

Astrophysique théorique

M. Jean-Claude PECKER, professeur

Le rapport ci-après couvre l'année universitaire 1975-1976 en ce qui concerne les cours, et l'année 1975 en ce qui concerne les autres rubriques, notamment l'activité scientifique.

COURS

La constante H de Hubble

Quand le moment vient, chaque année, de définir le titre des leçons qui seront professées l'année suivante, le Professeur est naturellement tenté de donner à l'exposé de ses recherches une expression concise, voire « percutante ». Le cours dont on lira ci-après le résumé s'était donc appelé d'abord « H ». En effet, on était arrivé à se faire l'opinion, étayée par de nombreux faits d'observation, et par une relecture attentive des travaux anciens, que la « constante de Hubble » n'est ni constante, ni de Hubble... Cependant « H » eut été un titre trop elliptique ; et tant de quantités physiques ou chimiques sont abrégées aussi par la lettre H que le contenu du cours n'eut pas été alors suffisamment bien défini... D'où un titre plus complet, mais bien peu exact, et sur lequel il fallait bien, dès ces premières lignes, que je m'explique.

Introduction : les constantes de la Cosmologie

Il est connu que les cosmologistes, ceux du moins qui essaient d'atteindre à une suffisante rigueur mathématique, sont obligés de décrire l'Univers comme une solution des équations de la Relativité Générale, complétées par la donnée de deux constantes mesurables définissant la valeur actuelle du taux de variation du « rayon » R de l'Univers, et du taux de décélération de cette variation. La solution est ramenée alors à l'expression de la fonction $R(t)$; cette fonction, supposée décrire l'évolution d'un Univers homogène et isotrope, dépend de ces deux paramètres mesurables, H_0 (la

constante de Hubble), et q_0 , avec $H_0 = \dot{R}/R$, et $q_0 = -\ddot{R}R/\dot{R}^2$. L'indice « o » met l'accent sur le caractère *local*, et *instantané*, des mesures susceptibles de nous permettre de déterminer ces quantités.

Le seul fait de définir ces quantités implique déjà des hypothèses dangereuses. Si l'expansion « apparente » (pour utiliser une expression fréquente de Hubble lui-même) est inhomogène ou anisotrope, la signification même de H_0 et q_0 doit être mise en cause. En fait, notre propre tendance sera, pour une galaxie i , située à une distance L_i de définir *une* quantité H_i et, si nous le pouvons, *une* quantité q_i . Ce problème, indépendamment de sa traduction en une quelconque cosmologie, est déjà fort difficile en soi. Pour une Galaxie donnée, G_i , la vitesse apparente est définie par la relation exprimant le décalage spectral :

$$z_i = (\Delta\lambda/\lambda)_i = H_i L_i / c$$

Déterminer H_i implique la mesure de v_i (vitesse apparente) = $c(\Delta\lambda/\lambda)_i$ et de la distance L_i . Les leçons de l'année 1975-76 ont porté principalement sur cette dernière détermination, sur laquelle repose tout un édifice, admis très généralement, et dont nous avons essayé de montrer à quel point les bases mêmes sont contestables.

I. Détermination des distances extragalactiques

1. On cherchera à utiliser des « chandelles » standards dont l'étude détaillée dans des objets proches aura permis de montrer qu'elles ont un éclat absolu (ou encore une dimension absolue) relativement bien déterminé à partir de critères mesurables indépendamment de leurs distances. La reconnaissance, puis l'étude, de ces « chandelles » standards, dans des objets plus lointains que ceux qui ont servi à déterminer leur éclat (ou leur dimension) absolu, permettent, en principe, la détermination des distances.

Tout critère de distance a une valeur provisoire : des chandelles longtemps considérées comme « standards » peuvent ne pas l'être (objets de propriétés variables d'une galaxie à l'autre).

D'où le caractère encore actuel, plus de 60 ans après les travaux de Henrietta Leavitt et de Harlow Shapley sur ces questions, d'une discussion détaillée.

Quelles chandelles utiliser ? Des objets assez brillants pour être observables dans des galaxies lointaines ; et assez bien définis pour que leur magnitude absolue soit bien connue.

Si la magnitude apparente d'un objet, de magnitude absolue supposée connue M est m , la distance de la galaxie G_i est définie par son « module de distance » :

$$m - M = 5(\log L_i - 1)$$

par définition même des échelles de magnitudes, et si la distance L_1 est exprimée en parsecs. Cette expression donnera la distance, quelle que soit la zone de longueurs d'onde pour laquelle on définit les magnitudes. Les « chandelles » les plus utilisées ont été, initialement (et encore maintenant) : les étoiles variables RR Lyr (M de l'ordre de -1 à $+1$), les céphéides classiques (0 à -5) étoiles variables dont la période permet de déterminer la luminosité, les novae de type RT Ser (-5 à -6), DQ Her (-6 à -7), V 603 Aqu (-7 , -8) ou CP Puppis (-10 , -11) — dont certaines sont récurrentes, et qui ont des courbes de lumière caractéristiques —, certaines supergéantes (-6 à -9) et enfin les supernovae, de type II ($M \sim -16$ à -17), ou I (de -15 à -20).

La limite de pénétration des grands télescopes, exprimée en magnitudes, fixera aisément les distances maximum que ces critères permettent d'atteindre. La magnitude limite dépend de la dimension du télescope, du temps de pose ou d'intégration de l'observation, du type de récepteur utilisé. Avec des techniques photographiques, la relation suivante peut être considérée comme satisfaisante :

$$m_{\text{lim}} = 10.5 + 2.5 \log D_{\text{em}} + 2 \log t_{\text{min}} ;$$

pour un diamètre de 500 cm (Mont Palomar), un temps d'exposition de 100 minutes, on trouve alors $m_{\text{lim}} = 23$. En améliorant les télescopes, les récepteurs, et le choix des sites, on pourra atteindre $m = 26$, — la limite étant imposée par l'atmosphère terrestre d'abord, mais, même si on s'en affranchissait, par la matière interplanétaire responsable de la lumière zodiacale.

Les deux relations ci-dessus montrent quelle valeur L_1 de la distance peuvent permettre d'atteindre dans les conditions ci-dessus les chandelles de magnitudes M :

$$M = 28 - 5 \log L_1$$

Ceci montre que les RR Lyr permettent actuellement d'atteindre les galaxies proches, celles de l'amas local, jusqu'à quelques Mpc ; les étoiles les plus brillantes des amas et les céphéides de type I peuvent permettre de dépasser 10 Mpc, et de dépasser — de peu il est vrai — l'amas local de galaxies ; les novae vont jusqu'à une trentaine de Mpc. Les supernovae permettent d'atteindre une centaine de Mpc — donc de dépasser les limites de notre « supergalaxie ». Pour aller plus loin, il faudra trouver autre chose que des étoiles...

Actuellement, Sandage — l'un des astronomes qui ont contribué le plus brillamment à la connaissance de H , — pense qu'il faut diviser l'Univers en plusieurs « couches » successives autour de notre galaxie : la zone où les meilleures chandelles sont les étoiles variables s'étend jusqu'à 4 Mpc

($v = 200$ km/s) ; puis c'est la zone des régions H II les plus brillantes (critère dont nous parlerons ultérieurement) jusqu'à 25 Mpc (1 500 km/s) ; puis la zone des « progrès actuels », celle des supernovae (jusqu'à 100 Mpc, 5 000 km/s), enfin la zone du « flot de Hubble » (où la distance est estimée seulement en utilisant la relation de Hubble, et où nous avons donc, quant à nous, les raisons les plus sérieuses de douter de la validité de cette relation, qui n'est prouvée en somme que dans un rayon de 100 Mpc — l'univers très proche en vérité). Les modules de distances sont respectivement : dans le groupe local, de l'ordre de 25, de 25 à 28 dans la région des céphéides, de 28 à 32 dans la zone suivante, de 32 à 35 dans la zone des progrès actuels, plus que 35 au delà...

2. Une fois choisies les meilleures « chandelles », encore faut-il corriger les magnitudes des effets de l'absorption par la matière diffuse de notre propre Galaxie. Cette correction est très différente d'un auteur à l'autre, bien que l'absorption soit très bien cartographiée : ces différences peuvent expliquer les différences entre les modules de distances déterminés pour les mêmes objets dans diverses publications. La correction A s'exprime en magnitudes :

$$m_{\text{corrigé}} = m - A$$

L'absorption galactique est fonction de la latitude galactique b et de la longitude l : Hubble et Oort ont utilisé la relation moyenne :

$$A = 0.31 \operatorname{cosec} b$$

Mineur utilise dans l'hémisphère galactique nord :

$$A_N = (0.22 \pm 0.02) \operatorname{cosec} b$$

et dans l'hémisphère galactique sud :

$$A_S = (0.28 \pm 0.02) \operatorname{cosec} b$$

Sandage choisit naguère :

$$A = 0.25 \operatorname{cosec} b$$

Des auteurs nombreux (Sandage notamment) utilisent maintenant une relation $A = F(b, l)$, telle que celle résultant des travaux, par exemple, de Holmberg.

