

Astrophysique théorique

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

Cours :

COSMOLOGIE D'OBSERVATION.

QUASARS ET GALAXIES ACTIVES. II. Les spectres de raies

1. Caractéristiques générales

Les galaxies actives sont d'abord caractérisées par leurs raies d'émission. Ces raies sont formées dans des régions encore proches du centre qui émet le rayonnement non-thermique ionisant (voir cours 1983-1984). L'analyse des intensités de ces raies doit permettre un diagnostic de ces régions.

La découverte de ce spectre de raies d'émission remonte à K. Seyfert (1943), qui les avaient découvertes dans le spectre de six galaxies, NGC 1068, NGC 4151, NGC 3516, NGC 7469, NGC 4051, et NGC 1275. Les raies d'émission sont formées dans leur noyau souvent très brillant, et sont superposées à un spectre banal de galaxie, comparable à un spectre stellaire de type G. Ces raies d'émission sont larges (75 000 - 8 500 km/s dans les ailes). Les ions responsables sont faciles à identifier, d'autant plus que le spectre ressemble fortement (aux largeurs des raies près) à celui des nébuleuses planétaires galactiques : raies de Balmer, raies interdites du nébulium ([OIII]), raies interdites de [NII], de [NeIII], de [SII],... raie permise de HeII (4686 Å).

Première remarque : le spectre des QSS est essentiellement identique (aux intensités et largeurs près des raies) à celui des Seyferts, — ce qui implique une ressemblance physique qui pourrait justifier l'interprétation cosmologique du décalage spectral des QSS, et contrer l'interprétation des QSS par Arp, comme « éjecta » de galaxies diverses.

Seconde remarque : la valeur de z peut donc varier fortement (0 à 4) d'un objet à l'autre. Dans le domaine visible, on n'observera pas les mêmes raies : pour les faibles z , raies de Balmer, de [OIII] ; pour les z moyens (0,5-1), raies de MgII, de FeII ; pour les grands z (1-3), raies de [CIII], CIV, OIV, SiIV, raies de Lyman. Cette sélection observationnelle joue un grand rôle dans les difficultés de l'interprétation.

Le spectre des QSS lointains et peu lumineux pose des problèmes délicats : on notera le cas (Hazard et al., 1984) du QSS : 1159 + 123 ($z = 3.50$) où l'utilisation d'un prisme objectif et de différentes émulsions permet d'étudier le spectre (le « Multi Mirror Telescope » permet de faire encore mieux). Un tel objet a un spectre très riche en information, notamment en ce qui concerne la « forêt d'absorption » de Ly α (sur laquelle nous reviendrons).

L'étude des intensités mutuelles et des largeurs aboutit à diverses classifications des galaxies actives (voir cours 1983-1984), en objets d'« activité » croissante (Krolik : des Liners aux BL Lac en passant par Seyferts 2, Seyferts 1, QSS « classiques » et OVV — objets très variables). La classification selon l'activité diffère de la classification selon le niveau d'ionisation ; ainsi les Seyferts 2 correspondent-elles à un niveau d'ionisation très élevé. Un seul paramètre de classification est donc certainement insuffisant ; mais il n'est pas exclu que diverses régions existent, de propriétés physiques différentes, dans les régions responsables des raies d'émission, dans le cas de diverses galaxies actives.

Différents exemples de diagrammes portant en abscisses ou en ordonnées des rapports de raies sensibles à l'ionisation, d'autres à la largeur, mettent bien en évidence les différences entre les différents types de galaxies actives.

On peut discuter, sur certains diagrammes de cette nature, la cause de l'ionisation : la source d'ionisation est-elle un rayonnement thermique, un rayonnement non-thermique, ou encore autre chose ?

Les classifications s'affinent, grâce à ces études : entre les Seyferts 1 et les Seyferts 2, on définit des Seyferts 1.5, 1.8, 1.9... (Osterbrock, Dahari, 1983). Mais certains objets évoluent d'un type à l'autre (exemple NGC 4151, étudiée en UV par Penston, 1982, Ulrich et al., 1984) : la largeur des raies d'émission évolue, des effets d'hystérésis sont notables dans les diagrammes : intensité CIV (par exemple), flux continu voisin.

Ce genre de complexité se manifeste aussi par le fait que dans des objets comme PHL 957, étudié par Strittmatter et Williams, 1976, le profil de raies différentes (Ly α , CIV, CIII) diffère très nettement d'une raie à l'autre.

De ce bref examen de l'ensemble des données, nous retiendrons certaines conséquences : (a) le caractère de la largeur des raies n'est pas un caractère intrinsèque ; pour un même objet, il est rapidement changeant ; (b) par suite,

la largeur des raies n'est pas nécessairement liée à la distribution d'ensemble des vitesses des nuages. Peut-être le processus d'ionisation sélectionne-t-il des directions, dans des angles plus ou moins ouverts, variables dans le temps ? (c) Il s'ensuit que les *rappports d'intensité*, moins variables que la *largeur ou la forme des profils*, sont de meilleurs paramètres objectifs de classification. (d) Mais même ainsi, il reste de graves difficultés, par exemple dans l'ordonnement des Liners, des Seyferts 1 et des Seyferts 2. (e) Faudrait-il alors imaginer que différentes régions, dont l'importance mutuelle constitue un paramètre physique de classification, soient responsables de différentes raies ? Ceci rendrait ambiguë l'exploitation des rapports d'intensité, s'il existe une dispersion dans les conditions de l'ionisation et de l'excitation.

2. Ressemblances et différences entre le spectre des quasars et de noyaux de galaxies actives, d'une part, et d'autre part les nébuleuses planétaires et les régions HII

Les ressemblances sont, en fait frappantes. Une galaxie active serait-elle simplement une galaxie très jeune (riche en nombreuses régions HII, qui domineraient le spectre), ou très vieille (riche en nombreuses nébuleuses planétaires, qui domineraient le spectre) ?

Cependant dans des diagrammes tels que $\log [\text{NII}]/\text{H}\alpha$ vs $\log ([\text{OII}]/[\text{OIII}])$ on met bien en évidence la différence entre régions HII et Seyferts ou Liners, due sans doute, essentiellement au spectre du rayonnement ionisant. Mais une certaine continuité entre les différents objets, dans d'autres diagrammes, suggère une analogie qualitative très évidente, et même une continuité entre les différents types d'objets, la dispersion des vitesses étant la seule différence essentielle. Une galaxie active pourrait-elle être faite de régions HII ou de NP animées de vitesses très dispersées ? Dans un diagramme $\log ([\text{OIII}]/\text{H}\beta)$ vs. $\log [\text{NII}]/\text{H}\alpha$, on peut en un premier temps, séparer les spectres (rayonnement ionisant suivant une loi de puissance) les Liners (ionisés par des ondes de chocs) les régions HII (ionisés par du rayonnement thermique) et les nébuleuses planétaires (ionisées par un rayonnement UV très intense) ; mais en un second temps, on trouve que les régions intermédiaires du diagramme se remplissent progressivement d'objets nouvellement observés.

Une telle analogie est trop importante pour n'être pas discutée plus profondément.

Peut-on s'en inspirer pour déduire des rapports de raies la température et la densité du milieu ? Cela donne des résultats intéressants (avec [NII], [SII], [OII], [OIII]) mais dépend de la source d'ionisation supposée. Nous

devons donc, d'abord examiner les travaux classiques concernant les nébuleuses gazeuses.

3. Mécanismes de formation des spectres d'émission des nébuleuses gazeuses

Les traités (classiques) d'Osterbrock, Kaplan et Pikelner, Spitzer ou Gourzadyan, les articles de revue, comme celui d'Aller et Liller, couvrent l'ensemble de cette question.

a) On a d'abord discuté le problème du *décément de Balmer* ; $H\alpha:H\beta:H\gamma$. Il est typiquement égal à 28:10:5 pour les nébuleuses gazeuses et à 40-60:10:4 pour les galaxies actives : mais cette différence donne-t-elle une possibilité non ambiguë de distinction ? On trouve (NGC7027, ou IC3568 ...) des nébuleuses gazeuses, des nébuleuses planétaires, des régions HII dont le décrement de Balmer ressemble beaucoup à celui des galaxies actives.

Le traitement détaillé suppose les niveaux supérieurs peuplés par capture et cascade. Les cas traditionnels supposent le milieu transparent à toutes les raies (cas A), opaque aux raies de Lyman (cas B), opaque aux raies de Lyman et de Balmer (cas C).

Les méthodes n'ont guère évolué depuis la série classique des articles de Menzel et ses collaborateurs, notamment Baker, Menzel, 1938. Le cas A ou le cas B redonnent bien les valeurs classiques du décrement observé pour les nébuleuses gazeuses, pourvu que T_e soit assez élevé ; mais ils ne permettent pas d'expliquer le décrement des QSS ou des galaxies actives. Les « bonnes » solutions font intervenir les nombres quantiques n et l (azimutal) ; mais les solutions élaborées jouent peu pour les galaxies à noyau actif, où l'on n'est pas obligé de traiter un grand nombre de niveaux, la densité électronique y étant, d'après toutes les analyses, plus élevé ($Ne \sim 10^9 - 10^{11}$) que dans les nébuleuses gazeuses ($Ne \sim 10 - 10^5$).

Le bon diagramme permettant de vérifier les prédictions de la théorie est le diagramme $\log(H\beta:H\gamma)$ vs $\log(H\alpha:H\beta)$. Dans ce diagramme, les nébuleuses planétaires (sauf les quelques-unes déjà notées) se trouvent proches des points calculés grâce à la théorie ci-dessus. En revanche les points représentatifs des galaxies actives se trouvent dans la partie haute, à droite, du diagramme.

Il est donc nécessaire de modifier la théorie : la prise en compte de l'effet de l'opacité (cas C) dans les raies de Balmer, nécessaire certes, ne suffit pas à résoudre le problème ; il faut, de façon correcte, discuter des hypothèses valables pour les nébuleuses gazeuses. Le caractère métastable du niveau 2S joue un rôle, de même que le rôle des collisions excitatrices.

Sur quels aspects des régions émissives des galaxies actives les raies de l'hydrogène peuvent-elles donc nous apporter une information ?

A priori (cela vient de considérations diverses utilisant toutes les données), N_e est élevé, donc les collisions sont importantes, et la profondeur optique est notable, y compris dans les raies de Balmer.

Une « modélisation » est nécessaire pour la géométrie. On suppose que la BLR (« broad line region » — région où se forment les raies larges) contient des régions d'hydrogène neutre non excité, et froid. Ces régions coexisteraient dans des nuages en mouvement relatif rapide les uns par rapport aux autres.

Le travail de S. Collin-Souffrin, de S. Dumont et de leurs collaborateurs (1981, 1982) est un travail essentiel dans ce domaine et présente un calcul cohérent du transfert de rayonnement dans un tel modèle. On suppose une géométrie plan-parallèle, un atome simple (4, 5 ou 6 niveaux et un continu), une redistribution complète et un profil de Voigt, et l'approximation du bilan détaillé dans le continu de Lyman (approximation « on the spot », ou OTS) ; on néglige le rayonnement incident, dont l'effet d'ionisation est un paramètre du modèle qui en tient compte implicitement. Et on traite alors rigoureusement les équations de l'équilibre statistique, et du transfert, couplées. Nous renvoyons aux articles originaux pour le détail des calculs.

