

Astrophysique théorique

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

Cours :

Cosmologie observationnelle. 3. Quasars et Galaxies Actives

Au cours des années 1980-81 et 1981-82, nous avons examiné de façon critique les divers arguments, tirés de l'expérience physique et de l'observation astrophysique, ayant des implications cosmologiques. Nous avons groupé l'exposé de ces arguments et la discussion de leurs implications, sous le terme « cosmologie observationnelle » qui, en français du moins, est un néologisme, mais qui a le mérite d'insister sur le fait qu'aujourd'hui, et de plus en plus, la cosmologie, science de l'univers dans son ensemble (observé, observable, et à jamais inobservable) ne peut se passer d'un recours constant à l'observation de phénomènes divers, y compris de ceux qui appartiennent à l'expérience quotidienne.

Dans l'univers observé, les observations indiquent qu'à l'intérieur d'un très large volume entourant la Terre, les propriétés de l'Univers, sans être homogènes ou isotropes pour autant, n'impliquent aucune différence (ni statistique, ni physique) entre les propriétés des objets proches de nous, et celles des plus lointains. En d'autres termes, les *galaxies* les plus lointaines de nous que nous puissions observer ne sont ni plus ni moins nombreuses que celles qui nous entourent, ni de nature physique différente ; la même proportion de galaxies des différents types, la même densité en amas de galaxies semblent bien caractériser l'ensemble de l'univers observé ; si l'univers évolue, ces galaxies propres et lointaines nous en fournissent une vision locale instantanée, — rien de plus.

Mais l'univers des *galaxies* est de dimension réduite. Si le décalage spectral $z = \Delta\lambda/\lambda = v/c$ est une mesure de la distance, alors les galaxies les plus lointaines pour lequel on puisse la déterminer sont encore assez proches ; elles ont un z de l'ordre de 0,5 ; elles se trouvent donc à moins de 3 000 Mpc (en donnant au rapport de Hubble la plus petite des valeurs possibles, c'est-

à-dire $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). Or, 3 000 Mpc, c'est à peu près dix milliards d'années de lumière. C'est un volume énorme qui semble donc n'être affecté d'aucune évolution sensible : les objets que la lumière a quittés voici dix milliards d'années ne semblent, malgré l'apparente expansion de l'univers (dont la durée, déduite des observations, excède à peine ce temps), ne différer ni en densité, ni en nature, de ceux que la lumière a quitté voici seulement quelques millions d'années (galaxies de l'amas local).

Certes, cette remarque surprenante n'est qu'imparfaitement fondée. Les dénombrements de galaxies lointaines sont affectées d'incertitudes diverses, tout comme l'étude du spectre de leur faible lumière. Sans doute les observations sont-elles moins probantes que ce que nous venons de leur faire dire : l'absence d'évolution est attestée avec une précision d'autant moins bonne que nos observations sont plus lointaines.

Aussi le monde astronomique a-t-il accordé une grande importance à l'étude d'objets de décalage spectral très élevé : la découverte des « *quasars* », dans les années 1960 *et sq.* a permis d'atteindre des valeurs de $z = 4$. L'étude statistique et physique de ces objets devrait permettre, peut-être, de mettre en évidence une évolution physique de l'univers. On notera qu'avec la valeur de H_0 utilisée ci-dessus, et si z est, pour ces objets, une mesure de la distance (ce qui est, ici, problématique, et sera discuté ci-après), les quasars de $z = \Delta\lambda/\lambda_0 = 4$ sont à une distance de $18 \cdot 10^9$ années de lumière (après correction relativiste) : dans l'hypothèse où les quasars sont à la distance que leur assigne leur z , le volume qu'ils permettent d'explorer est donc, en gros (le calcul dépend de la courbure de l'univers), 6 fois plus important que le volume exploré grâce à l'étude des galaxies.

Cette remarque justifie à elle seule le titre du cours de cette année, qui terminera (provisoirement) notre examen des arguments physiques et astronomiques de la construction cosmologique.

I. *Les quasars, les galaxies actives : la découverte*

Les découvertes relatives aux galaxies actives et aux quasars se sont succédées en vérité depuis 1943, mettant successivement en évidence des phénomènes « actifs » dans le domaine visuel, dans le domaine radioastronomique, et récemment dans le domaine des rayons X et gamma. La diversité des méthodes, et les effets de sélection impliqués par cette diversité ont fait conduire à la définition d'objets divers, dont l'étude ultérieure a montré qu'ils avaient de nombreuses ressemblances.

