personnalités étrangères, invitées par le Collège de France, ont donné, dans le cadre de la Chaire d'Astrophysique Théorique, des séries de cours ou de conférences :

M. Eijiro HIEI, professeur à l'Université de Tokyo, a donné une conférence sur le sujet suivant : *New results about solar flares*, le 29 janvier 1980.

M. Jorge SAHADE, professeur à l'Instituto de Astronomia y Fisica del Espacio de Buenos Aires, a donné une série de 8 leçons sur le sujet suivant : *The Wolf-Rayet stars* : (a) *The Wolf-Rayet stars : observational features, I*. (b) *The Wolf-Rayet stars : observational features, II*. (c) *The Wolf-Rayet binaries, I*. (d) *The Wolf-Rayet binaries, II*. (e) *Objects with Wolf-Rayet spectra*. (f) *The O and Of stars*. (g) *Evolutionary considerations*. (h) *Summary and conclusions*. Ces leçons ont été données les 19, 21, 26, 27 février, et les 4, 11, 18 et 25 mars 1980.

M^{me} Ann M. BOESGAARD, professeur à l'Université de Hawaii, Honolulu, a donné une série de 4 leçons sur le sujet suivant : *Light Elements in the Galaxy* : (a) *The Universal Abundances of D, Li, Be, and B*. (b) *Stellar Structure Information from Studies of the Light Elements*. (c) *Interstellar, D, Li, Be, B*. (d) *Effects on Primeval Abundances from Stellar and Galactic Evolution*, les 11, 18, 25, 27 mars 1980.

COMPOSITION DU LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE THÉORIQUE
(98 bis, boulevard Arago, 75014 Paris)

M^{me} J. BRUNEL (aide-comptable, Collège de France), M^{me} E. DECHARD (aide de laboratoire, Collège de France, départ en retraite le 1^{er} août 1979), M. S. DEPAQUIT (ingénieur 1 A, C.N.R.S.), M^{lle} G. DROUIN (documentaliste 3 A, C.N.R.S., départ en retraite le 1^{er} janvier 1980), M^{lle} S. DUMONT (astronome-adjoint, Observatoire de Paris), M^{me} M. GROS (assistant, Observatoire de Paris), M^{me} N. HEIDMANN (astronome-adjoint, Observatoire de Paris), M^{lle} A. L'HEVEDER (aide de laboratoire, Collège de France, depuis le 1^{er} février 1980), M. H. KAROJI (maître-assistant à Paris VI), M. R. KRICKORIAN (maître-assistant, Collège de France), M. M. LOUCIF (boursier algérien, étudiant de D.E.A.), M. C. MAGNAN (sous-directeur du laboratoire, Collège de France), M. J.-C. PECKER (professeur, Collège de France), M^{me} PETIT (aide-physicien, Collège de France), M^{lle} S. PERRET (secrétaire, Collège de France), M. E. SIMONNEAU (attaché de recherche, C.N.R.S.), M. R.N. THOMAS (maître de recherche, C.N.R.S.), M. J. ZOREC (boursier du Gouvernement français, Argentine).

Des chercheurs parisiens sont associés régulièrement au laboratoire. Certains d'entre eux y disposent d'un bureau : M. R. BONNET (L.P.S.P., Verrières), M. H. REEVES (C.E.A., Saclay).

Une coopération étroite se poursuit avec le groupe de M. J.-P. VIGIER, maître de recherche (Institut Henri Poincaré), notamment avec MM. G. LE DENMAT, P. MERAT, M. MOLES, L. NOTTALE et J.-P. VIGIER.

De plus, des personnalités étrangères ont effectué au Laboratoire d'Astrophysique Théorique des séjours courts ou prolongés, ou répétés : C. BARAMBON, Observatoire de Genève, le 2 mars 1979, J.L. NIETO, Observatoire du Pic du Midi, une semaine en mars 1979, I. HUBENY, Observatoire d'Ondrejov du 8 mars au 9 mai 1979, P. DELACHE, Université de Nice, le 23 mai 1979, B. PACZYNSKI, M. Copernicus Astronomical Center de Varsovie, le 30 octobre 1979, G. TENORIO-TAGLE, E.S.O./C.E.R.N., Genève, une semaine en novembre 1979, P. LAMY, L.A.S. de Marseille, les 26 et 27 novembre 1979, M. MOLES de l'Observatoire d'Almería en Espagne, une semaine en décembre 1979, M^{me} STEENMAN-CLARK, de l'Observatoire de Nice, les 17 et 18 décembre 1979, A. UNDERHILL, Goddard Space Flight Center de Greenbelt aux U.S.A., du 2 février au 15 mars 1980, M. ADJHOSSOU de l'Université du Bénin, Lauréat du Prix Guinness 79, en février 1980, P. VIOTTI, Laboratoire d'Astrophysique Spatiale, Frascati, du 15 au 22 février 1980, G. MICHAUD de l'Université de Montréal, du 3 au 18 mai 1980.

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE DU LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE THÉORIQUE

Le laboratoire (désigné par le sigle L.A.T.) est, depuis sa création, installé à l'Institut d'Astrophysique de Paris (ou I.A.P.), laboratoire propre du C.N.R.S., dont le Professeur a été Directeur de 1972 à 1979, et dont le directeur depuis cette date est M. Jean AUDOUZE, maître de recherches au C.N.R.S.