Nous remarquerons seulement que si le calcul est en soi très cohérent, la limitation latérale des nuages permet un échappement latéral des photons, dont il n'est pas tenu compte. Cet effet doit avoir pour effet d'augmenter le coefficient g de la théorie, coefficient qui définit le bilan radiatif (essentiellement identique au « net radiative bracket » de Thomas et Jefferies, au « escape coefficient » d'Athay, ou au « flux divergence coefficient » de Canfield et Putter).

De plus, négliger le champ de rayonnement extérieur n'est pas trop bon. Comme les auteurs le notent dans leur second article cité (1982), l'intensité du rayonnement incident influence nettement le rapport des raies de Lyman aux raies de Balmer.

Le résultat de ces deux discussions reste clair : pour rendre compte du décrétement de Balmer, il faut une densité columnique élevée ; mais N_e par cm^3 ne peut l'être trop, car il faut aussi — voir ci-après — rendre compte des raies interdites ; il faut donc des dimensions importantes. De plus l'existence de diverses régions apparaît comme *nécessaire* : la région HII est responsable de la raie $\text{Ly}\alpha$, la région HI_{exc} l'est des raies de Balmer. Mais on peut aussi « combiner » des régions denses (10^{11} cm^{-3}) et d'autres moins denses ($10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$).

L'évidente difficulté mise en évidence par cette discussion, c'est bien entendu la conviction que d'autres modèles complexes sont possibles, et que les paramètres, limités en partie seulement par la cohérence physique, sont souvent encore déterminés de façon *ad hoc*, liée au modèle, — et non unique ! Un modèle comme celui de Kwan et Krolik n'admet qu'un type de nuage, et tout est déterminé par la donnée du rayonnement ionisant et de l'équilibre hydrostatique.

b) Formation des raies interdites.

Les raies interdites (dipôle magnétique) ou semi-interdites (quadrupôle électrique) sont observées dans les nébuleuses planétaires, dans les nébuleuses gazeuses, comme dans les quasars et les noyaux de galaxies actives.

Essentiellement, un niveau métastable est peuplé par collision et, en se désexcitant (par suite des collisions, ou de façon induite, par le rayonnement incident) il émet les raies en question. Dans le cadre des hypothèses relatives au modèle, certains rapports de raies sont sensibles à la densité électronique N_e , d'autres à T_e . De façon générale, les problèmes de transfert ne jouent guère de rôle, car les probabilités de transition des raies sont très faibles.

En revanche la structure atomique supposée (limitée à un petit nombre de niveaux) a une influence sur la solution des équations d'équilibre statistique.

Le cas le plus souvent étudié est celui des raies de [OIII]. Le rapport des raies du nébulium (N_1 et N_2) à la raie 4363 est mesuré ; le calcul en est sensible à la température, et à la température seulement, si N_e est assez grand.

Pour les nébuleuses planétaires ce rapport est de 100 ; si N_e est grand, alors on obtient $T_e \sim 3\,700$ K, si N_e est petit le calcul détaillé aboutit à $T_e \sim 12\,200$ K. Pour les quasars, ce rapport n'est que de 3 : si N_e est grand, alors $T_e \sim 14\,100$ K ; si N_e est petit, T_e est de l'ordre de $12\,300$ K (le rapport $(N_1 + N_2)/4\,363$ n'est alors qu'une mesure de la densité, pas de la température). Les conditions d'existence des raies N_1 et N_2 impose $N_e \lesssim N_{e_{lim}}$; mais selon les auteurs cette valeur varie de 10^6 cm⁻³ (Gurzadyan) à 10^{10} cm⁻³ ; si bien qu'en fait, le rapport en question fixe bien T_e , mais pas N_e . On notera aussi que, pour ces raies N_1 et N_2 soient observables, il faut non seulement un niveau supérieur métastable, mais aussi que la probabilité A_{21} de désexcitation sans rayonnement (énergie transmise à une autre particule) soit faible par rapport à la probabilité de désexcitation spontanée A_{21} ; il faut enfin que le rayonnement excitant soit assez faible pour ne pas dépeupler le niveau métastable vers le haut. Quoiqu'il en soit, le rapport $(N_1 + N_2/H\beta)$ est un meilleur indice de densité que $(N_1 + N_2)/4\,363$.

c) Formation des raies permises

Le fait que les probabilités de transition soit 10^8 fois plus grandes que dans le cas des raies interdites change complètement la nature du problème. Le cas de Fe II, Si II a été traité par Collin et al. (1979, 1980), Dumont, Mathez (1981), Kwan, Krolik (1981). Il faut, dans chaque cas, discuter du rôle respectif des mécanismes collisionnels et radiatifs. L'excitation est-elle due seulement au continu ultraviolet? Alors les raies UV devraient apparaître en absorption, ce qui n'est pas le cas. Il faut donc tenir compte des excitations collisionnelles.

De plus, traiter proprement le problème de transfert dans la région responsable des raies permises devient nécessaire.

L'analyse des observations conduit à des températures de l'ordre de 5 000 K à 10^4 K, à des densités élevées ($N_e > 10^9$) à des profondeurs optiques de l'ordre de 10^5 , au centre des raies intenses étudiées.

Là encore, on est forcé de jongler avec des modèles *ad hoc*, si l'on veut rendre compte de la plupart des raies permises observées (Fe II : multiplets 42, 26, 27, 28, 37, 38, 48, 49, et ultraviolets ; Mg II : 2 798 ; CaII : H, K et le triplet infrarouge) et des raies de l'hydrogène. Avec $T_e \sim 10^4$, $N_e \sim 10^{10}$, $\tau_0 \sim 2.10^5$, on trouve des valeurs correctes pour les raies métalliques, mais $H\alpha$ est trop faible ; avec $T_e \sim 7.5 \cdot 10^3$ et $\tau_0 \sim 7 \cdot 10^4$, on trouve $H\alpha$ correctement, mais $Ly\alpha$ est trop faible.

En imaginant la méthode simple qui consiste à tracer, dans le diagramme N_e, T_e , des iso-Mg II, de iso-Fe II, des iso-raies UV, nous avons abouti à $N_e = 3 \cdot 10^{11}$ et $T_e = 8 \cdot 10^3$ pour $\tau_0 = 7 \cdot 10^4$, ce qui semble un compromis acceptable pour les régions où se forment les raies permises.

Nous reviendrons sur ces valeurs *in fine*.

4. Le spectre d'absorption

Les raies d'absorption du spectre des quasars sont de deux types : les raies de Lyman, qui apparaissent principalement, souvent très nombreuses, dans l'aile à courte longueur d'onde des raies de Lyman, et les raies diverses d'éléments ionisés (CIV, par exemple) qui ont souvent des profils de type P Cygni, l'absorption apparaissant dans l'aile à courte longueur d'onde de la raie d'émission.

a) Deux interprétations (non nécessairement contradictoires) sont possibles.

L'une est *intrinsèque*. Les raies d'absorption sont dues à des nuages éjectés par les quasars ($z > z_{\text{ém}}$ en majorité) pour la plupart, certains peuvent

être en chute vers les quasars, ($z < z_{\text{ém}}$ en majorité), distribués devant ou derrière l'objet principal. Cette interprétation, si elle est démontrée, doit permettre d'établir de meilleurs modèles des quasars.

L'autre est *extrinsèque*. Des nuages intergalactiques et des galaxies de z trop élevé pour être observées comme telles, peuvent être interposées entre le quasar et l'observateur. Cette seconde interprétation, si elle est démontrée comme correcte, est un argument fort pour le caractère cosmologique du décalage spectral ; elle permet aussi l'étude de la composition du milieu absorbant.

Après un examen de quelques observations typiques (forêt Ly α de Q1101-264 selon Carswell, profils de la raie de C IV pour QSS 0932 + 501, 1303 + 308, 1309 — 056 par Turnshek, ou pour NGC 4151, ions divers, selon Véron et al., 1974) on examine les arguments pour ou contre l'une de ces deux descriptions.

Le dernier article cité donne d'intéressants arguments ; du fait de la variabilité (de 2 magnitudes) de NGC 4151, la relation entre la raie d'absorption C II (1335) et le continu voisin fait apparaître que le continu se maintient, au minimum d'éclat, même si la raie s'annule. Ceci suggère un modèle, où un jet, source de rayonnement continu, ne serait pas couvert, pour l'observateur, par la région absorbante, proche donc du noyau émissif.

D'autres observations relatives à PHL 5200 (Jankkarinen et al.) suggèrent un modèle en éjection et interprètent le profil observé par la théorie de Sobolev, avec une couche en expansion plus rapide dans des régions externes, moins denses.

Norris et al. (sur le cas de 4C 534 et OQ 172) trouvent que l'abondance de C, N, O par rapport à celle de H est 10 à 100 fois plus faible que dans le Soleil ; ce fait apparente ces objets à des objets de population II ; il est consistant avec l'hypothèse de Oort : les nuages intergalactiques seraient les résidus du matériau qui a formé les superamas, enrichi par des vents venant des amas et superamas.

Pour Chaffee et al. (PHL 954), la largeur des raies de la forêt de Ly α est assez faible, plus faible en tous cas que la température d'équilibre de nuages intergalactiques en hydrogène pur : la matière serait donc enrichie déjà en métaux, — soit donc par le processus de Oort, soit du fait qu'il s'agit d'éjection de galaxies évoluées. Les mêmes auteurs, et Pettini et al., étudiant avec une excellente résolution les composantes très fines d'absorption de la raie C IV 1552 dans l'objet 0215 + 015 (de type BL Lac) suggèrent plusieurs nuages, localisés dans le halo d'une galaxie interposée.

Ces deux types de recherches favorisent plutôt l'hypothèse intergalactique.

Des travaux de nature statistique aboutissent à une autre conclusion.

b) Travaux de Weymann (1980).

Weymann discute de ce que devrait être la distribution de l'intensité dans l'aile de Ly α si la distribution du matériau absorbant était homogène entre l'observateur et le noyau du QSS (entre $z = 0$ et $z = z_0$) ; avec $H = \text{cste}$, il obtient une dépression très faible du continu ($\tau < 0.2$) on en déduit $n_H \lesssim 2 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^{-3}$ pour $z < 3$.

Mais l'observation (forêt de Ly α) pousse à une description en nuages (voir Lynds, 1971). On peut donc aussi établir, avec une distribution arbitraire, $N(z)dz$, de ces nuages, une comparaison avec l'observation. Or (Carswell, Coleman) la distribution observée des raies de la forêt avec z est fort différente des distributions prévues, que ce soit en utilisant, dans une cosmologie standard, $q_0 = 0$, ou $q_0 = 0.5$. Il y a trop de nuages pour $z \sim 2$ par rapport à $z \sim 3.5$. Peut-être ne sont-ils « pas encore » condensés ?

Les raies de la forêt de Ly α sont des mesures de la densité d'hydrogène quelque part. S'agit-il de matériau primordial ? La réponse à cette question est un point important de la discussion concernant leur localisation. Or même à $z = 3$, certains QSS ont des raies métalliques en abondance *normale* (au lieu de 10-20 %, si les QSS localisés à $z = 3$ ont un âge de l'ordre de 10-20 % de l'âge de notre Galaxie). Question : l'enrichissement se fait-il alors au moment de la formation des QSS, — et alors celui dû à l'évolution galactique est négligeable, ce qui est troublant ? — ou bien les QSS sont-ils vraiment à leur distance « cosmologique » (ce que je persiste à considérer comme douteux pour *certaines* QSS, notamment ceux à z élevé) ?