En 1943, Seyfert découvre, dans le spectre de six galaxies (dont NGC 4151 et NGC 1275), de nombreuses raies d'émission, produites dans un « noyau » très brillant. Ces raies larges ($7\,000$ à $9\,000 \text{ km s}^{-1}$ dans les ailes) sont

identifiées comme des raies interdites des spectres [Ne III], [S II], [O III], [N I], [Fe VII], Ca VI, [O I], [N II], [S II], et des raies permises du spectre de l'hydrogène (raies de Balmer) et de l'hélium, neutre (5 876 Å) et ionisé (4 686 Å). Elles sont superposées au spectre de la « galaxie sous-jacente », spirale normale. Elles indiquent l'existence d'un noyau quasi-stellaire, où les conditions physiques ressemblent (de loin !) à celles qui règnent dans les régions H II, et où des vitesses importantes (très supérieures à la vitesse d'échappement) animent les gaz émissifs.

En 1958, au Congrès Solvay, Ambartsumian tire de ces observations, complétées depuis Seyfert par des études dans le domaine radioastronomique (NGC 1275 n'est autre que la radiosource Per A, l'une des plus intenses du ciel), des conclusions très claires et très suggestives : tout plaide, selon cet auteur, pour l'existence dans le petit volume du « noyau », d'énergie « positive » ; ceci signifie l'existence quasi continue d'éjections de matière (l'énergie qui les anime compense l'énergie négative que leur confère la gravitation). Les jets observés au voisinage de radiosources comme Vir A (la galaxie elliptique M 87) confirment cette description des « noyaux actifs » de galaxies, présumées être de jeunes galaxies en formation.

Zwicky, Arp ont attiré l'attention sur les jets de matière observables (dans le domaine photographique) qui s'étendent souvent entre des galaxies associées, et qui, trop fins pour cela, ne peuvent sans doute pas être le résultat d'effets de marée.

Même dans des galaxies « banales » comme M 31 ou notre propre Galaxie, des noyaux embryonnaires éjectent de la matière de façon continue.

Revenons aux observations radioastronomiques. Reber (1944), Hey, Parsons, Phillips (1946) découvrent la première source radio extragalactique : Cyg A. Cette source est certainement très variable, et ceci prouve que les régions radio-émissoires sont de petite dimension. Bolton et ses collaborateurs (1949) découvrent de nouvelles sources, les unes galactiques (Tau A, — la nébuleuse du Crabe) et les autres extragalactiques (Vir A, — M 87 = NGC 4486 —, et Cen A, — NGC 5128 —, deux galaxies elliptiques d'aspect d'ailleurs assez peu normal) ; sur 4 radiosources brillantes, 3 sont extragalactiques, alors que dans le domaine visuel, on observe (à l'œil nu) 2 000 étoiles pour 3 galaxies seulement (M 31 et les deux nuages de Magellan).

Le problème posé est alors l'origine du rayonnement radioélectrique. Il ne peut s'agir d'un spectre thermique. Alfvén, Ginzburg... (1950 et années suivantes) proposent d'y voir la manifestation d'un effet synchrotron, c'est-à-dire de l'émission de photons par des électrons freinés dans leur mouvement, à des vitesses relativistes (v/c de l'ordre de grandeur de l'unité), par un champ magnétique notable. Ce mécanisme exige encore l'existence de jets de matière très violents.

De nombreuses radiosources extragalactiques sont découvertes, et petit à petit, identifiées à des galaxies observées dans le domaine visible, et souvent bizarres (ainsi Baade et Minkowski ont-ils, en 1954, identifié enfin Cyg A à l'une des galaxies les plus étranges d'un amas connu : c'est, disent-ils, un « objet curieux », qui « défie toute classification »). Les clichés des objets étudiés ont des caractéristiques intéressantes, qu'il s'agisse des galaxies de Seyfert ou des radiosources : NGC 1275 (Seyfert) a une structure filamenteuse, comparable à celle de la nébuleuse (reste de supernova) du Crabe. La radiosource 3 C 273 a un jet visible intense. Une galaxie brillante comme M 82 est « active », et sans doute explosive. La radiosource Cen A (\equiv NGC 5128) a une structure complexe, à l'échelle du degré d'angle, — comme à celle de la seconde d'angle —, impliquant des éjections successives dans deux directions symétriques par rapport à l'équateur, marqué d'une ceinture de poussières particulièrement dense, de NGC 5128.

L'idée de chercher, dans le dénombrement des radiosources, des « tests » cosmologiques, apparaît bientôt (Ryle, 1958). Nous y reviendrons.

