

Astrophysique théorique

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

Cours :

LE SOLEIL. STRUCTURE INTERNE I

Le Soleil est la plus proche des étoiles, celle d'où provient le plus d'information, $- 10^7$ fois plus que du reste de l'Univers. Son étude est donc celle d'une étoile-prototype, où les théories peuvent être confrontées avec les données de l'observation de la façon la plus détaillée, où les contradictions alors décelées peuvent nous permettre d'aller plus loin dans la compréhension de la machinerie stellaire.

Mais l'observation ne donne pas directement d'information sur les régions intérieures, en raison de l'opacité de la matière solaire. On doit donc en appeler à la théorie, à la solution d'un certain nombre d'équations, l'observation du Soleil global fournissant alors des conditions aux limites à ces équations : la discussion repose donc, d'abord, sur le choix des paramètres fondamentaux que la théorie devra intégrer.

A. LES PARAMÈTRES FONDAMENTAUX LIÉS A LA STRUCTURE INTERNE DU SOLEIL

Les modèles classiques (que nous décrivons en B) reposent sur les seules données : masse du Soleil, M_{\odot} , luminosité du Soleil, L_{\odot} , rayon du Soleil, R_{\odot} , et composition chimique, en proportion respective $X:Y:Z$ d'hydrogène, d'hélium, d'éléments plus lourds ($X/(X + Y + Z)$ étant par exemple le rapport de la masse d'hydrogène à la masse totale).

Mais les théories modernes (que nous aborderons en 1986-1987) doivent aussi tenir compte de la variation de la masse, de la luminosité, du rayon,

avec le temps, du fait que le Soleil est en rotation et que la vitesse angulaire de rotation dépend de la latitude héliocentrique et de la distance R de la couche considérée au centre du Soleil, du fait qu'il existe d'importants phénomènes de brassage convectif, du fait enfin que le Soleil comporte un champ magnétique important. Or les mesures nous renseignent aussi sur ces paramètres, et la théorie doit donc pouvoir les intégrer également.

a) *Valeurs de première approximation* (destinées à des estimations rapides)

$$M_{\odot} \sim 2 \cdot 10^{33} \text{ g} \quad \mathcal{R}_{\odot} \sim 7 \cdot 10^{10} \text{ cm} \quad \mathcal{L}_{\odot} \sim 4 \cdot 10^{33} \text{ erg cm}^{-1}$$

$$v_{\text{rotation}} \sim 2 \cdot 10^5 \text{ cm s}^{-1} \text{ (à l'équateur)}, \sim 2 \cdot 10^4 \text{ cm s}^{-1} \text{ à } 80^\circ \text{ de latitude}$$

$$\omega_{\text{rotation}} \sim 14^\circ/\text{jour} \text{ (à l'équateur)}, \sim 10^\circ/\text{jour} \text{ à } 80^\circ \text{ de latitude}$$

$$B \sim \text{(dans une tache)} 2 \text{ 000 gauss}$$

$$\text{(valeur quadratique moyenne photosphérique } \langle B^2 \rangle^{1/2}) \sim 100 \text{ gauss ?}$$

$$\text{(dipôle solaire)} \sim 2 \text{ gauss au pôle ?}$$

$$\xi \text{ (turbulence dans la photosphère)} \sim 2 \cdot 10^5 \text{ cm s}^{-1}$$

$$X = 0.73 \quad Y = 0.27 \quad Z = 0.017 \text{ (}\sim 0\text{)}$$

Nous utiliserons le plus souvent des unités cgs classiques, et non pas les unités SI, encore peu utilisées dans la littérature astronomique.

b) *Les énergies en cause*

Le Soleil est un réservoir considérable d'énergie, au sein duquel des conversions d'énergie (par exemple énergie de masse en rayonnements gamma) sont les facteurs de l'évolution séculaire de l'astre. L'énergie est perdue sous forme de rayonnements (photons de toutes énergies, notés γ), de neutrinos ν , de masse (protons p, noyaux α d'hélium et électrons e, principalement).

— L'énergie de masse stockée est $E_M = M_{\odot} c^2 = 10^{54}$ ergs

— L'énergie gravitationnelle potentielle est, en toute rigueur

$$E_{\text{grav}} = \int_0^{\mathcal{R}_{\odot}} G \frac{M(R)}{R} 4\pi \rho R^2 dR$$

en première approximation : $E_{\text{grav}} \sim k G M_{\odot}^2 \mathcal{R}_{\odot}^{-1}$

avec k de l'ordre de 2, on a : $8 \cdot 10^{48}$ ergs.

— L'énergie thermique est $E_{\text{th}} = \int_0^{\mathcal{R}_{\odot}} \left(\frac{3}{2} k \frac{T}{\mu} \right) 4\pi \rho R^2 dR$

où T , température, et μ , masse moléculaire moyenne, dépendent de R ,

Avec $\mu \sim \frac{1}{2} m_p$ (m_p : masse du proton) et $T \sim 5 \cdot 10^5$ K, on a :

$$E_{\text{th}} = 4 \cdot 10^{48} \text{ ergs}$$

A l'équilibre, et en négligeant les autres types de conversion énergétique, le théorème du viriel permet de démontrer d'ailleurs que

$$2 E_{\text{th}} = E_{\text{grav}}$$

Ces 3 quantités sont pratiquement constantes.

Interviennent aussi, très fortement, dans les conversions, les types suivants d'énergie, stockés dans le Soleil :

— L'énergie des photons, calculée en supposant le volume solaire occupé par le rayonnement d'énergie $\mathcal{L}_{\odot} dt$ émis dans le temps $dt = \mathcal{R}_{\odot}/c$

$$E_{\gamma} = \mathcal{L}_{\odot} \mathcal{R}_{\odot} c^{-1} = 10^{34} \text{ ergs}$$

— L'énergie magnétique $E_{\text{mag}} = \frac{\langle B^2 \rangle}{8\pi} \left(\frac{4\pi}{3} \mathcal{R}_{\odot}^3 \right)$

L'incertitude est grande sur $\langle B^2 \rangle$; aussi doit-on se limiter à donner une « fourchette » : $E_{\text{mag}} \sim 10^{31}$ à 10^{38} ergs

— L'énergie mécanique associée à la rotation :

$$E_{\text{rot}} = 1/2 I \langle \omega^2 \rangle, \text{ où } I \text{ est le moment d'inertie du Soleil}$$

$$\sim \mathcal{M}_{\odot} \left(\frac{v_{\text{surf}}}{c} \right)^2 c^2 \sim E_{\text{M}} \times 10^{-10}$$

— L'énergie mécanique associée à la turbulence et à la convection :

$$E_{\text{conv, turb}} = \frac{1}{2} \mathcal{M}_{\odot} \langle v^2 \rangle, \text{ est du même ordre de grandeur.}$$

Plus de précision dans ces estimations exigerait de connaître le modèle dans son ensemble. Nous en resterons donc là.

c) *Masse et variation de masse*

La distance du Soleil a été déterminée grâce à l'exploitation des lois de Kepler, à l'observation des mouvements apparents, depuis divers points de la Terre, de planètes et astéroïdes divers, et à la mesure par géodésie du rayon terrestre.

On a $r_{\text{eq}\oplus} = 6.378\ 140\ 10^6 \text{ m} \pm 5$ (rayon équatorial de la Terre) et

$$\begin{aligned} d_{\odot\oplus} \text{ (distance moyenne Terre-Soleil - ou demi-grand axe de l'orbite} \\ \text{terrestre) (ou } a) = 1 \text{ unité astronomique de distance} \\ = 1.495\ 978\ 70\ 10^{11} \text{ m} \pm 2 \end{aligned}$$

La troisième loi de Kepler lie la valeur de la masse du Soleil à la valeur de l'unité astronomique de distance ; on a

$$G \mathcal{M}_{\odot} P^2 = 4\pi^2 a^3$$

où P est la durée de l'année ; $P = 3.155\ 692\ 597\ 47\ 10^7$ secondes

On en déduit $G M_{\odot} = 1.327\ 232\ 2\ (8) \pm (4)\ 10^{26}$ cgs.

Mais G n'est pas déterminé avec beaucoup de précision. G est ici la constante de Cavendish de la gravitation universelle. En 1797, Cavendish obtenait $G = 6.72\ 10^{-8}$ cgs (valeur traduite en unités cgs) ; aujourd'hui, les meilleures mesures de laboratoires aboutissent à :

$$G = 6.672 \pm 0.004\ 10^{-8}\ \text{dyn cm}^2\ \text{g}^{-2}$$

On utilise souvent la constante « gaussienne » de la gravitation, définie par la relation

$$k (1 + m_p) = n_p^2 a^3$$

pour une planète de masse m_p où n_p (qui mesure la vitesse angulaire de rotation moyenne) est exprimé en radians par jour solaire moyen, et a en unités astronomiques

$$k = 86\ 400 \left(\frac{1}{a^3} G M_{\odot} \right)^{1/2}$$

On a : $k = 0.017\ 202\ 098\ 95$, valeur qui a été choisie, par définition, comme base intangible de la définition des autres constantes astronomiques.

On en déduit la masse du Soleil.

$$M_{\odot} = 1.9892 \pm 0,0012\ 10^{33}\ \text{g}$$

valeur dont la précision est en somme assez faible ($5\ 10^{-4}$).

La masse évolue pour trois raisons principales :

— perte sous forme de photons : $\mathcal{L}_{\odot} = 4\ 10^{33}$ ergs⁻¹ en est une mesure ; en équivalent de masse, on trouve :

$$\dot{M}_{\odot}/M_{\odot} = 7\ 10^{-14}/\text{an}$$

Cela correspond à la transformation d'hydrogène en hélium ;

— perte sous forme de neutrinos. On observera un flux de $F_{\nu} = 1.3 \pm 0.4$ SNU, le « SNU » (Solar neutrino unit) correspondant à 10^{-36} captures par seconde et par atome de chlore 37. Un calcul simple aboutit à une estimation de

$$\dot{M}_{\odot}/M_{\odot} \sim 2\ 10^{-17}/\text{an},$$

faible certes, mais pas négligeable, et qu'il faudrait augmenter encore s'il se confirme que les neutrinos ont une masse au repos non nulle ;

— perte sous forme de matière, dans le « vent » solaire.

Le calcul dépend d'hypothèses sur la distribution spatiale du vent (isotrope, ou se concentrant dans le plan équatorial du Soleil) et des mesures, à la distance de la Terre, de la vitesse et de la densité du vent. Zirker donne dans Jordan *et al.*, 1981, une valeur de :

$$\dot{M}_{\odot}/M_{\odot} \sim 3 \cdot 10^{-14}/\text{an, variable } (\pm 20 \%)$$

mais ceci est sans doute une surestimation, l'hypothèse faite étant celle de l'isotropie.

La variabilité du flux de masse, même faible, peut être un élément important lié à la conversion (mais où ?) d'énergie magnétique en énergie mécanique (et vice-versa).

d) *Luminosité et variation de luminosité*

Ce que l'on mesure, c'est d'abord la constante solaire S , qui s'exprime en calories par minute et par centimètre carré de récepteur terrestre exposé normalement au Soleil. Dès 1950, après des décennies de mesures, on trouvait $S = 1.855$ (Abbott et collaborateurs). Mais une portion importante de l'énergie solaire est issue des régions du spectre inobservables du sol. On peut estimer pour l'UV, XUV, les rayons X et γ ($\lambda \ll 3\,460 \text{ \AA}$) à 0.064, pour le visible (3460-7040 \AA) à 0.895, pour l'infrarouge (7040 \AA -24 000 \AA) à 0.961, et pour l'infrarouge lointain ($\lambda > 24\,000 \text{ \AA}$) à 0.065. Le total est alors (1959) de 1.985 calories $\text{min}^{-1} \text{cm}^{-2}$.

Il est important de ramener la constante solaire à d'autres unités et à d'autres quantités.

$$\text{On a } 1 \text{ cal min}^{-1} \text{cm}^{-2} = 697.57 \text{ W m}^{-2} \text{ (SI)} = 6.9757 \cdot 10^5 \text{ ergs s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{ (cgs)}.$$

La luminosité $\mathcal{L}_{\odot} = S \times 4\pi a^2$, si a est la distance Terre-Soleil. C'est l'énergie qui traverse *toute* sphère concentrique, notamment la sphère de rayon \mathcal{R}_{\odot} :

$$\mathcal{L}_{\odot} = (4\pi \mathcal{R}_{\odot})^2 \pi F,$$

le flux πF étant celui qui traverse 1 cm^2 de surface solaire dans toutes les directions, donc, selon la loi de Stefan : $\pi F = \sigma T_{\text{eff}}^2$, propriété d'un corps noir de température T_{eff} .

On a donc une correspondance précise entre \mathcal{L}_{\odot} et T_{eff} , \mathcal{R}_{\odot} , a et σ étant connus.

S varie de 1369 à 1371 Wm^{-2} , T_{eff} de 5779 à 5783 $^{\circ}\text{K}$, d'un auteur à l'autre. Cette incertitude ne couvre pas les variations réelles de \mathcal{L}_{\odot} et T_{eff} avec le temps. S variant de 1 %, T_{eff} peut varier de $\pm 15^{\circ}\text{K}$.

Les mesures modernes sont nombreuses, menées à partir d'avions, de ballons et d'engins spatiaux. La valeur la plus probable, donnée par Fröhlich (1977), est de 1373 Wm^{-2} (± 1 à 2 %) (incertitude sur T_{eff} de $\pm 18^{\circ}$).

En comprenant que l'incertitude est essentiellement due à la variabilité de la constante solaire, Mickey et Wilson (1976) aboutissent à une incertitude, en un moment donné, de l'ordre de $\pm 2^{\circ}$ sur T_{eff} .