L'absorption galactique est liée à l'excès de couleur des objets étudiés, — si la loi de rougissement est considérée comme « normale » ! Cette relation, souvent utilisée, dans les cas où les excès de couleur peuvent être déterminés directement, s'écrit, selon Bok :

$$A = 3.2 E_{B-V}$$

Nous ne devons pas oublier dans nos discussions que cette correction ne concerne *que* l'absorption galactique — mais l'absorption au sein de l'amas local, de la supergalaxie, de la métagalaxie, ne devraient pas être omises, au moins en principe...

Une autre difficulté, liée encore à la détermination des valeurs de la magnitude apparente m utilisées dans le calcul des distances, vient du fait que l'on utilise des étoiles variables : doit-on choisir la magnitude au maximum, au minimum, ou quelque valeur moyenne ? Différents auteurs utilisent différentes définitions de la magnitude à utiliser — et ceci n'est pas sans conduire parfois à des confusions regrettables.

3. Les étoiles de type RR Lyrae ont cela de remarquable que ce sont sans doute d'excellentes chandelles, leur magnitude absolue étant pratiquement indépendante de tout autre paramètre : elles se trouvent sur la branche horizontale du diagramme HR des amas globulaires de notre Galaxie. On sait — depuis l'étude par Miss Leavitt, 1912, des nuages de Magellan —, que les étoiles pulsantes obéissent à une relation période-luminosité ; dans le cas des RR Lyrae, cette relation (réduite à une extrême simplicité) est essentiellement : $m = cste...$ Par ailleurs l'histogramme des RR Lyrae dans le diagramme $m, \log P$ est très pointu autour de la valeur $\log P = 0.25$. En d'autres termes, même si la relation $\log P, m$ n'était pas très bonne, la bonne définition de P , donc de m , et le caractère très particulier des courbes de lumière, permettent d'utiliser les RR Lyrae comme de très bonnes chandelles.

Un des éléments de la discussion est que les RR Lyrae appartenant toutes à un amas globulaire donné, la distance de cet amas étant définie, la loi $m, \log P$ est bien définie. Cependant l'extension de l'amas, et l'absorption interne à l'amas, imposent une certaine dispersion : on peut montrer que cet effet est réellement négligeable.

Naturellement, les RR Lyrae, en tant que chandelles, posent d'autres problèmes : pourquoi par exemple, ce « trou » entre les étoiles de période 0.4 jour et 0.45 jour, où les histogrammes montrent un évident et significatif « manque » ?

Par ailleurs certains auteurs établissent une relation $m, \log P$ pour les RR Lyrae ; mais il y a des désaccords : pour Oméga Cen, il semble que la magnitude augmente avec P , pour les RR Lyrae hors des amas, Parénago au contraire écrit : $M = 0.44 - 0.20 \log P$; pour M 3, Sandage et Roberts ont une relation inverse (comme aussi Belserene pour Oméga Cen et M 3) : $m = K +$ (et non — !) $0.41 \log P$.

Autre difficulté classique pour les RR Lyrae : comment « localiser » dans le diagramme HR, le diagramme d'un amas par rapport à celui d'un autre : faut-il ajuster les séries principales ? Alors les déterminations des magnitudes pour les RR Lyrae varient d'un amas à l'autre... Faut-il au contraire, ajuster les diagrammes dans la région des RR Lyrae ? On obtient alors des résultats anormaux pour les relations entre l'âge d'un amas, et son diagramme HR...

L'utilisation de cette méthode donne pour $M = 0.2 \pm 0.2$, en admettant la première façon d'opérer comme plus légitime. D'un auteur à l'autre, on trouve des variations considérables de 0 à 0.45, avec des barres d'erreurs de l'ordre de 0.3 à 0.5 magnitude...

Une technique permettant d'éviter cette difficulté, c'est de déterminer directement non pas les valeurs de m , et de M , par le diagramme HR, mais d'évaluer les distances par une détermination de parallaxes ; trop peu de parallaxes trigonométriques sont accessibles ; on utilisera donc des parallaxes « dynamiques ». Cette méthode est d'une importance fondamentale pour déterminer le « zéro » de la relation $m, \log P$, la relation elle-même pouvant résulter d'autres études. Selon Wilson (1939) (parallaxes statistiques, issues des mouvements propres), on a : $M = 0.15$; selon Mineur (1944) (mouvements propres, et termes de mouvement solaire), $M = -0.02$, et (mouvements propres et vitesses radiales) $M = -0.58$, puis $M = -0.32$ (1952 : moyenne des déterminations antérieures). L'étude critique montre à Mineur que -0.02 est une meilleure valeur. On adopte actuellement $M = 0.0 \pm 0.2$... Mais des valeurs fort différentes existent dans la littérature (Parénago : 0.53 ± 0.38 ; Pavlovskaja : 0.50 ± 0.18 ; Van Herk : 0.68 ; Sandage, 1964 : 0.41 ; Tammann : 0.5 en 1969) et sont parfois utilisées...

Dans le cas des RR Lyrae, le terme d'absorption (considéré de façon plus générale ci-dessus) ne peut non plus être négligé : mais on s'en sort en le déterminant implicitement ; en effet on peut — quel que soit A — déterminer le module de distance \mathcal{A} , pour les RR Lyrae, à une constante près, et donc celui pour un autre type d'objet calibré avec ces RR Lyrae. On a alors :

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{d,RR} &= m_{RR,obs} - M_{RR,obs} \\ M_{RR} &= m_{RR,obs} - \mathcal{A}_{d,RR} \\ \mathcal{A}_{d,RR} &= \mathcal{A}_d, \text{ tout objet associé} = \mathcal{A}_d \\ M_{objet} &= m_{objet} - \mathcal{A}_d \end{aligned}$$

4. Nous devons, pour toutes les espèces de chandelles standards utilisées, nous livrer à la même analyse critique que pour les RR Lyrae. Nous abrégerons ici cette discussion, qui a couvert les étoiles variables de population I et II (ce qu'on peut nommer au sens large, les Céphéides), les supergéantes, les novae et les supernovae, d'une façon aussi détaillée que dans le cas des RR Lyrae.

Quelques remarques ont amené des développements spécifiques nouveaux. On a notamment montré le caractère très subjectif de l'utilisation d'une « supergéante synthétique » dans une galaxie, fabriquée en combinant l'éclat de quelques-unes parmi les plus brillantes, d'une façon unique, pour tous les objets extragalactiques dont on détermine la distance : il nous semble

en effet que cette technique (contrairement à celle qui utilise la relation période-luminosité de variables bien connues) est sujette à de graves critiques : comment savoir si, d'une galaxie à l'autre, la distribution des plus brillants des objets visibles n'est pas une fonction très sensible au type de la galaxie étudiée ? Dans les nuages de Magellan l'existence, reconnue notamment par Divan et Burnichon, de « super-supergéantes » bleues de classe de luminosité 0, est un fort argument à l'appui de notre scepticisme...

Ce genre d'hypothèse sur la ressemblance entre la population d'une galaxie quelconque avec celle de la nôtre est un très grave et très général problème.

5. Parmi les développements les plus importants de cette exploration de l'univers proche, figure la célèbre discussion de la distance de M 31. Mineur le premier contesta (par une étude serrée des parallaxes statistiques) le zéro de la relation période-luminosité des céphéides galactiques ; Baade arrivait à la même conclusion en remarquant qu'il ne pouvait détecter aucune RR Lyrae dans M 31, et que donc on s'était trompé sur le zéro de la relation période-luminosité des céphéides classiques, faute d'avoir tenu compte correctement de l'absorption dans la Galaxie.

Actuellement, la relation $m, \log P$ doit dépendre de la couleur de l'étoile variable utilisée, et l'estimation des luminosités s'en trouve plus précise — mais plus difficile.

II. Distances dans l'Amas local, et au delà

Ayant discuté des principaux critères de distance utilisés dans le proche univers, nous avons examiné en détail, et de façon critique, la très importante série d'articles de Sandage et Tammann publiée en 1974-75 dans l'*Astrophysical Journal*. Nous nous sommes préoccupés d'abord de l'Amas local (ou du Groupe local — si l'on préfère) de galaxies.