Un autre point important résulte de l'analyse des histogrammes des longueurs d'onde d'absorption des raies CIV : selon Weymann, ces histogrammes poussent à admettre l'éjection par le QSS plutôt que l'interposition de nuages à toutes distances, ce qui conforte peut-être (ou contredit ?) la conclusion tirée de la comparaison des forêts de Ly α avec les modèles cosmologiques. Pour CIV en tous cas, la conclusion « éjection » semble plus claire (MCS 275 : 2 nuages de CIV, à 4 000 et 18 000 km.s $^{-1}$ respectivement). Cette conclusion semble confirmée par les données relatives à 3C191 (Williams) et à 3C205.

c) L'analyse de Libby et al., 1984.

Ces auteurs étudient 13 quasars, et dans ces 13 quasars, les forêts de Ly α . Ils notent d'abord que valeurs de λ_{abs} corrigées du z) se groupent autour de valeurs privilégiées ; à $\pm 1 \text{ \AA}$ près, cinq QSS (sur treize) définissent ces

valeurs privilégiées. Certaines sont du côté « rouge » (8), certaines, plus nombreuses, du côté « bleu » (47) de la raie non déplacée, à 1 216 Å.

On compare la distribution observée avec des distributions calculées, en supposant les nuages absorbants distribués au hasard. Les coïncidences ($\Delta z = z - z_0$, identiques dans plusieurs des 13 QSS) sont très nombreuses : on trouve 55 « quintuplets » (raies apparaissant dans au moins 5 quasars). La distribution au hasard conduit à 13 ± 2 au lieu de 55. La conclusion des auteurs, c'est donc que l'absorption est intrinsèque au quasar.

Cette conclusion est cependant légèrement infirmée par la remarque que le nombre de composantes du côté « bleu » augmente nettement avec le z d'émission ; le nombre de composantes du côté « rouge » est plus proche d'être constant ; il pourrait bien indiquer une contribution intrinsèque ; à $z \sim 3$, 1/7 des raies seraient alors (bleu ou rouge) intrinsèques, et 6/7 dues à des interpositions entre le QSS et l'observateur, à des distances données par le z_{abs} . De plus, un article récent de Zwiderwijk critique sévèrement la méthodologie statistique de Libby et al.

d) Autres types d'arguments.

L'identité des $\Delta z = z_{\text{ém}} - z_{\text{abs}}$ pour 2 quasars, même si les $z_{\text{ém}}$ sont différents, est une indication (Weymann et al., 1977) en faveur du nuage intergalactique interposé. Mais si les $z_{\text{ém}}$ sont identiques (QSO PG 1115 + 08), cela ne prouve rien, car il peut s'agir d'un effet de lentille gravitationnelle, le nuage massif en étant la cause n'étant pas le lieu de l'absorption. Un autre cas analogue est celui de la source X-IE-0104.2 + 3153 (Stocke), où les 3 composantes d'absorption seraient plutôt locales.

5. Modèles des régions de formation des raies. Conclusion.

a) Toutes les analyses ci-dessus discutées poussent vers des modèles fortement composites, différentes régions étant nécessairement à l'origine de différents systèmes de raies, — raies de Lyman, de Balmer, raies permises de FeII, MgII, de SiII, raies interdites de OIII ..., raies d'absorption — ; mais alors on ne peut rien tirer de bien intéressant (sinon des classifications, mais quel sens ont-elles ?) des rapports de raies.

b) En conclusion de cette série d'exposés, on a donc procédé à un retour sur la description des quasars et galaxies actives par des « modèles » progressivement plus complexes.

Les contraintes sont multiples :

1. Débit d'énergie énorme ($M = -27$) si le z est cosmologique (cette question restant essentielle).

2. Caractéristiques du spectre continu (indépendantes de z) : a-t-on *un* spectre non thermique, ou *des* spectres non thermiques (issus de différentes régions et mécanismes), ou même simplement une combinaison de spectres multi-thermiques (voir cours de l'année précédente) ?

3. Caractéristiques des raies d'émission. Décrément de Lyman, décrément de Balmer, intensités des raies interdites [OIII], etc., des raies permises (Si II, Fe II, Ca II...). Profils et largeurs de ces diverses raies.

4. Caractéristiques des raies d'absorption. Sont-elles intrinsèques (comme le suggèrent les profils de P Cygni des raies de C IV, ou certaines analyses statistiques) ou au contraire dues à des interpositions (forêt de Ly α), qui seraient un argument très fort pour la nature cosmologique du z des QSS lointains ?

On passe donc en revue les modèles successifs de Burbidge et al. (1966), inspirés d'une analogie QSS - étoile entourée de couronne continue, et de Bahcall, Kozlovsky (1969), qui montrent la nécessité d'une inhomogénéité de la zone responsable des raies d'émission. Le fait que l'on trouve des abondances d'hélium faibles et des abondances métalliques quasi-stellaires pose, à ce stade, des interrogations cosmologiques, auxquelles répondent mieux les modèles impliquant des z non cosmologiques... Mais quelle est la valeur des telles déterminations ?

Les modèles suivants ont surtout cherché à discuter la cause de l'ionisation. Scargle et al. (1974) montrent que si on explique [OIII] avec un rayonnement UV ionisant, on a du mal à expliquer Mg II, sauf à introduire des régions de formation différentes. Cependant, avec un spectre en loi de puissance, on arrive assez bien à expliquer simultanément He II, C IV, [OII], et [OIII] (alors $\alpha \sim 0.8$ et $T_e \sim 1.5 \cdot 10^4$ K). Stoner et al. (1974) discutent au contraire la possibilité de l'ionisation collisionnelle (qui explique bien certains profils), cependant que Daltabuit, Cox (1972), après Osterbrock (1971) défendent le rôle d'une ionisation par une onde de choc, source de l'énergie rayonnante. Ces modèles sont assez bons pour que l'on doive, comme Mac Alpine, envisager (1974) des modèles hybrides, envisagés aussi par Baldwin et al. (1974).

La complexité, pour Mathews (1974, 1975), Blumenthal et Mathews (1975), vient plutôt de l'inhomogénéité du milieu émissif ; ces auteurs ionisent par du rayonnement UV, et discutent de la stabilité du confinement des nuages émissifs plongés dans un nuage plus dilué et plus continu, absorbant. L'intérêt majeur, à nos yeux, du travail de ces auteurs, est de poser le problème en termes dynamiques. Mais les confrontations de leurs calculs avec les données de l'observation (profils) ne reflètent qu'un accord qualitatif, et dans une certaine mesure, artificiel. A noter l'évolution nécessaire, dans ces théories (Blumenthal, Mathews, 1979), des nuages en des « galettes »

aplaties dans la direction du rayonnement, et animées de vitesses vers l'extérieur.

Un modèle assez prometteur est celui d'Osterbrock (1978) où les régions centrales sont responsables des raies larges, et les régions périphériques des raies étroites ; l'aplatissement explique, comme dans le modèle plus simpliste de Pecker (1978), une ionisation privilégiée dans la direction de l'axe polaire de la galaxie.

Les travaux déjà examinés, de Collin-Souffrin et al., ont, sur les modèles précédents, l'avantage énorme de traiter correctement du problème du transfert. Mais certaines conclusions des modèles antérieurs en sont affectées ; et des modèles comme ceux de Kwan et Krolik ont des structures plus simples que les modèles antérieurs du genre de ceux de Mac Alpine ; l'inhomogénéité ad hoc de ces modèles peut faire place à un traitement rigoureux de situations géométriques plus simples.

c) Reste à poser à nouveau une question. Le z mesuré des quasars et galaxies actives est-il une mesure sans ambiguïté de leur distance ? En d'autres termes, peut-il exister des causes de décalage spectral vers le rouge autres que les effets cosmologiques qui déterminent le décalage spectral des galaxies lointaines ordinaires ? Cette question suppose que l'on admette, ou non, la relation de Slipher-Hubble comme liée à une expansion universelle.

La majeure partie des astronomes, s'appuyant sur de nombreuses associations de quasars avec des galaxies de z identiques, sur l'interprétation des « forêts » de Ly α , etc. adoptent la solution la plus simple : le décalage spectral z est bien une mesure de la distance.

Une minorité de chercheurs considère l'existence de « décalages spectraux anormaux » comme significatifs. Les arguments sont de plusieurs natures : (i) effet de type, mis en évidence par Jaakkola, Molès, Le Denmat, Karoji, Nottale, Vigier, Giraud (voir Giraud, 1982) : ainsi les elliptiques ont-elles un z supérieur, statistiquement, à celui des spirales, et ce de façon significative ; (ii) certaines associations quasars-galaxies associent des objets de z différents (nombreux exemples de Arp, pas tous convaincants ; parmi les plus intéressants, signalons celui de NGC 3384) ; (iii) la distribution des quasars en fonction de z ne correspond pas à une distribution homogène en fonction de la distance ; les pics de cette distribution sont irréductibles (ceci a été affirmé depuis des années par Barnothy ou Burbidge ; un travail récent de Depaquit et al., 1984, apporte une discussion statistique convaincante).

L'argument (i) reste cependant marginal ; l'argument (ii) peut (peut-être) s'expliquer par des intensifications gravitationnelles (Canizares, Nottale) de l'état des quasars lointains au voisinage de galaxies proches ; l'argument (iii)

reste aussi marginal, et on peut en trouver aussi des interprétations cosmologiques (qui exigent, il faut le dire, beaucoup d'imagination !).

Un argument récent (Chu et al., 1984) semble indiquer que les associations quasars-galaxies (de z différents) sont beaucoup plus nombreuses que ne laisseraient le prévoir une distribution au hasard. Le calcul de ces auteurs porte sur 4 364 galaxies et 1 356 quasars : peut-il être affecté, lui aussi, par les effets d'intensification gravitationnelle ? Ce point n'a pas encore été réellement discuté.

Que conclure de ces arguments et contre-arguments ? En ce qui me concerne, je voudrais rappeler que dans le diagramme (v/c , m_v) de Hubble, les QSS occupent un domaine limité de m_v et s'étendent, à m_v donné, sur de larges intervalles en v/c . Ceci suggère très fortement qu'il y a quasar et quasar : tout un spectre de galaxies actives s'étendant des galaxies normales, sans décalage intrinsèque, aux quasars extrêmes, à fort décalage intrinsèque, pourrait exister, — mais il reste difficile de préciser quel est le paramètre physique qui, ajouté à la nécessaire « activité », pourrait entraîner l'apparition d'un décalage spectral intrinsèque vers le rouge.

Quoi qu'il en soit, il est bon de souligner que cette discussion a peu d'incidence cosmologique. Les quasars lointains sont sans doute peu « évolués » : leur composition chimique devrait, si leur z est cosmologique, refléter ce fait, et différer de celle des quasars proches. Nous avons dit que tel ne semble pas le cas ; ce peut vouloir dire soit que ces grands z ne sont pas d'origine cosmologique, soit que l'évolution chimique de l'Univers n'est pas celle que prévoit la cosmologie standard.