Les activités de l'I.A.P. sont d'une telle nature que le L.A.T. y a naturellement trouvé sa place, et que des contacts très fructueux ont lieu avec ses membres. Toutefois, il semble nécessaire, après une année d'intervalle, de rédiger de façon séparée le rapport d'activité du L.A.T. En effet, notre activité, au sein de l'I.A.P., a certainement un caractère assez spécifique. Sans nous préoccuper plus particulièrement de certains objets, plutôt que d'autres, sans sacrifier par exemple notre tradition de recherches sur le Soleil à la vague (à la vogue) des études extragalactiques, mais sans nier pour autant que ce domaine grandissant dans les préoccupations des astronomes est devenu d'une étonnante richesse, c'est aux *phénomènes physiques*, en ce que ces objets astrophysiques nous permettent de les préciser, et même de les découvrir, que nous nous intéressons d'abord. C'est pourquoi, dans les recherches solaires, l'accent est mis sur les différences entre régions calmes et actives, afin de mieux cerner ce qui fait la région active : dans les étoiles (et notre série de monographies C.N.R.S.-N.A.S.A. illustre admirablement cet effort), c'est aussi la différence entre étoiles Of et O, Be et B, GK et T Tau, etc., qui nous préoccupe : quels sont les phénomènes, nécessairement hors équilibre, qui dominent ici, qui dominent là ? La méthodologie de traitement des atmosphères courbes et étendues, des champs de vitesse, l'étude de phénomènes de superluminance, des éruptions solaires ou stellaires, de l'effet Compton inverse... procède aussi de cette logique. Dans les galaxies, les noyaux actifs sont des exemples de ce regard nouveau : quelle est leur nature ? Qu'est-ce qui distingue la galaxie à noyau actif, ou le quasar d'une galaxie ordinaire ? Les décalages anormaux sont-ils, ou ne sont-ils pas, liés à cette activité ? Et, à l'échelle de la cosmologie, notre réflexion s'oriente vers la remise en question, appuyée sur les données astronomiques, des grandes options couramment défendues. Car en ce domaine moins qu'en tout autre, on ne peut considérer rien comme résolu ; une nouvelle physique, valable à l'échelle de l'univers, n'a pas encore émergé ; c'est des phénomènes anormaux ou étrangers qu'on pourra l'extraire... Nous souhaitons, sans bien entendu contredire la physique du laboratoire, que nos travaux puissent y contribuer.

A travers la diversité des sujets traités, on trouvera donc un regard différent

vers les objets ou les phénomènes bizarres, et une permanente (et raisonnable) remise en question d'un certain nombre d'idées reçues. C'est là que se trouve l'unité de notre petit groupe de chercheurs.

I. ETOILES. RECHERCHE SUR L'INTERPRÉTATION DES SPECTRES

a) *Monographies sur les différents types d'étoiles*

Au cours des trois années précédentes (1976, 1977, 1978), R.N. Thomas a préparé et développé un programme cohérent de recherche dont les thèmes et les buts sont centrés sur l'organisation — en tant que co-organisateur avec le D^r Stuart Jordan de la N.A.S.A.-Goddard — d'une série de monographies ayant pour titre : *Nonthermal structure and Evolution of Stellar Atmospheres*. Cette série de monographies est cautionnée conjointement par le C.N.R.S. et la N.A.S.A. ; elle a débuté au printemps 1977 et devait s'achever en 1980-1981 ; mais le délai a été repoussé de deux ans, par suite de circonstances indépendantes de la volonté de Jordan et de Thomas. L'ensemble des dix ouvrages à publier couvre les différents types d'étoiles, et les différents groupes de problèmes théoriques majeurs liés à la physique hors équilibre des couches extérieures des étoiles.

La supervision générale de la série des monographies est confiée à M. Léo Goldberg (Kitt Peak National Observatory) et à J.-C. Pecker, qui rédigeront le volume des conclusions.

Outre son rôle de co-organisateur de la série de monographies, R.N. Thomas assure la rédaction de l'un des ouvrages de la série, celui qui concerne la thermodynamique hors équilibre des couches extérieures des étoiles.

Christian Magnan rédige en ce moment une partie de l'ouvrage consacré aux phénomènes aérodynamiques dans les atmosphères stellaires ; cette partie examinera la façon dont on peut obtenir des informations sur les mouvements dans les atmosphères à partir des profils de raies spectrales.

On doit noter que l'organisation de ces monographies a conduit à des voyages de R.N. Thomas ou du Professeur, en divers observatoires, où des auteurs de l'une ou l'autre des monographies résident, à l'organisation par R.N. Thomas notamment d'une table ronde à Trieste sur les questions soulevées par certaines des monographies, à la visite en France de plusieurs chercheurs étrangers, notamment A.B. Underhill et R. Stalio, tout particulièrement impliqués dans la rédaction des ouvrages.

Nous rappelons ici que le but principal des monographies est, à l'époque actuelle de la recherche astrophysique, de mettre l'accent sur une mutation

profonde de la façon dont sont abordés les problèmes de diagnostic des atmosphères stellaires, et des régions plus extérieures. L'importance des phénomènes hors équilibre, des vents stellaires et des pertes de masse associées, conduit à une comparaison très suggestive des étoiles dites « normales » avec celles qui présentent des caractères hors équilibre particulièrement visibles dans leur spectre : étoiles O vs. étoiles Of ; B vs. Be ; Ap et Am vs. A, etc. Chaque monographie spécifique consacrée à un type stellaire mettra en évidence ces comparaisons, et les conséquences que le diagnostic des étoiles normales doit en tirer. De plus des volumes consacrés à la thermodynamique, à l'hydrodynamique, aux méthodes de taxonomie stellaire, et enfin un volume de conclusions générales, compléteront les monographies spécifiques.

b) *Observations d'atmosphères stellaires hors équilibre*

L'importance des pertes de masse dans un grand nombre d'étoiles, et le fait que ces phénomènes sont étroitement associés à l'existence d'une chromosphère et d'une couronne, observables dans les domaines UV et X, a conduit R.N. Thomas, en collaboration régulière avec J. Zorec et V. Doazan (Observatoire de Paris), à entreprendre des observations sur le satellite IUE. Ces auteurs ont mis en évidence la première perte de masse à très grande échelle pour une étoile Be, 59 Cygni, et sa forte variation sur plusieurs mois.