De fait, les variations temporelles de S sont de l'ordre de 0.1 %.

Une question importante — abordée par Angström dès 1922 — est de savoir si cette variabilité à long terme est liée à l'activité solaire. Deux écoles de pensée coexistent encore. Selon la plupart des observateurs, l'atmosphère joue le rôle essentiel. Mais (1970) Kondratyef et Nikolsky ont suggéré une croissance (+ 2.5 %) du minimum au « milieu » du cycle, puis une décroissance (-2.5 %) jusqu'au maximum. La discussion (1983) de Newkirk résume bien les données, l'échelle de temps des variations et les influences possibles déterminantes pour ces variations :

A court terme (1 jour $< \tau < 1$ an) les variations mesurées sont nettement liées aux passages des groupes de taches et facules et aux indices usuels d'activité. Tout se passe en gros comme si l'éclat de la surface était constant, à l'exception des taches. Mais les calculs permettent de représenter la variation observée de la constante solaire :

$$dS_{\text{obs}} = a dS_{\text{tache}} - b dS_{\text{facule}} + c E d\mathcal{L}$$

où $d\mathcal{L}$ serait la variation intrinsèque de la luminosité. L'analyse des données conclut alors quand même qu'on ne comprend pas, avec ces modèles, 30 à 40 % de la variance observée de S . Mais ces modèles ignorent l'évolution physique des taches au court de la rotation, et ne tiennent compte que des effets de perspective : ceci tend à surestimer les surfaces tachées ; quantitativement, ces erreurs ne suffisent cependant pas à expliquer l'effet observé.

Plusieurs hypothèses restent possibles.

Selon Newkirk, la mauvaise qualité des données sur les taches et les facules pourrait suffire à expliquer l'écart.

Selon le même auteur, une variabilité *réelle* de \mathcal{L} pourrait exister, comme pour les étoiles de type RS CVen et BY Dra.

Pecker (1980) a proposé une hypothèse selon laquelle une redistribution de la luminosité pourrait affecter les régions polaires et n'être pas décelable à cause des effets de perspective. C'est pourquoi un programme spatial d'une grande importance serait la mesure de la constante solaire depuis une fusée localisée à très haute latitude héliographique (« out of the ecliptic »). Les implications de telles mesures sur la théorie du magnétisme solaire et de sa structure interne pourraient être essentielles.

A plus long terme (1 an $< \tau < 11$ ans), les variations cycliques de la constante solaire sont de l'ordre de $\Delta S/S \sim 0.1$ % mais correspondent mal aux calculs déduits des surfaces tachées qui admettent un temps de stockage de l'ordre de 10 ans. Il faut évidemment noter que \mathcal{L} dépend de T_{eff} et de R_{\odot} . Les mesures doivent aussi s'interpréter en prenant en considération les variations de rayon (voir ci-après) et celles de la température effective.

Peu d'indicateurs sont valables : il semble que la raie CI 5380 Å soit un bon indicateur de température effective ; mais, pour Newkirk, une légère modification de gradient thermique suffit à expliquer les observations. Les observations de E. Müller et al., dans l'infrarouge lointain, sont de bonnes mesures d'un T_{eff} moyen : elles indiquent une augmentation du minimum de température avec l'activité. D'autres mesures ont été faites : mais de cet ensemble rien de bien convaincant n'émerge.

En ce qui concerne les variations à long terme ($11 < \tau < 500$ ans ; $500 < \tau < 10^5$ ans), les seules indications d'une variation de S reposent sur les données de nature météo-climatologiques. Il convient encore de ne pas trop échafauder de théorie solaire sur ces données, pour importantes qu'elles soient.

e) *Rayon solaire et variation du rayon*

La valeur du rayon solaire résulte de la mesure du diamètre apparent θ'' au temps t_i et de la distance Terre-Soleil au même instant.

A 1 UA, on trouve actuellement 1919.26'' comme valeur du diamètre apparent. Entre aphélie et périhélie, la variation est de 35.82''. Ces valeurs correspondent à $\mathcal{R}_{\odot} = 6.960 \cdot 10^{10}$ cm.

Question ouverte : \mathcal{R}_{\odot} varie-t-il ? Les mesures équateur-pôle de Dicke et celles de Hill sont contradictoires. L'instrument de Rösch et Yerle, exempt des critiques que l'on peut apporter à ses prédécesseurs, donnera sans doute une réponse ; mais l'astrolabe impersonnel Danjon modifié par Chollet, Laclare et Demarcq permet, le long d'un seul diamètre de faible latitude héliographique, de mesurer ce diamètre : de façon très consistante, ces auteurs mettent en évidence une période de 900 à 1 000 jours (avec $\Delta\theta'' \sim 0.18''$) mais aussi (analyse de Delache, Laclare, Sadsaoud) des périodes probables d'une amplitude comparable, notamment une période de 320 jours, que l'on retrouve dans l'analyse de l'activité. Il semble qu'à un petit diamètre corresponde un soleil actif. Mais s'agit-il d'une variation de $\langle \mathcal{R}_{\odot} \rangle$, ou seulement d'une oscillation non-radiale de mode ℓ petit ? Des phénomènes analogues avait été signalés par Gilliland et Wittman et sont cités par Newkirk.

f) *Oscillations non radiales*

Ce phénomène, découvert en 1962 par Leighton, Noyes et Simon, et par Evans et Michard, a été étudié en de très grands détails depuis une dizaine d'années. Nous nous bornerons à renvoyer aux ouvrages classiques, qui contiennent une importante bibliographie (par exemple Jordan *et al.*, 1981).

g) *Rotation et rotation différentielle*

Le Soleil est un rotateur lent, sa vitesse équatoriale étant de l'ordre de grandeur de 2 km s^{-1} , à comparer avec des valeurs de l'ordre de 100 à 200 km s^{-1} , mesurées pour les étoiles des types A, B, O. Ce phénomène est sans doute lié, pour les étoiles des types F, G (et plus froids) à la perte de moment angulaire ayant donné lieu aux systèmes planétaires.

Par rapport à des étoiles de même masse, le Soleil est lent aussi, ce que semble impliquer un âge élevé : il semble en effet qu'à masse égale, la vitesse équatoriale soit proportionnelle à la racine carrée de l'âge.

Depuis 1872 (Vogel) on mesure la rotation solaire au moyen de divers indicateurs, l'Observatoire du Mont-Wilson ayant la collection de données la plus homogène.

Si l'on considère la vitesse angulaire Ω , elle s'exprime en fonction de la latitude héliographique B par une relation du genre

$$\Omega = a + b \sin^2 B + c \sin^4 B$$

où b est négatif. Cette formule est une représentation raisonnable de la rotation différentielle.

On notera d'abord que a n'est pas constant dans le temps. Les variations de $\Delta a/a$ de l'ordre de 10 à 20 % ont été observées en quelques jours, de l'ordre de 1 % en une journée. L'explication de ce résultat n'est pas connue.

Les données concernant a et b dépendent beaucoup du « traceur » choisi : taches, filaments, phénomènes chromosphériques et coronaux, ou bien mesures d'effets Doppler de certains points bien localisés.

Plusieurs remarques peuvent être faites concernant ces mesures.

Tout d'abord les deux hémisphères ne se comportent pas de la même façon.

Ensuite, même dans une même couche atmosphérique, photosphère par exemple, les divers traceurs ne donnent pas les mêmes résultats : les petits groupes de taches sont de 2 % plus rapides que les grands groupes.

Les facules polaires sont plus lentes que les filaments de même latitude ; la couronne verte est significativement plus rapide que les phénomènes chromosphériques de même latitude.

Les mouvements méridiens des taches sont notables et reflètent des phénomènes convectifs profonds. Au voisinage de l'équateur, une légère décroissance de la vitesse a été parfois notée.

Aux phénomènes de pure rotation, des oscillations de torsion se superposent : une onde de torsion semble se diriger vers l'équateur, et met 22 ans à l'atteindre.

Certains indices superficiels sont sensibles à la rotation solaire dans les couches internes :

D'abord les oscillations qui indiquent que le Soleil, en gros, tourne comme un solide.

Puis les observations des trous coronaux et celles du géomagnétisme, d'ailleurs associés. En 1954, Pecker et Roberts ont étudié la récurrence des pics du géomagnétisme ; ils ont d'abord confirmé un phénomène découvert par Maunder au début du siècle : les taches solaires apparaissent à des longitudes héliographiques privilégiées. Les pics du géomagnétisme sont anticorrelés avec les régions actives, ce qui implique l'existence de cônes vides au-dessus de ces régions actives : ce phénomène est identique à celui des trous coronaux, découvert dans le rayonnement X ; or ces cônes, comme d'ailleurs les trous coronaux, tournent sans être affectés par la rotation différentielle ; tout se passe comme s'il s'agissait de la manifestation superficielle des régions profondes où se forment les phénomènes actifs, et qui tournent comme un corps solide.

Une question importante est celle de l'axe de rotation : coïncide-t-il ou non avec l'axe magnétique ? Trellis a montré, à partir de l'étude des taches, que le Soleil est bien un rotateur oblique ; mais l'angle entre l'axe magnétique et l'axe de rotation n'est que de 0.5° (et cet angle précesse avec une période de 70 ans). Or l'axe magnétique, déduit des secteurs du champ magnétique dans la couronne, est incliné d'une trentaine de degrés par rapport à l'axe de rotation : une torsion aussi forte du dipôle implique une structure quadripolaire qui reflète sans doute des effets MHD à grande échelle, et l'existence réelle d'une structure oblique profonde.

h) *Le magnétisme solaire*

Les phénomènes magnétiques sont bien connus, localisés autour des taches, et se manifestent par l'effet Zeeman et par les formes des boucles coronales.

Le problème n° 1 est celui de comprendre le mécanisme des conversions et des échanges énergétiques. Ainsi, dans les taches, où le champ magnétique est élevé, la température est basse ; l'inverse semble vrai dans les facules ; ainsi la turbulence est-elle importante à la frontière des régions actives : tous ces phénomènes sont symptomatiques de ces échanges.

Mais le problème qui se pose avec encore plus d'acuité est de savoir discerner ceux des problèmes *locaux* dont la connaissance a une incidence sur la compréhension de la structure *profonde* du Soleil. On serait tenté *a priori* de répondre : a) les phénomènes *d'émergence* d'une région active (tache, etc.) ; b) les mesures *globales* (R , etc.) de l'intensité de l'activité ; c) la *localisation*, sur la surface solaire, de l'activité solaire ; et *a posteriori* (ce qui

laisse des doutes sur le bien-fondé du choix ci-dessus) : d) les *jets coronaux* et le *géomagnétisme*.

— L'émergence des groupes de taches montre — suggère plutôt (Giovannelli) — qu'il s'agit de tubes de flux magnétique « flottant » en quelque sorte à proximité de la surface. Le déclenchement de ce mécanisme pourrait être dû aux effets minimes des marées dues à Vénus et à Jupiter (Trellis). Ces tubes, issus de la zone convective, doivent être tordus, déformés ; les tubes émergents doivent avoir une structure détaillée faite de « fibres » (tout comme des cordes) : c'est l'idée de Piddington, confirmée par certaines observations. L'apparence des structures chromosphériques, au-dessus des taches, suggère fortement l'existence d'arches complexes qui se dispersent et se groupent (selon le schéma de Piddington-Giovanelli).

Ces phénomènes posent des questions importantes du point de vue de la structure interne : pourquoi le champ magnétique est-il distribué en fibres tordues ? Pourquoi « flottent-elles », dans les phases préliminaires ? Comment montent-elles, sous quelle action émergent-elles ? Pourquoi cette émergence a-t-elle lieu à des longitudes de Carrington bien définies (Maunder) ?

Les observations poursuivies dans le domaine X ont mis en évidence l'existence d'un chauffage coronal intense et localisé. Pourquoi ces points brillants X coïncident-ils avec l'émergence d'une région magnétique active ?

— Les caractéristiques globales du cycle reflètent incontestablement les propriétés internes du Soleil.

On notera d'abord les « lois de Hale » : 1) dans un hémisphère, toutes les régions actives ont le même alignement est-ouest des polarités magnétiques pendant un cycle de onze ans ; 2) les alignements de polarités sont de signes opposés dans les deux hémisphères ; 3) les alignements de polarités se renversent d'un cycle au suivant (ce qui suggère la réalité des cycles de 22 ans).

On notera ensuite les lois de Spörer-Maunder : 1) les taches migrent, globalement, vers l'équateur ; 2) l'équateur magnétique ne coïncide pas vraiment avec l'équateur de la rotation ; 3) les deux hémisphères ne sont pas symétriques ; 4) les zones tachées ne dépassent guère des latitudes de 40-45° ; 5) deux cycles successifs empiètent parfois l'un sur l'autre (et les régions où apparaissent les points X brillants continuent les régions tachées vers les hautes latitudes, si bien que deux cycles de 18 ans se suivent avec un intervalle de 11 ans).

De plus, les découvertes géologiques de Williams (1982) ont mis en évidence une périodicité de 314 ± 5 ans (à l'époque précambrienne) et, depuis lors, la constance de phénomènes comme les périodicités à 11 et 22 ans ou les minimums longs de Maunder et de Spörer.

Ces faits ont certainement des incidences sur la structure interne du Soleil dont ils dépendent étroitement.