Mon sentiment personnel est, en tout cas, que les problèmes liés à la nature physique du décalage spectral vers le rouge sont, malgré un consensus presque universel, encore ouverts au débat.

J.-C. P.

BIBLIOGRAPHIE

L.H. ALLER, W. LILLER, in : *Nebulae and Interstellar Medium, Stars and Stellar-Systems*, Ch. Univ. Press, 1968.

J.N. BAHCALL, B. KOZLOVSLY, *Astrophys. J.*, **155**, 1077, 1969.

J.N. BAHCALL, B. KOZLOVSLY, *Astrophys. J.*, **158**, 529, 1969.

J. BAKER, D.H. MENZEL, *Astrophys. J.*, **88**, 52, 1938.

J.A. BALDWIN, E.M. BURBIDGE, G.R. BURBIDGE, C. HAZARD, L.B. ROBINSON, E.J. WAMPLER, *Astrophys. J.*, **193**, 513, 1974.

- C.K. BLUMENTHAL, W.G. MATHEWS, *Astrophys. J.*, **198**, 517, 1975.
- C.K. BLUMENTHAL, W.G. MATHEWS, *Astrophys. J.*, **233**, 479-497, 1979.
- G.R. BURBIDGE, E.M. BURBIDGE, F. HOYLE, C.R. LYND, *Nature*, **210**, 774, 1966.
- C.R. CANIZARÈS, *Nature*, **219**, 620-623, 1981.
- R.F. CARSWELL, G.J. FERLAND, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, **191**, 55, 1980.
- F.H. CHAFFEE, R.J. WEYMANN, D.W. LATHAM, P.A. STRITTMATTER, *Astrophys. J.*, **267**, 12, 1983.
- Y. CHU, X. ZHU, G. BURBIDGE, A. HEWITT, *Astron. Astrophys.*, **138**, 408-414, 1984.
- S. COLLIN-SOUFFRIN, M. JOLY, N. HEIDMANN, S. DUMONT, *Astron. Astrophys.*, **72**, 293, 1979.
- S. COLLIN *et al.*, *Astron. Astrophys.*, **83**.
- S. COLLIN-SOUFFRIN, P. DELACHE, S. DUMONT, H. FRISCH, *Astron. Astrophys.*, **104**, 264-275, 1981.
- S. COLLIN-SOUFFRIN, S. DUMONT, J. TULLY, *Astron. Astrophys.*, **106**, 362, 1982.
- E. DELTABUIT, D.P. COX, *Astrophys. J.*, **177**, 855, 1972.
- E. DELTABUIT, D.P. COX, *Astrophys. J. Letter*, **173**, L 13 et ..., 1972.
- S. DEPAQUIT, J.-C. PECKER, J.P. VIGIER, *Astron. Nachr.*, **306**, I, 7-15, 1985.
- A.M. DUMONT, G. MATHEZ, *Astron. Astrophys.*, **102**, 1-7, 1981.
- E. GIRAUD, Thèse « Galaxies normales autour du flot de Hubble », 1982.
- GURZADYAN, *Planetary Nebulae* (traduit du russe), GORDON et BREACH, 1969.
- C. HAZARD, T.R. TERLEVICH, R. McMAHAN, D. TURNSHEK, C. FOLTZ, J. STOCKE, R. WEYMANN, *Mon. Not. Roy. Astron. Society*, **211**, n° 2, 45 P, 1984.
- V.S. JUNKKARINEN, E.M. BURBIDGE, H.E. SMITH, *Astrophys. J.*, **265**, 51, 1983.
- L. KAPLAN, S. PIKELNER, *The Interstellar Medium* (traduit du russe), Harvard U.P., 1970.
- J. KWAN, J.H. KROLIK, *Astrophys. J.*, **250**, 478-507, 1981.
- L.H. LEVINE, L.M. LIBBY, S.K. RUNCORN, *Astron. J.*, **89**, 311-315, 1984.
- R. LYND, *Astrophys. J. Letters*, **164**, L 73, 1971.
- G.M. MAC ALPINE, *Astrophys. J.*, **193**, 37, 1974.
- W.G. MATHEWS, *Astrophys. J.*, **189**, 29, 1974.

- W.G. MATHEWS, *Astrophys. J.*, **207**, 351, 1976.
- W.G. MATHEWS, *Astrophys. J.*, **252**, 39, 1982.
- J. NORRIS, F.D.A. HARTWICK, B.A. PETERSON, *Astrophys. J.*, **273**, 450, 1983.
- L. NOTTALE, communication personnelle, 1984.
- D.E. OSTERBROCK, *Pont Ac. sc. Scripta Varia*, n° 35, p. 164, 1971.
- D.E. OSTERBROCK, *Astr. Papers ded. to B. Strömgren*, Cop. Univ. Obs., 299, 1978.
- D.E. OSTERBROCK, O. DAHARI, *Astrophys. J.*, **273**, 478, 1983.
- J.-C. PECKER, *Astr. Papers ded. to B. Strömgren*, Cop. Univ. Obs., 285, 1978.
- M. PETTINI, R.W. HUNSTEAD, H.S. MURDOCH, J.C. BLADES, *Astrophys. J.*, **273**, 436, 1983.
- J.D. SCARGLE, L.J. CAROFF, C.B. TARTER, *Astrophys. J.*, **189**, 181, 1974.
- K. SEYFERT, *Astrophys. J.*, **97**, 28, 1943.
- L.Jr. SPITZER, *Physical Processes in the Interstellar Medium*, Miley, 1978.
- L. Jr. SPITZER, *Searching between the Stars*, Yale Univ. Press, 1982.
- D.A. TURNSHEK, R.J. WEYMANN, R.F. CARSWELL, M.G. SMITH, *Astrophys. J.*, **277**, 51, 1984.
- Ph. VÉRON, M.P. TARENGHI, *E.S.O. preprint*, **207**, 1982.
- Ph. VÉRON, M.P. VÉRON, M. TARENGHI, *E.S.O. preprint*, **341**, 1984.
- R.J. WEYMANN, *Phil. Trans. R. Soc. London, A*, **296**, 399, 1980.
- R.J. WEYMANN *et al.*, *Astrophys. J.*, **213**, 619, 1977.
- E.J. ZWIDERWIJK, *Astron. J.*, **89**, 1808, 1984.

SÉMINAIRE

Formation des raies spectrales : effets physiques de la redistribution

- 8 janvier : Introduction générale (J. OXENIUS).
- 15 janvier : La fonction de redistribution atomique (A. OMONT).
- 22 janvier : Redistribution en champ de rayonnement intense (S. REYNAUD).
- 29 janvier : Forme des raies spectrales dans les plasmas de laboratoire (J. JAÉGLÉ).
- 5 février : Effets multiatomiques sur la redistribution (D. VOGLAMBER).

— 12 février : Coefficients d'absorption et d'émission dans un atome à plusieurs niveaux (J. OXENIUS).

— 26 février : Redistribution et transfert radiatif - I (E. SIMONNEAU).

— 5 mars : Redistribution et transfert radiatif - II (E. SIMONNEAU).

— 12 mars : Redistribution dans les atmosphères stellaires (C. MAGNAN).

— 19 mars : La fonction de redistribution pour un gaz relativiste (R. KRİKORIAN).

Le séminaire a été organisé cette année avec l'aide de J. OXENIUS et de E. SIMONNEAU. Je tiens à les remercier vivement ; il m'a semblé utile de leur demander de rédiger un résumé d'ensemble de ce séminaire. On trouvera ce résumé ci-après.

J.-C. P.

Dans la théorie semi-classique de l'interaction entre la matière et le rayonnement, telle qu'elle est utilisée dans la spectroscopie des plasmas astrophysiques (atomes et électrons de quelques eV), le gaz d'atomes capables d'absorber et le gaz d'atomes capables d'émettre (atomes excités) sont considérés, sous le point de vue cinétique, comme des gaz différents ; ils ont des fonctions de distribution des vitesses qui sont différentes. On note habituellement respectivement par ξ' et \mathbf{n}' , la fréquence et la direction d'un photon absorbé par un atome et par ξ et \mathbf{n} , la fréquence et la direction d'un photon ré-émis, par cet atome, dans la même raie spectrale (ξ n'est pas trop différent de ξ'). La correction d'« aberration » étant petite aux vitesses qui correspondent aux températures citées, la direction des photons est la même dans les repères de l'atome et du laboratoire. Pourtant, dans ce dernier repère, les fréquences ν' et ν des photons absorbés et ré-émis, sont reliés aux fréquences atomiques ξ' et ξ , et à la vitesse v de l'atome, par l'effet Doppler.

Le double processus d'absorption d'un photon (ξ' , \mathbf{n}') et de ré-émission d'un autre photon (ξ , \mathbf{n}) est caractérisé par une « fonction de redistribution » $r(\xi', \mathbf{n}'; \xi, \mathbf{n})$, qui décrit la probabilité relative (normalisée) pour que ce processus complet soit réalisé. La probabilité totale dépend des coefficients d'Einstein A_{21} , B_{12} . La forme fonctionnelle de cette fonction de redistribution $r(\xi', \mathbf{n}'; \xi, \mathbf{n})$, dépend du rapport entre ces coefficients et les probabilité d'excitation S_{12} et de désexcitation S_{21} inélastiques (électroniques).

L'intégrale sur toutes les possibilités de réémission :

$$\iint d\xi \frac{d\Omega}{4\pi} r(\xi', \mathbf{n}'; \xi, \mathbf{n}) = \alpha(\xi', \mathbf{n}')$$

est le « profil » du coefficient d'absorption dans le repère atomique, et l'intégrale sur toutes les absorptions, pour un champ de rayonnement $I(\xi, n)$ donné,

$$\iint \mathrm{d}\xi' \frac{\mathrm{d}\Omega'}{4\pi} r(\xi', \mathbf{n}' ; \xi, \mathbf{n}) I(\xi', \mathbf{n}')$$

est la partie du coefficient d'émission qui correspond à la diffusion. Il y aura, dans le coefficient d'émission totale $\eta(\xi, \mathbf{n})$, une partie indépendante du champ de rayonnement dont la dépendance avec la fréquence ξ , est la même que celle du coefficient d'absorption $\alpha(\xi, \mathbf{n})$.

Si $f(\mathbf{v})$ et $f^*(\mathbf{v})$ sont respectivement les fonctions de distributions des vitesses des atomes capables d'absorber et d'émettre, alors les profils φ_ν et Ψ_ν , des coefficients d'absorption et d'émission dans le repère du laboratoire, tels qu'ils apparaissent dans l'équation de transfert, sont :

$$\varphi_\nu = f(\mathbf{v}) \otimes \alpha(\xi, \mathbf{n}) \quad \text{et} \quad \Psi_\nu = f^*(\mathbf{v}) \otimes \eta(\xi, \mathbf{n})$$

c'est-à-dire, le produit de convolution des profils atomiques par les fonctions respectives de distribution des vitesses. Les vitesses des atomes et les fréquences et directions des photons absorbés et ré-émis, sont reliés par l'effet Doppler.