Ces études déjà menées en coopération avec des équipes étrangères, seront poursuivies activement. La coordination entre les différentes techniques d'observation, assurée par R.N. Thomas, implique des recherches poursuivies sur le satellite Copernicus (Snow et Malborough de Western Ontario University, J. Rogerson, Princeton University), sur le satellite Einstein, dans le domaine des rayons X (avec Vaiana et Rosner, Harvard-Smithsonian Observatories) et bien entendu au sol (à Saint-Michel, tout d'abord et à l'Observatoire Lick, avec L. Kuhi). Les recherches porteront sur un ensemble d'étoiles Be. Y seront associés également R. Stalio (Trieste) et R. Viotti (Rome).

c) *Etudes théoriques sur les étoiles T Tauri*

Nicole Heidmann et R.N. Thomas ont poursuivi les recherches publiées dans un premier article (S. Dumont, N. Heidmann, L.V. Kuhi, R.N. Thomas, 1973, *Astron. Astrophys.*, **27**, 273) dans lequel le calcul de la raie H α en émission à partir d'un modèle à chromosphère profonde, mais statique, conduisait à des contradictions entre l'émission intégrée dans la raie et le grand renversement central du profil.

Dans un article sous presse on introduit un champ de vitesses dans la chromosphère profonde, mais cela n'est pas suffisant pour supprimer les contradictions précédentes.

Par contre, l'introduction de différentes distributions de densité (dépendant de la grandeur du flux de masse) permet d'obtenir une grande variété de modèles. Leur étude montre que le renversement central dans le profil de la raie $H\alpha$ est *toujours obtenu* avec de faibles vitesses d'expansion et, à la limite, avec une chromosphère statique, sans flux de masse créant une atmosphère étendue. Il est donc plutôt lié à *l'absence d'atmosphère étendue*, contrairement à l'opinion générale selon laquelle ce renversement central est un effet de « shell » (enveloppe). On ne peut pas le *supprimer* sans la considération de *chromosphères, couronnes et régions post-coronales étendues* et non pas seulement de chromosphères profondes.

d) *Recherches théoriques sur les étoiles binaires serrées*

En collaboration avec V.S. Niemela (Buenos Aires), Juan Zorec a étudié l'influence de la pression de radiation sur le potentiel au voisinage d'une binaire serrée.

2. SOLEIL

a) *Etude des facules solaires*

L'étude du Soleil, grâce aux travaux entrepris depuis plusieurs années sur le satellite OSO-8, s'est poursuivie, grâce au succès des expériences menées à bien sur les deux télescopes solaires du L.A.S.P. et du L.P.S.P., et grâce à l'aide des équipes, l'une de Boulder, Colorado, U.S.A., l'autre de Verrières-le-Buisson. Ce travail est mené en collaboration principalement avec Z. Mouradian, de l'Observatoire de Meudon, par S. Dumont et J.-C. Pecker. Y ont participé également, à des titres divers, autres les membres des équipes ci-dessus, MM. E. Hiei (Tokyo), G. Chapman (Californie) et G. Simon (Obs. Meudon).

Le premier dépouillement des données satellites ayant été terminé au cours de l'année 1978, l'année 1979 a été consacrée au tri des données et à l'analyse des profils obtenus. On peut distinguer dans cette étude trois zones de l'atmosphère solaire :

Zone de transition chromosphère-couronne. On dispose d'observations dans les raies O VI (L.P.S.P.), C IV, Si IV et Si II (L.A.S.P.). Avec l'aide de M. Desmerger pour les données L.A.S.P., on a analysé ces données et déterminé les largeurs Doppler, l'intensité centrale, le rapport d'intensité des deux raies dans le cas de doublets observés, l'épaisseur optique de la région de formation. Ces raies n'étant pas vraiment optiquement minces, nous mettons actuellement un programme au point pour déterminer le rayon-

nement dans une atmosphère représentative de cette zone. Les taux de collision sont calculés avec un programme de S. Sahal. Ce travail est en voie d'achèvement.

Chromosphère. La chromosphère est étudiée à partir des observations (L.P.S.P.) des raies de résonance de Ca II et Mg II. L'examen des données a montré que, lorsqu'on balaie la surface solaire en traversant une facule, il se produit un élargissement de la raie K_2 à la limite de la facule. Comme nous disposons seulement d'un petit nombre d'observations de cette sorte, G. Simon a recherché dans la masse des données OSO-8, avec l'accord du L.P.S.P., d'autres observations concernant le balayage d'une facule. L'examen de ces nouvelles données est en cours.

Par ailleurs, le travail théorique a porté sur l'établissement de programmes pour le calcul de profils synthétiques avec redistribution partielle en fréquence, avec champs de vitesse, avec hétérogénéités et avec courbure (au bord solaire).

Photosphère. Le dépouillement des raies de CO observées à Kitt Peak est terminé (Z. Mouradian).

Etude de corrélation des images. Un gros travail effectué par M. Desmerger consiste en la création de fichiers des images simultanées d'une même région faculaire (champ magnétique, vitesses caractéristiques, K_2 , K_3 du Ca II et K_2 du Mg II) et la détermination des coefficients de corrélation. Nous pensons, en 1980, terminer l'étude des raies de Ca II et Mg II et obtenir un modèle faculaire dans la chromosphère.

b) *Eruptions solaires*

Il s'agit de prévoir le degré de polarisation des raies de Balmer, dans le cas d'un atome localisé dans un champ électrique, soit constant, soit variable. Le milieu étant optiquement épais, il est nécessaire de déterminer tout d'abord les populations non ETL des niveaux de l'hydrogène.

Ce travail nous a été suggéré par E. Schatzman, M. Semel, P. Bakshi et G. Kalman (Boston College), et pour l'aborder, nous avons besoin du premier programme relatif à l'hydrogène (transformation du programme de Mihalas). Actuellement ce programme marche bien à 15 000 K, mais il y a des problèmes dans le cas solaire. Le second programme sur lequel nous travaillons actuellement permettra de voir si le découplage des équations d'équilibre statistique et d'équilibre hydrostatique suffit pour résoudre ces problèmes. Ce travail est poursuivi en collaboration par S. Dumont et G. Debève (I.A.P.).