B. LES MODÈLES « STANDARD » DE L'INTÉRIEUR SOLAIRE

Dans cette partie du cours, introductive au cours de 1986-1987, nous avons suivi d'assez près les exposés classiques rappelés dans la bibliographie. Nous nous bornons ci-après, de ce fait, à indiquer le plan de notre exposé, et à quelques remarques complémentaires.

a) *Les théorèmes d'équilibre*

Que peut-on dire à partir de la seule donnée de R_{\odot} , L_{\odot} , M_{\odot} et de la constatation que le Soleil est une sphère en équilibre ? L'équilibre hydrostatique et le théorème d'additivité des masses (souvent appelé à tort « condition de continuité de la masse ») conduisent à des inégalités longuement discutées par Chandrasekhar qui fixent à la température et à la pression centrale du Soleil des limites inférieures et supérieures. Les évaluations « moyennes » de Schwarzschild et de Kourganoff aboutissent à des conclusions analogues : le Soleil est un gaz non dégénéré ; la pression de radiation n'y est qu'un terme correctif. On supposera toujours la structure sphérique.

b) *Les équations d'équilibre*

Ce sont, dans les modèles classiques, les équations : d'équilibre hydrostatique (*EH*) — dont on démontre la stabilité — ; d'équilibre thermique (*ET*), (*T* est stationnaire : les sources d'énergie sont exactement compensées par les pertes) ; d'équilibre radiatif (*ER*), (localement, l'énergie venant de l'intérieur est absorbée, et réémise vers l'extérieur).

L'équilibre radiatif peut être violé si les convections amorcées ne s'amortissent pas ; la condition de Schwarzschild permet de décider si l'*ER* est réalisé ou non ; s'il ne l'est pas, on adoptera une relation adiabatique dans la zone convective.

Ces équilibres (auxquels on ajoute la condition d'additivité des masses) aboutissent à deux jeux possibles de quatre équations différentielles du premier ordre, classiques et non-linéaires, en chaque couche. On dispose de conditions physiques locales : équation d'état, loi d'opacité, et loi de production d'énergie, qui interviennent dans ces quatre équations. De plus, on a deux groupes de conditions aux limites, deux au centre, deux à la surface, ce qui suffit à « bien définir » les problème.

c) *L'équation d'état*

Elle dépend de la masse moléculaire moyenne — donc de la composition chimique et des effets d'ionisation qui dépendent eux-mêmes de la profondeur dans le Soleil.

d) *L'opacité*

Elle est due uniquement aux transitions libre-libre, lié-libre, dans une moindre mesure lié-lié, et aux phénomènes de diffusion par les électrons. L'opacité dépend de la composition chimique, et, évidemment, de la profondeur.

L'isotropie du rayonnement étant quasi parfaite dans les couches intérieures de l'étoile, l'opacité (qui, *stricto sensu*, dépend bien entendu de la fréquence) peut être représentée par l'opacité moyenne de Rosseland.

e) *Les sources d'énergie*

Ce sont celles des réactions p-p, efficaces dans les régions centrales ($r/R_{\odot} < 0.2$) de l'étoile.

f) *Les conditions aux limites*

On peut choisir $T = P = 0$ à $r = R_{\odot}$. Mais on peut aussi prendre un modèle d'atmosphère réaliste, bien construit, et choisir les conditions physiques en l'une de ses couches comme conditions aux limites.

De toutes façons, une intégration simple des équations d'équilibre conduit à une loi : $p^2 = C + K T^{8.5}$; selon la valeur de cette constante C , cette portion extérieure de modèle convient plus ou moins bien. L'atmosphère réaliste correspond à une valeur précise (positive) de C .

g) *Les techniques d'intégration*

On peut partir de la surface ou de l'intérieur : dans les deux cas, des divergences numériques empêchent de « couvrir » tout le modèle.

Les techniques font donc intervenir une couche de raccord à $r = r_i$; et pour que cette couche puisse être bien définie, il est utile de définir des grandeurs physiques non dimensionnelles et de faire intervenir des équations réduites très maniables que l'on peut ramener à des constantes simples, en petit nombre, calculables à partir des conditions aux limites. Les modèles résultent alors de la combinaison d'une solution d'enveloppe ($r > r_i$) avec une solution d'intérieur profond ($r < r_i$). Ces modèles sont « inhomogènes » (c'est-à-dire que la masse moléculaire moyenne varie avec la profondeur) et permettent même (pour que le raccord soit assuré), la détermination du rapport H : He.

J.-C. P.

BIBLIOGRAPHIE

La bibliographie est évidemment considérable. Nous la limitons à quelques ouvrages collectifs et articles de synthèse, qui renvoient le plus souvent à la littérature utilisée. Sur la première partie (données fondamentales), nous citerons :

E.U. CONDON, M. ODISHAW, ed., *Handbook of Physics*, 2d ed. McGraw-Hill, 1967.

C.J. DURRANT, *Solar system, the Sun*, part I, pp. 82-101 dans Landolt, Bornstein, Numerical data, New series, VI, 2, *Astronomy and Astrophysics*, Sub volume a, Springer, 1981.

J.A. EDDY, ed., *The new solar physics*, AAAS Symp. 17, Boulder, Westview Press, 214 p., 1978

P.A. GILMAN, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, **12**, 47, 1974.

R.G. GIOVANELLI, *Secrets of the Sun*, London, Cambridge Univ. Press, 116 p., 1984

R. HOWARD, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, **22**, 131, 1984.

S. JORDAN, ed., *The Sun as a star*, C.N.R.S.-N.A.S.A. Monograph series on non-thermal phenomena in stellar atmospheres, 518 p., 1981.

G.P. KUIPER, ed., *The Sun*, Univ. of Chicago Press, 745 p., 1953.

G. NEWKIRK, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, **21**, 429, 1983.

J.-C. PECKER, *L'Astronomie expérimentale*, Paris, P.U.F., 155 p., 1969.

O.R. WHITE, ed., *The Solar output and its variations*, Boulder, Colorado Ass. Univ. Press, 526 p., 1977.

Nous citerons aussi quelques articles auxquels nous nous sommes référés, et qui sont peu cités dans les ouvrages ou articles de synthèse :

P. DELACHE, F. LACLARE, H. SADSAOUD, *Nature*, **317**, 416, 1985.

J.-C. PECKER, W.O. ROBERTS, *Astron. J.*, **59**, 330, 1954 ; *Science*, **120**, 721, 1954 ; *J. Colorado. Wyoming Acad. Sc.*, 30 march 1954 ; *C.R.Ac.Sc.*, **239**, 635, 1954 ; *J. Geophys. Res.*, **60**, 33, 1954.

M. TRELIS, *C.R.Ac.Sc.*, **262**, 221 ; 312 ; 1462, 1966.

Sur la seconde partie, quatre ouvrages fondamentaux doivent être consultés :

S. CHANDRASEKHAR, *An introduction to the study of stellar structure*, Chicago Univ. Press, 509 p., 1939 ; Dover, 1967.

J. COX, R.T. GIULI *Principles of stellar structure*, 2 vol., Gordon & Breach, 1 327 p., 1968.

V. KOURGANOFF, *Introduction to advanced astrophysics*, Reidel, 480 p., 1968.

M. SCHWARZCHILD, *Structure and evolution of the stars*, Princeton Univ. Press, 296 p., 1958.

PROFESSEURS INVITÉS

Des personnalités étrangères, invitées par le Collège de France, ont donné, dans le cadre de la Chaire d'Astrophysique Théorique, des séries de conférences :

M. Naoshi FUKUSHIMA (Professeur à l'Université de Tokyo) a donné quatre leçons sur « L'environnement électrique de la Terre » :

7 janvier 1986 : Current responsible for geomagnetic variations.

14 janvier 1986 : Need of satellite observation of the three-dimensional distribution of electric currents in the ionosphere-magnetosphere.

21 janvier 1986 : Recent satellite measurements of the geomagnetic field.

28 janvier 1986 : The secular variation of geomagnetism through the study of ancient aurorae.

M. Luboš PEREK a donné quatre leçons sur les sujets suivants : Astronomy and space law : a study in the interaction between the scientific and the social sphere.

3 juin 1986 : Basic principles of space flight, basic principles of space law.

10 juin 1986 : The definition of outer space.

17 juin 1986 : Registration of space objects ; the geostationary orbit.

24 juin 1986 : Protection of the environment and of space activities.

M. Paul LEDOUX a donné deux leçons sur les « Oscillations non-radiales ».

12 juin 1986 : Problème général.

13 juin 1986 : Le mode à 160 minutes.

SÉMINAIRES

Les séminaires ont été, cette année, divisés en deux groupes : (1) Formation d'étoiles ; (2) Nuages moléculaires et proto-étoiles.

Les cinq premiers séminaires ont été les suivants :

— 7 janvier : Introduction (J.-C. PECKER).

— 14 janvier : Simulations numériques de l'effet dynamo turbulent (M. MENEGUZZI).

— 21 janvier : Comment écouter le cœur des étoiles (E. FOSSAT).

— 28 janvier : Quelques phénomènes du cycle solaire liés à l'activité géomagnétique de 1868 à 1880 (P. SIMON).

— 4 février : Interaction entre le vent solaire et le milieu interstellaire local (R. LALLEMENT).

Les séminaires suivants ont groupé plusieurs exposés sur le thème des nuages moléculaires et des protoétoiles, dont les résumés sont reproduits ci-après.

18 février 1986

D. DOWNES (I.R.A.M.) : Formation of massive stars in our Galaxy.

This lecture is a review of recent ideas on how the formation of massive stars differs from that of low-mass stars.

Topics covered are :

— Mechanisms preventing star formation, structure of and evidence for « cores » of star formation, shock-induced versus stochastic formation of massive stars ;

— The theory of bi-modal star formation and its implications for the initial mass function and distribution of massive stars and metallicity gradients in the Galaxy.

E. FALGARONE (Ecole Normale Supérieure) : Structure hiérarchique du milieu interstellaire et formation d'étoiles.

La plus condensée des phases du milieu interstellaire est divisée en entités dites « nuages », tenus par leur propre champ de gravité. Certaines de leurs propriétés (taille, fraction d'hydrogène sous forme moléculaire, abondance de molécules, dispersion de vitesses interne) sont remarquablement sensibles aux modifications de leur environnement. Ce sont les variations dans les paramètres de ces nuages qui dictent des conditions qui préludent au processus de formation d'étoiles, et jouent un rôle fondamental dans la distribution de masse des étoiles formées.

Les observations dans le domaine millimétrique permettent aujourd'hui d'avoir accès à ces paramètres ainsi qu'à la structure du milieu interstellaire dans son ensemble. Sur plus de quatre décades en taille, les nuages forment une hiérarchie. Parmi les propriétés remarquables de cette structure, citons :

(i) chaque échelle est en quasi-équilibre du viriel et cependant à la limite de l'instabilité gravitationnelle ;

(ii) la matière est distribuée de façon à optimiser son irradiation en fonction du champ de rayonnement extérieur.

Les observations indiquent aussi que la cellule élémentaire de cette hiérarchie peut former des étoiles sans que l'essentiel de sa masse se soit effondrée

ou fragmentée. Ceci contredit visiblement les idées traditionnelles sur la fragmentation du gaz interstellaire et la formation des étoiles. On montrera comment la structure interne de ces nuages de base permet d'inverser le classique critère d'instabilité gravitationnelle de Jeans.

F. CASOLI (Ecole Normale Supérieure) : Observations de flots moléculaires autour d'étoiles jeunes.

Au cours de leur évolution vers la séquence principale, les étoiles de toute masse semblent passer par un épisode très énergétique de perte de masse. Ces flots ont été mis en évidence par l'observation, dans les régions de formation d'étoiles, d'ailes étendues de la raie de rotation $j = 1-0$ de CO, correspondant à du gaz à grande vitesse, de 10 à 100 km/sec. La cartographie de ces flots suggère le plus souvent une distribution anisotrope des composantes bleuies et rougies. Le centre du flot coïncide généralement avec une source IR associée à une étoile récemment formée. Associés à ces flots, on trouve des jets optiques, des objets HH et des masers.

Les observations moléculaires les plus typiques de ces flots seront présentées. On décrira la manière d'en déduire les paramètres physiques des flots et les incertitudes de ces calculs. On discutera les modèles proposés pour expliquer des phénomènes aussi énergétiques ainsi que les conséquences pour la stabilisation des nuages moléculaires et la régularisation du processus de formation d'étoiles.

S. CABRIT (Institut d'Astrophysique de Paris) : Formation des raies de CO dans les flots bipolaires.

Nous présentons une étude de la formation de la raie $j = 1-0$ de CO en géométrie bipolaire, pour deux types de champ de vitesse : constant et accéléré. Selon l'angle de visée et l'angle d'ouverture du flot, quatre classes de profils de raies, de cartes vitesse-position et de cartes d'intensités intégrées peuvent être distinguées. Notre modèle nous permet également de tester la méthode la plus communément employée pour déduire les paramètres du flot à partir des cartes observées en CO. Nous trouvons que cette méthode est inappropriée, principalement parce qu'elle sous-estime à la fois la densité colonne de CO et l'échelle de temps caractéristique du flot. Finalement, nous faisons quelques suggestions qui devraient permettre une plus grande précision.

— 25 février 1986 :

D. WILLIAMS (University of Manchester, Grande-Bretagne) : Recent developments in interstellar chemistry.

The success of gas phase ion-molecule reaction schemes for forming small interstellar molecules is well established, and will be briefly reviewed. The

discussion will include both cold-cloud and high-temperature regions, and some particular successes of this chemistry will be highlighted.

Such schemes, however, fail to account fully for a number of observational results : for example, the high C/CO ratio, the overabundance of some molecules and the detection of complex molecule mantels on grains. It will be argued that these observations suggest the existence of a rich chemistry on grain surface. Some recent properties concerning interstellar surface chemistry will be described, and their implications explored.

A. LÉGER (Ecole Normale Supérieure) : Signatures spectrales des grains et des agrégats interstellaires.

1) Informations déduites de la loi d'extinction du milieu interstellaire et émission des grains.