Les objets qui ont servi aux calibrations faites par différents auteurs sont essentiellement le LMC, le SMC, M 31 bien entendu, parfois M 33, et souvent NGC 6822, et IC 1613 — soit, à l'exception de M 31 (Sb) et M 33 (Sc), des galaxies « irrégulières ».

Hypothèse n° 1 : les céphéides ont les mêmes propriétés d'un des objets étudiés à l'autre. On doit donc trouver, pour toutes, la même relation $m, \log P$: or si la pente de cette relation est -2.25 (pour le domaine bleu) dans le SMC, il n'en est rien pour le LMC, où la pente est 2.84 ... Suivant donc que l'on utilise les plus brillantes ou les moins brillantes des variables d'une galaxie, son module de distance sera trouvé différent...

Un cas important est celui de M 31. Dans cette galaxie, Hubble avait utilisé les objets d'allure stellaire les plus brillants. Mais certains d'entre eux n'étaient pas des étoiles, mais des régions d'hydrogène ionisé, semblables aux régions galactiques H II entourant les étoiles chaudes de notre Galaxie. Ceci étant admis, on dispose de critères du « second ordre », — la dimension apparente des régions H II.

Leur utilisation est sujette aux mêmes critiques, il faut le souligner, que l'utilisation des critères primaires. La dimension réelle des régions H II dépend en effet de deux paramètres : le nombre de photons UV émis par l'étoile centrale (donc, essentiellement, sa température effective), et aussi la densité moyenne du milieu interstellaire. Or dans la Galaxie, cette densité varie de façon très nette des régions centrales aux régions périphériques. L'utilisation des dimensions apparentes des régions H II (et là aussi on a souvent utilisé des combinaisons des plus grandes régions H II d'une galaxie donnée, — combinaisons différentes d'un auteur à l'autre) est donc critiquable si on ne se préoccupe pas du choix de la région de la galaxie où la mesure est faite. Or dans les galaxies les plus proches on voit les régions H II proches du centre ; pour les galaxies plus lointaines, moins bien résolues, on ne voit que les plus extérieures des régions H II, — plus grandes : on a donc tendance à sous-estimer leur distance... A cette mise en garde s'en ajoute une autre ; d'une galaxie jeune à une galaxie évoluée, les températures effectives des étoiles chaudes, comme la densité moyenne, doivent varier de façon très considérable. De plus, comme pour les supergéantes, on utilise la « queue » d'une distribution — une caractéristique en somme de cette distribution particulièrement sujette à de nombreuses contestations, — en tout cas en ce qui concerne les galaxies les plus compactes, — galaxies de Markarian, de Seyfert, voire quasars...

Naturellement, tous les auteurs ayant étudié les galaxies proches — celle de l'Amas Local, celles aussi du groupe de M 81 (dont NGC 2403) — ont calculé leurs modules de distance en utilisant, autant que faire se pouvait, tous les critères de distance disponibles. Ainsi Tammann et Sandage arrivent-ils, en 1968, à la valeur $\langle H \rangle = 65 \pm 15$.

Une des conséquences de la diversité de ces choix de critères, d'un auteur à l'autre, est que, pour les mêmes objets, on trouve des valeurs de H_1 différentes ; une autre, qui dépend du choix des galaxies de calibration, c'est que la relation de calibration (magnitude absolue de certaines étoiles, dimensions de régions H II) varie d'un auteur à l'autre, les galaxies de calibration n'étant pas les mêmes.

Un point important est l'apparition dans ces travaux de la notion de classe de luminosité (I à V) des galaxies. Les critères peuvent être les mêmes de l'une

à l'autre, — mais pas nécessairement ; et l'utilisation, dans les galaxies de calibration, de proportions variées de galaxies des différentes classes peut conduire à de grandes différences.

Un autre point à noter est l'apparition récente dans le débat, des critères radioastronomiques de distance. Schématiquement on peut dire que l'intensité de la raie à 21 cm mesure la masse d'hydrogène, la largeur mesurant plutôt la vitesse de rotation, en km/s ; en appliquant la troisième loi de Képler, on peut en déduire une masse d'ensemble. Ces informations, complétées par celles déduites des mesures optiques sur la forme de la galaxie, et par la classification de cette galaxie, permettent de calibrer telle ou telle classification et de déduire la luminosité absolue de chaque galaxie classée, en utilisant en somme une combinaison des critères radioastronomiques et des critères morphologiques. Ces recherches, toujours, rencontrent la même difficulté : elles aboutissent à des échelles de calibration qui restent fonction des échantillons utilisés.

Comme résultat des discussions les plus approfondies, nous mentionnerons la valeur la plus récente de $\langle H \rangle$: 55 ± 5 selon Sandage et Tammann, — en notant que d'autres auteurs conservent des valeurs nettement plus élevées —, et tout aussi bien étayées !

III. Au delà de 100 Mpc...

Un critère de distance s'impose dès qu'on va assez loin : la luminosité des galaxies elles-mêmes : d'où la construction de diagrammes de Hubble où l'on porte en abscisse la magnitude. Pour les amas de galaxies, on peut aussi utiliser la luminosité des plus brillantes galaxies de l'amas.

Les calibrations relatives à ces objets reposent sur l'évaluation des luminosités des galaxies des différentes classes de luminosité — reconnaissables dans les amas de galaxies par leur éclat, et en dehors des amas, éventuellement, par certaines caractéristiques morphologiques. Mais ces calibrations, encore une fois, diffèrent d'un auteur à l'autre... Ainsi les ScI de l'échelle de Van den Bergh sont intrinsèquement moins brillantes que celles de l'échelle de Sandage — par environ 1 magnitude, semble-t-il ; cette différence est sans doute due au choix limité, et différent, des galaxies de calibration. On notera que même un seul auteur (Sandage) trouve, pour le groupe N 81 - NGC 2408 des modules de distances toujours inférieurs lorsqu'il choisit comme « chandelles » les régions H II, à ce qu'ils sont lorsqu'il choisit les étoiles brillantes... Là aussi des difficultés dans le choix des échantillons de calibration, et la variation des propriétés physiques d'une galaxie à l'autre, même au sein d'une même classe de luminosité ou d'une même classe morphologique, sont à prendre en considération.

L'étude des amas de galaxies permet évidemment d'aller loin : mais là encore, doit-on admettre que deux amas se ressemblent ? L'étude de la stabilité des amas permet (théorème du viriel) de connaître leur extension réelle, de distinguer les limites apparentes ; mais a-t-on le droit de l'appliquer ? Ce n'est pas sûr... Un amas peut fort bien être en état d'évolution, d'instabilité : alors la mesure du diamètre de l'amas ne saurait être un indice de distance...

L'utilisation de diagrammes v, m (et non pas v, L_i) a un intérêt tout particulier. Dans de tels diagrammes, la droite de pente 0.2 représente la relation de Hubble : si elle n'apparaît pas comme vérifiée par tel ou tel échantillon, ce peut être pour des raisons de non-homogénéité (en luminosité) de l'échantillon — ainsi en est-il des quasars, ou des objets compacts, pour lesquels la pente semble supérieure à 0.2, et la dispersion assez considérable. Sandage et Tammann font remarquer que, la constante de Hubble étant alors mesurée par l'ordonnée à l'origine de la relation en question, des biais observationnels affectent les mesures, ou plutôt leur interprétation en termes de constante de Hubble. Ainsi la limitation en magnitude d'un échantillon prive la statistique des objets les plus faibles, pour les distances les plus grandes, et tend à augmenter les valeurs trouvées de H . Nous pouvons argumenter d'ailleurs dans le sens opposé : dans son raisonnement, Sandage implique que la dispersion est due uniquement à la dispersion en magnitudes ; si elle est due à une dispersion des vitesses apparentes, pour une magnitude absolue donnée, alors on peut montrer que le biais ainsi défini tend au contraire à diminuer les valeurs déterminées de H .

IV. Anisotropie, inhomogénéité de H

Nous avons montré les incertitudes de la détermination des distances de galaxies — donc des valeurs de la constante de Hubble. Ces difficultés, en bref, sont dues d'une part au choix des combinaisons de critères, et au choix des galaxies d'étalonnage ; aussi à la détermination du zéro de la relation, par la détermination de la distance de l'éclat réel des objets utilisés comme critères.

De fait, ces difficultés ont conduit des auteurs comme Sandage lui-même, tout en publiant des valeurs assez précises de H , à émettre des doutes sérieux sur les irrégularités trouvées parfois (et même par lui) dans la distribution dans le ciel des valeurs de H_i . Pourtant ces irrégularités, si elles sont confirmées, peuvent être d'une considérable importance cosmologique.