3. THÉORIE DES ATMOSPHÈRES STELLAIRES. PROBLÈMES ARCHÉTYPES

a) *Transfert de rayonnement ; méthodes d'addition des couches*

Le travail consistant à éclaircir les phénomènes de transfert de rayonnement se poursuit. Après l'étude préliminaire de l'ionisation de la matière dans l'enveloppe (Magnan, 1979), nous avons achevé la mise au point de la méthode numérique permettant de traiter des cas plus réalistes et d'examiner en particulier la transmission du continu de Balmer. L'exploitation de ce programme va se poursuivre sur des modèles d'atomes à plusieurs niveaux en géométrie sphérique.

Cette exploitation, menée par C. Magnan et M. Gros, s'oriente vers l'étude de situations physiques suffisamment réalistes pour avoir une signification astrophysique précise. Notamment, il faut introduire dans les programmes la possibilité de destruction des photons de Balmer ($n \rightarrow 2$), ce qui implique un modèle assez réaliste de l'atome d'hydrogène. De plus il faut résoudre les problèmes difficiles liés à la géométrie de l'enveloppe.

Par ailleurs, G. Debève et J.-C. Pecker étendent la méthode d'addition des couches pour l'appliquer au calcul du transfert de rayonnement dans les régions ionisées autour des étoiles très chaudes, dans le cas où le milieu contient de l'hélium et de l'hydrogène.

b) *Profils des raies spectrales formées dans un milieu turbulent*

Ce travail, objet de la thèse de troisième cycle de Mohammed Loucif, se termine. Les résultats obtenus sont extrêmement intéressants et montrent pour la première fois des séquences de profils asymétriques formés dans un milieu turbulent, en présence d'effets non ETL. Ces séquences rappellent à l'évidence les déformations de profils de raies chromosphériques intenses, type Ca II ou Mg II.

c) *Transfert en géométrie sphérique*

Les travaux de M.E. Simonneau concernent l'équation de transfert radiatif dans des systèmes à géométrie sphérique (comme le sont par exemple, les atmosphères des étoiles supergéantes). Une analyse a été faite dans un cas particulier, celui du problème de Milne, et pour des situations plus générales, pendant la fin de 1978 et 1979. Cette analyse générale fait partie du dernier article de la série « Radiative Transfer in Atmospheres with Spherical Symmetry », accepté pour publication in *J. Quant. Spectrosc. Radiative*

Transfer. Les articles de cette série, complétés par une étude critique approfondie, ont constitué la Thèse de Doctorat d'Etat Française de M. Simonneau, soutenue en mai 1979. Une étude critique de synthèse est le sujet d'un long article de mise au point soumis pour publication aux *Annales de la Société Royale des Sciences de Liège*.

d) *Phénomènes de transport*

L'activité de M. Simonneau s'oriente aussi vers le *transport d'autres particules que les photons*. Le but concret de ces recherches consiste à résoudre complètement le problème de la formation des raies spectrales en tenant compte de la vraie description cinématique des atomes dans leurs niveaux fondamentaux et excités. Les profils des coefficients d'absorption et d'émission dépendent directement des fonctions de distribution des vitesses de ces atomes. Les simplifications utilisées habituellement ne sont toujours pas justifiées, au moins pour les atomes excités. Avec J. Oxénius (Université Libre de Bruxelles) et J. Borsenberger (Observatoire de Meudon), M. Simonneau s'est proposé de déterminer, dans plusieurs cas intéressants, cette fonction de distribution de vitesses et la forme correspondante du coefficient d'émission, ainsi que la répartition d'énergie (redistribution) dans son intérieur.

Ces deux « sujets de recherche » ont évidemment un domaine d'application commun : la formation des raies spectrales dans des milieux optiquement épais, mais dilués. Mais de plus, la mise au point des méthodes pratiques de résolution des équations cinétiques présente un autre intérêt : les développements, approximations et algorithmes numériques, existant pour le transport des photons, peuvent en effet servir d'exemple dans le traitement du transport des autres particules.

Deux types de prolongements s'ouvrent à ces travaux. D'un côté l'étude est nécessaire à d'autres approximations qui, même non généralisables à des méthodes exactes, peuvent, comme premières approximations, être suffisamment correctes dans beaucoup des cas (par exemple comme point de départ de méthodes itératives). M. Simonneau a déjà montré dans un travail précédent qu'une façon d'obtenir ces approximations consiste à faire des interpolations entre des résultats connus pour des situations extrêmes.

D'un autre côté, l'application des méthodes développées dans le travail de Thèse de M. Simonneau à des modèles d'atmosphères, est possible. Cela peut se faire dans le cadre de codes déjà existants de construction de modèles d'étoiles supergéantes, en remplaçant la technique de résolution de l'équation de transfert par la nouvelle méthode correspondante à la géométrie sphérique. L'application systématique est possible, puisque les besoins d'informatique (temps et mémoire de calcul) sont minimes. Des collaborations avec F. Querci (Observatoire de Meudon) sont prévues à ce sujet.

4. GALAXIES ET QUASARS

a) *Décalages anormaux vers le rouge : études statistiques*

Ces travaux (menés en étroite coopération avec les chercheurs de l'I.H.P., principalement G. Le Denmat, M. Molès, L. Nottale et J.-P. Vigier et impliquant, au L.A.T., S. Depaquit, H. Karoji et J.-C. Pecker) sont arrivés à l'issue d'une phase importante de leur développement. G. Le Denmat a soutenu sa thèse en 1977, M. Molès en 1979, L. Nottale en juin 1980, et celle de H. Karoji est en voie d'achèvement.

En conclusion de cette période, depuis 1971, de très nombreux articles ont été publiés, ou sont en cours de publication. Malgré le fait que ce groupe n'ait pas convaincu une majorité d'astronomes, il semble cependant évident qu'ils ont au moins montré avec clarté l'importance du problème posé par l'existence possible de décalages anormaux vers le rouge, les menaces que l'existence de tels décalages font peser sur les cosmologies traditionnelles ; ils ont prouvé, sans aucun doute possible, l'existence d'un effet nouveau, l'effet de traversée des amas (ou effet Karoji-Nottale), et ils ont suggéré des mécanismes d'interaction photon-boson susceptibles de produire de tels décalages.