2) Identification des bandes IK en émission « non-identifiées » : les molécules polygraphitiques.

3) Implications de la présence de ces molécules pour l'émission, le chauffage, et la chimie du milieu interstellaire.

M. de MUIZON (Sterrewacht Leiden et Observatoire de Paris) : Infrared spectroscopic observations of interstellar dust in IRAS sources.

A number of non-stellar objects have been selected according to some peculiarities in their 7.5-23 μ m spectrum, as measured by the Low Resolution Spectrometer (L.R.S.) onboard IRAS. We present ground-based follow-up spectroscopy in the 3 to 4 μ m range, carried out from UKIRT (Mauna Kea) and from ESO-3.60 m (La Silla).

In a first set of sources, the L.R.S. spectrum show several emission features. We measured their counterpart in the 3 μ m region. In a few sources, also observed at higher resolution (R 500), we detected several new features. These new data will be discussed in the context of the recent attempts to identify the features, i.e. : the polycyclic aromatic hydrocarbon molecules' hypothesis.

In a second set of sources (protostars and OH/IR stars), the L.R.S. spectra show a strong and deep silicate absorption band at 10 μ m, enhanced with a wing at 11.5-12 μ m. Based on our detection of a strong 3 μ m water-ice band in these objects, the wing is interpreted as the 12 μ m water-ice band. Some properties of icy grains towards the observed targets will be investigated.

S. GUILLOTEAU (Groupe d'Astrophysique, U.M.S.G., Grenoble) : Disques autour d'étoiles massives : quelles évidences ?

La détection de disques denses, résidus présumés de la phase de formation des étoiles et peut-être agents focalisants des flots bipolaires associés aux étoiles jeunes, reste un problème délicat. Les étoiles les plus massives offrent

a priori quelques avantages dans les tentatives de détection. Outre les disques vraisemblablement plus gros, les vitesses d'effondrement gravitationnel ou de rotation en jeu sont plus importantes. En plus, quelques phénomènes « annexes » comme l'existence de régions HII compactes permettent l'utilisation de méthodes spécifiques. Quelques méthodes d'étude possibles seront présentées et le schéma théorique (simplifié) Accrétion + Rotation → Disque comparé aux observations les plus récentes.

— 4 mars 1986 :

R. MUNDT (Max Planck Institut für Astronomie, Heidelberg) : Herbig-Haro objects, jets and related outflow phenomena in young stellar objects.

A review of the various observational indications for mass outflows from visible T Tauri stars and IR-sources of similar luminosity ($0.1 L_{\odot} < L < 100 L_{\odot}$) is given. Stellar emission line profiles, radio continuum studies, CO line observations of surrounding high-velocity molecular gas and optical investigations of associated Herbig-Haro (HH) objects and optical jets are discussed. The latter investigations have shown that some of these young stellar objects are capable of generating highly-collimated bipolar flows. These jets have typical lengths of 0.01 to 0.5 pc, opening angles of a few degrees and their measured radial velocities reach values of up to 400 km/s. A discussion of typical parameters of these jets (Mach number...) will be a further subject of this talk.

E. FEIGELSON (Penn State University, U.S.A.) : X-Rays from pre-main sequence stars.

Observations of X-ray emission from low-mass pre-main sequence stars are summarized and discussed. These include objects in the Orion, Taurus, Ophiucus, and Chameleon clouds. The high level of X-ray emission, rapid variability, all indicate a flare origin. Implications for the evolution of stellar activity, molecular cloud chemistry and other topics, will be reviewed.

P. ANDRÉ (Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay) : Emission radio des étoiles jeunes.

Une revue des différents mécanismes d'émission continue radio-centimétrique par les étoiles jeunes est présentée.

Deux grandes classes de mécanismes sont à l'œuvre : émissions dites « thermique » (région H II, vent ou disque d'accrétion ionisés...) et « non-thermique » (éruptions, vent chaotique...).

L'accent est mis en particulier sur les conséquences observables qui permettent de trancher entre les différents modèles : spectres caractéristiques, variabilité temporelle, résolution spatiale. Des objets récemment observés au V.L.A. servent à illustrer les différents cas possibles.

— 11 mars 1986 :

F. PRADERIE (Observatoire de Meudon) : Non-homogénéité du vent stellaire dans le cas des étoiles pré-séquence principale.

Des observations dans les domaines UV et visible, étalées sur un long intervalle de temps, ont été faites sur une étoile pré-séquence principale de masse intermédiaire ($3M_{\odot}$). On a pu montrer que la vitesse du vent à différentes distances de la photosphère varie avec une période qui n'est autre que la période de rotation de l'étoile. Les conséquences de ces observations pour la structure de l'enveloppe en expansion et le champ magnétique seront discutées.

J. BOUVIER (Institut d'Astrophysique de Paris) : Phénomènes magnétiques dans les étoiles T Tauri.

Puisqu'il n'est pas possible, à l'heure actuelle, de mesurer directement les champs magnétiques des étoiles T Tauri, il faut rechercher des diagnostics observationnels permettant d'inférer leur existence.

L'étude de l'activité magnétique du Soleil nous guide alors dans la sélection de critères liés à la présence de champs magnétiques intenses (taches magnétiques, émission CA II, rayonnement X). L'analyse de ces critères dans les étoiles T Tauri, en particulier la mise en évidence de larges taches magnétiques à leur surface, a permis d'établir le rôle prépondérant joué par le champ magnétique dans l'activité manifestée par ces objets.

L'effet dynamo est généralement tenu pour responsable de la production des champs magnétiques solaires et stellaires. Nous discutons l'existence éventuelle de relations attendues dans le cadre de l'effet dynamo entre niveau d'activité et taux de rotation dans les étoiles T Tauri.

G. BASRI (Astronomy Department, Berkeley) : Stellar activity : causes and effects.

Over the last decade, great advances in the study of stellar activity have occurred. Observations from space have played a large role and synoptic ground-based observations have also been crucial. It has become apparent that the factors which fix the level of activity on a star are mostly the stellar rotation and age, while position in the HR Diagram is at most a secondary consideration. The Sun has proved a reasonable analogy from which to start stellar analysis, although some stars are vastly more active than it. We discuss in detail the results leading to these statements, compare stellar activity in a wide variety of stars by means of consistent calibrated data at many wavelengths, and try to summarize our current state of knowledge and directions of research on stellar activity. Particular attention is paid to rotation-activity relations for main sequence stars and evolved subgiants, and the question of what are the fundamental physical parameters involved.

ACTIVITÉS DU LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE THÉORIQUE

Le laboratoire (désigné par le sigle L.A.T.) est, depuis sa création, installé à l'Institut d'Astrophysique, Paris (ou I.A.P.), laboratoire propre du C.N.R.S., dont le directeur est M. Jean AUDOUZE, Directeur de Recherches au C.N.R.S.

Comme par le passé, la spécificité du L.A.T. au sein de l'I.A.P. reste la préoccupation commune aux chercheurs qui le composent de s'occuper, à travers les faits astrophysiques et grâce à leur force de suggestion, de la nature des phénomènes physiques qui en commandent les aspects, et dont, bien souvent, l'astrophysique seule aborde l'étude. De cette préoccupation commune, qui concerne divers domaines, résulte l'unité du groupe malgré la diversité des sujets étudiés. De là aussi viennent les nombreuses collaborations entre les membres du L.A.T. et les autres chercheurs de l'I.A.P. ou des chercheurs de Paris, de Meudon, ou étrangers à la région parisienne, voire à la France. Les rapports annuels successifs d'activité du L.A.T. du Collège de France reflètent bien cette unité et cette diversité, nullement contradictoires l'une avec l'autre.

COMPOSITION DU LABORATOIRE

Membres permanents : C. BERTOUT (C.R. C.N.R.S.), J. BRUNEL (Prép. Temp. Coll. de Fr.), S. DEPAQUIT (Ing. C.N.R.S.), S. DUMONT (Astr. Adj. Obs. de Paris), B. ETCHETTO (Techn. CdF., depuis août 1986), E. GIRAUD (Prof. Ac. Paris), M. GROS (Asst. Obs. de Paris), P. HAOUR (Techn. Coll. de Fr.), H. KAROJI (M. Asst., Univ. Paris VI), R. KRİKORIAN (M. Asst. Coll. de Fr.), S. LALOË (mi-temps depuis juin 86, Ing. C.N.R.S.), L. LERICQUE (Techn. Coll. de Fr.), M. MARTIĆ (Prép. Temp. Coll. de Fr.), I. NADDEO (Ing. CdF., depuis 31 juillet 1986), P. MÉRAT (Ing. C.N.R.S.), S. PERRET (Techn. C.N.R.S. jusqu'en janv. 1986), E. SIMONNEAU (C.R. C.N.R.S.).

Membre à titre temporaire : K. SAHU.

Chercheurs associés : R. BONNET (E.S.A.), J. BOUVIER (I.A.P.), S. CABRIT (I.A.P.), S. COLLIN (Obs. de Meudon), Z. MOURADIAN (Obs. de Meudon), J. OXENIUS (Univ. Bruxelles), M. SRINIVASAN (Ahmedabad, Univ.), J.-P. VIGIER (I.H.P.).

ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES DU L.A.T.

1. *Physique solaire* :

a) *Facules chromosphériques*

L'équipe qui s'est consacrée à l'étude des *facules chromosphériques* se composait au départ de Simone Dumont et Jean-Claude Pecker pour le L.A.T. et de Zadig Mouradian pour le D.A.S.O.P. (Observatoire de Paris-Meudon). G. Simon (Obs. de Paris-Meudon) a participé au travail d'observation et d'interprétation.

Diverses collaborations se sont établies : avec les responsables des deux instruments embarqués sur le satellite OSO 8 que nous avons utilisés (J.-C. Vial et G. Artzner pour le L.P.S.P. et E. Chipman pour le L.A.S.P.), avec G. Chapman (U.S.A.) pour les mesures du champ magnétique, avec E. Hiei (Japon) pour l'étude de la chromosphère et avec C. Fang (Pékin et Meudon) pour l'étude des structures chromosphériques.

Le but de ce programme peut être défini comme suit : les observations sur le Soleil — régions calmes ou régions actives (facules) — sont faites par satellite ou au sol, dans un domaine spectral allant de l'ultraviolet à l'infrarouge proche. Elles sont complétées par des mesures du champ magnétique et des champs de vitesses, au niveau photosphérique. Ceci permet l'étude d'une atmosphère à différents niveaux et dans différentes conditions (par exemple : fort et faible champ magnétique) et la construction de modèles améliorés.

Nous ne rappelons pas ici tous les résultats obtenus mais uniquement ceux qui nous ont conduits à de nouvelles recherches.

L'analyse des profils de la raie chromosphérique K de Ca II a montré une variation du champ de vitesse au bord d'une facule (G. Simon et al., 1980). Ce résultat étant basé sur une seule observation, une campagne d'observation a été entreprise (et est en cours) par Z. Mouradian à l'Observatoire de Paris-Meudon. Il s'agit d'obtenir des profils de la raie K en balayant une région faculaire et en suivant cette région, si possible, pendant tout son passage sur le disque solaire.

Des modèles de la zone de transition chromosphère-couronne ont été obtenus pour le soleil calme et des régions d'activité moyenne (Soleil en 1976). Nous avons entrepris de tester ces modèles avec des données obtenues avec l'instrument ATM monté sur le satellite Skylab en 1973. Ces observations ont été dépouillées au D.A.S.O.P. (M.-J. Martres, Z. Mouradian, et I. Soru-Escaut). On dispose d'observations centre-bord d'une facule et du soleil calme, et de coupes photométriques d'une facule de géométrie simple pendant

son passage sur le disque. Le travail d'interprétation est en cours pour les raies de Mg X, O VI et O IV (S. Dumont).

Enfin, la prise en compte, dans l'interprétation des données, des effets de la « rugosité » (forme non sphérique des couches émettrices, dans tel ou tel rayonnement) a été entreprise de façon systématique ; une publication préliminaire a montré l'importance des corrections imposées par une telle prise en compte et a justifié le développement, en cours, de ces calculs (J.-C. Pecker).

b) *Structure fine du champ magnétique*

M^{lle} Milena Martić, de l'Université de Belgrade, est rattachée au laboratoire, où elle a effectué son stage de D.E.A. Elle y poursuit son travail de thèse sous la direction effective de Luc Damé (du L.P.S.P.) et de J.-C. Pecker.

Son travail est une première étape dans la compréhension de la nature des relations existant entre le champ magnétique à petite échelle, la convection et les oscillations photosphériques et chromosphériques.

Les observations poursuivies en novembre/décembre 1983 (L. Damé (L.P.S.P.), H. Ramsey, H. Mauter, D. Mann) à l'aide du télescope de la tour à vide de Sacramento Peak ont permis d'obtenir plusieurs séquences *simultannées* de filtrogrammes (dans le pic bleu de la raie K du calcium II et dans une raie de CN) et de magnétogrammes à haute résolution spatiale (0.5 à 1"), à 6303 Å, obtenues par le Filtre Lyot à bande réglable de Lockheed. La haute résolution spatiale des données est complétée par une haute résolution temporelle (12 sec) et une bonne durée des séquences, de 20 minutes jusqu'à 4 heures.

M. Martić a développé le logiciel nécessaire à la correction et à la calibration des images bi-dimensionnelles. Dans un deuxième temps, elle a développé les programmes d'analyse des corrélations statiques et dynamiques entre les oscillations en structure fine du Ca II K et le champ magnétique à petite échelle.