C'est à cette époque qu'intervient la découverte majeure que fut celle des quasars. Ce mot, créé en 1964 par Chiu, est un acronyme qu'il faut lire : « *quasi-stellar astronomical radio-source* ». Dès 1954, le décalage spectral de Cyg A est mesuré ($z = 0.057$). En 1960, Minkowski détermine celui de 3 C 295, radiosource identifiée à l'objet le plus brillant d'un amas de galaxies : déjà, on atteint $z = 0.46$, dépassant largement le décalage spectral de toutes les galaxies étudiées. En 1961, Matthews et Sandage identifient 3 C 48 et 3 C 273 à des objets d'aspect *stellaire*, et de décalage spectral important (respectivement 0,37 et 0,16). Greenstein et Münch en étudient le spectre ; ils mettent en évidence une enveloppe sans raies d'hydrogène ; la source elle-même a un excès d'ultraviolet. Est-ce une étoile (galactique) affectée d'un décalage spectral non dû à une récession dopplérienne ? Est-ce au contraire une galaxie lointaine ? Le spectre UV est une indication de non-thermicité de l'émission lumineuse. Le flux radio, s'il s'agit d'une étoile, est très supérieur (un facteur 10^7 !) 4 celui du soleil : ceci renforce l'impression d'un spectre non thermique.

Mais s'il s'agit d'une étoile, pourquoi ce décalage spectral ? Et s'il s'agit d'une galaxie (ou d'un objet extragalactique lointain), sa luminosité absolue est énorme, si l'on suppose que la mesure de z est une mesure de la distance. Et alors, comment expliquer cette formidable luminosité ?

Le dilemme est de taille, et nous y reviendrons en discutant la distance des quasars.

Les études de radiosources comme 3 C 273 grâce aux occultations par la Lune (Hazard, 1963) confirment leur petit diamètre apparent (inférieur à la seconde d'angle) et l'existence d'un jet, visible sur les clichés photographiques

(Greenstein et Schmidt, 1964) comparable à celui de M 87 (Vir A) observé par Baade en 1956 : Les radiosources et les quasars ont bien des ressemblances et cette constatation élimine sans doute l'hypothèse stellaire. Elle n'implique pas pour autant que le décalage spectral z soit lié à l'expansion apparente de l'univers et que la mesure de z soit une mesure de la distance.

Dans la suite de ce cours, nous tenterons de séparer clairement les propriétés des objets étudiés, quasars, galaxies de Seyfert, radiosources en deux groupes : celles qui n'impliquent aucune hypothèse sur la nature physique du décalage spectral, et celles qui impliquent que la mesure de z est une mesure (par le rapport de Hubble) de la distance.

2. Taxonomie des galaxies à noyau actif (AGN *)

La technique de découverte est un véritable moyen de classification. Les objets découverts dans le domaine radio sont, *a priori*, intenses dans ce domaine ; ceux qui n'ont pas été découverts dans le domaine radio et qui le sont dans le domaine γ ou X ont, proportionnellement, un rayonnement γ ou X plus intense. Les dix objets extragalactiques les plus brillants du ciel dans le domaine radio ne sont pas les mêmes que les objets les plus brillants dans les domaines visible, UV, ou X. Mais cette classification n'est qu'une apparence. Les galaxies à noyau actif doivent, pour mériter ce nom, présenter plusieurs caractères actifs : morphologie optique ou radio : jets ; spectres continus variables et « non-thermiques » ; raies d'émission variables ; polarisation. Les effets d'évolution peuvent affecter les classifications fondées uniquement sur la technique de découverte.

Une première classification « objective » est fondée sur l'éclat absolu du noyau actif ; elle suppose une valeur de la distance, donc l'interprétation « cosmologique » du décalage spectral.

Alors la classification permet d'ordonner les AGN, selon le tableau (approximatif) ci-après :

	Galaxies	Seyfert de type 2	Seyfert de type 1	Quasars
$\log (F_{\nu} / F_0)$				
optique	2	3,5	4,5	8
infrarouge	2	5	6	10
radio	< 1	5,5	5,5	10,5
(F_0 arbitraire)				

* Active galactic nuclei — en anglo-latin.

On voit que l'ordre est le même pour tous les domaines spectraux ; cependant les Sey 2 sont plus proches des Sey 1 dans le domaine radio qu'en IR ou dans le domaine visible.

Une classification des AGN à partir de critères indépendants de z exige la satisfaction d'au moins deux critères « classiques », auxquels il faudrait désormais ajouter les critères de la découverte dans les domaines X et gamma.

Ces critères sont les suivants :

a) *région nucléaire* plus brillante que dans d'autres galaxies de type comparable de Hubble.

Si m_G et m_N sont respectivement les magnitudes de la galaxie (sans le noyau) et de celle du noyau, $\Delta m = m_N - m_G$ est un bon critère de classification ; — Δm augmente des galaxies normales aux AGN ;

b) spectre *continu* à distribution *non-thermique* ;

c) raies *d'émission* formées dans le noyau, et d'excitation due à un spectre non thermique ;

d) *variabilité* dans le spectre continu et/ou dans le spectre de raies.