Deux articles de revue (l'un en 1977, déjà cité dans un rapport antérieur) ont été consacrés par J.-C. Pecker à ces questions, qui ont fait aussi l'objet de plusieurs de ses conférences citées dans la bibliographie.

Certains points continuent à exiger des développements et des recherches. Ainsi S. Depaquit s'est-il plus particulièrement consacré à l'étude des quasars comme test cosmologique. Comme suite à une étude antérieure sur l'utilisation de la structure angulaire des quasars comme test cosmologique, M. S. Depaquit s'est plus particulièrement attaché cette année à l'étude de la distribution du décalage spectral des raies d'émission des quasars. Barnothy, Burbidge et Karlsson avaient mis en évidence l'existence d'une périodicité dans l'histogramme des quasars en fonction du redshift ; à partir du catalogue de Burbidge (581 quasars), S. Depaquit a confirmé l'existence de cette périodicité (de $0,089$ en $\log(1+z)$) avec cinq pics à $z = 0,3 ; 0,6 ; 0,96 ; 1,41 ; 1,96$. L'interprétation d'un tel effet reste extrêmement controversée. On sait que le nombre de quasars détectés à un décalage spectral donné peut dépendre assez largement de divers paramètres observationnels liés à l'existence de raies fortes d'émission bien caractérisées. Des effets de sélection peuvent ainsi résulter de l'identification spectroscopique des quasars, d'un excès d'ultraviolet et d'une variation de la magnitude limite de détection. Mais l'étude quantitative de l'influence des raies fortes menée indépendamment pour chacun de ces effets, montre que ceux-ci ne sauraient expliquer la périodicité de l'histogramme. Ces conclusions confirment l'opinion d'H. Arp sur ce sujet.

Par ailleurs, S. Depaquit étudie la distribution du décalage spectral des raies d'émission pour des échantillons « complets » de quasars. Or celle-ci contredit une première conclusion de Wills, et confirme l'existence d'une périodicité comparable dans l'histogramme de plusieurs échantillons complets.

b) *Anisotropie des observations à signification cosmologique*

A partir de 1979, H. Karoji étudie avec J.-C. Pecker la dynamique et la relation de Hubble dans le Superamas local de galaxies, en particulier les apex du mouvement de notre Galaxie par rapport aux différents référentiels extragalactiques. Cette étude complètera la thèse d'Etat que H. Karoji compte soutenir en fin d'année 1980. H. Karoji est en train d'examiner :

1) de quelle façon la relation de Hubble est perturbée par la présence de l'amas Virgo (y a-t-il « freinage de l'expansion » par une concentration importante de masse et par d'autres phénomènes ?) ;

2) s'il y a, à l'intérieur du Superamas, une rotation différentielle, comme cela a été suggéré par G. de Vaucouleurs ;

3) si les apex ainsi déduits sont compatibles avec un modèle dynamique de l'objet, et surtout avec le mouvement par rapport au corps noir cosmologique de 3 °K.

c) *Spectres des galaxies de Seyfert, des galaxies à noyaux actifs et des quasars*

Ces travaux sont menés en coopération entre S. Dumont et N. Heidmann, du L.A.T., de G. Debève de l'I.A.P., avec S. Collin, M. Joly, D. Péquignot (O. de Meudon).

Il s'agit d'interpréter les raies permises émises par ces objets et d'obtenir des « modèles ». Un premier travail sur les raies de Fe II, commencé en 1978, a été achevé en 1979. Ensuite, d'autres raies (Mg II, H α , Ca II) ont été considérées, avec celles de Fe II ; ce travail a confirmé l'existence d'une densité élevée et d'une grande épaisseur optique dans la région de formation de ces raies. Le modèle proposé est une chromosphère avec disque d'accrétion (article en préparation).

Depuis juin 1979, l'équipe de S. Collin poursuit l'étude de ce modèle chromosphérique : M. Joly poursuit le travail sur le Fe II en le complétant par l'étude de raies de Fe II importantes, et qui n'étaient pas incluses dans le premier travail (premiers résultats exposés au colloque de Villafranca, nov. 1979). S. Collin et S. Dumont ont commencé l'étude des raies de Balmer de l'hydrogène. Une première étape a été franchie : obtenir le rapport H α /H β dans une région de densité électronique donnée (premiers résultats exposés par S. Collin à Villafranca). Une deuxième étape est commencée : obtenir un modèle avec un atome à 3 niveaux (ionisation de l'hydrogène).

Cette étape est nécessaire pour l'étude des autres raies entreprises par d'autres chercheurs de l'équipe. L'étape suivante sera le calcul du décrement de Balmer.

Pour l'étude des raies Ly α et de l'hélium, nous avons besoin d'un meilleur programme concernant l'équilibre de l'hydrogène ; ce programme est préparé actuellement par G. Debève. Par la suite, nous envisageons une collaboration avec D. Péquignot pour l'étude des modèles photoionisés.

d) *Observations de galaxies*

Depuis le début de 1979, H. Karoji entreprend au sein de l'équipe de S. Koutchmy à l'I.A.P., une analyse bidimensionnelle d'images des galaxies. Elle a pour objectif de comprendre ce que représentent la classe de luminosité et la séquence de Hubble, en terme de *transformée de Fourier* (TF). Après avoir construit un appareil de reproduction des images, M. Karoji a effectué la prise des images TF et le vidéo traitement d'un certain nombre de galaxies représentatives, du point de vue de luminosité et de morphologie.

Parallèlement, il participe à la réalisation d'un *sensitomètre* en collaboration avec l'Observatoire de Madrid : cet appareil sera monté au télescope d'Almeria (sud de l'Espagne). Cette contribution permettra de disposer de clichés originaux de bonnes qualités (résolution angulaire de l'ordre de 17"/mm, avec échelon sensitométrique, champ utile important, etc.), et de poursuivre les études photométriques et morphologiques de galaxies dans les meilleures conditions possibles.