D'intéressants résultats sont obtenus :

i) La corrélation entre l'intensité du champ magnétique et l'émission dans la raie du Ca II K (région active, réseau) est plus élevée que dans les études faites précédemment à plus basse résolution.

ii) Les oscillations dans le champ magnétique montrent la forte puissance oscillatoire localisée dans l'élément brillant qui correspond à la région la plus active. Le maximum du spectre en fréquence correspond à une période de 3 minutes ; ce résultat est en accord avec les résultats récents de Dara-Papamargariti et Koutchmy (Proceedings 8th European Meeting of the I.A.U., 1984)

qui observent également des oscillations de 3 minutes de l'intensité du champ magnétique dans les raies 6301.5 et 6302.5 Å.

iii) De plus, les cartes de phase de l'oscillation du champ magnétique font apparaître une zone de cohérence étendue, corrélée à la zone d'émission renforcée en Ca II K. Sur toute l'étendue de la région active, le champ magnétique oscille approximativement en phase. Cette cohérence de phase semble indiquer l'existence d'une origine commune pour les oscillations des différents points de la région active.

iv) Un autre résultat concerne les propriétés du champ oscillatoire observées dans la raie K du Ca II. Les cartes de fréquence en intensité intégrées montrent, à une période de 3 minutes, la disparition du réseau chromosphérique. Les oscillations de 3 minutes semblent être restreintes à la région plus sombre du disque solaire, c'est-à-dire à l'intérieur des cellules de la supergranulation.

L'étude des cartes de phase de l'oscillation dans la raie Ca II K met en évidence une étendue de cohérence de la phase (10"-12") qui souligne nettement une structure intermédiaire existant au centre des supergranules. Les spectres d'intensité de cohérence en fonction de nombre d'ondes horizontal (transformée de Fourier spatiale des cartes de phase) révèlent un pic très significatif qui correspond à une fréquence spatiale de 8 Mm. Ce degré d'organisation des éléments oscillatoires peut être rapproché de la description de la *méso-granulation* mise en évidence par November et al. (1979). L'analyse montre que cette méso-dimension de l'organisation spatiale a pour origine l'oscillation de 3-5 minutes, plutôt que la convection.

2. Théorie des atmosphères stellaires et des enveloppes circumstellaires

a) Transfert de rayonnement, codes de calcul

M. Edouardo Simonneau a procédé à une simplification des codes de calcul du transfert de rayonnement. Il s'avère en effet comme très probable que les codes de calcul de transfert — et en conséquence ceux du calcul des modèles d'atmosphères et des spectres stellaires — peuvent être simplifiés d'une façon substantielle sans, pour autant, introduire une perte de précision.

Ce travail est en train de dépasser son étape conceptuelle. E. Simonneau s'est incorporé dans un programme de recherche, « Structure des couches extérieures des étoiles de type spectral A et plus tardives », établi par M^{me} F. Praderie et M. L. Crivellari dans le cadre d'une collaboration internationale entre la France et l'Italie (Observatoire de Paris-Meudon et Observatoire de Trieste). Dans ce programme, E. Simonneau s'occupe de la résolution numérique de l'équation du transfert de rayonnement dans le calcul des modèles d'atmosphères ; ceci lui a permis de tester les affirmations

antérieures quant à la possibilité de simplification dans les méthodes de résolution.

M. Claude Bertout et M^{lle} Sylvie Cabrit ont développé un code permettant de calculer, sans autres approximations que celles inhérentes à la méthode de Monte-Carlo, les populations NLTE de la molécule CO dans des géométries et champs de vitesse complexes.

D'autre part, le développement du code de calcul des raies de résonance commencé avec M. Gibor Basri en 1984 s'est poursuivi cette année. La phase de tests du programme est bien avancée et l'on commence à pouvoir envisager de l'utiliser pour des études concrètes. Une partie des tests, concernant notamment les effets de la redistribution partielle en présence de champs de vitesse, sera bientôt publiée.

b) *La formation des raies*

M. Christian Magnan a réalisé avec C. Bertout un travail de mise au point concernant la formation des raies dans des enveloppes en mouvement. Il s'agissait d'expliquer en termes physiques la forme des profils calculés en faisant appel à des modèles analytiques simples. On a notamment délimité soigneusement les conditions dans lesquelles un renversement central pouvait apparaître au contraire d'un profil parabolique. Le premier cas est caractéristique des enveloppes géométriquement étroites, le second l'est des enveloppes étendues.

En outre, C. Magnan a conseillé et suivi les calculs de M. L. Ben Jaffel, chercheur extérieur au laboratoire du L.A.T., dont la thèse porte sur les profils de raies observés dans l'atmosphère de Jupiter.

A cet effet, C. Magnan a aidé à mettre en route la méthode d'addition de couches qui s'est révélée tout à fait adéquate à traiter un tel problème. Il est possible que le travail se prolonge dans d'autres directions intéressantes et nouvelles.

E. Simonneau s'est préoccupé du problème de la redistribution dans les raies. Du point de vue physique, le problème posé est celui de la détermination de la structure des coefficients d'absorption et d'émission dans le repère du laboratoire, tels qu'ils apparaissent dans l'équation de transfert. C'est la solution de cette équation, qui dépend évidemment de ces coefficients, qui doit être comparée aux observations lors de l'analyse spectroscopique.

Pour déterminer ces coefficients conformément aux méthodes habituelles de la spectroscopie des plasmas, E. Simonneau s'est placé dans le cadre des modèles semi-classiques. On y considère les atomes excités et non-excités comme des particules de type différent et l'on décrit les gaz d'atomes excités et non-excités à l'aide de deux fonctions de distribution de vitesses différentes.

Ainsi, les coefficients d'absorption et d'émission dans le repère du laboratoire sont-ils donnés par les coefficients atomiques convolués avec la fonction de distribution de vitesses de l'atome dans le niveau correspondant.

Deux problèmes se posent successivement dans cette étude. Le premier est celui de l'obtention des coefficients dans le repère propre de l'atome. Le second, dont E. Simonneau s'est occupé avec J. Borsenberger et J. Oxenius, est celui de l'obtention des fonctions de distribution de vitesse des atomes différemment excités, et donc des coefficients d'absorption et d'émission dans le repère du laboratoire.

En l'absence de perturbations dues à des circonstances externes au système, les fonctions de distribution de vitesse des atomes différemment excités doivent être non-maxwelliennes. Les auteurs ont décrit tous les processus qui contribuent à sa détermination, ainsi que les relations mathématiques qui décrivent ces processus. En résumé, il est nécessaire de résoudre des équations cinétiques pour étudier les fonctions de distribution de vitesses. L'étude générale de ce problème est terminée ; on entre dans la phase de publication des résultats.

c) Théorie d'une enveloppe gazeuse illuminée par une source centrale

En collaboration avec C. Magnan, et sous sa supervision, M^{me} Monique Gros a continué à traiter cet important problème qui fera l'objet de sa thèse. Elle en est arrivée au stade de l'exploitation et de la présentation des résultats pour la publication.

Les travaux de M. Gros portent sur l'étude de l'état d'excitation et d'ionisation d'atomes d'hydrogène illuminés par une source centrale. Après avoir mené un gros travail de vérification et d'essais des programmes dans les diverses situations où une solution numérique simple est déjà disponible, elle a démarré une phase d'exploitation plus systématique. Les problèmes abordés maintenant sont de nature plus physique et concernent directement l'analyse des processus à l'œuvre dans le milieu étudié.

Une zone de transition entre la région HII et la région HI a été calculée. M. Gros s'attache actuellement à en expliquer les propriétés essentielles, position et surtout épaisseur.

L'étape suivante consistera à étudier la réponse de ces caractéristiques à des conditions physiques différentes (source d'excitation, densité dans l'enveloppe, extension de cette dernière).

d) Les atmosphères de supernovae

Ce problème a été abordé par E. Simonneau. Il est possible d'adapter au calcul des modèles des atmosphères des supernovae la méthode de résolution

approchée de l'équation de transfert en géométrie sphérique développée lors des travaux qui ont constitué sa thèse d'Etat. Ceci ne demande aucun effort numérique particulier en ce qui concerne le calcul de transfert de rayonnement et peut donc s'adapter très facilement aux codes qui décrivent l'expansion des couches et les courbes de lumière. Avec le calcul des modèles, on pourra avoir un aperçu théorique du spectre des atmosphères ainsi qu'une meilleure relation entre le rayon atmosphérique et la dynamique de l'expansion. Cette relation est fondamentale pour déterminer la constante de Hubble.

Pour ces travaux, E. Simonneau s'est associé à une équipe de la Faculté de Physique de l'Université Centrale de Barcelone qui, depuis quelques années, travaille sur l'évolution et les courbes de lumière des supernovae du type I. Ses relations avec cette équipe se sont déroulées dans le cadre de l'Action Intégrée n° 41 : « Recherches de la structure des couches extérieures de supernovae ».

3. *Traitement relativiste de phénomènes atmosphériques*

Durant l'année 1985-1986, l'activité de recherche de M. Ralph Krikorian, en collaboration avec S. Kichenassamy (IHP), s'est concentrée, comme dans les années précédentes, sur l'étude de certains problèmes de physique relativiste présentant un intérêt astrophysique. Les sujets abordés ont été les suivants :

a) *Transfert relativiste du rayonnement.*

Utilisant le formalisme relativiste de la théorie cinétique ainsi que la théorie relativiste de l'optique géométrique, ces chercheurs ont établi l'équation du transfert de rayonnement en présence d'un champ de gravitation pour un milieu dispersif isotrope faiblement absorbant et non magnétique. L'importance du champ de gravitation et de la variation spatio-temporelle de l'indice de réfraction sur la fonction de distribution de rayonnement a été explicitée dans le cas d'un champ à symétrie sphérique. Ce travail a permis de clarifier les difficultés existant à ce sujet dans la littérature.

b) *Polarisation du rayonnement.*

S. Kichenassamy et R. Krikorian ont étudié la polarisation de la lumière dans le cadre de la relativité générale et ont obtenu en particulier la loi de variation de l'état de polarisation de la lumière lors de sa propagation d'un point à un autre. Les implications astrophysiques de cette loi vont être étudiées, principalement du point de vue observationnel. Le travail doit faire l'objet d'une publication.

c) *Rayonnement Cerenkov.*

Ce rayonnement joue un rôle important dans divers domaines de la physique. Récemment, il a été invoqué pour expliquer les raies d'émission dans les

quasars. S. Kichenassamy et R. Krikorian se sont donc proposés d'obtenir la condition d'apparition de ce rayonnement dans le cadre de la relativité générale.

4) *Atmosphères stellaires et milieu interstellaire : observations*

a) *Observations IRAS (Infra Red Astronomical Satellite) d'objets très rouges*

Les données IRAS, obtenues dans le cadre d'une coopération avec le Professeur Stuart Pottasch, de l'Université de Gröninge, ont permis la réalisation de plusieurs travaux, dans différents domaines.

M. Kailash Sahu, de l'Université d'Ahmedabad, s'est consacré, lors de son séjour d'un an au L.A.T., à l'étude de ces données. De nombreux objets ont été observés, qui étaient observables dans le domaine visible, mais dont la nature n'était pas connue. On a procédé, sur les plaques du Mont Palomar, à la détermination des magnitudes V et B (à la précision de $\pm 0,2$ mag). Les couleurs $B - V$ se trouvent dans le domaine 3-6 magnitudes ; le rapport des flux à $12 \mu\text{m}$ et dans le bleu, f_{12}/f_B , est égal ou supérieur à 10^4 environ. Ces objets ne sont pas dans le plan galactique : ne pouvant être des régions H II galactiques, ce sont plus vraisemblablement des protoétoiles ou des nébuleuses protoplanétaires, ou encore un nouveau type d'étoiles à enveloppe froide. Ces objets étant sélectionnés, on les a observés récemment à l'aide des spectrographes du télescope de 150 cm de l'ESO et à Nobeyama dans les raies de CO. Ce programme est en cours, en collaboration entre K. Sahu, J.-C. Pecker, H. Karoji (du L.A.T.), S. Pottasch (Gröninge) et N. Ukita (Nobeyama) ; ce dernier a, dans ce cadre, séjourné quelques mois en France.

b) *Observations IRAS de nébuleuses protoplanétaires*

K. Sahu (en collaboration avec S. Pottasch) a étudié la localisation de ces objets dans un diagramme ($\log(f_{25}/f_{60})/\log(f_{12}/f_{25})$), localisation qui peut être considérée comme un bon diagnostic de leur nature. Des informations complémentaires sont tirées des rapports f_{IR}/f_{vis} et des spectres IRAS ; une recherche systématique de ces objets peut être entreprise.

c) *Nébuleuses planétaires*

K. Sahu (en collaboration avec M. J.N. Desai, Ahmedabad), a étudié la structure cinématique de NGC 3132, nébuleuse planétaire possédant un noyau stellaire double. La structure de cette nébuleuse planétaire est ellipsoïdale.

d) *Rayons stellaires*

H. Karoji a explicité les données IRAS : Le flux à $12 \mu\text{m}$ est utilisé pour calculer le diamètre angulaire et le rayon d'étoiles naines du voisinage solaire (en collaboration avec M^{lle} Marie-Noël Perrin, Obs. de Paris), en faisant appel à des modèles d'atmosphère. On a trouvé une différence significative entre les

rayons ainsi déterminés et ceux déduits de la relation de Barnes-Evans. Comme cette dernière est fondée sur les mesures interférométriques directes, la différence constatée n'est pas facile à interpréter, à moins d'incriminer les fondements des modèles classiques d'atmosphères stellaires.