Dans son cours au Collège de France, J. Krolik (1984) a proposé une classification par « activité croissante », et classe ainsi les AGN :

« Liners » et galaxies WR	faible émission X ; raies étroites de faible ionisation dans le visible
Seyfert 2	raies d'émission étroites ; faible puissance radioélectrique (WRS)
Radiogalaxies à raies étroites, et galaxies N	raies d'émission étroites ; puissance notable dans le domaine radio (SRS)
Seyfert 1 et galaxies N	rayonnement X et UV ; raies d'émission étroites et larges ; SRS
Radiogalaxies à raies larges et galaxies N	rayonnement X et γ ; raies d'émission larges ; SRS
Quasars « standards » QSS	X, UV ; raies d'émission larges ; z élevé. Si radioémission forte (SRS) : QSR (découverts en ondes radio) ; si WRS : QSO, découverts dans le visible
Quasars de type VVO (objets très variables)	UV ; raies d'émission larges ; polarisation du continu ; variation violente du rayonnement continu ; SRS
BL Lacertae (« Blazars »)	indice spectral élevé dans le domaine X ; pas de raies fortes d'émission ; spectre continu variable et polarisé ; SRS

Cette classification met en évidence les catégories intermédiaires que l'on a dû introduire entre les galaxies de Seyfert, les radiogalaxies et les quasars dont la découverte a été décrite en 1. On notera tout particulièrement l'importance du cas extrême des galaxies de type BL Lac.

La classification d'Ozernoy (1982) est évolutive. Son paramètre est le caractère non thermique du spectre continu. Les objets à spectre thermique dominant sont constitués de la séquence : régions HII intergalactiques, — Irr 1, S, SO, E (ou séquence de Hubble) — C_1 et C_2 (galaxies massives compactes de Zwicky) ; dans cette séquence la classification est essentiellement morphologique. Lorsque la luminosité non-thermique et la luminosité thermique sont du même ordre de grandeur, la séquence morphologique va des Actives irrégulières I aux Irr II et aux galaxies N à émission nucléaire et radio, puis aux galaxies compactes bleues de Zwicky, enfin aux galaxies quasi-stellaires. Les objets où la luminosité d'origine non-thermique l'emportent vont des Markarian (à excès d'UV), aux Seyferts, aux radiogalaxies fortes (souvent doubles), aux galaxies N puis aux quasars (ou QSS). Des séquences évolutives diverses sont indiquées dans cette classification bidimensionnelle (morphologie, caractère non-thermique).

Une classification intéressante est celle de Morgan et Dreiser (1983) ; elle est purement morphologique, et permet la recherche des AGN sur les clichés. Ces auteurs distinguent les Qn (nébulaires), les Qs (stellaires) et les Qj (avec jet). Fondées sur l'importance du noyau optique, elles divisent les Qn entre 4 classes : $*N_-$ (Seyfert 1 ; type NGC 4 151) ; $*N$ (II ZwI) et $*N_+$ (I ZwI), objets compacts de Zwicky ; et $*Qn$ (QSR ; type 3 C 48). des $*N_-$ aux $*Qn$, Δm varie de 6 magnitudes.

Comme dans le domaine des étoiles, les premières classifications ont un caractère très empirique, qui peut à la rigueur permettre la découverte d'objets à mieux étudier, et ne constituent qu'un « débroussaillage ». L'avenir verra des simplifications de ces classifications, et aboutira à des classifications liées aux caractéristiques physiques des objets classés. Le nombre de paramètres peut largement excéder celui des classifications stellaires, et ce fait peut rendre ces efforts assez lents, sinon vains : mais ils autoriseront sans doute une meilleure appréhension de la nature physique des AGN et des caractéristiques de leur évolution.

On peut se demander s'il y a une continuité de propriétés spectrales des galaxies normales aux AGN : les « Liners » (low ionization narrow lines emission lines radio-sources) sont-ils, par exemple, des intermédiaires ? D'une extrémité à l'autre de la distribution, y a-t-il des cassures nettes, — ou une continuité ?

Un argument pour une cassure nette entre galaxies normales et AGN vient de l'étude de divers rapports d'intensité de raies d'émission (ainsi $[NII]/H\alpha$

et [OIII]/[OII]). Les AGN (Liners y compris) se comportent très différemment des régions HII, suggérant que le phénomène essentiel est le caractère non-thermique du rayonnement *continu* ionisant.

Réservant donc l'étude des raies pour une autre année, nous nous concentrons cette année sur l'étude du spectre continu, qui devrait suffire à nous permettre de discuter de « l'évolution » de la portion d'univers exploré, si z est une indication de la distance.