5. PROCESSUS PHYSIQUES FONDAMENTAUX EN ASTROPHYSIQUE

a) Nicole Heidmann consacre maintenant l'essentiel de ses réflexions aux problèmes de la *physique des processus d'émission dans des régions « actives »* rapidement variables, dont l'intensité lumineuse passe par des pics importants.

La question posée plus particulièrement est : le mécanisme du type super-radiance, observé au laboratoire — notamment sur des raies IR de Na I — intervient-il (et comment) dans de telles régions ?

La *superradiance*, décrite pour la première fois par Dicke en 1954, est l'émission coopérative d'atomes excités, fortement corrélés entre eux. L'émission cohérente est proportionnelle à N^2 , carré du nombre d'atomes émetteurs par unité de volume, et non plus à N , comme c'est le cas dans l'émission spontanée quand les atomes sont indépendants. Il en résulte que pour une énergie d'excitation donnée, la luminosité observée est beaucoup plus

grande, mais pendant une durée beaucoup plus brève : pour assurer la conservation de l'énergie, celle-ci est en $1/N$.

La mise en place des atomes excités est un phénomène d'interférence quantique inter-atomique résultant de l'indiscernabilité des atomes vis-à-vis de l'émission spontanée des premiers photons.

La corrélation est d'autant plus grande que la distance entre les dipôles atomiques est plus petite. La densité du milieu joue donc un rôle important. Au laboratoire, les mesures ont été faites avec des densités de l'ordre de 5×10^9 à $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. D'autres propriétés physiques du milieu interviennent et les phénomènes de transfert jouent également un rôle important. La géométrie du système émetteur est représentée, dans la formule donnant l'intensité du rayonnement, par un facteur de forme qui dépend du rapport de la longueur d'onde de la raie à la section du volume émetteur. Un tube cylindrique allongé et de petite section est favorable.

On cherche d'abord à appliquer ce mécanisme de l'émission superradiante aux éruptions chromosphériques, le plasma solaire étant le plasma astrophysique connu avec le plus de détails et la physique de ce milieu étant la plus élaborée. Si ce mécanisme s'avère efficace, cela modifiera les conditions énergétiques de l'émission du rayonnement. Ce travail est engagé en collaboration avec Sylvie Sahal (Obs. de Meudon, L.A.M., groupe des « processus atomiques et moléculaires de l'astrophysique »).

b) Ralph Krikorian a continué ses recherches sur *l'effet Compton inverse*, sa formulation et ses possibles implications astrophysiques. Ces travaux sont menés en étroite coopération avec S. Kichenassamy (I.H.P.).

Ils ont montré (avec H. Haruthyunian et A. Nikoghossian) que l'interprétation des observations, émissions continues dans l'UV et dans le bleu, à l'aide de l'effet Compton inverse, se heurtait à de grandes difficultés (travail publié dans *Astrofizika*). Ils ont également montré (article en cours) que l'invariance relativiste de la section efficace de collision $d\sigma$ découle du fait que l'on adopte pour la vitesse relative une expression qui n'est pas satisfaisante du point de vue de la relativité restreinte. La définition correcte de la vitesse relative conduit à la loi de transformation $d\sigma (1 - \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2) = \text{inv}$ où \mathbf{v}_1 et \mathbf{v}_2 sont les vitesses des particules cible et des particules du faisceau par rapport à un référentiel d'inertie S.

D'autres travaux sont en cours ; M. Krikorian a d'autre part consacré une partie importante de son temps à la rédaction de sa thèse.

c) La célébration, en 1979, du centenaire d'Albert Einstein a conduit J.-C. Pecker, à la suggestion d'Alfred Kastler, à quelques réflexions sur un

mémoire publié en 1912 et passé un peu inaperçu. Dans ce mémoire, Einstein donnait une application numérique du *principe de Mach-Einstein*. On a pu montrer que le principe pouvait être mis sous la forme d'une équation de contrainte sur la distribution de densité dans l'Univers.

d) En liaison avec les problèmes que pose à la cosmologie la découverte d'effets difficilement compatibles avec la solution classique de la « grande explosion » (le « big bang »), J.-C. Pecker a été amené à réfléchir sur *la notion, appliquée à l'univers, d'entropie*, et de production d'entropie. Cette réflexion conduit à une formulation peut-être nouvelle, de l'expression du taux de formation d'entropie, à l'échelle des phénomènes cosmologiques. Ce travail prendra certainement beaucoup de temps avant qu'une publication concluante soit possible.

PUBLICATIONS

G. ARTZNER, S. DUMONT, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, G. SIMON, J.-C. VIAL, *Microturbulence at the solar plage edge* (Soumis à *Astron. Astrophys.*, 1980).

G. ARTZNER, S. DUMONT, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, G. SIMON, J.-C. VIAL, *Observations entre le centre et le bord du Soleil de la composante K2 de la raie K de Ca II au moyen du satellite OSO 8* (*C.R. Acad. Sc. Paris, Sér. B*, **290**, 365, 1980).

G. ARTZNER, E. CHIPMAN, S. DUMONT, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, J.-C. VIAL, *Vitesses non thermiques dans la zone de transition entre la chromosphère et la couronne du Soleil (régions actives)* (*C.R. Acad. Sci. Paris*, sous presse, 1980).

J. BORSENBERGER, J.-C. PECKER, *Effet des décalages spectraux devant et à côté d'une masse sur le profil des raies spectrales issues de cette masse ou des masses localisées derrière elle* (*Bull. Soc. Roy. Sc. Liège*, **48**, n° 5-8, p. 204, 1979).

R. CAYREL, S. DUMONT, P. MARTIN, *Small-scale versus large scale motions in the solar photosphere from a non-LTE calculation of multiplet 38 of Ti I* (Coll. U.A.I. n° 51 : *Convection and Turbulence in Stellar Atmospheres*, London, Ontario, Canada, 27-30 août 1979, sous presse).