5. *Evolution stellaire*

a) *Etude de la phase pré-T Tauri*

Après conclusion d'études préliminaires comprenant le développement d'un code d'intégration exacte de profils de raies en géométrie axiale (Bertout, 1985) et l'étude critique des méthodes observationnelles et de l'interprétation de l'émission de CO à grande vitesse (stage de D.E.A. de S. Cabrit), C. Bertout et ses collaborateurs ont attaqué (fin 1984) le problème de la formation des raies de CO en géométrie bipolaire. C'est un problème particulièrement actuel puisque, depuis la première détection en 1980 d'un flot moléculaire bipolaire à grande vitesse autour d'une source infrarouge, on s'est rendu compte que les protoétoiles de toutes masses semblent passer par une phase d'éjection bipolaire de matière au cours de leur évolution vers la séquence principale. C'est aussi un problème intéressant parce qu'aucune théorie de l'évolution protostellaire n'avait prédit cette phase. Enfin, c'est un problème que les travaux antérieurs de C. Bertout sur le transfert de rayonnement en géométrie non-sphérique lui permettaient d'aborder rapidement. On doit encore noter qu'il n'y a, pour l'instant, aucune concurrence dans ce domaine.

Dans un premier temps, C. Bertout et S. Cabrit ont donc étudié des champs de vitesse simples leur permettant, sinon de comparer théorie et observation, du moins de comprendre le rôle de la géométrie et des paramètres de l'écoulement moléculaire dans la formation des raies. Ils ont ainsi pu montrer qu'il existe quatre classes possibles de profils selon l'angle d'ouverture des cônes d'éjection et l'angle sous lequel le flot est vu. Ils ont ensuite utilisé leurs modèles pour vérifier les méthodes employées par les observateurs pour tirer des observations les paramètres physiques du flot et ils les ont trouvées grossièrement inexactes. Cette meilleure compréhension du rôle des différents paramètres géométriques du flot leur a cependant permis de proposer des améliorations à ces méthodes. Ces premiers résultats ont fait l'objet d'un article (Cabrit et Bertout, Ap.J., sous presse).

Ils ont alors fait une demande de temps d'observation au télescope de 30 m de l'IRAM (en collaboration avec M. C. Thum, de l'IRAM) qui leur permettra de vérifier leurs idées et de calculer avec plus de précision notamment le taux de quantité de mouvement de gaz moléculaire en mouvement, paramètre important pour la compréhension du mécanisme d'éjection du gaz. Cette demande a été retenue.

Enfin, C. Bertout et S. Cabrit ont entamé la seconde phase de ce projet, qui consiste à tenter de dériver le champ de vitesse et la distribution de matière dans un flot bipolaire par la comparaison directe entre théorie et observations. Cette démarche nécessite le développement d'un outil de calcul de la fonction source des raies de CO plus puissant que celui que l'on possède actuellement. C. Bertout et S. Cabrit ont choisi, pour sa souplesse, une méthode de Monte-Carlo. La mise en œuvre de ce nouveau code nécessitera une machine rapide.

Le but essentiel de cette recherche est, en ce moment, de comprendre le rôle du magnétisme dans le phénomène T Tauri. La thèse de M. Jérôme Bouvier fera prochainement le point sur ce sujet. La voie suivie par C. Bertout et ses collaborateurs est pour l'instant surtout observationnelle et a donné lieu en 1985 à des résultats intéressants. Une campagne d'observation à l'ESO en décembre 1984, durant laquelle on disposait de trois télescopes pour l'étude simultanée des variations en photométrie optique et infrarouge ainsi qu'en spectroscopie, leur a permis en effet de mettre en évidence l'existence de taches sur une étoile T Tauri typique et d'en faire un modèle (Bouvier, Bertout et Bouchet, *Astron. Astrophys.*, sous presse). Alors que la présence de taches sur des étoiles « post-T Tauri » à raies d'émission très faibles est bien connue, les variations photométriques périodiques résultant de la modulation rotationnelle par les taches ont jusqu'ici rarement été observées sur des étoiles T Tauri typiques, d'où l'intérêt de cette étude. Il semble cependant, après les campagnes d'observations de décembre 1984 et 1985 (pour laquelle J. Bouvier disposait du télescope ESO de 1 m pour la photométrie UBVR et C. Bertout du spectro CARELEC monté au télescope de 193 cm de l'OHP), que des taches puissent être détectées assez souvent quand des observations systématiques sont effectuées jour après jour sur des périodes de temps suffisamment longues (la période de rotation typique étant de l'ordre de 6 jours, il faut au moins 12 jours pour mettre clairement en évidence une modulation rotationnelle).

Les mesures de vitesses de rotation d'étoiles T Tauri, commencées en 1982, sont en cours de publication (Bouvier, Bertout, Benz et Mayor, *Astron. Astrophys.*, soumis). Elles ont permis de se rendre compte que si les étoiles T Tauri ne tournent pas très vite (typiquement entre 15 et 30 km/s pour $M \cong 1.2 M_{\odot}$), elles ne semblent pas tourner non plus très lentement ; les auteurs n'ont pas trouvé d'étoile T Tauri tournant plus lentement que 6-8 km/s. Si ce résultat est confirmé par une étude plus approfondie, ses implications pour la compréhension de l'évolution pré-stellaire des étoiles de faible masse seront considérables. Les mesures de rotation ont aussi été utilisées pour tenter de mettre en évidence des corrélations entre indicateurs d'activité et vitesse de rotation ou période (Bouvier et Bertout, 1986) ; une partie de la thèse de J. Bouvier sera d'ailleurs consacrée à ce problème, plus difficile qu'il n'y paraît.

Pour résumer en quelques mots les progrès accomplis dans l'étude du rôle du magnétisme dans le phénomène T Tauri, on peut dire :

i) que la classe T Tauri continue vers les grandes vitesses de rotation la relation entre flux X et $v \sin i$ trouvée par Pallavicini et collaborateurs pour les étoiles de types spectraux tardifs de la séquence principale ;

ii) que le quotient du flux X au flux de la raie K de Ca II (sous certaines hypothèses, c'est en principe un indicateur d'activité libre de l'incertitude sur la distance et le rayon de l'étoile ainsi que sur la dimension des régions actives qui entache les flux) semble décroître quand la période croît. A dire vrai, les auteurs ne sont pas encore certains de vraiment comprendre ce que cette relation veut dire, bien qu'elle soit interprétée par plusieurs groupes travaillant sur les RS CVn comme une preuve de l'existence de l'effet dynamo dans ces étoiles ;

iii) que des taches ayant des propriétés comparables aux taches observées sur les systèmes RS CVn sont présentes à la surface de plusieurs étoiles T Tauri typiques.

Mis à part les doutes de C. Bertout et de ses collaborateurs sur la signification du point 2, ces résultats peuvent s'interpréter comme des manifestations de l'effet dynamo. Ils mettent donc en évidence, pour la première fois, le rôle de ce mécanisme dans la classe T Tauri. Ils permettent aussi des comparaisons précises avec les autres étoiles actives de types spectraux tardifs, en particulier les RS CVn. La collaboration commencée avec G. Basri, spécialiste de ces objets, permettra d'aller plus loin dans ce domaine.

Enfin, l'étude de certains aspects de la dynamique d'enveloppes stellaires en mouvement, commencée avec MM. Martin et Prophète en 1984, se poursuit dans le cadre de la formation par la recherche à l'E.N.S.T.A.

6. Recherches extragalactiques

a) *Exploitation des données infrarouges IRAS*

Cette exploitation, poursuivie par H. Karoji (en collaboration avec M. Michel Dennefeld et M. Parviz Mérat, notamment) offre des résultats concrets. D'une part, l'observation au V.L.A. (Very Large Array, New Mexico, U.S.A.) en 20 cm de quatre galaxies de notre liste a révélé que deux d'entre elles ont une luminosité extrêmement élevée dans les continus radio et en infrarouge, luminosité comparable à celle de Arp 220, l'une des galaxies les plus brillantes de tout le ciel. La poursuite du programme est donc très prometteuse quant à la détermination du nombre relatif de ce genre de galaxies par rapport à la population des galaxies dans son ensemble, et quant

à la compréhension du mécanisme de la formation violente d'étoiles, considérée comme la cause principale de cette brillance exceptionnelle. D'autre part, l'analyse de données spectroscopiques des galaxies IRAS a démontré une corrélation très nette entre la luminosité infrarouge et celle de la raie H. Cela constitue un élément de plus pour interpréter cette activité comme résultant d'une formation récente d'étoiles.

b) *Elaboration de la relation Tully-Fisher*

E. Giraud a commencé ce travail à Pasadena, Carnegie Institution of Washington, et l'a terminé au L.A.T. La relation de Tully-Fisher à deux couleurs utilise les magnitudes bleue (B) et infrarouge (H , à 1,6 μ m) des galaxies spirales en fonction de la vitesse maximum de rotation. L'étude d'une relation de T-F à deux couleurs a été entreprise pour diverses raisons : (a) Bothun et al. (1985) ont trouvé des variations d'amas à amas de la relation couleur-vitesse de rotation. (b) Le module de distance obtenu séparément dans le bleu et l'infrarouge sont corrélés avec l'indice de couleur $B - H$ (Giraud, 1985). (c) Il existe des différences importantes suivant les auteurs (c'est-à-dire les échantillons) concernant à la fois la valeur de la pente de la relation dans le bleu ainsi que son unicité en fonction des différents types de spirales (Rubin et al., 1985, Aaronson et al., 1982). (d) Pour une vitesse de rotation donnée, la brillance superficielle dans l'infrarouge semble varier d'amas à amas (Krann-Korteweg).

La relation de Tully-Fisher à deux couleurs a une dispersion plus faible que celle dans le bleu ou celle dans l'infrarouge, bien que les erreurs de mesures soient cumulées. Chacune de ces relations doit avoir une dispersion interne supérieure à la relation à deux couleurs. La valeur de la pente varie très peu d'un échantillon à l'autre : on trouve des valeurs très voisines que ce soit pour un échantillon dans l'amas de la Vierge, un dans Ursa Major, pour 87 galaxies de champ dans le Superamas Local ou pour des échantillons dans l'amas des Poissons, dans Pégase I et dans Coma. La relation ne semble pas être sensible aux variations de couleur pour une vitesse de rotation donnée dans les différents amas. En supposant que la vitesse de décélération due à l'amas de la Vierge soit de 350 km^{-1} à la position du Groupe Local, on trouve que les rapports de distance relatifs à Virgo sont très voisins des rapports de Hubble (à 0,2 mag près, ou à 0,1 mag près dans le repère du rayonnement à 3 K).

Une étude poursuivie au Mont Wilson a permis à E. Giraud de montrer que la différence de point origine de la relation de Tully-Fisher en fonction du type morphologique et de sa dispersion croît lorsque la pente varie de 5 à 10. Dans le cas d'une pente de 10, les résultats obtenus sont compatibles avec ceux de Rubin et al. (1985). Si on n'effectue pas de correction de type dans le

bleu et si la relation de Tully-Fisher dans l'infrarouge a une pente de 10, les spirales de type tardif paraissent plus proches avec la relation de T-F dans le bleu que dans l'infrarouge.

Enfin une relation de Tully-Fisher a été établie pour les magnitudes centrales de galaxies, dans le système BV.

c) *Perturbation du milieu extragalactique par le Groupe Local*

E. Giraud a entrepris cette étude afin de mesurer le plus précisément possible le rapport de Hubble à faible distance et de vérifier si celui-ci est réellement plus faible dans la sphère cinématique $v \leq 600 \text{ km}^{-1}$ (Giraud, 1984, 1986). Les distances sont mesurées dans l'échelle courte de de Vaucouleurs et le rapport de Hubble obtenu doit être comparé à la valeur moyenne de $100 \text{ km}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. On trouve que l'effet de décélération du Groupe Local est faible. Il est négligeable au-delà de 2,5-3 Mpc. La déviation par rapport au flot linéaire sans masse indique que la masse du Groupe Local, M_{LG} , est sûrement inférieure à $10^{13} M_{\odot}$ et que sa valeur est dans le domaine des $5 \times 10^{11} M_{\odot}$ - $5 \times 10^{12} M_{\odot}$. Le rapport de Hubble, après correction du freinage dû à la masse du Groupe Local, est de $80 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ sans correction de l'effet de décélération de Virgo. Il est de 76 après correction dans le cas où $M_{\text{Virgo}} = 5 \times 10^{14} M_{\odot}$, $t_0 = 12 \text{ Gy}$ et $d_{\text{Virgo}} = 14 \text{ Mpc}$. La dispersion (à une dimension) des vitesses est de 50 à 60 km^{-1} si elle n'est pas biaisée par la coupure en vitesse. La valeur de $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ est exclue par les données de l'échantillon.

d) *Etude des orbites de galaxies dans l'amas de Virgo*

En entreprenant ce travail, E. Giraud avait pour but de rechercher s'il existait des indications suggérant que les galaxies spirales déficientes en hydrogène dans Virgo sont sur des orbites radiales et qu'elles ont traversé au moins une fois le milieu intra-amas (où une partie de l'hydrogène serait perdu par un mécanisme d'ablation).