3. Propriétés du spectre continu des AGN

L'examen du spectre de divers AGN, dans l'intervalle de 16 dex qui va de $\sim 10^7$ MHz (radio) à 10^{23} Hz = 400 MeV (γ), — et au-delà —, met en évidence le caractère presque constant du produit νF_ν , (par opposition au spectre, quasiment monochromatique sur un tel intervalle, des sources thermiques simples). On définit dans une région donnée un indice spectral α par la relation $F_\nu \sim \nu^{-\alpha}$. La constatation que nous venons de faire implique que, sur l'ensemble du spectre, $\langle \alpha \rangle$ est de l'ordre de l'unité.

Mais l'examen en question met aussi en évidence la complexité de détail de ces spectres « plats ». En effet α varie (par exemple pour le quasar-type 3 C 273) de +0,5 (radio), à +1 (IR), +1,5 (visible, UV), +0,5 (X durs), +1,5 (gammas). L'interprétation non-thermique devra tenir compte de cette complexité.

Cette complexité a divers aspects : variations de α , en l'une des régions spectrales, d'un auteur à l'autre — d'une époque à l'autre ; différences très notables entre les indices spectraux, dans le domaine radio par exemple, des BL Lac, des QSR, des galaxies de Seyfert, et des radiogalaxies. On notera que l'indice $\langle \alpha \rangle$ pour une BL Lac est plus proche de 0,7 que de 1.

Dans le domaine radio, la distribution spectrale a été particulièrement bien étudiée. Elle fait apparaître aux grandes longueurs d'onde, de nombreux cas où α est supérieur à 1,2 et aux courtes longueurs d'onde des nombreux cas où α est de l'ordre de 0 à 0,25. En gros cependant, dans toutes les gammes de longueur d'onde radio, α se distribue selon une loi de Gauss ; la valeur la plus probable est 0,75 ; la largeur à mi-hauteur de la courbe gaussienne correspondante est de l'ordre de 0,25. Les spectres radio ont des aspects en vérité assez divers : on va des spectres « pentus » ($\alpha \sim 1$ sur l'ensemble du spectre radio, comme dans 3 C 47) à des spectres « plats »* ($\alpha \sim 0,3$, — comme dans 3 C 273) ; de plus la courbure de la relation $F_\nu(\nu)$ est parfois tournée vers les F_ν positifs (3 C 273), ce qui implique $\alpha_{10 \text{ MHz}} > \alpha_{100 \text{ GHz}}$, ou vers les F_ν négatifs (3 C 147,0), ce qui implique $\alpha_{10 \text{ MHz}} < \alpha_{100 \text{ GHz}}$.

* Le mot « plat » a une signification différente dans le domaine radio et dans l'ensemble du spectre.

On a tenté de représenter ces spectres radio assez complexes par la superposition de spectres de type synchrotron de caractéristiques différentes ; un nuage en expansion d'électrons relativistes est une interprétation intéressante, due à Van der Laan, de spectres complexes comme celui de la galaxie de Seyfert NGC 1275. Un cas comme celui des Liners N 1052 ou NGC 4278 (radiosources elliptiques) met en évidence quatre composantes distinctes très évidentes. Jones les interprète comme une combinaison des spectres de quatre objets : les lobes radio étendus ($20''$), aux basses fréquences ; puis un cœur ($0'',001$) de basse fréquence, où règne un champ de 510^{-4} gauss ; puis un cœur plus petit encore, de haute fréquence, où le champ atteint quelques gauss ; enfin un « jet » de très haute fréquence de quelque 10 mas (milliarc-second $\equiv 0'',001$).

Peu de spectres radio sont simples. Spangler donne comme exemple des « source synchrotron idéale » (« text book synchrotron ») le cas des quasars Q 0552 + 398 et Q 1848 + 283 ; le spectre permet la détermination précise du champ magnétique responsable du freinage des électrons.

L'étude des spectres complexes (la variation dans le temps de $\langle \alpha \rangle$ radio) met en évidence le fait que cette variation est liée à la variation différentielle du rayonnement des différentes composantes. Le cas de NGC 1275 (\equiv 3 C 84) est à cet égard très clair : entre 1967 et 1980, l'importance relative des régions étendues par rapport aux cœurs de haute fréquence a augmenté nettement.