Dans le premier exposé, J. Oxenius (Service de Chimie Physique II, Université Libre de Bruxelles) a décrit le cadre général du problème à traiter dans les exposés suivants. Ce cadre a été brièvement résumé ci-dessus. Les cinq exposés suivants ont porté sur la fonction de redistribution $r(\xi', \mathbf{n}' ; \xi, \mathbf{n})$ dans le repère atomique, comme suit : M. A. Omont (Groupe d'Astrophysique, Université de Grenoble) fit un exposé sur la théorie générale de cette fonction de redistribution, pour un atome à deux niveaux d'énergie. Dans le troisième exposé, M. S. Reynaud (Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne, Ecole Normale Supérieure) démontra comment un rayonnement « laser » intense peut modifier les propriétés des niveaux d'énergie et la structure des fonctions de redistribution. M. P. Jaeglé (Laboratoire de Spectroscopie Atomique et Ionique, Université Paris-Sud, Orsay) fit le quatrième exposé, sur les possibilités d'observation des différents mécanismes qui interviennent dans la formation des raies spectrales, dans les plasmas du laboratoire. Le cinquième exposé, fait par M. D. Voslamber (C.E.A. Fontenay-aux-Roses), traita des effets coopératifs des atomes voisins sur la fonction de redistribution d'un atome donné. L'exposé suivant, fait par J. Oxenius, traita, toujours dans le cadre de la théorie semi-classique, de la fonction de redistribution pour un atome à plusieurs niveaux d'énergie. Cette fonction $r(\xi_1, n_1 ; \xi_2, n_2 ; \dots ; \xi_k, n_k)$ établit la corrélation qui existe entre plusieurs absorptions ou émissions successives. Dans cet exposé on a démontré que, contrairement à ce qui se produit un atome à

deux niveaux, la fonction de redistribution pour un atome à plusieurs niveaux, même dans le repère atomique, dépend du champ de rayonnement et de la fonction de distribution des vitesses des atomes dans chaque état d'excitation.

Les exposés suivants porteront sur le coefficient d'absorption et d'émission *dans le repère du laboratoire*, c'est-à-dire après que l'on ait convolué les coefficients atomiques avec la fonction convenable de distribution des vitesses.

Pour un atome à deux niveaux, la fonction de distribution des vitesses des atomes non-excités est supposée maxwellienne. Le profil du coefficient d'absorption dans le laboratoire est celui de l'équilibre : profil de Voigt (voire de Gauss). Mais la fonction de distribution des atomes excités doit être déduite d'une équation cinétique, couplée dans son terme source à l'équation de transfert. Dans cette équation cinétique, outre le paramètre $\varepsilon = S_{21}/(A_{21} + S_{21})$ qui représente la proportion entre les désexcitations inélastiques (électroniques) et les désexcitations radiatives, et qui caractérise donc l'importance du transfert hors ETL, deux autres paramètres interviennent, à savoir : $\eta = \lambda_{exc}/\lambda_{ph}$, rapport entre le parcours moyen des atomes excités et le libre parcours moyen des photons ; et $\zeta = \lambda_{exc}/\lambda_{el}$, rapport entre le parcours moyen des atomes excités et le libre parcours moyen des atomes entre deux collisions élastiques. Le premier, η caractérise l'importance du déplacement des atomes excités ; le second, ζ caractérise l'importance des collisions élastiques dans la thermalisation de la fonction de distribution de vitesses des atomes excités. Ces trois paramètres ε , η et ζ permettent de classer les différents types de cinétique des atomes excités et leur relation avec le coefficient d'émission de rayonnement, d'après le tableau ci-dessous :

Classification

$\varepsilon \simeq 1$ ETL

$\varepsilon \ll 1$ non-ETL

$\zeta \ll 1$ « régime cinétique »

$\eta \ll 1$ redistribution partielle (statique)

$\eta \gg 1$ flux cinétique des atomes excités

$\zeta \gg 1$ « régime de diffusion »

$\eta \ll 1$ redistribution complète

$\eta \gg 1$: $\delta = \eta^2/2\zeta$

$\delta \ll 1$ redistribution complète

$\delta \gg 1$ flux de diffusion des atomes excités.

N.B. : Dans le modèle « homogène » il n'y a de gradients (et donc de flux) que pour la situation non-ETL ($\varepsilon \ll 1$).

Dans les exposés « Redistribution et Transfert Radiatif, I et II », M. E. Simonneau (Laboratoire d'Astrophysique Théorique, Collège de France), a décrit cette théorie générale du coefficient d'émission qui tient compte du transfert des atomes excités, puis analysé tous les cas limites ; il a montré ensuite des résultats obtenus pour les différentes fonctions qui interviennent dans le problème, selon les différentes valeurs des paramètres caractéristiques ε , η et ζ . M. C. Magnan (Laboratoire d'Astrophysique Théorique, Collège de France) traita les aspects astrophysiques, observationnels, de la fonction de redistribution dans le repère du laboratoire et les simplifications qui peuvent être introduites comme conséquence des particularités des situations astrophysiques. Enfin, dans le dernier exposé, M. R. Krikorian (Laboratoire d'Astrophysique Théorique, Collège de France) étudia la structure des fonctions de redistribution dans le cadre relativiste et montra comment le coefficient d'émission doit être modifié, quand les vitesses des atomes sont suffisamment grandes, pour tenir compte des effets relativistes.

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. Peter WILSON (Professeur à l'Université de Sydney) a fait deux conférences sur le sujet suivant : Magnetic Flux Changes in Photospheric Layers - Observations, théorie. (06.03.85).

M. Giorgio EINAUDI (Professeur assistant, Scuola Normale Superiore, Pisa) a fait une conférence sur le sujet suivant : Magnetic Instabilities in Solar Conditions : 1. Ideal limits ; 2. Resistive effects. (16.04.85).

De plus, M.G. BASRI de l'Université de Berkeley, a séjourné dans le laboratoire, du 1^{er} au 31 août, pour effectuer des travaux sur les étoiles T Tauri avec C. BERTOUT. De même, M. N. UKITA, attaché de recherche à Nobeyama (Japon), a travaillé du 13 novembre au 20 décembre 1984 sur les observations infrarouges et radio d'objets du catalogue IRAS avec P. MÉRAT et H. KAROJI.

ACTIVITÉS DU LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE THÉORIQUE

Le laboratoire (désigné par le signe 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, 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

(juin 1984 - juin 1985)

Membres permanents : C. BERTOUT (C.R. C.N.R.S.), J. BRUNEL (Prép. temp. Coll. de Fr.), S. DEPAQUIT (ingénieur C.N.R.S.), S. DUMONT (Astr. adj. Obs. de 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.), L. LERICQUE (techn. Coll. de Fr.), C. MAGNAN (ss. direct. Labo. Coll. de Fr.), P. MÉRAT (ingénieur C.N.R.S.), J.-C. PECKER (Prof., Coll. de Fr.), S. PERRET (techn. C.N.R.S.), G. PETIT (techn., Coll. de Fr.), E. SIMONNEAU (C.R., C.N.R.S.), R.N. THOMAS (M.R., C.N.R.S.).

Membres à titre temporaire : O. ATANACKOVIC (stagiaire, 3^e cycle), M. GESKIS (stagiaire D.E.A.), M. MARTIČ (stagiaire D.E.A.), E. GIRAUD (boursier Carnegie-Del Duca au Mont Wilson, Las Campanas, Obs. à Pasadena, Californie).

Chercheurs associés : R. BONNET (E.S.A.), S. COLLIN (Obs. de Meudon), J.-P. VIGIER (I.H.P.).

Visiteurs étrangers (en dehors des professeurs invités pour les cours et séminaires et séjours d'assez longue durée) : Mira KARABIN, Walter STIBBS, G. BASRI, N. UKITA.

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE DU L.A.T.

Elle est restée orientée vers plusieurs directions essentielles : l'étude des atmosphères astrophysiques hors équilibre (Soleil, étoiles, quasars), l'étude des

objets extragalactiques et de leur distribution, les perspectives cosmologiques. Le rapport ci-après résulte essentiellement des rapports individuels fournis par les chercheurs du L.A.T.

I. *Le Soleil*

a) *Soleil (calme et actif) - modèles* (S. Dumont, J.-C. Pecker, en collaboration avec les chercheurs de l'Observatoire de Meudon cités ci-après). Les modèles (calme et actif) de la zone de transition entre chromosphère et couronne (ou CCT), établis à partir des observations satellite OSO 8 (profils des raies O VI, C IV, Si IV) sont maintenant testés avec des observations obtenues par le satellite Skylab.

Avec ces nouvelles données, nous disposons de plus d'informations en fonction de l'altitude. Les 7 canaux donnent : raies Mg X 62.53 nm, O VI 103.9 nm, O IV 55.46 nm, C III 97.78 nm, C II 133.57 nm et H I Ly α 121.9 nm et le continu H I de Lyman à 89.60 nm, avec différentes largeurs de bande passante. Seules les trois premières raies proviennent bien de la zone de transition, mais elles couvrent une plus grande étendue en altitude que les raies observées par OSO 8. Par contre, pour chaque raie, l'information est réduite : nous connaissons seulement l'intensité intégrée avec le continu voisin. Le dépouillement est fait par Z. Mouradian, I. Soru-Escout et M.J. Martres, en priorité pour les trois raies de la CCT. De l'ensemble des données, on extrait celles relatives au Soleil calme et à deux facules (variation centre-bord).

Les modèles précédemment établis vont servir de base à l'étude de ces données. Nous pourrons ainsi d'une part affiner le modèle de Soleil calme et d'autre part, faire une comparaison de régions actives.

b) *Soleil, turbulence* (Simone Dumont, avec Nicole Mein, Observatoire de Meudon). Ce travail sur les profils théoriques des raies de Ca II est en voie d'achèvement. Nous étudions les profils dans différentes conditions : redistribution complète - redistribution partielle en fréquence ; largeur Doppler variable - ou non ; vitesses dans l'atmosphère nulles - ou non. Ce travail permettra de définir la précision que l'on peut espérer atteindre, suivant les hypothèses faites pour résoudre les équations de transfert du rayonnement.

c) *Influence de la « rugosité »* (S. Dumont, J.-C. Pecker, avec Z. Mouradian, Observatoire de Meudon). Prendre en compte la structure géométrique des régions émissives de telle ou telle raie influence les interprétations de façon très nette ; cette influence a été calculée pour des situations très générales et permet de savoir comment il faut en tenir compte dans l'analyse des données, résolues ou non-résolues, de Skylab et d'OSO 8. Un exposé de synthèse a été

donné par J.-C. Pecker au Colloque de Sydney (sous presse) ; deux articles sont en cours d'achèvement sur ces questions.

II. *Les étoiles*

a) *Etoiles T Tauri ; objets jeunes et froids*. Les travaux de C. Bertout, et des chercheurs et stagiaires qu'il dirige ou a dirigé cette année se sont orientés surtout dans le domaine des étoiles T Tauri, leur perte de masse, le rôle du magnétisme, etc. On peut les résumer comme suit :

Observations

Les travaux observationnels de MM. Bertout et Bouvier ont été centrés sur la détermination d'une éventuelle relation entre rotation et activité (en particulier dans le domaine X) pour les étoiles jeunes de faible masse, de type T Tauri et « post-T Tauri » dans la région de Rho Ophiuchi. Cette étude a permis de montrer que dans un diagramme rotation-émission X les étoiles T Tauri se placent dans le même domaine que les étoiles de type spectral tardif actives de type RS CVn. D'autre part, étoiles T Tauri et RS CVn prolongent vers les grandes vitesses de rotation la relation observée pour les étoiles de type tardif de la séquence principale. On peut donc en déduire que le mécanisme responsable de l'émission X dans ces différentes classes d'étoiles est probablement le même, ce qui confirme le rôle du magnétisme dans l'activité des étoiles T Tauri (Bouvier et al., 1984 ; Bouvier et Bertout, 1984).