S. COLLIN-SOUFFRIN, S. DUMONT, N. HEIDMANN, M. JOLY, *Formation of permitted lines in the spectrum of type I Seyfert Galaxies and Quasars. I. Fe II lines, preliminary discussion*, (*Astron. Astrophys.*, **72**, 28, 1979).

S. COLLIN-SOUFFRIN, S. DUMONT, N. HEIDMANN, M. JOLY, *Formation of permitted lines in the spectrum of type I Seyfert Galaxies and Quasars. II. The Fe II emissive region (Astron. Astrophys., 83, 190, 1980).*

V. DOAZAN, L.V. KUHI, J.M. MARLBOROUGH, T.P. SNOW, R.N. THOMAS, *Variable Wind-Velocity in 59 Cygni (Tubingen Coll. Proc, sous presse, 1980).*

V. DOAZAN, P. SELVELLI, R. STALIO, R.N. THOMAS, *Te-Structure of the Wind in γ Cas (Tubingen Coll. Proc., sous presse, 1980).*

V. DOAZAN, R. STALIO, R.N. THOMAS, *Proposed Three-Phase Modeling of Be Stars from combined visual and IUE Observations (Goddard Space Flight Center Coll. Proc., sous presse, 1980).*

V. DOAZAN, L.V. KUHI, R.N. THOMAS, *Variable Mass-Flux from 59 Cyg. (Astrophys. Lett. J., sous presse, 1980).*

V. DOAZAN, R.N. THOMAS, R. VIOTTI, ed., *Compte rendu de la Table Ronde de Trieste (juin 1979, sous presse).*

M. GROS, C. MAGNAN, *The method of addition of layers to solve non-linear radiative transfer problems (Astron. Astrophys., sous presse, 1980).*

H.A. HARUTHYUNIAN, R.A. KRIKORIAN, A.G. NIKOGHOSSIAN, *On the interpretation of flare phenomenon in red dwarf stars by inverse Compton scattering (Astrofizica, 15, 431, 1979).*

N. HEIDMANN, R.N. THOMAS, *A scheme of stellar atmospheric region : III. Formation of emission lines in T Tauri stars (Astron. Astrophys., sous presse, 1980).*

N. HEIDMANN, *Les étoiles (coll. « Que sais-je », P.U.F., à paraître).*

A. KASTLER, J.-C. PECKER, L. SCHWARTZ, *Appel à nos ministres (Le Monde, 13 décembre 1979, p. 16).*

C. MAGNAN, *The sudden Appearance of stars (Astron. Astrophys., 72, 18, 1979).*

V.S. NIEMELA, J. ZOREC, *Models of Equipotential surfaces for luminous Binary systems (First Latin-American Regional Astronomy Meeting, ed. A. Gutierrez-Moreno et H. Moreno, p. 211, 1980).*

V.S. NIEMALA, J. ZOREC, *Sur la modification des surfaces équipotentielles dans les systèmes binaires due à la pression du rayonnement de ses composantes (C.R. Acad. Sc. Paris, Sér. B, 290, 67, 1980).*

V.S. NIEMALA, J. ZOREC, *Sur les différents types de configurations des surfaces équipotentielles des systèmes binaires à composantes très lumineuses (C.R. Acad. Sc. Paris, Sér. B, 290, 95, 1980).*

J.-C. PECKER, *Rapport de la Commission 5 de l'U.A.I. (Trans. U.A.I., T. XVII A, p. 7, 1979).*

— *Report of meetings of I.A.U. Commission 5 at the General Assembly (Trans. U.A.I., T. XVII B, Montréal, août 1979).*

— *Compte rendu sur la 17^e Assemblée Générale de l'U.A.I. (Montréal, août 1979, C.R. Acad. Sc. Paris, 289, Vie Acad., p. 76-77, 19 nov. 1979).*

— *Literature References, Journal abbreviations and the I.A.U. (The Observatory, 99, 220, déc. 1979).*

— *Responsabilité de l'astronomie : situer l'Univers (M.U.R.S. Bull., 5, 1979).*

— *Correspondance (Espace et Civilisation, 8, p. 51, 1979).*

— *La découverte de l'Univers (pcm, 76, n° 6-7, 1979).*

— *André Couder et l'optique astronomique (L'Astronomie, 94, 149, 1980).*

— *Le ciel et deux écrits (coll. poche Marabout, à paraître).*

— *L'Univers est-il en expansion? (Bull. Soc. Franco-Japonaise des sc. pures et appl., 31, p. 69 (en français) et p. 53 (en japonais), 1980).*

— *Le rôle de l'image dans la vulgarisation des sciences et des techniques (Bull. inf. de l'A.E.S.F., sous presse, 1980).*

— *Il paranormale? Vediamo un po'... (Astronomia, 2, n° 4, 54, 1980).*

— *Histoire des sciences : Remarques sur un pli cacheté (n° 271) déposé à l'Académie des Sciences par Hippolyte Fizeau le 16 août 1841 (C.R. Acad. Sc. Paris, 21 avril 1980, 290, Vie Acad., p. 145).*

— *Le ciel et deux écrits (en langue japonaise, Hosei Univ. Press, Tokyo, 1980).*

— *Observations mal comprises dans le cadre de la cosmologie classique (dans coll. Einstein, sous presse, 1979).*

— *La science et le nouvel ordre économique mondial (Science, Paris, sous presse, 1979).*

— *L'évolution des galaxies (Sciences, Paris, sous presse, 1979).*

— *La science face aux choix majeurs de la fin du millénaire (Bull. M.U.R.S., sous presse, 1979).*

— *L'Univers en 1979 (Acad. Sc. Morales et Politiques, Paris, sous presse, 1979).*

— *L'Univers est-il en expansion? (Univ. Madrid, sous presse, 1980).*

— *Le vent solaire (Planétarium de Bruxelles, sous presse, 1980).*

— *Astronomie et analogie (Séminaire interdisciplinaire de l'Institut Collégial Européen, sous presse, 1980).*

— *Anisotropie des propriétés de l'Univers (Acad. Roy. de Belgique, sous presse, 1980).*

— *L'Atmosphère solaire, du modèle à la physique (Collège de France, conférence du soir d'intérêt général, sous presse, 17 janvier 1980).*

E. SIMONNEAU, *Radiative transfer in atmospheres with spherical symmetry. IV. The non conservative problem* (*J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **23**, 73, 1980).