Ces recherches utilisent souvent le « module de Hubble » h_m , défini à partir de la relation :

$$\log cz_i = \log H + 0.2 m_i - K$$

par :

$$h_m = \log cz_i - 0.2 m_i$$

On montre alors (Rubin, Ford, Rubin, puis Vigier et ses collaborateurs, à l'IHP) qu'une différence significative existe entre les modules de Hubble mesurés soit dans la direction du centre supergalactique (à peu près celle de l'amas de galaxies de Virgo), soit dans la direction opposée. Cette différence est aussi trouvée par Sandage — mais considérée par lui comme non significative, bien que la barre d'erreur indique une déviation de 2.8 fois l'erreur standard par rapport à l'isotrope.

Plus convaincante nous paraît l'analyse « fine » de l'effet de Rubin, Ford et Rubin par les chercheurs de l'IHP et de l'IAP (Nottale, Karoji, Molès, Nieto, le Denmat, Vigier et nous-mêmes). Ces auteurs en effet trouvent qu'il est plus significatif de diviser le ciel en deux groupes de régions, les régions A, devant, ou entre, les amas de galaxies, et les régions B, derrière ces amas. Alors la différence devient plus significative, l'effet Rubin-Ford-Rubin résultant d'un effet de moyenne, le centre supergalactique étant naturellement plus riche en régions B. Aucune interprétation classique ne semble capable de réconcilier l'effet A-B et l'isotropie du rayonnement dit « cosmologique », à $3^\circ K$: ce rayonnement étant considéré comme un résidu de l'explosion initiale de l'Univers (« big bang »), un doute est alors jeté sur la réalité de cette explosion, sur la réalité de l'expansion elle-même...

Un autre fait rend le problème plus difficile encore : il semble que les valeurs de H_i dépendent nettement de la distance : vers le centre et vers l'anticentre de la supergalaxie, cette variation est différente. Non seulement H n'est pas isotrope, mais H n'est pas homogène : c'est une quantité essentiellement locale !

Avant d'atteindre une conclusion de signification cosmologique, nous étudierons, dans le cours de l'année 1976-77, les galaxies se comportant de façon anormale dans le diagramme de Hubble. D'ores et déjà nous pensons que le cadre général de l'Univers en expansion ne peut plus être retenu sans une sérieuse remise en question des observations sur lesquelles il se fonde, et donc sur les hypothèses qui soutiennent les développements théoriques.

SÉMINAIRES ET CONFÉRENCES

Des séminaires ont eu lieu sur le thème *Physique des étoiles A particulières (Ap)* du 6 janvier au 24 février 1976 :

Problèmes posés par le phénomène de diffusion dans l'interprétation des anomalies des étoiles Ap, E. SCHATZMAN ;

Les éléments légers dans des étoiles Ap, S. VAUCLAIR ;

Problèmes de structure interne : zone convective et rotation dans les étoiles Ap, G. VAUCLAIR ;

Génération turbulente des champs magnétiques, J. LEORAT ;

Structure des champs magnétiques : I. - Le champ magnétique solaire, M. SEMEL ; II. - *Le champ magnétique dans les étoiles Ap*, L. MESTEL ;

Débat sur le rotateur oblique, animé par C. MÉGESSIER ;

Le spectre ultraviolet des étoiles Ap, F. PRADERIE, C. JAMAR.

Le professeur D.W.N. STIBBS, directeur de l'Observatoire de l'Université de St Andrews (Ecosse), a fait une série de huit leçons sur les sujets suivants, du 18 novembre au 9 décembre 1975 : *Some aspects of radiative transfer* : 1) *Radiative transfer in plane-parallel and spherical atmospheres* ; 2) *Application of the principles of invariance to the study of the heating of plane-parallel atmospheres* ; 3) *Non-coherent scattering in the formation of absorption lines* ; 4) *The formation of Zeeman triplet lines in the spectra of magnetic stars* ; 5) *Magnetic variable stars and the oblique rotator model*.

M. Johannes HARDORP, professeur à l'Université de Stony Brook, New York, a fait une série de huit cours sur : *Stellar rotation and magnetic fields*, à partir du 6 janvier 1976 : 1) *Stellar rotation : Effect on stellar structure and main sequence evolution* ; 2) *Effect on late evolution* ; 3) *Effect on emergent radiation* ; 4) *The sun and solar wind* ; 5) *Effect of magnetic field on radiative transfer : Sunspots* ; 6) *Effect of magnetic field on radiative transfer : Ap stars* ; 7) *An oblique rotator model for the Ap star HD 51418* ; 8) *Problems of absolute calibration of stellar energy distribution*.

M. Jay M. PASACHOFF, directeur de l'Observatoire Hopkins de Williams College (U.S.A.), a fait deux conférences sur : 1) *Deuterium and the future of the universe* ; 2) *The solar corona and the African eclipse expedition*, les mardi 15 et jeudi 17 juin 1976.

M. Ph. SCHERESCHEWSKY, vice-président de la Société météorologique de France, a fait une conférence sur : *L'atmosphère terrestre vue de l'espace : un problème actuel*, le mardi 13 avril 1976.

SÉMINAIRES EXTÉRIEURS AU COLLÈGE DE FRANCE, CONFÉRENCES, COURS

N. HEIDMANN : *Etude de la structure générale des étoiles sur les étoiles jeunes de type T Tauri* (Observatoire de Marseille, novembre 1975).

C. MAGNAN : *Transfert non ETL en milieu turbulent, entre la micro et la macro turbulence* (Institut d'Astrophysique, printemps 1975).

Jean-Luc NIETO : *Anisotropie et inhomogénéité de la constante de Hubble* (Observatoire de Marseille, novembre 1975).

E. SIMONNEAU : *Sur une nouvelle approximation pour résoudre l'équation de transfert en systèmes à géométrie sphérique* (Institut d'Astrophysique, mai 1975).

— *Une simple approximation pour le transfert en géométrie sphérique* (Observatoire de Genève, juillet 1975).

— R. N. THOMAS : *Thermodynamic basis for structure of stellar atmospheres* (Observatoire de Marseille, novembre 1975). — *Matter fluxes, chromospheres, emission lines.*

Juillet 1975 : University of Colorado, Boulder ; Sac Peak Observatory (2 séminaires) ; Kitt Peak (2 séminaires) ; University of California, Berkeley.

Décembre 1975 : Goddard Space Flight Center, Greenbelt ; Harvard College Observatory ; Sac Peak Observatory.

R. N. THOMAS : *Stellar atmospheres as a transition zone* (Institut d'Astrophysique de Liège ; 12 cours, mars-mai).

C. CANNON : *Advanced School in Astronomy* [Erice (Sicile), 3 cours].

F. PRADERIE : *Advanced School in Astronomy* [Erice (Sicile), 4 cours].

COMPOSITION DU LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE THÉORIQUE

(98 bis, boulevard Arago, 75014 Paris)

au 1^{er} janvier 1976

M. E. BENDER (vacataire, Collège de France, à temps partiel) ; M^{me} BRUNEL (aide-comptable, Collège de France) ; M^{me} E. DÉCHARD (aide de laboratoire, Collège de France) ; M. S. DEPAQUIT (ingénieur I A, C.N.R.S.) ; M^{me} G. DROUIN (documentaliste 3 A, C.N.R.S.) ; M^{lle} S. DUMONT (astronome-adjoint, Observatoire de Paris) ; M. R. FREIRE (boursier, Uruguay) ; M^{me} M. GROS

(assistant, Observatoire de Paris) ; M^{me} N. HEIDMANN (astronome-adjoint, Observatoire de Paris) ; M. R. KRİKORIAN (maître-assistant, Collège de France) ; M. C. MAGNAN (sous-directeur du laboratoire, Collège de France) ; M. J.-L. NIETO (assistant, Ecole Centrale) ; M. J.-C. PECKER (professeur, Collège de France) ; M^{me} PETIT-ALEXANDRE (aide-physicien, Collège de France) ; M^{lle} S. PERRET (secrétaire, Collège de France) ; M^{me} F. PRADERIE (astronome-adjoint, Observatoire de Paris) ; M. E. SIMONNEAU (attaché de recherche, C.N.R.S.) ; M^{me} M. STEINBERG (assistante de recherche 3 A, C.N.R.S.), M. R. N. THOMAS, professeur associé (Université de Paris VII).