Travaux théoriques et modélisation

(i) Etude de raies spectrales en géométrie sphérique.

En collaboration avec G. Basri (Berkeley) et N. Calvet (Merida, Venezuela) un programme complexe permettant de calculer la formation des raies de résonance a été mis sur pied qui tient compte en particulier de la redistribution partielle en fréquence des photons diffusés dans les enveloppes gazeuses étendues avec champs de vitesses. Le but de ces calculs est de tenter de reproduire les profils obtenus par spectrographie à haute dispersion pour un certain nombre d'étoiles T Tauri, à l'étude du rayonnement chromosphérique. La nécessité d'ajouter à la chromosphère une zone étendue possédant un champ de vitesses macroscopique est maintenant reconnue.

(ii) Etude de raies spectrales en géométrie bipolaire.

Une nouvelle méthode d'intégration de profils de raie (Bertout, 1984 b) a été étendue au cas d'enveloppes circumstellaires de symétrie axiale. La première application de cette nouvelle méthode a été l'étude de profils formés dans une enveloppe biconique. Ces premiers résultats ont fait l'objet

d'une communication au colloque UAI de Toulouse (Berthout, 1984 c). Plusieurs applications pratiques utilisant cette méthode sont en cours de réalisation. S. Cabrit et C. Bertout étudient la formation des raies de CO dans une géométrie bipolaire, afin d'être en mesure d'interpréter les observations millimétriques des transitions de rotation de CO. La présence d'écoulements bipolaires du gaz moléculaire entourant les objets stellaires jeunes a en effet été révélée par les observations millimétriques de ces dernières années. Cette phase, non prédite par les scénarios d'évolution protostellaire, semble avoir lieu quelle que soit la masse de l'objet stellaire en formation. Jusqu'ici, les interprétations de ces observations sont basées sur des modèles simplistes et la modélisation quantitative des flots CO permettra d'imposer des contraintes strictes aux propriétés des vents stellaires poussant le gaz moléculaire.

b) *Etude du rayonnement radio et infrarouge d'étoiles OB*. Un code développé par C. Bertout pour le calcul du spectre infrarouge produit dans un vent stellaire a été utilisé avec succès pour reproduire le continu IR proche d'étoiles supergéantes OB et pour en déduire la loi de variation de la vitesse dans leurs enveloppes. Ces travaux, en collaboration avec le groupe de B. Wolf (Heidelberg), ont donné lieu à publications (Bertout et al., 1984, Leitherer et al., 1984 a, b).

c) *Observations des étoiles Be, et plus généralement, d'autres catégories d'étoiles à raies d'émission*. Au cours de cette année, le travail de R.N. Thomas (en collaboration avec V. Doazan) a continué à démontrer : (i) la première étude systématique de la forte variabilité de la superionisation dans quelques étoiles Be ; (ii) la première évidence d'une association entre l'état thermique de la photosphère d'une étoile Be et l'augmentation du flux de masse qui forment l'Environnement Local Stellaire discuté largement dans les livres de V. Doazan sur les étoiles Be, et de R.N. Thomas sur une plus large variété d'étoiles à raies d'émission. Ils souhaitent que ce genre de résultats puissent former les bases phénoménologiques pour la compréhension de l'aérodynamique des étoiles en tant que système thermodynamique ouvert — mais non-linéaire. Ils espèrent utiliser ces études particulières d'étoiles particulières pour mettre au point le développement d'études plus larges sur des groupes d'étoiles sélectionnés grâce à des programmes d'observations spatiale et au sol, en collaboration avec plusieurs observatoires récemment orientés (voir note ci-après, page 37).

d) *Etoiles à spectre infra-rouge intense (étoiles du programme IRAS)*. Grâce à l'accès aux données du satellite IRAS, dans le cadre des préoccupations extragalactiques du L.A.T. (voir ci-après, VI b), des travaux ont été menés sur les étoiles du catalogue IRAS (P. Mérat, M. Geskis). Les cartes IRAS peuvent être comparées à des cartes de l'Atlas du Mont Palomar bleues et rouges, en des régions du ciel pour lesquelles (grâce aux travaux de l'équipe

de W. Becker) des observations extensives de magnitudes d'étoiles en deux couleurs et allant de 9 à 18 magnitudes sont disponibles et peuvent servir de références. On a donc entrepris les identifications des objets IRAS et la détermination de leurs magnitudes bleue et rouge. Pour déterminer ces magnitudes une méthode (comparable à celle de King) de microphotométrie suivie de planimétrie a été développée. Ces résultats seront utilisés dans l'étude des objets de nature stellaire observés par le satellite IRAS.

e) *Photométrie stellaire absolue*. J.-C. Pecker, en collaboration avec l'équipe de Roger Peyturaux (qui dirige l'ensemble de ces travaux, à l'I.A.P. et au Pic du Midi), participe à ce programme systématique d'observations. A l'aide d'un télescope construit par R. Peyturaux dans ce but, et équipé d'une étoile artificielle « fabriquée » avec un bon corps noir, la campagne d'observation d'étoiles brillantes a commencé, en octobre 1984, puis en mai 1985.

III. *Théorie du transfert de rayonnement dans les milieux gazeux*

a) *Problèmes de redistribution en fréquence de l'énergie dans la formation des raies spectrales*. On a noté que le séminaire de cette année a traité de ces problèmes. Plusieurs chercheurs du L.A.T. ont concentré leurs efforts dans cette direction.

Christian Magnan, rappelons-le, a proposé l'an dernier une approximation permettant de tenir compte de façon très simple du couplage entre les fonctions de distribution des vitesses atomiques et les répartitions hors équilibre des atomes dans les sous-niveaux. Comme cela se produit souvent dans la formulation initiale d'un problème, certains points soulevés par l'introduction de cette approximation n'étaient pas entièrement clairs. Une correspondance avec Ivan Hubeny a permis d'y remédier, de même que la présentation d'un séminaire sur la question qui a nécessité une remise en forme de la question. On a pu d'une part justifier l'approximation de l'aide d'arguments mathématiques convaincants et d'autre part l'énoncer clairement en termes physiques. De ce dernier point de vue, l'approximation revient à remettre collectivement en équilibre les vitesses atomiques des atomes, après que ceux-ci aient subi une transition radiative quelconque.

Signalons enfin à ce propos que le formalisme utilisé par C. Magnan, basé sur la notion intuitive (et, disons-le, incorrecte d'un point de vue strictement théorique) de sous-niveaux, permet de traiter sans difficulté des chaînes de transitions radiatives, dans lesquelles se succèdent arbitrairement émissions ou absorptions. On généralise ainsi la notion de fonction de redistribution, dans la ligne des travaux de Hubeny et al., au delà du seul cas absorption-réémission, et surtout on donne les formules numériques permettant des calculs concrets.

E. Simonneau a poursuivi et étendu ses recherches dans ce domaine, et s'est préoccupé des incidences d'une *discussion précise de la cinétique globale des atomes excités*.

Pour décrire les coefficients d'absorption et d'émission dans le repère du laboratoire, tels qu'ils interviennent dans l'équation de transfert, il faut connaître la fonction de distribution de vitesses des atomes dans chaque niveau d'excitation. Ce problème se complique extraordinairement dès que la durée de vie des atomes excités est grande et que le libre parcours moyen de ces atomes devient donc comparable aux grandeurs caractéristiques qui décrivent la variation des densités respectives. Il est nécessaire de résoudre des équations cinétiques pour étudier ces fonctions de distribution de vitesses. Si, dans ces équations cinétiques, nous négligeons le terme de « streaming », c'est-à-dire le flux des atomes excités, nous retrouvons (au moins pour l'atome à deux niveaux) la théorie classique de la redistribution.

J. Borsenberger, J. Oxenius et E. Simonneau ont posé ce problème cinétique général pour le cas d'un gaz d'atomes à deux niveaux d'énergie, où il existe un gradient dans la densité des atomes excités, dû seulement à des effets du transfert hors-ETL. Le problème est donc fermé et autoconsistant. Ainsi, l'échelle caractéristique de variation des propriétés dépend de paramètre d'écart à l'ETL, qui, à son tour, dépend du nombre de collisions inélastiques (électroniques) et de l'opacité (ou libre parcours moyen des photons). Le libre parcours moyen des atomes excités dépend de sa vie moyenne et du nombre de collisions élastiques. Nous décrivons les caractéristiques du milieu par les rapports entre ces paramètres fondamentaux. Ce problème a été déjà discuté (mais non traité numériquement) par J. Oxenius (1979), dans le cadre de l'approximation de la diffusion pour le mouvement des atomes excités. Ainsi, ils ont écrit une équation cinétique décrivant le mouvement des atomes ; cette équation qui, évidemment, est couplée à celle de transfert. Elle a été traitée numériquement.

Dans un premier article, d'une série « Resonance line transfer and transport of excited atoms », après avoir écrit toutes les équations qui interviennent sous une forme non-dimensionnelle, les auteurs ont fait l'analyse formelle des deux types de transport. Ils ont mis en évidence tous les cas limites qui peuvent intervenir dans le problème ; le transfert non-ETL classique pour les photons est un de ces cas limites où la distribution de vitesses des atomes excités correspond à celle de l'équilibre (Maxwell). Ils ont aussi traité le problème complémentaire : supposer le rayonnement en équilibre local à la température d'excitation, et en déduire la distribution de vitesses des atomes excités. De même, ils ont trouvé la forme sous laquelle les différents paramètres caractéristiques interviennent dans la fonction de distribution des vitesses. De plus, contrairement à ce qui se passe pour le transport des photons, deux cas extrêmes peuvent se présenter pour le transport des particules. Ces deux

cas, non triviaux, correspondent aux conditions aux limites : a) destruction (échappement libre, absorption) ; b) réflexion « optique ».

Cette étude a évidemment, supposé un grand effort de calcul analytique, mais elle a permis de mettre en évidence les aspects fondamentaux du problème du transfert, et donc de le voir sous un point de vue plus large. Le cas général, où interviennent les deux types de transport, sera une combinaison *non linéaire* de ces deux cas limites, qui ont été étudiés physiquement.

Pour ce cas général, tous les résultats numériques voulus sont obtenus. Dans une première analyse, ces résultats confirment l'importance des effets non-locaux, pour certaines valeurs des rapports entre les paramètres caractéristiques qui décrivent le système.

Ces résultats sont :

- la distribution des photons $I(v, n, r)$ solution de l'équation de transfert ;
- la fonction de distribution de vitesses des atomes excités $f_2(v, r)$ solution d'une équation cinétique ;
- le coefficient d'émission $n_2(r) \psi(v, r)$ qui dépend de $f_2(v, r)$;
- les moments de ces distributions : $J(v, r)$ et $H(v, r)$ pour les photons et $n_2(r), u_2(r) = \langle v(r) \rangle$ pour les atomes excités.