On trouve que l'hypothèse des orbites radiales est compatible avec les données. Un modèle masse-âge de Virgo est étudié pour calculer le diamètre des apex des orbites ainsi que celui des sphères de vitesse nulle et d'énergie nulle. Dans le cas d'une masse de Virgo de $5 \times 10^{14} M_{\odot}$, et $t_0 = 12,2 \text{ Gy}$, la sphère d'énergie nulle a un rayon de 11 Mpc, celle de vitesse nulle de 6 Mpc. La sphère des apex des galaxies ayant traversé une fois le centre de l'amas a un rayon de 3 Mpc, la deuxième sphère des apex est à 2,2 Mpc. Ce modèle semble être compatible avec les données ; il donne en particulier un diamètre maximum de la sphère des galaxies déficientes compatible avec l'observation. De plus, il ne semble pas ridicule de suggérer que les galaxies les plus déficientes, qui sont confinées près du cœur de l'amas, sont à l'intérieur de la

seconde sphère des apex. Si Virgo est à 14,2 Mpc, le modèle donne une vitesse de décélération de 325 km^{-1} pour le Groupe Local.

e) *Observation de quasars*

E. Giraud a obtenu des images CCD de la paire QSO-galaxie PKAS 1327-206. Le quasar est situé sur les mêmes pixels qu'une partie d'anneau associé à la galaxie.

f) *Interprétation du spectre des galaxies actives*

Dès 1978, une équipe conjointe de l'Observatoire de Meudon et du L.A.T. a entrepris l'étude du noyau de galaxies actives, et plus précisément, l'étude de la région où se forment les raies d'émission larges (ou BLR, pour Broad Lines Region). Au centre de cette équipe, M^{me} Suzy Collin-Souffrin (Obs. de Paris-Meudon), qui en a eu l'initiative, M^{lle} Simone Dumont (L.A.T.) et M^{me} Monique Joly (Obs. de Paris-Meudon). Diverses collaborations ont eu lieu dans le passé (voir les précédents rapports) ; le travail qui vient de s'achever a été mené, pour une part, en collaboration avec M. Daniel Péquignot (Obs. de Paris-Meudon).

Le but du travail entrepris est le suivant : l'étude des conditions physiques qui règnent dans la BLR peut améliorer notre connaissance de la physique des noyaux actifs de galaxies. Actuellement, si on s'accorde sur une BLR composée de nuages ayant de grandes vitesses entourant une source centrale de rayonnements ultraviolet et X, plusieurs questions restent posées : y a-t-il une seule région d'émission ou bien plusieurs avec des paramètres (densités, ionisation) différents ? Peut-il y avoir d'autres sources de chaleur (rayonnement cosmique, dissipation d'ondes...) ? La quantité de poussière, interne ou externe, est-elle considérable, négligeable ? Les abondances sont-elles normales ?..

La méthode suivie peut se définir ainsi : il était légitime au départ de penser que les méthodes qui ont été employées avec succès dans les atmosphères stellaires, les régions H II et les nébuleuses planétaires pourraient permettre de résoudre quelques problèmes. On a donc développé des modèles détaillés de nuages BLR et comparé ensuite les spectres théoriques qu'on en déduisait aux spectres observés, cette comparaison permettant d'ajuster les modèles jusqu'à ce que théorie et observations s'accordent. Bien que le problème soit plus difficile dans le cas de la BLR que dans ceux des atmosphères stellaires ou des nébuleuses planétaires, il a été possible de déterminer l'influence de certains paramètres physiques sur le spectre émis.

Un grand pas en avant a été fait par différents auteurs en vue de la résolution de ce problème au début des années 80 par l'introduction du formalisme « probabilité d'échappement ». Des modèles ont ainsi été établis

pour l'étude des raies de Mg II et de Fe II, principalement. Il restait cependant à explorer des modèles plus épais, avec des densités de l'ordre de 10^{10} cm^{-3} et des densités columniques de 10^{23} cm^{-2} . De tels modèles nécessitent le traitement « exact » du transfert de rayonnement, pas seulement dans les raies, comme l'équipe l'a montré en 1981, mais aussi dans les continus. Un code a donc été établi qui traite « exactement » le transfert de rayonnement lorsque c'est nécessaire et qui est particulièrement adapté aux nuages dans lesquels les continus de Balmer et de Paschen de l'hydrogène sont optiquement épais. Il a également permis de comparer la solution « exacte » à celles obtenues avec diverses approximations.

On peut donner une description détaillée du modèle obtenu. Ce modèle de nuage est une couche plan-parallèle illuminée par une source de rayonnement dont l'énergie couvre un domaine de quelques eV à environ 1 MeV. La densité à la surface éclairée et l'épaisseur totale de la couche étant données, on résout les équations d'équilibre statistique pour les populations des niveaux des différents ions, les équations d'équilibre d'ionisation et d'équilibre thermique ainsi que les équations de transfert de rayonnement (raies et continus). Divers auteurs ont montré qu'un nuage BLR comporte deux zones : une zone HII, fortement ionisée, et une zone HI excitée, ou HI*, où le degré d'ionisation de l'hydrogène n'est que de quelques pour cent. Ces deux zones sont séparées par une région de transition très étroite où l'épaisseur optique à 91,2 nm, τ_L , varie de 10 à 10^3 (en partant de la face éclairée). Cette structure est très différente de celle d'une nébuleuse planétaire. Cependant, la zone HII peut être étudiée moyennant quelques modifications par des méthodes semblables à celles utilisées pour les nébuleuses planétaires. Par contre, la zone HI* le sera selon les méthodes utilisées pour les atmosphères stellaires. D'où un programme en deux étapes : zone HII jusqu'à $\tau_L 10^4$, puis zone HI*, couches que l'on ajoute à la zone HII. Dans cette zone HI*, l'épaisseur optique τ_L est suffisamment grande pour que l'approximation « on the spot » soit valable pour le continu de Lyman de l'hydrogène. Par itération (sur l'ionisation), nous obtenons un premier modèle pour lequel on calcule les gains et les pertes (raies, continus, hydrogène et éléments lourds) ; leur comparaison permet de déterminer une nouvelle distribution de température. On répète le processus jusqu'à convergence et on calcule alors les flux émergeant de chaque face du nuage.

Le traitement du transfert de rayonnement est classique :

Pour les raies, Thomas et Athay ont déterminé la quantité fondamentale « Net Radiative Bracket » (NRB) qui s'introduit simplement dans les équations d'équilibre statistique, dans l'équation d'équilibre d'énergie locale et dans l'expression du flux émergent. Dans le formalisme « probabilité d'échappement », le NRB est remplacé par cette dernière. Le programme permet soit de faire cette approximation, soit de calculer le NRB « exactement ». Les

continus (énergie inférieure à 13,6 eV) sont calculés exactement. L'équilibre d'ionisation tient compte des processus radiatifs et collisionnels. L'équilibre thermique est obtenu en égalant les gains radiatifs et les pertes.

La discussion des résultats aboutit à diverses conclusions. La comparaison des méthodes « exacte » et « approchées » permet de dire que le formalisme « probabilité d'échappement » est valable lorsque l'épaisseur optique dans le continu de Balmer est petite, sinon il ne peut être utilisé qu'avec précaution. Cependant, dans tous les cas, certains processus doivent être calculés exactement.

Comme les modèles de BLR à une composante ne permettent pas de rendre compte des intensités des raies de faible ionisation (telles les raies de Fe II), les auteurs ont essayé un modèle photoionisé à deux composantes en surestimant le rayonnement X incident autour de 3 keV pour augmenter l'étendue et le chauffage de la zone HI*. On peut conclure que ce modèle ne peut, lui non plus, expliquer le rapport Fe II/H observé et qu'une autre sorte de nuage, probablement non chauffé par photoionisation, est nécessaire pour expliquer l'émission de Fe II.

Par la suite, l'équipe « galaxies actives » envisage d'évaluer l'importance de certains phénomènes sur les résultats obtenus et, éventuellement, d'en tenir compte pour l'établissement de nouveaux modèles. Citons, par exemple : influence d'un fort effet Compton sur le chauffage du nuage BLR ; influence de redistribution partielle en fréquence (qui peut être importante pour les raies de résonance optiquement épaisses) sur la valeur du NRB et par conséquent sur le modèle...

g) Implications cosmologiques des observations extragalactiques

M. Serge Depaquit a poursuivi ses recherches sur les quasars. Ce travail a porté sur la distribution des décalages spectraux des raies d'émission et d'absorption des quasars, ainsi que sur leur répartition en densité dans le ciel. En coopération avec H. Arp (Max Planck Institut, Munich), une attention particulière a été consacrée aux associations quasars/galaxies (galaxies isolées, amas, superamas).

Sur une suggestion de H. Arp, une étude systématique de la distribution du décalage spectral des quasars proches en direction des galaxies a été effectuée. Elle n'a pas confirmé l'hypothèse première de H. Arp sur l'existence de périodicités dans la distribution du décalage spectral des quasars « proches » des galaxies.

Le travail de S. Depaquit est actuellement orienté vers l'étude des tests cosmologiques (dimension angulaire - décalage spectral ; diagramme de Hubble) à partir des données observationnelles les plus récentes.

P. Mérat a utilisé les données IRAS (voir ci-dessus, paragraphes 4a, b, c, d et 5a) en vue d'en tirer des informations d'intérêt cosmologique.

L'exploitation de ces données s'est faite en collaboration avec l'équipe du Centre International d'Astrophysique Relativiste de l'Université de Rome, dirigé par Francesco Melchiorri. Ont participé aux travaux Paola Andreani, Brunella Nisini et Lucio Rossi. Les travaux ont d'abord porté sur l'effet Sunyaev-Zeldovich dans les amas de galaxies. Les données IRAS des amas ayant un noyau de rayon $x \approx 2'$ ont été pris comme échantillon. Ceci permettra de déterminer des limites supérieures sur le fond extragalactique dans les bandes : 12, 25, 60 et 100 m. Le travail est en cours.

Par ailleurs, pour évaluer la masse baryonique cachée dans notre Galaxie, les données IRAS concernant un ensemble de 1 418 galaxies ont été analysées. Les flux relatifs moyens dans les quatre bandes 12, 25, 60 et 100 m ont été pris sur les longitudes galactiques, et ordonnés en lots de 10° selon la latitude galactique. Ces flux présentent une décroissance systématique depuis le pôle nord galactique jusqu'à 30° du plan galactique, où une confusion des sources commence à se manifester. Cette décroissance peut être attribuée à la présence d'un milieu absorbant. D'où l'interprétation par la présence d'une masse cachée baryonique.

7. *Cosmologie théorique*

P. Mérat a développé un modèle supersymétrique d'univers construit à partir des principes de réciprocité de Born et de triplé de Cartan. L'intérêt d'un tel modèle est attesté par le développement du modèle des « super cordes » au cours des deux dernières années. Le principe de réciprocité de Born ne peut être satisfait que dans le cadre d'un espace-temps à huit dimensions. Or le principe de triplé de Cartan ne concerne que des géométries à huit dimensions. En effet, c'est seulement à huit dimensions que les vecteurs et les spineurs ont le même nombre de composantes réelles interchangeables. Ainsi peut-on y transformer un vecteur en un spineur et un spineur en un vecteur. La supersymétrie est donc spontanée. Dans le domaine de la cosmologie, ce modèle supersymétrique donne une théorie de supergravité avec la possibilité de supprimer la constante cosmologique. Ceci est dû aux transformations SO (4,4) non-compactes qui régissent le modèle.

La théorie de la gravitation basée sur une géométrie affine pure est due à Schrödinger (et, dans un premier temps, aussi à Eddington). Il semble bien que la théorie de Schrödinger, concurrente de celle d'Einstein en matière de généralisation de la relativité générale, n'avait jamais été obtenue à partir d'un traitement de jauge. Ce traitement sera présenté par P. Mérat à la conférence internationale sur la relativité générale à Stockholm.

8. *Développements instrumentaux*

K. Sahu a développé la théorie de dispositifs expérimentaux destinés à accroître le pouvoir collecteur de lumière d'un spectromètre de type Fabry-Pérot. La méthode utilise une ouverture à zones multiples, au lieu d'une ouverture ponctuelle conventionnelle. Cela est particulièrement utile pour l'étude d'objets étendus faibles, tels que la nébuleuse de Gum ; on peut alors utiliser le pouvoir collecteur du spectromètre pour obtenir sans difficulté des spectres de cet objet extrêmement peu lumineux. Ce travail est poursuivi en collaboration avec le Professeur J. Desai, R. Gupta et M. Srinivasan, de l'Université d'Ahmedabad.

SÉMINAIRES CONFÉRENCES ET MISSIONS

J.-C. PECKER, Observations, Pic-du-Midi (15-26 mai 1985).

J.-C. PECKER, S. DUMONT, Atelier « galaxies actives », île d'Yeu (10-14 juin 1985).

P. MÉRAT, Congrès « Physics and Astronomy », Rome (16-21 juin 1985).

J.-C. PECKER, Séminaire sur la politique de la Science, Rome (30 sept.-4 oct. 1985).

E. SIMONNEAU, Collaboration Internationale entre l'Observatoire de Meudon et celui de Trieste, Trieste (1-15 septembre 1985).

E. SIMONNEAU, « Recherches sur la structure des couches extérieures des supernovae », Université Centrale de Barcelone (10 nov.-8 déc. 1985).

J.-C. PECKER, Assemblée Générale de l'U.A.I., New Delhi, 17 nov.-5 déc. 1985.

J.-C. PECKER, Conférence, Lyon, Institut Mérieux, 6-7 déc. 1985.

S. DUMONT, Table ronde coronographe, GS Soleil, Chantilly, 5-6 fév. 1986.

K. SAHU, XIX^e General Assembly I.A.U., New Delhi (29 oct.-2 déc. 1985).

K. SAHU, Discussion avec Prof. POTTASCH, Gröningen (29 mars au 8 avril 1986).

K. SAHU, Discussion avec M.J. SEATON, Londres (27 avr.-6 mai 1986).

K. SAHU, conférence, « The late stages of stellar evolution », présentation de « The phase of photo-planetary nebulae evolution », Canada (2-5 juin 1986).

K. SAHU, Observations, Chili (7-17 juin 1986).

M. MARTIĆ, U.A.I. Symposium n° 123, Aarhus, Denmark, 7-11 juillet 1986.

Le Prof. Jean-Claude PECKER a donné diverses conférences, en dehors de celles figurant dans la bibliographie.