De plus, des visiteurs étrangers ont effectué au Laboratoire d'Astrophysique théorique des séjours prolongés ou répétés :

Séjours courts : P^r P. WILSON, Université de Sydney, avril-mai (3 semaines) ; P^r E. A. SPIEGEL, Université de Columbia, New York, 15 avril-15 juin ; D^r D. O. GOUGH, Institute for theoretical Astrophysics, Cambridge, England, janvier (8 jours) ; D^r S. FRANDSEN, Aarhus, Danmark, 11 au 15 mars ; D^r C. JAMAR, Institut d'Astrophysique, Liège, plusieurs séjours de 1 semaine ; P^r W. N. D. STIBBS, Observatoire de St Andrews, Ecosse, octobre, novembre et décembre ; D^r A. M. BOESGAARD, Université de Hawaïï, U.S.A., mai (15 jours).

Séjours longs : P^r C. CANNON, Université de Sydney (1 an) ; D^r L. CRAM, Université de Sydney (1 an) ; M. I. VARDAVAS, Université de Sydney (6 mois) ; M. P. LOPERT, Université de Sydney (9 mois) ; M^{me} A. CANNON, Université de Sydney (1 an).

Des chercheurs parisiens sont associés régulièrement au L.A.T. où ils disposent d'un bureau : R. BONNET (L.P.S.P., Verrières), H. REEVES (C.E.A.).

Une coopération étroite se poursuit avec le groupe de M. J. P. VIGIER (maître de recherche, Institut Henri Poincaré), notamment avec MM. J. P. VIGIER, P. MERAT, R. LE DENMAT, H. KAROJI, T. JAakkOLA, M. MOLES.

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE DU LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE THÉORIQUE
(Année 1975)

L'activité du laboratoire porte principalement sur un ensemble de problèmes théoriques et semi-empiriques concernant les atmosphères stellaires. D'autres travaux se rapportent à l'atmosphère du Soleil d'une part, à l'évolution des galaxies d'autre part.

I. ETOILES

1. *Théorie intégrée des échanges d'énergie dans l'atmosphère*

a) *Atmosphères en équilibre radiatif*

L'étude fine de l'effet des absorbants continus métalliques sur la structure thermique d'une atmosphère en E.T.L. a été achevée par S. Dumont et N. Heidmann. Les étoiles dans lesquelles les atomes neutres absorbants sont suffisamment abondants sont de type B 5 à G. L'introduction de ces absorbants y produit des effets différents suivant la température effective du modèle : elle diminue T_{eff} dans les modèles les plus froids, comme on s'y attendait, mais dans les modèles les plus chauds elle produit une augmentation de T_{eff} dans presque toute l'atmosphère.

En étudiant en détail le modèle à $T_{\text{eff}} = 15\,000$ K, nous expliquons cette augmentation en T_{eff} par : (1) les continus de ces absorbants (CI principalement) qui se forment assez profondément, vers $\tau_{5\,000} \geq 1$; (2) leurs coefficients d'absorption qui « bouchent un trou » dans la courbe de l'absorption en fonction de la fréquence, rapprochant ainsi le coefficient d'absorption du cas gris ; (3) les fréquences auxquelles les absorptions ajoutées sont efficaces qui sont voisines du maximum de J_{ν} , lequel s'écarte là suffisamment de B_{ν} pour fournir une contribution importante à $(J_{\nu} - B_{\nu})$ dans la condition de l'équilibre radiatif.

M. Gros et J. Borsenberger ont poursuivi la construction de modèles hors E.T.L. par la méthode de linéarisation complète de Mihalas. Les absorbants continus sont H, He, C. D'une part des modèles d'étoiles très chaudes ($T_{\text{eff}} = 40\,000$), différentes par leur composition chimique, ont été calculés. Le but de ce travail est de voir l'influence de la composition chimique de

l'étoile sur celle de la région H II associée. D'autre part, la construction de modèles d'atmosphères pour les étoiles froides ($T_{\text{eff}} = 12\,500\text{ K}$ à $T_{\text{eff}} = 10\,000\text{ K}$) s'est poursuivie. Au fur et à mesure que les modèles sont plus froids, des problèmes numériques apparaissent, liés aux gradients introduits par l'ionisation de l'hydrogène.

Une première comparaison des résultats avec les flux émergents prédits à partir des différents modèles (E.T.L.) disponibles dans la littérature montre que pour $T_{\text{eff}} = 12\,000\text{ K}$ et $11\,000\text{ K}$ au moins, les flux sortants des modèles hors E.T.L. sont différents pour les longueurs d'ondes plus petites que $1\,400\text{ \AA}$. La structure thermique des divers modèles se différencie dans les couches superficielles.

b) *Vents stellaires et chromosphères*

C. J. Cannon et R. N. Thomas ont développé les équations décrivant le stockage et la propagation de matière et d'énergie dans l'atmosphère stellaire et la sous-atmosphère ; ces équations sont établies à partir de l'équation de Boltzmann pour les particules et les photons, de telle sorte qu'apparaisse leur dépendance par rapport au mode de stockage d'une part et au degré d'écart à l'équilibre d'autre part. L'origine de la chromosphère est attribuée au caractère imparfait du « wind-tunnel » (soufflerie aérodynamique) que constitue, par analogie, la situation stellaire. Les conditions aux limites sont prises en compte soigneusement.

Une solution des équations de Cannon et Thomas, dans le cas à symétrie radiale, est appliquée par Thomas, Dumont et Heidmann à l'étude des étoiles jeunes T Tauri : la vitesse radiale d'expansion du gaz est posée égale à la vitesse thermique dès le début de la chromosphère. Avec cette spécification du champ de vitesse, les profils des raies $H\alpha$ et K de Ca II sont calculés, par une méthode de résolution du transfert de Simonneau. La température de la chromosphère est elle-même tirée de la valeur absolue de l'émission dans le continu de Balmer de ces étoiles.

Cette interprétation chromosphérique de l'origine des raies d'émission et du continu de Balmer dans les étoiles T Tau souffre peut-être une alternative, en terme de source de l'ionisation de la nébulosité qui entoure ces étoiles et source de l'excitation. R. Krikorian a entrepris d'explorer le rôle du rayonnement Compton inverse et du rayonnement de transition.

c) *Enveloppes circumstellaires*

Le désaccord mis en évidence par R. Krikorian entre les observations du continu visible et les prédictions de modèles classiques d'étoiles 0 a été

étudié par J.-C. Pecker et R. Krikorian, qui ont montré que l'existence d'une enveloppe de poussières circumstellaires ne rapproche pas les calculs des observations.

Qualitativement le désaccord peut s'expliquer par l'influence d'une enveloppe gazeuse froide entourant l'étoile ; si le rayon intérieur de l'enveloppe coïncide avec le rayon stellaire, nous avons alors ce qu'on appelle une atmosphère étendue. Des modèles d'étoiles 0 avec atmosphère étendue ont été construits par Mihalas, mais l'accord avec les observations n'est pas encore satisfaisant. L'étude de ce problème se poursuit.

2. *Transfert du rayonnement*

Cette « technique théorique » indispensable aux physiciens des atmosphères fait l'objet de travaux avancés dans le laboratoire.

L'essentiel du travail de C. Magnan, en 1975, a porté sur la *formation de raies spectrales en présence d'un champ de vitesses aléatoires*. Il a pu traiter de façon extrêmement satisfaisante le problème de transfert non E.T.L. lorsqu'on tient compte de la longueur de corrélation de la turbulence et ce par l'introduction d'une approximation nouvelle, l'approximation des « cellules effectives ». Des calculs numériques ont permis de montrer l'importance cruciale du paramètre « longueur de corrélation » : grâce à la méthode développée il est maintenant possible de couvrir de façon « continue » tout le domaine compris entre les limites usuelles de la « microturbulence » et de la « macroturbulence ».

Dans le domaine du *transfert en géométrie sphérique*, E. Simonneau a développé une méthode approchée qui permet d'avoir assez facilement des solutions de l'équation de transfert dans des conditions propres aux atmosphères stellaires (article sous presse à « J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer »).

E. Simmoneau a, depuis, considéré une autre méthode numérique de résolution de l'équation de transfert en géométrie sphérique, après avoir fait le changement de variable indépendant $\mu \rightarrow \alpha$ de la forme

$$\mu = \pm \sqrt{1 - \frac{\alpha}{r^2}},$$

car, de cette façon, l'équation résultante est celle qui correspond à la géométrie plane, mais dans laquelle l'intensité est prise dans une direction μ variable selon la loi antérieure.

3. Etude semi-empirique des chromosphères

Plusieurs types d'étoiles sont analysés, soit par l'interprétation de raies fortes, soit par celle de continus ultraviolets, en vue de mettre en évidence la présence et les propriétés des chromosphères.