Examinons le spectre continu dans les régions spectrales de fréquence croissante, et passons à l'*infrarouge*. Bien que le spectre thermique des poussières circumgalactiques soit clairement dominant dans de nombreux spectres d'AGN (M 82, NGC 4151, NGC 1068), il arrive que l'on mette en évidence une distribution spectrale moins pointue, caractérisant un émetteur synchrotron de faible opacité (exemple QSS 1413 + 135, $\alpha_{\text{IR}} \sim 3$ vers $10 \mu\text{m}$). Il arrive aussi (3 C 273) que le spectre ne semble indiquer la présence d'aucune source particulière d'émission en plus d'un spectre de synchrotron s'étendant du domaine radio au domaine visible. Dans les couleurs J, H, K, le spectre des Seyferts 2 et des Seyferts 1 (dans cet ordre) apparaît comme intermédiaire entre galaxies normales et QSS de petit z .

Les travaux menés par le satellite IRAS mettent en évidence le fait que le spectre des QSO culmine dans l'infrarouge lointain ($\log \nu_{\text{Hz}} \sim 12-13$) : ce domaine spectral offre donc un moyen de découverte de ces objets.

Dans le domaine *visible*, le spectre des AGN (QSS, QSO, galaxies N, BL Lac) permet une claire discrimination entre ces groupes d'objets qui se situent très différemment dans le diagramme classique *U-B*, *B-V*. Une évidente difficulté vient de ce que dans ce diagramme, les points représentatifs ne diffèrent guère de ceux correspondant aux étoiles de type O rougies par

l'absorption interstellaire par les poussières de notre galaxie. Les BL Lac et les galaxies N sont plus « rougies » que les quasars.

Une grande difficulté de ces études vient du mélange du spectre de différentes régions d'une galaxie à noyau actif. Il faut séparer le spectre du noyau ponctuel actif (spectre « non stellaire ») du spectre stellaire de la galaxie sous-jacente, particulièrement intense (spectre stellaire de type approximatif G.K) dans le domaine visible. L'existence d'absorption quasi-continue, dans ce domaine, par des petits nuages affectés d'une importante dispersion des vitesses, et absorbant les raies de Lyman, est évidente sur le spectre de quasars à grand z comme PKS 0405 + 268 et quelques autres ; cet effet perturbe les analyses dans une direction. Et elles sont perturbées dans l'autre par un excès de rayonnement vers 3 000 Å (longueur d'onde ramenée au spectre non décalé vers le rouge) : l'interprétation en est encore douteuse ; l'accumulation de raies du Fe II, mais aussi l'émission par l'hydrogène atomique, étalée par une forte dispersion de vitesses, peuvent contribuer à cette « bosse » du spectre.

Dans l'*ultraviolet*, on notera que de nombreux travaux cherchent à travailler sur des magnitudes *absolues*, une telle notion ayant de plus en plus d'implications à mesure que l'on va vers les hautes fréquences, qui véhiculent le maximum d'énergie; mais les quantités étudiées dépendent alors non seulement de z , mais de la relation entre z et le module de distance ; elles pré-supposent la connaissance du paramètre q_0 de décélération, qui intervient dans les modèles cosmologiques, par l'intermédiaire des relations très utilisées proposées par Mattig.

Quoi qu'il en soit, la magnitude dans le spectre UV continu est fortement corrélée (surtout si q_0 est de l'ordre de l'unité) avec l'intensité des raies d'émission du C IV : ceci montre que la région des raies d'émission est sensible au flux d'énergie produit dans l'UV par les régions internes responsables du spectre continu UV.

Grâce au satellite Einstein, le spectre X a été très bien étudié. La luminosité X peut être comparée à la luminosité optique (ceci n'implique rien quant à z , — sinon une correction qui dépend de z et de la valeur supposée de α). On trouve que L_X/L_0 décroît avec L_0 (L_X serait proportionnel à $L_0^{1/2}$) ; le nombre $\zeta = \log(L_X/\sqrt{L_0})$ est fortement corrélé avec l'indice $\alpha_{\text{rad-opt}}$ qui caractérise le noyau spectre du noyau dans les longueurs d'onde élevées. L'indice $\alpha_{\text{opt-X}}$ est fortement corrélé avec la luminosité optique.

Mais L_X n'est corrélé ni avec z (donc pas d'évolution se manifestant de cette façon) ni avec la luminosité radio, — malgré la combinaison de deux des corrélations suggérées ci-dessus, en raison sans doute de l'intervention d'autres paramètres, cachés dans les dites corrélations.

La luminosité X (mais, ici, attention à l'effet du z !) permet de classer les AGN : les galaxies elliptiques ont un flux absolu 10^5 fois inférieur dans le domaine X à celui des QSR, les Seyferts occupant une position intermédiaire dans l'histogramme correspondant.

On notera aussi la différence de comportement des AGN de nature différente. Ainsi les QSR « plats » sont-ils dix fois moins X-émissifs que les QSR « pentus ».