La suite de ce travail consiste en une description mathématiquement simple servant de guide vers l'exposition et la compréhension du problème. Cette approximation correspond à un modèle à *deux* fluides, pour l'intensité ainsi que pour les atomes excités. Cette description simple ne peut évidemment être qu'une première approximation qualitative, où les échelles caractéristiques interviennent comme exposants dans des expressions comportant une seule exponentielle. Borsenberger, Oxenius et Simonneau ont pu ainsi justifier qualitativement la forme, et la variation en fonction des grandeurs caractéristiques, des résultats obtenus précédemment. Le troisième volet de la série d'articles en cours décrira ces résultats généraux.

b) *Atmosphères sphériques*. Monique Gros (en collaboration avec C. Magnan) a continué son travail de recherche dans le domaine de l'étude du transfert de rayonnement dans les atmosphères sphériques étendues. Rappelons que l'objectif de cette étude est le calcul de l'émission dans les continus de Balmer et Paschen de certains objets, intermédiaires par leur structure entre les photosphères stellaires et les nébuleuses planétaires. Ces chercheurs en sont maintenant arrivés au point où les différentes parties du « code » numérique sont utilisables : dans ce programme, sont donc abordés les points suivants :

- résolution des équations d'équilibre statistique pour un atome à 5 niveaux ;

— résolution de l'équation de transfert pour toutes les transitions atomiques par la méthode dite « d'addition de couches » ;

— représentation par paramétrisation de la géométrie de l'enveloppe considérée.

Des vérifications de la qualité du « code » ont été effectuées dans des situations simplifiées, où des solutions analytiques sont disponibles (cas linéaire). Ces résultats seront utilisés pour initialiser le calcul dans le cas le plus général.

c) *Formation des raies en présence de turbulence.* L'une des préoccupations majeures de C. Magnan demeure la prise en compte correcte des vitesses non thermiques dans les problèmes de transfert. Il a proposé un formalisme original, basé sur la méthode d'addition de couches, qui permet d'inclure les vitesses aléatoires, c'est-à-dire la turbulence. Le formalisme présente de nombreux avantages sur les méthodes proposées par d'autres chercheurs. Il reste notamment beaucoup plus près de la réalité physique et se prête mieux à toutes sortes d'applications pratiques.

Le cas ETL est traité de façon exacte, y compris dans un milieu inhomogène. Le cas hors ETL est décrit, quant à lui, à l'aide d'une approximation qui convient dans tous les cas astrophysiques. Pour l'instant, le travail s'est limité au développement du formalisme (la plupart des formules obtenues sont d'ailleurs données pour la première fois) mais il pourrait se prolonger sans doute facilement par des calculs numériques.

IV. *Les étoiles : systèmes ouverts, à la thermodynamique non linéaire et hors de l'équilibre*

Le travail de R.N. Thomas a continué dans ce domaine essentiellement à partir d'un point de vue « empirique-théorique ». La série de monographies C.N.R.S.-N.A.S.A., organisée par R.N. Thomas en collaboration avec S.D. Jordan de la N.A.S.A., a pour but de rassembler les meilleurs travaux d'observations modernes pour chaque thème. La série d'ateliers de Trieste, organisée par R.N. Thomas en collaboration avec R. Stalio à Trieste, regroupe périodiquement les personnes et les idées, autour du contenu des monographies, pour en extraire une première considération. La monographie écrite par R.N. Thomas, quatrième de la série, est un rapport évolutif sur ce que l'on connaît des modèles de structure des atmosphères stellaires. L'article de Mihalas montre le succès de la monographie : (a) « lecture indispensable pour tout étudiant sérieux en atmosphères stellaires » ; (b) « démontrant qu'aucune théorie actuelle ne prévoit, ou ne représente, de schéma de structure d'atmosphère des étoiles observées » ; (c) « le livre aura un impact profond sur le travail à venir sur les atmosphères stellaires » ; (d) « dans le passé,

Thomas a manifesté le don d'avoir généralement raison » — (dans ses analyses) — « même pour des causes fausses » — (telles que Mihalas les comprend) —.

Note : Les paragraphes ci-dessus II et IV concernent notamment les recherches et activités du professeur R.N. Thomas. M. Thomas va quitter le L.A.T. à la date du 1^{er} octobre 1985, après une douzaine d'années au sein du Laboratoire, au cours desquelles il a notamment occupé, pendant deux ans, une chaire de Professeur au Collège de France (chaire d'Etat pour Professeurs étrangers). Je tiens à remercier le professeur Thomas d'avoir fait bénéficier mon laboratoire de sa présence riche et de sa personnalité scientifique puissante et féconde.

J.-C. P.

V. *Physique relativiste des milieux astrophysiques*

R.A. Krikorian a continué, en collaboration avec M. Kichenassamy, l'étude de certaines questions relatives au transfert du rayonnement en relativité restreinte et en relativité générale. Leur activité s'est concentrée sur l'obtention de l'équation de transfert, dans un milieu dispersif, en relativité générale. Cette équation relativiste de transfert a été établie à partir de la formulation, en relativité générale, de la théorie hamiltonienne de l'optique géométrique dans un milieu dispersif et de l'équation de Liouville correspondante. Les applications de cette équation font l'objet de nouvelles recherches, en cours de développement. Ce travail a été accepté à Physical Review D.

VI. *Recherches extragalactiques*

a) *Noyaux actifs des galaxies (régions émissives)* (Simone Dumont, avec Suzy Collin-Souffrin et Monique Joly de l'Observatoire de Meudon). Ce programme commencé il y a plusieurs années, s'est poursuivi par la mise au point et l'exploitation (actuellement) d'un code destiné plus particulièrement à l'étude des milieux optiquement très épais, chauffés par une source continue non-thermique de rayonnement X-dur. Il a été nécessaire de traiter correctement le transfert du rayonnement dans les raies et le continu, de faire le bilan radiatif... La contribution de S. Dumont a porté sur le transfert du rayonnement et le calcul des taux de gains et pertes dans les continus de l'hydrogène. Deux articles sont en préparation. L'importance de ce travail est de montrer que, même en présence d'un spectre X intense, un simple bilan radiatif ne permet pas d'expliquer les spectres observés.

Au cours de ce travail S. Dumont et S. Collin-Souffrin ont obtenu une méthode approchée et rapide pour le calcul d'un modèle en équilibre hydrostatique et l'ont testée avec un modèle solaire.

b) *Travaux de nature statistique sur les galaxies actives* (S. Dumont et J.-C. Pecker avec S. Collin-Souffrin, M. Joly, J.-L. Masnou, L. Nottale,

H. Sol, de l'Observatoire de Meudon). La littérature sur les quasars contient une énorme quantité de données observationnelles diverses peu exploitées sur le plan statistique. Réunir ces données dans des fichiers exploitables est un premier travail, en voie d'achèvement. S. Dumont et J.-C. Pecker construisent le fichier « variabilité optique » qui contient actuellement les mesures de la magnitude B d'une cinquantaine d'objets observés pendant plusieurs années. Les autres données : radio, X, raies sont réunies par S. Collin-Souffrin, M. Joly, J.-L. Masnou, L. Nottale, H. Sol. Nous comptons étudier ainsi les relations entre les phénomènes radio, optiques et X ; l'influence de l'inclinaison de l'axe de l'objet central ; les paramètres qui conditionnent les spectres de raies...

c) *Exploitation des données IRAS*. Grâce à la collaboration qui a été entreprise par le L.A.T. avec le Professeur S. Pottasch (Université de Groningen), notre laboratoire a entrepris l'étude des galaxies IRAS, *a priori* siège de formation stellaire et objets actifs. Ce travail, à l'I.A.P., s'est déroulé dans le cadre d'une équipe commune au L.A.T. et à l'I.A.P., composé de M. G. Debève, M. Dennefeld (I.A.P.), H. Karoji, P. Mérat (L.A.T.) et de visiteurs étrangers (N. Ukita, bientôt K.C. Sahu), et de jeunes stagiaires préparant respectivement leur thèse et leur D.E.A. (P. Belfort, M. Geskis).

Un premier effort, non limité aux galaxies, a abouti à la mise sur ordinateur des quelques 250 000 sources discrètes observées dans les quatre bandes spectrales infrarouges 12 microns, 25 microns, 60 microns et 100 microns des images de 98 % de la sphère céleste enregistrées par l'intermédiaire du Satellite IRAS (voir ci-dessus II).

Des observations au sol des sources IRAS sont nécessaires : d'une part, elles ont été poursuivies à l'ESO par M. Dennefeld de l'I.A.P., et ne sont pas couvertes par ce rapport ; d'autre part dans le domaine radioastronomique millimétrique, H. Karoji a obtenu du temps du télescope au « 45 mètres » millimétrique de Nobeyama (Japon), et a donc fait des observations (février-mars 1985) dans la raie de la molécule CO (2,6 mm) pour les galaxies IRAS. D'autre part, du temps d'observation au V.L.A. (Very Large Array, New Mexico, U.S.A.) a été attribué à l'équipe, et les cartes en 20 cm ont été obtenues pour 4 galaxies IRAS. Les analyses de ces données radio-astronomiques sont en cours.

VII. *Cosmologie*

M. Parviz Mérat a poursuivi le développement d'un modèle « supersymétrique » d'Univers. L'intérêt de ce modèle basé sur l'extension complexe G_2^c , du groupe de Lie exceptionnel G_2^c , provient du fait que G_2^c est le plus petit groupe exceptionnel qui a, entre autres sous-groupes maximaux, le groupe

$S_1(2, c)$ ou $O S_1(2, c)$. Or $S_1(2, c)$ est le groupe de spin correspondant au groupe de Lorentz. Ceci permet donc de construire un modèle qui contient, naturellement et sans addition, l'espace-temps Minkowskien. Un autre avantage du groupe G_2^c c'est qu'il appartient à la chaîne $SO(8, c) \supset SO(7, c) \supset G_2^c$. Ceci nous permet de remonter à la 7-sphère compacte $S^7 = SO(8)/SO(7)$ ou encore à la 7-sphère non-compacte ${}_4S^7 = SO(4, 4)/SO(3, 2)$. Ces deux espaces se distinguent parmi les espaces pseudo-Riemanniens irréductibles, simplement connexes, et globalement symétriques, possédant un parallélisme absolu cohérent. Ceci semble être une condition importante dans un modèle physique. Aussi la géométrie correspondante à ${}_4S^7$ et ${}_4S^7$ sont soumis au principe de trinité de Cartan.

D'autre part avec $SO(8, c)$ on reste toujours dans un modèle où le spin reste égal ou inférieur à 2 et donc on ne rencontre pas de difficultés de couplage avec la gravitation.

Dans le domaine de la cosmologie ce modèle supersymétrique donne une théorie de supergravité avec constante cosmologique.

Par ailleurs, Serge Depaquit a consacré son activité à l'étude des implications cosmologiques des observations extragalactiques. Après sa publication, une étude relative à la distribution des quasars en fonction de leur décalage spectral (réf. 5) a été complétée par l'analyse de divers échantillons de quasars (complets, optiques, X, etc.). Dans la même perspective de recherche, l'incidence des effets de la sélection observationnelle sur la distribution des raies d'absorption des quasars a fait l'objet d'une étude.

Parallèlement et en coopération avec H. Arp, une attention particulière a été portée aux associations possibles quasars/galaxies (Arp), quasars/amas (Arp), quasars/superamas (Arp, Oort, de Riffer).