En plus des travaux déjà cités sur les étoiles jeunes T Tauri, d'autres étoiles jeunes sont étudiées par R. Krikorian : les naines à raies d'émission. Il a montré que l'excès d'UV, déjà signalé par R. Canavaglia pour ces étoiles des types F 8 à G 2, s'étend jusqu'au type KO. R. Krikorian a par ailleurs dépouillé les observations d'étoiles naines à émission qu'il a obtenues à Mauna Kea (Hawaïi) ; il a établi les relations suivantes entre les grandeurs K_1 K_2 K_3 qui caractérisent l'émission dans les raies K de Ca II : l'intensité de K_1 est d'autant plus élevée que K_2 est grand. L'intensité de K_3 est d'autant plus faible que K_2 est grand. L'intensité de l'aile C définie par l'expression du profil d'amortissement $I_\lambda = I_0 - C/\Delta\lambda^2$ est d'autant plus élevée que K_2 est intense.

F. Praderie a poursuivi la recherche d'excès d'émission dans des régions opaques du spectre à l'aide d'observations en provenance des satellites TD-1 et Copernicus.

a) L'analyse des spectres TD-1 d'étoiles A et plus tardives a continué d'être menée en collaboration avec C. Jamar (Institut d'Astrophysique, Liège) : étude de l'évolution des discontinuités dues à la photoionisation entre les types AO et FO, effets de la luminosité, confirmation d'un manque d'opacité dans les modèles à $\lambda < 2\ 500$ Å. Au cours de ce travail, il est apparu que Procyon (F5 IV-V) présente un excès d'émission par rapport à tous les modèles existants à $\lambda < 1\ 680$ Å. Deux caractéristiques en émission sont évidentes, coïncidant avec le doublet de C IV à $\lambda = 1\ 550$ et la raie Ba α de He II à $\lambda = 1\ 640$ Å. Ces deux raies ont été recherchées systématiquement dans toutes les étoiles observées par TD-1, et assez brillantes. Dans Procyon seulement, il a été possible de déduire la mesure d'émission à $T = 9.5 \cdot 10^4$ K (température du maximum de l'ion C IV dans une zone de transition chromosphère-couronne).

b) Etude de la raie Lyman α dans l'étoile Véga (AO V)

Durant l'année 1975, ce programme, commencé avec E. Simonneau, s'est développé comme suit : on a fait une étude préliminaire du profil de la raie, sauf dans la région centrale qui n'était pas observée, avec une fonction source non E.T.L. pour Ly α et un continu sous-jacent E.T.L., principalement dû à C I.

On a montré qu'un modèle E.T.L. et un modèle hors E.T.L. purement photosphériques, ce dernier avec remontée de température de 1 100 K, ne rendent pas compte de l'aile violette, qui est trop intense. Par la suite, on a obtenu à Princeton les observations de la partie centrale de la raie. L'absence d'émission et l'intensité très faible, sinon nulle, du noyau central, ne permet pas de conclure quant à l'existence ou non d'une chromosphère. Quant à l'aile violette, un premier calcul hors E.T.L. des populations des trois niveaux inférieurs de C I a été fait. Ce calcul indique une sous-population des niveaux ; il rejoint un résultat obtenu par ailleurs par M. Gros et J. Borsenberger et un résultat de Snidjers non publié ; mais il doit être complété avant que l'on puisse conclure à une opacité très diminuée à $\lambda < 1\,239\text{ \AA}$, ce qui irait dans le sens de prédire une aile violette plus intense pour Ly α . Ce travail est en cours, ainsi que l'étude de la partie centrale de la raie Ly α .

R. Freire, en collaboration avec J. Czarny (Meudon), a observé à haute résolution (0.04-0.05 \AA) les raies H et K de Ca II dans 4 étoiles à la tour solaire de Meudon. L'objectif de ce programme était de compléter dans le visible les observations à haute résolution (0.05 \AA) de la raie $\lambda\ 1\,335$ de C II obtenues par le satellite Copernicus. R. Freire a étudié la formation de ces raies hors E.T.L. à l'aide de programmes de S. Dumont, et critiqué les modèles classiques d'étoiles A dans la région où se forme le centre des raies.

4. *Abondances*

Leur détermination ne donne lieu à aucun travail systématique dans le laboratoire ; on s'intéresse, soit à des cas très particuliers, soit à la méthode de détermination elle-même.

a) *Etude de l'abondance du bore dans Sirius et dans Véga*

Le bore est l'un des éléments légers de grand intérêt pour la théorie de la nucléosynthèse. Des spectres à la résolution de 0.05 \AA en provenance du satellite Copernicus (programme de Guest Investigator Boesgaard-Praderie) montrent que la raie de résonance de B II à $\lambda = 1\,362.46\text{ \AA}$ est asymétrique dans Véga et n'apparaît pas du tout dans Sirius. F. Praderie, B. Milliard et M. L. Pitois ont montré que l'origine de l'asymétrie de la raie dans Véga peut être attribuée à une raie de V III ; on a calculé un spectre synthétique de la région considérée ; l'abondance de B a été déterminée dans Véga et une limite supérieure dans Sirius. Accessoirement, les vitesses de rotation de ces étoiles ont été obtenues par une méthode originale due à Milliard et Pitois.

Un programme d'observations du multiplet de B II à λ 1 623 a été soumis à l'équipe Copernicus et accepté. Les raies, prédites très faibles, devraient, si elles peuvent être observées, confirmer les valeurs obtenues pour les abondances. L'absence de bore dans Sirius est pour le moment non interprétée.

b) *Equilibre de l'élément strontium dans l'hypothèse de la diffusion*

Deux des problèmes que posent les anomalies spectrales des étoiles Ap ont été abordés par F. Praderie sur le cas de Sr II : 1) Le diagnostic des abondances est-il correct ? Dans le cas de Sr II, une analyse hors E.T.L. d'abondance a été faite, à l'aide de programmes de S. Dumont. On montre qu'on ne peut éviter de larges surabondances pour rendre compte des observations dans les étoiles Ap ; ce sont les étoiles de comparaison « normales » où les écarts à l'E.T.L. sont les plus grands. 2) Peut-on accumuler un élément sous forme d'un nuage à abondance augmentée sous l'effet de la force radiative et de la gravité ? Ce travail est mené en collaboration avec G. Michaud (Montréal). La partie traitée à Paris consiste à calculer les forces radiatives dans l'atmosphère, en traitant les champs de rayonnement et les populations des niveaux hors E.T.L. Deux programmes de S. Dumont ont été modifiés pour cet objectif.

II. SOLEIL

Dans la *photosphère calme*, la polarisation du rayonnement a été étudiée dans les raies et dans le continu.

a) *Raies*

Les effets de la polarisation dans la formation de raies non-E.T.L. ont été traités par la méthode de Feautrier pour une atmosphère plan-parallèle infinie, avec redistribution en fréquence (S. Dumont, A. Omont, J.-C. Pecker, D. Rees). Dans le cas d'une atmosphère isotherme, on a discuté l'influence de ϵ , probabilité de destruction d'un photon pendant la diffusion, et l'erreur introduite par l'hypothèse de la redistribution complète. On a étendu l'étude à un modèle représentant les principaux caractères de la chromosphère et de la photosphère solaire. On a alors discuté l'influence de la force de la raie avec l'hypothèse de la redistribution complète. On a calculé le taux de polarisation en fonction de la fréquence et de la direction ainsi que les deux fonctions-source en fonction de la profondeur optique.

b) *Continu*

Des discussions ont eu lieu avec Florence Goutail (Service d'Aéronomie) sur l'interprétation des mesures de polarisation dans l'ultraviolet et obtenues à l'aide d'une fusée. Les résultats théoriques (taux de polarisation calculés par nous avec le modèle HSRA) diffèrent des mesures par un facteur 4 à certaines fréquences. Cet écart est sans doute dû aux raies qui sont nombreuses dans ce domaine spectral. Il faut par ailleurs signaler que le modèle HSRA, dans lequel on ne tient pas compte de l'absorption due aux raies, ne fournit pas la polarisation observée à ces longueurs d'onde (S. Dumont, J.-C. Pecker).