Nous avons dit que, en général, L_X n'est pas corrélé avec z . Si l'on se limite aux QSS sélectionnés par leur rayonnement X, une corrélation semble claire, ainsi que pour les Seyferts de type 1 (et de z compris entre 0,002 et 0,4) : cela est une indication possible d'évolution physique... Mais deux résultats en apparence contradictoires imposent au moins une certaine prudence.

Comme pour le continu UV, le continu X est bien corrélé avec l'intensité de l'émission des raies larges, pour les raisons déjà signalées.

On connaît encore peu de sources extragalactiques par leur spectre dans le domaine gamma. Le QSS 3 C 273 a été bien étudié. On notera que parmi les quelques autres sources gamma connues, figure le QSS 0630 + 180, dont le spectre optique est plat ($a \sim 1$), dont le z est de 1,2 et qui est 10^4 fois plus intense dans le domaine gamma que dans le domaine radio, — contre 100 fois seulement dans le cas de 3 C 273. Il s'agit d'une source extrêmement brillante dans le domaine gamma : il serait intéressant de voir si ce fait influence le spectre des raies d'émission.

Il est important de noter que dans tous les domaines du spectre, la grande majorité des AGN montre des variations lentes et rapides du flux, et, bien sûr, des différents indices α déterminés.

4. Interprétation du spectre continu des AGN

Quels spectres continus peuvent être émis par un plasma, caractérisé par sa température T_e et sa densité électronique N_e ?

Les transitions entre deux états d'énergie libres des électrons sont une source majeure de continu, qui s'ajoute aux transitions entre états libre et lié. Mais ces transitions (s'il y a émission, elles correspondent à un *freinage* des électrons) peuvent être dues au freinage, soit par le champ électrique d'un ion positif (*bremsstrahlung*), soit par le champ magnétique général, si les électrons sont très rapides (rayonnement de type *synchrotron*), soit encore par l'effet d'un milieu réfringent sur les électrons alors superlumériques (effet Čerenkov).

Les photons émis, les ions et les électrons subissent ensuite des interactions mutuelles. Il faudra traiter le problème de transfert des photons, tenir compte de la « diffusion », de l'« absorption », et des redistributions. Il faudra aussi tenir compte de la diffusion Compton inverse, qui augmente la fréquence des photons au détriment des électrons et se traduit par une redistribution (« comptonisation ») du spectre synchrotron émis.

La théorie de ces rayonnements et des effets de transfert et de redistribution a occupé deux leçons ; les équations sont classiques ; et nous ne les écrivons pas ici.

Nous ferons cependant une remarque générale. Si le bremsstrahlung est essentiellement un rayonnement thermique, le rayonnement synchrotron au contraire, ne l'étant pas, on peut calculer l'opacité et l'émissivité en utilisant, dans les deux cas, l'hypothèse (valable seulement à l'équilibre stationnaire : mais tous les auteurs en sont là !) du bilan détaillé.

Ces calculs supposent que l'on ait traité de la propagation des ondes dans un plasma : le calcul fait intervenir la « fréquence de plasma ». Le traitement du rayonnement synchrotron fait intervenir la fréquence de Larmor, et la fréquence de giration des électrons rapides dans le champ magnétique. Le calcul de l'opacité résulte du calcul du bilan détaillé.

Le cours a suivi de près les exposés classiques de Ginsburg, Pacholczyk, Delcroix et Denisse. L'application des calculs aux spectres observés dans le domaine radio est facilitée par les approximations de type Rayleigh Jeans ($1 - e^{-x} \sim x$, quand x , proportionnel à ν , est beaucoup plus petit que l'unité). L'adéquation de la théorie à l'observation permet d'avoir une idée sur la distribution des énergies des électrons dans le jet relativiste, qui n'est pas nécessairement (au contraire !) maxwellienne. On peut montrer que la courbure du spectre (relation $\alpha(\lambda)$) dans le domaine radio, est liée aux fréquences élevées, aux pertes d'énergie des électrons par l'effet synchrotron et les diffusions Compton), aux fréquences moyennes aux pertes par les transitions libre-libre, et aux basses fréquences, aux pertes dues à l'ionisation des milieux (au détriment de l'énergie qui aurait pu se trouver rayonnée) par les jets électroniques. L'appauvrissement en électrons d'énergie élevée est progressif et mesure en quelque sorte la « durée de vie » du jet relativiste.