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

[1] C. BERTOUT, C. LEITHERER, O. STAHL, B. WOLF, *Infrared studies of early-type stars in OB associations, the Temperature and density distributions in the stellar wind*, *Astron. Astrophys.*, **144**, 87, 1985.

[2] C. BERTOUT, *The stellar content of nearby clouds - T Tauri stars, in Proceedings of the I.A.U. Eighth European Regional Meeting*, Toulouse, 1984, sous presse.

[3] 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, 1984, sous presse.

- [4] J. BOUVIER, C. BERTOUT, *Rotation and Activity in T Tauri stars, the ESO Messenger*, **39**, 33, 1985.
- [5] S. DEPAQUIT, J.-C. PECKER, J.P. VIGIER, *The redshift distribution law of quasars revisited*, *Astron. Nachr.*, **306**, 7, 1984.
- [6] V. DOAZAN, R.N. THOMAS, *Variability of Mass-flux in Be stars*, *Hvar Obs. Bull.*, **7**, N° 1, 97, June 1984.
- [7] V. DOAZAN, R.N. THOMAS, *Possible Identifying Characteristics of Be Stars*, *Proceedings of 4th European I.U.E. Conf.* ESA SP-218, p. 297, mai 1984.
- [8] V. DOAZAN, G. SEDMAK, R. STALIO, R.N. THOMAS, *An Episodic Red-Wing Structure of Si IV, 1394, in γ Cas*, *N.A.S.A. Goddard I.U.E. Workshop*, avril 1984.
- [9] S. DUMONT, S. COLLIN-SOUFFRIN, *Rapid non-L.T.E. Calculations of Balmer Lines and Hydrogen Ionization : The Solar Case* ; *Astron. Astrophys.*, **144**, 245, 1985.
- [10] C. FANG, Z. MOURADIAN, G. BANOS, S. DUMONT, J.-C. PECKER, *Structure and Physics of Solar Faculae. IV. Chromospheric Granular Structure*, *Solar Physics*, **94**, 61, 1984.
- [11] C. LEITHERER, C. BERTOUT, O. STAHL, B. WOLF, *The cool wind of the B hypergiant cygnus OB 2 N° 12 in the infrared*, *Astron. Astrophys.*, **140**, 199, 1984.
- [12] C. LEITHERER, B. WOLF, C. BERTOUT, *Infrared energy distribution of OB stars with mass-loss*, *Mitt. Astron. Ges.*, **60**, 302, 1984.
- [13] C. MAGNAN, *Redistributions Functions for Astrophysical Problems*, *Astron. Astrophys.*, **142**, 117, 1985 a.
- [14] C. MAGNAN, *Line Formation in the Presence of Turbulence*, *Astron. Astrophys.*, **144**, 186, 1985 b.
- [15] 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*, sous presse.
- [16] J.-C. PECKER, *Les oscillations du Soleil et des étoiles*, *Comptes Rendus de l'Acad. des Sciences, La vie des Sciences*, tome 1, N° 3, p. 199, avril 1984.
- [17] J.-C. PECKER, *Sous l'étoile Soleil*, Fayard, 1984.
- [18] J.-C. PECKER, *L'Univers*, *Encyclopédie philosophique*, Presses Universitaires de France, sous presse.
- [19] J.-C. PECKER, *La Nature de l'Univers*, *Encyclopaedia Universalis*, Symposium, 1985.
- [20] J.-C. PECKER, *Histoire de l'Astronomie (XX^e siècle)*, Unesco, History of Mankind, sous presse.

[21] J.-C. PECKER, *Vistas on Stellar Atmospheres, Proc. of the Ronald Giovanelli coll.*, Sydney, sous-presse.

[22] E. SIMONNEAU, *Non local effects on the redistribution of resonant scattered photons*; Proc. of the Theory Workshop on spectral line formation, Trieste, septembre 1984, sous presse.

SÉMINAIRES, CONFÉRENCES ET MISSIONS

Quatrième conférence européenne de l'I.U.E. à Rome, mai 1984 (R.N. THOMAS).

Atelier sur les problèmes de transfert radiatif dans les enveloppes circumstellaires, Ile d'Yeux, juin 1984 (C. BERTOUT, G. DEBÈVE, C. MAGNAN, M. GROS, J.-C. PECKER).

« Solar Terrestrial Prediction Workshop » à Meudon, du 18 au 22 juin 1984 (J.-C. PECKER).

Monique GROS a participé à l'Université d'Été d'Astronomie à Formiguières dans les Pyrénées Orientales, du 4 au 13 juillet 1984. Cette Université a pour objectif de donner aux enseignants le goût et la capacité d'assurer une formation à la pratique scientifique, aussi bien théorique que pratique, par l'astronomie (et l'astrophysique).

25^e Conférence Internationale d'Astrophysique à Liège, « Theoretical Problem in Stellar Stability and Oscillations » du 10 au 13 juillet 1984 (J.-C. PECKER).

Workshop on « Solar Chromospheric Diagnostics and Heating » à SacPeak, du 13 au 17 août. R.N. THOMAS a participé à cet atelier en tant que coordinateur de la section « Non Radiative Heating » et a rédigé deux rapports à ce sujet qui sont sous presse (ed. B. Lites).

Third Trieste Workshop : « Relation Between Stellar Atmospheric Non-radiative Heating and Mass-Loss » du 19 au 26 août à Sacramento Peak. R.N. THOMAS fait parti du comité d'organisation de ce 3^e Workshop.

R.N. THOMAS a été invité par le National Observatory of Mexico, à St. Philippe (Californie), pour donner une conférence « Stars as Open Thermodynamic Systems » suivie d'une discussion (26 août - 1^{er} septembre 1984).

E. SIMONNEAU a participé à un atelier sur les « Aspects théoriques dans la formation des raies spectrales » à Trieste en septembre. Une série de trois articles sous le titre générique « Resonance Line Transfer and Transport of Excited Atoms » est en cours de rédaction.

8^e Assemblée Régionale Européenne de l'U.A.I., à Toulouse du 17 au 21 septembre 1984 (C. BERTOUT, S. DUMONT, J.-C. PECKER).

« European Solar Physics section of the European Physical Society » à Nordwijk du 30 septembre au 4 octobre 1984.

« The Ron Giovanelli Commemorative Colloquium » à Sydney du 26 au 29 novembre 1984, sur le thème « Past Progress and Future Developments in Solar and Stellar Physics » (J.-C. PECKER).

Journée de travail sur les jets moléculaires bipolaires, Grenoble, 29 novembre 1984 (C. BERTOUT).

Symposium Alfred KASTLER du 9 au 11 novembre 1984, communication de J.-C. PECKER : « Le pompage optique naturel dans le milieu astrophysique ».

Réunion à l'Île d'Yeu du Comité Exécutif de l'Union Astronomique Internationale en septembre 1984 (J.-C. PECKER).

Conférence donnée par J.-C. PECKER, sur « Les Confins de l'Univers », le 12 décembre 1984 à Bordeaux.

Dans le cadre de l'Université Inter-Ages de Versailles, J.-C. PECKER a donné deux conférences « Aspect du Soleil », le 16 janvier 1985, et « Exploration de l'Univers », le 23 janvier 1985.

Participation de J.-C. PECKER à la conférence « Défense de l'homme » sur le thème « de la bête à l'homme », le 21 janvier 1985.

Séminaire donné par J.-C. PECKER : « L'exploration passive des milieux astrophysiques », à Verrières-le-Buisson, le 31 mai 1985.

J.-C. PECKER a présenté, dans les Nouvelles de l'Académie des Sciences : un compte rendu du Colloque Franco-Japonais « Phénomènes actifs dans l'atmosphère des étoiles » (avril-mai 1984, p. 9) ; l'ouvrage de R.N. THOMAS : « Stellar Atmospheric Structural Patterns », C.N.R.S.-N.A.S.A. (avril-mai 1984, p. 8) ; l'ouvrage de Vladimir Kourganoff : « Quelle Ecole ? », ed. Scarabée et Co., le 11 mars 1985.

Missions d'observations : à La Silla (Chili), faites par C. BERTOUT, du 1^{er} au 7 juillet, du 10 au 14 août et du 9 au 2.

R.N. THOMAS à Madrid (I.U.E.) en octobre, et à Trieste en décembre 1984.

H. KAROJI à Nobeyama (Japon) en février-mars 1985.

ACTIVITÉS DIVERSES

C. BERTOUT encadre de jeunes chercheurs : MM. PROPHÈTE et MARTIN pour leur stage de fin d'études de l'École Polytechnique : « La théorie de

l'expansion des restes de supernovae peut-elle s'appliquer aux enveloppes d'étoiles T Tauri ? ». Ce travail continue en 1985 dans le cadre de l'option de formation par la recherche de l'E.N.S.T.A., et va donner lieu à publication. M. J. BOUVIER et M^{lle} S. CABRIT pour leur thèse de Doctorat (nouvelle formule), qui étudient respectivement le rôle du magnétisme dans l'activité des étoiles T Tauri, et la formation des raies de CO dans les écoulements moléculaires bipolaires.

Christian MAGNAN a poursuivi la direction du travail de thèse de Monique GROS. A ce stade, les différents modules du calcul général ont été testés séparément avec succès et il reste à assembler ces éléments pour constituer le programme définitif.

Il est également important de noter que nombre de chercheurs se préoccupent d'activités de plus large popularisation, soit par leur plume soit en participant à leur organisation. Dans cet ordre d'idées, S. DUMONT est rédactrice en chef de l'« Astronomie », bulletin mensuel de la Société Astronomique de France. J.-C. PECKER, avec l'aide permanente de S. PERRET, dirige l'édition d'un ouvrage collectif chez Flammarion, « Astronomie Flammarion », à la rédaction duquel ont participé (entre autres) S. DUMONT et C. MAGNAN. J.-C. PECKER a continué à présider le Comité d'Organisation du Musée des Sciences, des Techniques et des Industries de La Villette, et, dans ce cadre, à assumer diverses responsabilités. Il préside le Comité d'Astronomie du Palais de la Découverte. De même nature est sa participation au Haut Collège de Philosophie, au C.E.S.T.A., ou à la Fondation de France, ainsi que son appartenance au comité de lecture de diverses revues, comme la Vie des Sciences, l'Argonaute, et au conseil de l'Association des Ecrivains Scientifiques. Il a été élu membre de la C. Nationale pour l'Unesco (Sciences) et coopté comme membre de la commission permanente de cet organisme.

Publications diverses

J.-C. PECKER, *Une belle vieille nouveauté (Les aventures de la raison)*, *Le Monde*, 22-23 juillet 1984, p. 11.

— *Astronomia* « *Quanta scienza c'è nell'astrologia?* », sept. 84, N° 36, p. 14.

— *Journal des Astronomes Français*, « *François Link* », 22, décembre 1984.

— *L'astrologie ça n'existe pas*, *Paris-Match*, décembre 1984, p. 21.

— *L'étoile miraculeuse existe*, *Vital*, janvier 1985, 52, p. 92.

— *Les horizons de la Recherche, Le Matin*, mars 1985, p. 12-13.

— *Il faudrait planifier à long terme la recherche, Le Matin*, 25 avril 1985, p. 18.

— *L'astrologie est une drogue sans valeur, Les cahiers rationalistes*, mars 1985, 403, p. 192.

DISTINCTIONS, NOMINATIONS

J.-C. PECKER a été désigné comme « Personnalité de l'année 1984 ».