En ce qui concerne le *soleil actif*, l'équipe de S. Dumont, J.-C. Pecker, Z. Mouradian (Observatoire de Meudon) et G. Chapman (Los Angeles) est engagée dans l'étude des facules, dont elle se propose de bâtir un modèle. Le satellite OSO-8 ayant été lancé avec succès le 21 juin 1975, le programme d'observation de facules solaires mis au point par notre équipe a pu commencer en octobre 1975. Il comprend une série d'observations qui s'échelonnent en altitude dans l'atmosphère solaire depuis la basse photosphère jusqu'à la zone de transition chromosphère-couronne : avec le satellite, on a observé les centres de 6 raies chromosphériques (H et K de Ca II, h et k de Mg II, L α et L β) et aussi quelques régions spectrales dans les ailes de ces raies, d'origine photosphérique ; on a observé également 2 raies de C IV qui proviennent de la zone de transition chromosphère-couronne ; au sol, on a observé en même temps les mêmes facules à Kitt Peak (CO, continu à 1.65 μ , spectrohéliogrammes dans K₃, CN et He λ 10 830, champ magnétique et champ de vitesse) et à Sacramento Peak (raies de Ca II et continus à λ 3 643, 3 678, 4 777 Å). Nous avons ainsi observé 5 facules en octobre 1975 et nous avons pu les suivre dans leur passage sur le disque.

En 1975 on a mis au point les programmes suivants : calcul des raies de CO (E.T.L.) et interprétation de mesures du continu centre-bord. On a étudié le calcul non-E.T.L. de raies moléculaires (CO et CN) et montré que, pour une même distribution de température, un champ de vitesse (micro-turbulence) modifie les pics d'émission des raies chromosphériques, car la pression du gaz est changée.

III. GALAXIES

Les études se sont poursuivies dans ce domaine dans trois directions principales, en étroite coopération avec J.-P. Vigier et les chercheurs de l'Institut Henri Poincaré. Ont participé à ces travaux, à l'I.A.P., J.-L. Nieto,

N. Heidmann et J.-C. Pecker ; à l'I.H.P., S. Le Denmat, S. Depaquit, H. Karoji, M. Molès, L. Nottale ; la coopération avec T. Jaakkola (Helsinki) s'est heureusement poursuivie.

La première direction de recherches a tendu vers l'étude des anisotropies de l'expansion apparente de l'Univers ; en d'autres termes H dépend de la direction — comme de la distance. Ainsi a-t-il été possible de détecter ce que nous avons appelé l'effet A-B (notes diverses, et article sous presse aux *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*) : si l'on désigne par A les régions du ciel entre, ou devant, les amas de galaxies, et B les régions camouflées par ces amas, la constante H est de 40 % plus élevée dans ces dernières : cet effet rend compte de la dissymétrie trouvée par Rubin *et al.* (puisque les amas sont plus nombreux dans la région du centre supergalactique, vers Virgo). Ils rendent compte aussi d'autres, non expliquées par l'effet Rubin-Ford-Rubin.

Une seconde direction de recherches s'imposait : poursuivre l'explication des décalages anormaux vers le rouge par des effets physiques, affectant les photons au cours de leur traversée d'un milieu dense en matière comme en énergie radiante. En ce domaine, un point crucial était l'explication par les interactions entre les photons de la source et les bosons scalaires locaux, non seulement de l'effet Hubble (en tout ou en partie) mais du rayonnement dit cosmologique — dont nous rappellerons qu'il est lui, isotrope, contrairement à la « constante » H de Hubble (voir résumé du cours). Un progrès important a été fait dans cette voie, et la publication est en préparation.

Enfin, l'association entre QSS et galaxies a fait l'objet de recherches de J.-L. Nieto, de façon à savoir si les QSS sont des objets « locaux », ou « cosmologiques », en d'autres termes, si le décalage des raies spectrales vers le rouge qui les affecte est dû à des causes intrinsèques (compacité) ou à l'éventuelle expansion de l'Univers. Un programme d'observation à l'OHP a débuté en 1975 (J.-L. Nieto, N. Heidmann) dont l'objet est l'étude des associations galaxies-quasars et des bras de matière entre objets. Deux missions ont été effectuées au télescope de 193 cm.

IV. DIVERS

R. N. Thomas a suggéré un programme d'observations qui généralise les idées développées à l'occasion de l'étude des T Tauri. La différence entre le spectre du soleil et celui des T Tauri représenterait l'évolution du stockage

d'énergie cinétique non thermique avec l'âge pour deux étoiles de même masse. Cette idée est étendue aux couples (A, Ae), (B, Be), (O, Of). La recherche du continu de Balmer en émission sera menée avec le groupe de G. Courtès.

Par ailleurs, une série de monographies sur ces étoiles est prévue (collaboration avec L. Divan et V. Doazan).

ACTIVITÉS DIVERSES ET COMMISSIONS

F. Praderie et R. N. Thomas ont participé au groupe « Long Term Planning 1980-1990 » de l'Agence Spatiale Européenne (groupe présidé par R. M. Bonnet).

J.-C. Pecker a été désigné comme membre du comité E.S.M.O.C., et y assume la responsabilité de l'organisation des groupes de travail européens en physique solaire (« workshops »). A cette occasion M. Pecker a séjourné à l'Ecole Normale Supérieure de Pise, où il a fait une conférence.

J.-C. Pecker a continué à présider la Société Astronomique de France, et le Comité « Sciences » de la Commission Française pour l'U.N.E.S.C.O. Dans ce cadre, il a participé aux réunions d'organisation des cours post-universitaires de l'U.N.E.S.C.O., à Montpellier et à Grenoble.

J.-C. Pecker a présidé le comité de sélection des investigateurs invités du L.P.S.P. à bord du satellite OSO-8, ainsi que la RCP 310, consacrée à l'exploitation par les équipes françaises d'investigateurs invités, des possibilités de cet instrument.

PUBLICATIONS

(pour l'année 1975 seulement, 1^{er} janvier au 31 décembre)

A. BOESGAARD, C. MAGNAN, *The circumstellar shell of Alpha Orionis from a study of the Fe II emission lines* (*Ap. J.*, t. 198, p. 369, 1975).

J. BORSENBERGER, J.-C. PECKER, J.-P. VIGIER, *Calcul et tables d'une intégrale utile dans l'interprétation de phénomènes voisins du bord solaire (ou stellaire)* [*Bull. Soc. Roy. Sci. Liège*, 1975, n° 11-12, p. 706].

L. CAMPUSANO, J. HEIDMANN, J.-L. NIETO, *Curves giving the age of the Universe in Friedmann models* (*Astron. Astrophys.*, t. 41, p. 229, 1975).

C. J. CANNON, P. LOPERT, C. MAGNAN, *Redistribution perturbations in radiative transfer theory* (*Ibidem*, t. 42, p. 347, 1975).

L. E. CRAM, *Mass momentum and energy transport in the solar atmosphere* (Communication E.S.M.O.C., Conf. Pubbl. Università degli studi di Firenze, t. 105, p. 13, 1975).

— *Spectrum of the electron-scattering continuum* (*Solar Phys.*, 1975, en préparation).

— *Interpretation of $H\alpha$ contrast profile of chromospheric fine structure* (*Ibidem*, t. 42, p. 53, 1975).

L. E. CRAM, P. R. WILSON, *Hydromagnetic waves in structured magnetic fields* (*Ibidem*, t. 41, p. 313, 1975).

L. E. CRAM, P. LOPERT, *A perturbation of the radiative transfer equation in a moving medium* (1975, en préparation).

L. E. CRAM, I. VARDAVAS, *Spectral line formation in chromospheric fine structure. I.* (*Astron. Astrophys.*, 1975, en préparation).

G. LE DENMAT, J.-P. VIGIER, J.-C. PECKER, *Les supernovae de type I et l'anisotropie de la Constante de Hubble* (C.R.A.S., 1975, sous presse).

G. LE DENMAT, M. MOLES, J.-L. NIETO, *Decrease of Hubble constant with distance in the local supercluster anticenter direction* (*Astron. Astrophys.*, t. 45, p. 219, 1975).

G. LE DENMAT, M. MOLES, J.-L. NIETO, J.-P. VIGIER, *Possible local variation of the Hubble constant in Van den Bergh's calibration of Sc-type galaxies* (*Nature*, t. 259, p. 773, 1975).

S. DEPAQUIT, J.-P. VIGIER, J.-C. PECKER, *Comparaison de deux observations de déplacements anormaux vers le rouge observés au voisinage du disque solaire* (C.R.A.S., Paris, t. 280, p. 113, 1975).

S. DUMONT, N. HEIDMANN, J. T. JEFFERIES, J.-C. PECKER, *The abundance determination in a stellar atmosphere. I. L.T.E. experimentation using an artificial non-L.T.E. spectrum* (*Astron. Astrophys.*, t. 40, p. 127, 1975).

S. DUMONT, N. HEIDMANN, *Effect of the absorbers upon the thermal structure of an L.T.E. atmosphere. II. C, Si, Mg, Fe and Al* (*Ibidem*, sous presse, 1975).