— Participation à l'émission « Le bon plaisir de... Yannis Xenakis » pour France-Culture (oct. 85) ;

— « Voyage en Univers » au profit de la Fondation pour la Recherche médicale à Lyon (6 déc. 85) ;

— « Activité solaire et phénomènes climatiques », Bureau des Longitudes (10 déc. 85) ;

— « L'ionosphère, les télécommunications, les astronomes... et le droit international », Séminaire Droit International, Collège de France, séminaire du Professeur Dupuy (20 jan. 86) ;

— « Univers 86 », Conférence à Gretz Armainvilliers (23 jan. 86) ;

— Participation au colloque « Raison, Rationalisme, Rationalité », au Grand Orient de France (1^{er} mars 1986) ;

— Conférence-débat « Voyage dans l'Univers » à l'école de la rue de la Providence (20 fév. 86), et dans les établissements scolaires et à la M.J.C. de Limours (21 mars 1986), au Collège des Sénardières, Ile d'Yeu (26 et 29 mai 1986) ;

— Conférence au Mans « La machine Soleil », Université du Maine (22 avril 1986) ;

— Conférence « Astronomie, cosmologie et création » au Cercle Ernest-Renan (mai 1986).

ACTIVITÉS DIVERSES

Responsabilités diverses

J.-C. PECKER a été nommé Président du Programme Mobilisateur Culture Scientifique et Technique, par délégation de Monsieur le Ministre de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur.

C. BERTOUT a été nommé Président du Comité des Utilisateurs du VAX du campus parisien Observatoire.

Tâches d'enseignement et de popularisation (hors Collège de France)

E. SIMONNEAU a été invité par le Département de Physique de la Terre et du Cosmos de l'Université Centrale de Barcelone pendant le mois de novembre 1985. En plus des travaux cités précédemment, il a donné une série de

leçons, sous le titre : « Spectroscopie Stellaire », où il a développé la description phénoménologique de tous les processus physiques qui interviennent dans les atmosphères stellaires.

M. GROS continue à participer activement à un programme de diffusion de l'astronomie auprès des enseignants et animateurs. Ce programme réalisé en collaboration avec L. BOTTINELLI, L. GOUGUENHEIM (Observatoire de Paris, Paris XI), F. DELMAS, F. DURRET, M. GERBALDI (I.A.P., Paris XI), J. DUPRÉ (Paris XI), G. WALUSINSKI (A.P.M.), comprend des cours théoriques et des activités du type : travaux dirigés et pratiques. L'Université d'été d'Astronomie de 1985 a eu lieu à Formiguères (PO). De plus, elle a participé à l'encadrement de divers stages et à l'organisation des visites de l'Observatoire de Paris, sa collaboration à l'Astronomie (revue de la Société Astronomique de France) est régulière : en collaboration avec S. DUMONT, elle a participé à la planification et à la rédaction d'un cours élémentaire d'astrophysique, qui pourra être diffusé ultérieurement sous la forme d'un manuel.

S. DUMONT a continué d'assumer la très lourde tâche de rédacteur en chef de l'Astronomie. Elle a rédigé diverses analyses d'ouvrages et de notes scientifiques pour cette revue. De plus, elle a participé aux visites guidées de l'Observatoire de Paris.

J.-C. PECKER a dirigé l'édition d'un ouvrage collectif, « l'Astronomie Flammarion », Flammarion, publié en novembre 1986. M^{lle} Sylviane PERRET a assuré la coordination de cette édition, M^{lle} DUMONT et M. MAGNAN, chercheurs du L.A.T., ont écrit deux des chapitres de cet ouvrage important.

C. MAGNAN a consacré la majeure partie de son travail à la rédaction d'un livre destiné au grand public et présentant les grands thèmes scientifiques du vingtième siècle. L'ouvrage tel qu'il était ébauché a dû être remanié en fonction des demandes de l'éditeur potentiel. La nouvelle version est achevée.

C. BERTOUT a consacré une partie de son travail à la rédaction d'une monographie (qui, rappelons-le, devrait être terminée le 30 juin 1986) sur les étoiles T Tauri pour Cambridge University Press. C. BERTOUT a donné quatre heures de conférences à l'atelier de la R.C.P. 615, « Accrétion et perte de masse par disques et jets », organisé à Palma de Majorque en décembre 1985.

Publications scientifiques

P. ANDREANI, F. MELCHIORRI, P. MÉRAT, B. NISINI, L. ROSSI, *Evidence for barionic dark matter in our Galaxy ? (Astrophys. J., en préparation).*

P. ANDREANI, F. MELCHIORRI, P. MÉRAT, B. NISINI, L. ROSSI, *Search for the S-Z effect in rich clusters of galaxies (en préparation).*

O. ATANACKOVIĆ, E. SIMONNEAU, *Effects of elastic collisions on the local frequency redistribution in the transfer line photons* (Colloque « Collisions et rayonnement », Orléans, septembre 1985, sous presse).

P. BELFORT, M. DENNEFELD, H. KAROJI, *Star formation in IRAS galaxies* (Workshop on « Star-Forming Dwarf Galaxies », éd by D. Kunt, T.X. Thuen and J. Tran Thanh Van, Paris, éd. Frontières, 1985, p. 351-367).

C. BERTOUT, *The stellar content of nearby clouds, T. Tauri stars, in Nearby molecular clouds* (Proceedings of the I.A.U. Eighth European Regional Meetings, Toulouse, 1984, Springer, 1985, p. 145-159).

C. BERTOUT, C. MAGNAN, *Simple formulae for spectral line profiles emitted by moving spherical shells* (soumis à *Astron. Astrophys.*).

J. BORSENBERGER, J. OXENIUS, E. SIMONNEAU, *Resonance line transfer and transport of excited atoms* (*J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **35**, p. 303-328, mai 1986).

J. BOUVIER, W. BENZ, C. BERTOUT, M. MAYOR, *Rotation and X-ray emission in T Tauri stars, in Proceedings of the I.A.U. Eighth European Regional Meeting* (Toulouse, Springer, 1985, p. 222-226).

S. COLLIN-SOUFFRIN, S. DUMONT, *The Emission Spectrum of Active Galactic Nuclei. I. Computational Methods* (*Astron. Astrophys.*, sous presse).

S. COLLIN-SOUFFRIN, S. DUMONT, *The Emission spectrum of Active Galactic Nuclei. II. High Column Density Photoionization Models and Low Ionization Lines* (*Astron. Astrophys.*, sous presse).

L. DAMÉ, M. MARTIĆ, *Further evidence of the oscillatory behaviour of the chromospheric meso-scale intensity structure* (IAU symp. Aarhus, en préparation).

L. DAMÉ, M. MARTIĆ, *On the interpretation of the solar mesogranulation* (*Astrophys J.*, en préparation).

L. DAMÉ, M. MARTIĆ, *Minute oscillations in the solar magnetic-field* (en préparation).

S. DUMONT, S. COLLIN-SOUFFRIN, *Rapid non-LTE calculations of Balmer Lines and Hydrogen Ionization : the solar case* (*Astron. Astrophys.*, **144**, 245, 1985).

H. KAROJI, M. DENNEFELD, N. UKITA, *VLA Observations of three high IR-Luminosity IRAS galaxies* (*Astron. Astrophys.*, 155, L3, 1986).

L. Ben JAFFEL, C. MAGNAN, A. VIDAL-MADJAR (en préparation).

H. KAROJI, M.-N. PERRIN, *Stellar radius determination from IRAS 12 m fluxes* (*Astron. Astrophys.*, 1986, en préparation).

N. MEIN, P. MEIN, J.-M. MALHERBE, L. DAMÉ, S. DUMONT, *Atmospheric structure deduced from disturbed line profiles, application to Ca II lines* (Proc. of Coll. Sacramento Peak).

J.-C. PECKER, *Le pompage optique naturel dans le milieu astrophysique* (*Annales de Physique*, **10**, p. 631-643, 1985 ; et *Cahiers laïques*, **200**, p. 22, 1985).

J.-C. PECKER, *Vistas on stellar-solar atmospheres* (*Austral. Jour. Phys.*, **38**, 1, 1985).

J.-C. PECKER, ed., *L'Astronomie Flammarion* (ouvrage collectif en deux volumes, Flammarion, Paris, novembre 1985).

J.-C. PECKER, *La Nature de l'Univers* (Encyclopedia Universalis, Symposium, 1985, p. 279-293).

J.-C. PECKER, *Histoire de l'Astronomie (XX^e siècle)* (UNESCO, History of Mankind).

J.-C. PECKER, *l'Univers* (Encyclopédie Philosophique, Presses Universitaires de France, sous presse).

K. SAHU, J.N. DESAI, *Kinematic structure of NGC 3132 : the planetary nebula with a binary nucleus* (*Astronomy and Astrophysics*, sous presse).

K. SAHU, J.N. DESAI, M. SRINIVASAN, R. GUPTA, *Technique and advantages of using multiple-zone apertures in Fabry-Pérot spectroscopy* (*Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, vol. 627, sous presse).

E. SIMONNEAU, *Non local effects on the redistribution of resonant scattered photons, in Progress in stellar spectral line formation theory* (ed. by J.E. Beckman and L. Crivellari, NATO advanced research workshop, Grignano-Miramare (Trieste), 1984, Dordrecht, Reidel, 1985, p. 73-86).

Autres publications

M. GROS, *La lumière raconte* (*L'Astronomie*, avril 1986, p. 187-197).

S. LALOË, J.-C. PECKER, *A la recherche du coronium* (*Astronomie*, **100**, p. 175, avril 1986, et p. 227, mai 1986).

J.-C. PECKER, *Allocution pour l'association des lauréats du Concours Général* (*Bull. périodique*, **36-37**, p. 33, 1985).

J.-C. PECKER, *Janus II* (*Journal des Astronomes Français*, **23**, p. 31, mai 1985).

J.-C. PECKER, *Le jeu truqué de Moon* (*Bull. de liaison du Centre contre les manipulations mentales*, oct. 85).

J.-C. PECKER, *Capire l'Astronomia* (traduction en italien de « Clefs pour l'Astronomie », Seghers, Paris, 1981, Hoepli, Trento, Italie).

J.-C. PECKER, *Petite histoire édifiante* (Association Française pour l'Information Scientifique, **157**, p. 19, sept.-oct. 85).

J.-C. PECKER, *L'universalité des lois physiques, du Soleil aux quasars* (séance publique annuelle des 5 Académies, 22 oct. 85).

J.-C. PECKER, *La tête dans les étoiles* (interview pour *l'Humanité*, 22 oct. 85).

J.-C. PECKER, *La culture scientifique pour esperanto* (interview recueillie par D. Leglu pour *Libération*, 18 déc. 85).

J.-C. PECKER, *L'œuvre scientifique de Lalande, in Jérôme de Lalande* (A. Gros édit., *Les nouvelles Annales de l'Ain*, 1985, p. 1-32).

J.-C. PECKER, *Réflexions d'un astrophysicien (sur un texte de D. Laplane)* (*La Revue des Deux Mondes*, p. 115, jan. 1986).

J.-C. PECKER, *Astronomie Flammarion* (*Les Nouvelles de l'Acad.*, présentation d'ouvrage, séance du 20 janvier 86, p. 8-10).

J.-C. PECKER, *Au-delà de Halley* (*Bull. Munic. de Limours*).

J.-C. PECKER, *L'espace Superstar, Le Roi Soleil* (*Autrement*, **77**, p. 25, fév. 1986).

J.-C. PECKER, *L'espace Superstar, Autoportrait* (*Autrement*, **77**, p. 53, fév. 86).

J.-C. PECKER, *Space Science Reviews* (**43**, p. 386, avril 1986, book review).

J.-C. PECKER, *Brèves réflexions sur l'éthique d'un astronome* (*Protection contre les rayonnements ionisants*, **101**, p. 33).

J.-C. PECKER, *La cosmologie de la grande explosion est-elle contournable ?*, dans *Cosmologie* (ed. Schneider J., *La nouvelle Encyclopédie*, Fayard, sous presse).

J.-C. PECKER, *L'Astronomie du Siècle* (Entretien pour *Révolution*, n° 309, p. 58, fév. 86).

J.-C. PECKER, *Impact of Astronomy on the development of western society* (*Cosmic Perspectives*, éd. D.C.V. Mallik, Bangalore, sous presse).

J.-C. PECKER, *Les hommes de la Villette* (*Le Monde*, 16-17 mars 1986, rubrique courrier).

J.-C. PECKER, *Il n'est pas de science sans responsabilité* (Entretien pour la revue *Pourquoi* n° 213, p. 16-23, mars 1986).

J.-C. PECKER, Entretien *Le tour du ciel par 23 astronomes* (*Ça m'intéresse*, n° 62, p. 29, avril 86).

J.-C. PECKER, *Intervention sur l'Astrologie et les Auberges de Jeunesse* (*Les Cahiers Rationalistes*, **414**, p. 253, mai 1986).

J.-C. PECKER, Préface à l'ouvrage de A. PILOT, *La Vie dans l'Univers ?* (sous presse, 1986).

J.-C. PECKER, Préface à l'ouvrage de L. CELNIKIER, *Histoire de l'Astronomie (Technique et Documentation)*, Lavoisier, Paris, 1986).

J.-C. PECKER, *Pierres de Vie (Hommage à A. Verdet)*, p. 31 à 39, p. 183 à 189, éd. Galilée, 1986).

P. SAMUEL, J.-C. PECKER, *Notice nécrologique de Léon Herrmann (Annuaire de l'Ecole Normale Supérieure)*, 1986, p. 32).