— *Transfert de rayonnement dans les atmosphères étendues* (soumis à *Bull. Soc. Roy. Sc. Liège*, mai 1980).

R.N. THOMAS, *Concluding summary of the 4th International Colloquium on Astrophysics at Trieste : High resolution spectrometry* (ed. M. Hack, *Obs. Trieste Publ.*, p. 702, 1978).

— *Thermodynamic requirements on atmospheric models imposed by observed stellar nonthermal mass-fluxes and by those observed nonthermal features enhanced in Xe stars* (in *I.A.U. Symp. n° 83 Proc., on Mass-Loss Evolution of 0-type stars*, ed. P.S. Conti et C.W.H. de Loore, p. 215, Reidel-Dordrecht, 1979).

CONGRÈS, COLLOQUES, RÉUNIONS

Colloque E.S.A./E.S.O. sur « Astronomical uses of the Space Telescope », Genève, février 1979 (N. HEIDMANN).

Ecole d'été d'Astronomie de Grasse, 3-15 juillet 1979 (M. GROS a donné un cours sur Analyse de la lumière).

Assemblée Générale de l'U.A.I. à Montréal, août 1979 (J.-C. PECKER, S. DUMONT, R.N. THOMAS, N. HEIDMANN).

Colloque U.A.I. n° 51, London, Canada, 1979 (S. DUMONT).

Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Munich, décembre 1979 (H. KAROJI).

N.A.S.A. Symposium on Solar Orbiting Telescope, Goddard Space Flight Center et University of Colorado on I.U.E. Research Program, 12 au 26 janvier 1980 (R.N. THOMAS).

Colloquium on Be-stars and discuss Almeria Observing Program, Heidelberg, 27-31 janvier 1980 (R.N. THOMAS).

Colloquium on 2nd year of E.S.A.-I.U.E., Tubingen, 23-28 mars 1980 (R.N. THOMAS).

Colloquium on 2nd year of I.U.E., Goddard Space Flight Center, Washington, 5-18 mai 1980 (R.N. THOMAS, J. ZOREC).

SÉJOURS A L'ÉTRANGER, MISSIONS, CONFÉRENCES

V. DOAZAN, R.N. THOMAS, J. ZOREC, mission d'observation à l'Observatoire de Haute-Provence en avril 1980, et à Madrid en mai 1980.

H. KAROJI, mission d'observation à l'Observatoire d'Almería (Espagne).

C. MAGNAN, conférence à Valenciennes sur « la relation de l'homme à l'univers » (mars 1979).

J.-C. PECKER, conférence au Collège des Recherches Avancées, 18 janvier 1980, sur « la cosmologie, une aventure mentale ».

— Conférence au Centre Culturel de Compiègne, 24 janvier 1980, sur « l'Univers en 1980 ».

— Conférence à Bourg-en-Bresse, Association Astronomique de l'Ain, 15 mars 1980, sur « l'Univers est-il en expansion ? ».

— Conférence à l'Académie Royale de Belgique, Bruxelles, 1^{er} mars 1980, sur « l'anisotropie des propriétés de l'univers » ; puis au Planetarium de Bruxelles, le 28 février 1980, sur « le vent solaire ».

— Missions du Ministère des Affaires étrangères en Espagne du 11 au 16 février 1979 et conférences sur « l'Univers est-il en expansion ? » à Madrid, Saragosse, Barcelone, Valence et Séville ; à Fairbanks (Alaska), du 24 au 29 août 1979 ; à l'Université de Hawaii, Institute for Astronomy à Honolulu, du 30 août au 17 septembre 1979 ; à Tokyo du 17 septembre au 17 octobre 1979, conférences et visites de nombreux observatoires japonais ; nombreux entretiens avec des chercheurs japonais dans le cadre de la collaboration franco-japonaise ; à l'Ambassade de France à Séoul, Corée, du 18 au 25 octobre 1979.

— Invitation du Swedish Natural Science Research Council, en tant qu'expert pour l'étude de la recherche astrophysique suédoise, du 4 au 8 décembre 1979.

E. SIMONNEAU, réalisation d'une série de 8 conférences à Granada (Espagne), sur « Physique stellaire : théorie et observations », du 20 juin au 10 juillet 1979. En février 1980, conférence sur « approximations asymptotiques et interpolations dans le transfert de rayonnement », à l'Université de la Laguna (Iles Canaries) ; conférence sur « observation et expérimentation : exemples en physique stellaire » à l'Université autonome de Madrid ; conférence sur « la théorie de la couleur et du spectre des étoiles », à l'Université de Santiago de Compostela (Espagne).

R.N. THOMAS, séjour de 2 mois à l'Université du Colorado, du 20 juin au 10 septembre 1979.

J. ZOREC, mission d'observation à l'Observatoire de Haute-Provence (oct.-nov.-déc. 1979) ainsi qu'à l'E.S.O. au Chili ; en avril 1980, mission au C.D.C.A. à Nice.

DISTINCTIONS, NOMINATIONS

J.-C. PECKER a été nommé Fellow of the American Association for the Advancement of Science, en janvier 1980 ;

— a été promu au grade d'Officier dans l'Ordre National du Mérite le 14 juin 1979 ;

— a été élu Associé de la Section des Sciences Mathématiques et Physiques de l'Académie Royale des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique, le 30 juin 1979 ;

— a été réélu à la Commission Nationale pour l'U.N.E.S.C.O., Comité des Sciences Exactes et Naturelles, le 13 juin 1979 ;

— a été nommé Membre du Comité Exécutif de l'Association « l'Université à l'Usine », en mai 1979.