L. GALLOUET, N. HEIDMANN, F. DAMPIERRE (*Astron. Astrophys.*, Suppl. series, 1975).

N. HEIDMANN, S. DUMONT, R. N. THOMAS, Communication à la 21^e réunion astronomique européenne, à Tbilissi : *Significance of asymmetric emission line profiles on mass-flux and chromosphere from T Tauri stars* (1975).

T. JAAKKOLA, H. KAROJI, G. LE DENMAT, M. MOLES, L. NOTTALE, J.-C. PECKER, J.-P. VIGIER, *Additional evidence and possible interpretation of angular redshift anisotropy* (*Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 1975, sous presse).

C. MAGNAN, *Aspects of frequency redistribution for non coherent scattering in a turbulent medium* (*J.Q.S.R.T.*, t. 15, p. 979, 1975).

— *An approximation for solving the non-L.T.E. line transfer in a spatially correlated random velocity field* (*Ibidem*, 1976, *J.Q.S.R.T.*, t. 16, p. 281).

— *A new approximation for solving non-L.T.E. line transfer in a spatially correlated random velocity field* (*Colloque C.N.R.S.*, n° 250, 1976, Ed. Cayrel, p. 179).

J.-C. PECKER, *Promotion of solar physics in Europe : introduction to a debate* (Communication E.S.M.O.C., Conf. Publ. Università degli studi di Firenze, t. 105, p. 125).

— *On the proper use of ancient papers and of contemporary budgets* (*Observatory*, 1975, sous presse).

J.-C. PECKER, J.-P. VIGIER, *Sur les dangers d'une approximation classique dans l'analyse des décalages spectraux vers le rouge* (*C.R.A.S.*, t. 281, p. 369, 1975).

J.-C. PECKER, R. N. THOMAS, *Solar astrophysics : ghettois or symbiosis with stellar and galactic astrophysics ?* (*Space Sci. Reviews*, sous presse, 1975).

J.-C. PECKER, *L'année Camille Flammarion* (*Astronomie*, p. 1, 1975) ; *L'Europe à l'heure du Soleil* (*Ib.*, p. 49) ; *Une observation révolutionnaire* (*Ib.*, p. 89) ; *Un problème mal résolu : la composition des étoiles* (*Ib.*, p. 129) ; *A propos des parallaxes stellaires* (*Ib.*, p. 177) ; *Du bon usage des* (*Ib.*, p. 89) ; *Un problème mal résolu : la composition des étoiles* (*Ib.*, p. 269) ; *Le Soleil, la Galaxie et les périodes de glaciation* (*Ib.*, p. 351) ; *Progrès récents de l'Astronomie* (*Ib.*, p. 434) (pour les articles de journaux et revues variés, voir la fin du chapitre).

F. PRADERIE, *Quatre cours sur le Diagnostic de chromosphère stellaire* [Cours Erice (Sicile), mai, *Ultraviolet stellar astronomy*, 1975, sous presse].

— *Diagnostics of Strontium abundances in Ap stars atmospheres* (Communication Colloquium I.A.U., n° 32, 1975, sous presse).

F. PRADERIE, E. SIMONNEAU, T. P. SNOW, *Evidence for a chromosphere in Vega* (B.A.A.S., t. 7, p. 359, 1975).

— *Evidence for a temperature rise in the outer layers of α Lyrae, from Copernicus observations of Lyman- α* (*Astrophys. Space Sci.*, t. 38, p. 377, 1975).

F. PRADERIE, R. N. THOMAS, *Radiation loss and mechanical heating in the low solar chromosphere* (*Solar Phys.*, 1975).

R. N. THOMAS, *Irreversibility, evolution, Evolution and the process of local concentration* (*Foundations of Physics*, sous presse, 1975).

— *Stellar atmospheres nonequilibrium thermodynamics and irreversibility* (*Advances in chemical physics*, V. 32, 1975, John Wiley).

R. N. THOMAS, C. J. CANNON, *The origin of stellar winds ; subatmospheric non-thermal storage modes vs radiation pressure* (*Astrophys. J.*, 1975, sous presse).

E. SCHATZMAN, C. MAGNAN, *Shifts and asymmetries of lines formed in a theoretically driven turbulent medium* (*Astron. Astrophys.*, t. 38, p. 373, 1975).

E. SIMONNEAU, *Radiative transfer in atmospheres with spherical symmetry* (J.Q.S.R.T., 1975, sous presse).

Articles de journaux, revues, divers

J.-C. PECKER, *On astrology and modern science* (cont.) [*Leonardo*, t. 8, p. 181].

— *D'une esthétique des structures* (*Revue de l'art*, sous presse).

— *La photographie astronomique (étude critique)* (*Revue de l'art*, sous presse).

— *Températures et magnitudes en astrophysique : un aide-mémoire* (*Astronomie*, 1976, p. 191).

— *L'astronomie à la recherche de bénévoles (92 - Hauts-de-Seine, n° 3)*.

— *Le cinquantième anniversaire de la Mécanique ondulatoire* (*Astronomie*, p. 227).

— *La peur du mal et le devoir du savant* (*Le Monde*, 4 juin, p. 22).

— *Postface : Pour aider à la lecture de l'Astronomie populaire*.

— *Une réunion commune à toutes les commissions de la Société Astronomique de France (Astronomie, p. 50).*

— *Kuiper (1905-1973) [Astronomie, p. 84].*

— Préface à *La découverte du cosmos par l'astronomie, l'astrophysique et l'astronautique*, de P. de la Cotardière (Eyrolles, Paris).

— Préface de *L'Univers objectif, théorie unitaire*, de J. Loiseau (Ed. Chiron, Paris).

— P. ASCHER, G. GIRALT, J.-P. KAHANE, J.-C. PECKER, A. WISNER, *L'activité scientifique en débat (table ronde) (France Nouvelle, n° 1 539, 13-20 mai, p. 26).*

J.-C. PECKER, E. SCHATZMAN, *Sur la méthode scientifique (Causerie radiodiffusée par France-Culture, 24 novembre, Courrier Rationaliste, n° 4, février 1975, p. 47).*

CONGRÈS, COLLOQUES

Participation à des colloques

*Florence, 24-28 février, 1^{er} Conférence européenne des astronomes so-
laires : A et C. CANNON, L. CRAM, S. DUMONT, N. HEIDMANN, P. LOPERT,
J.-C. PECKER, R. N. THOMAS.*

*Liège, Belgique, 20^e Colloque d'Astrophysique de Liège, J.-C. PECKER
et R. N. THOMAS.*

*Tbilissi, U.R.S.S., 1^{er} au 5 juillet, 2^e réunion astronomique européenne :
Etoiles et galaxies d'un point de vue observationnel, N. HEIDMANN.*

*Nice, France, 1^{er} au 5 septembre, Physique des mouvements dans les atmos-
phères stellaires (Symposium U.A.I.), L. CRAM, C. MAGNAN, R. N. THOMAS.*

*Bucarest, 9-12 septembre, 3^e conférence de la Société européenne de
Physique sur « l'énergie et la physique », J. L. NIETO.*

*Vienne, 8-10 septembre, Physics of Ap stars (Colloque U.A.I.), F. PRA-
DERIE.*

Voyages d'études

- 1) J. L. NIETO : voyage à l'Observatoire de Marseille, 9 au 15 juin, voyage à l'Observatoire de Nice (C.D.C.A.), 11-15 mai.
- 2) M. GROS, C. CANNON, F. PRADERIE ont assisté au cours d'été sur l'Astronomie stellaire en ultraviolet, 26 mai au 8 juin.
- 3) J. BORSENBARGER s'est rendu à Toulouse pour la mise en route d'un programme sur CDC 6 600 (28 septembre - 4 octobre), au centre de calcul du C.N.E.S.
- 4) F. PRADERIE est allée à l'Observatoire de l'Université de Princeton (U.S.A.) et à l'Université de Montréal (Groupe du P^r Michaud) du 8 au 20 juillet.
- 5) S. DUMONT (2 septembre au 1^{er} octobre) et J. BORSENBARGER (30 novembre au 8 janvier) ont fait chacun un séjour d'un mois à Boulder pour faire des observations sur le satellite OSO-8 (expérience L.P.S.P.).
- 6) J. L. NIETO, N. HEIDMANN, J.-C. PECKER (février 1975), et J. L. NIETO, G. LE DENMAT et J. SCHNEIDER (novembre 1975) ont fait des observations à l'Observatoire de Haute-Provence.
- 7) F. PRADERIE a fait un séjour de travail à l'Institut d'Astrophysique de Liège (25-30 juillet).
- 8) R. N. THOMAS : séjour de 2 mois 1/2 comme visiting Professor, Department of Astrophysics, University of Colorado (juin-août).