Un travail très récent de Cruz-Gonzales et Huchra, portant sur le spectre de 25 objets de type BL Lacertae, exploite systématiquement les différents α caractérisant le spectre du domaine radio au domaine X. Les corrélations trouvées comme signification mettent en évidence le caractère plausible d'une interprétation d'ensemble du spectre continu. La théorie de Jones, O'Dell, Stein (1974) permet d'exploiter la fréquence du maximum radio ν_m du spectre (dû à la « self-absorption »), l'indice radio-infrarouge α_{RI} , la fréquence de

cassure ν_h par comptonisation, et l'importance (déterminée par la comparaison des indices α_{RI} et α_{RX}) et l'effet Compton inverse. On obtient une valeur du champ \mathbf{B} (10^{-4} à 50 G) qui fixe ν_m , de θ , dimension de la source (qui fixe le degré de collimation du faisceau d'électrons, et qui prend des valeurs de 10^{16} à 10^{19} cm), de la durée de vie des jets d'électrons successifs qui fixe ν_H (et dont l'ordre de grandeur est inférieur à l'année).

Sans doute l'étude du spectre continu n'est-elle pas terminée ; sans doute l'étude des raies d'émission et des raies d'absorption peut-elle apporter d'autres informations. Mais c'est par le spectre continu que l'on remonte aux jets d'électrons nécessaires à la formation du spectre continu synchrotron ; et c'est par les jets d'électrons que l'on atteint la source d'énergie des quasars : c'est là que, nécessairement, se trouve l'explication des formidables débits d'énergie des quasars, supposés à leur distance déduite de leur z par la relation de Hubble, — leur distance dite « cosmologique ». Les modèles sont cependant encore peu satisfaisants (théorie de l'environnement des trous noirs), et nous considérons qu'il convient encore de laisser ouverte la question posée au début de ce résumé.

[Cette question est d'autant plus ouverte que les travaux les plus récents de Arp, ou, dans notre groupe, d'E. Giraud, confirment largement l'existence très probable de décalages spectraux non associés à une vitesse, de quelque nature qu'elle soit. H. Arp a donné cette année au Collège de France, en complément de ce cours, en mai 1984, une série de quatre cours dont le sommaire figure ci-après, et qui ont montré, au moins, que la question doit rester ouverte ; il est dommage que les défenseurs des thèses opposées, qui craignent que les résultats de Arp ne soient dus à des erreurs de nature statistique, ou à des effets physiques tels que l'intensification gravitationnelle de l'intensité des sources situées derrière des amas de galaxies, par exemple, n'aient pas cru devoir assister à ces exposés remarquables, au cours desquels Arp a répondu à un certain nombre d'objections publiées dans la littérature.

On notera que si les décalages spectraux des quasars ne sont pas des mesures de leur distance, il faut leur trouver une cause nouvelle. Les efforts de Vigier, Molès, Marić, et nous mêmes, en 1973-1980, invoquant une interaction entre les photons et les bosons *ad hoc*, les efforts actuels de Vigier, faisant appel à l'interaction entre les photons et l'éther de Dirac, sont encore peu convaincants. Mais, si Arp a raison (et ses arguments sont très forts), alors il est clair qu'une cause physique doit être trouvée ; et si elle existe, l'interprétation des décalages spectraux des galaxies normales est elle-même sujette à caution, comme alors toutes les cosmologies purement « expansionnistes ».]

5. L'univers lointain et la cosmologie

Dans l'univers standard en expansion après une grande explosion (l'univers du « big bang ») seuls le rayonnement de fond de ciel à 3 °K et l'abondance des éléments légers sont des indicateurs de l'état de l'univers à z très grand (1 000 ou plus).

Mais directement, seul l'univers jusqu'à $z \sim 4$ nous est accessible.

Si les objets observés (quasars) sont à la distance qu'implique leur z , nous les voyons tels qu'ils étaient il y a 18 milliards d'années (avec $H_0 = 50 \text{ km S}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). L'univers standard était alors plus dense et plus chaud qu'aujourd'hui. Deux effets affectent les observations : l'*expansion*, bien entendu, qui se traduit par une densité (nombre d'objets de même nature, quasars, galaxies... par unité de volume), plus grande à $z = 4$ qu'à $z = 0,01$, et l'*évolution* de ces objets et du milieu dans lequel ils se sont formés, pouvant elle-même influencer le nombre d'objets de nature donnée formés dans un volume donné par unité de temps, donc les proportions des objets de différente nature, et affecter même la nature physique précise (composition, masse...) de ces objets.

Est-il d'ailleurs possible de séparer ces deux effets ?

Dès 1934 et 1936, Tolman, et Hubble lui-même avaient proposé deux « tests » classiques de l'expansion. Le premier était d'effectuer des dénombrements homogènes ; le second d'étudier la distribution de la dimension des objets extragalactiques.

Commençons par l'examen de cette seconde étude.

La théorie (classique) établit une relation entre la dimension angulaire apparente θ_0 , le rayon R_0 de courbure, les constantes H_0 et q_0 de l'expansion, la magnitude apparente m_{corr} , et la valeur de z . Cette théorie suppose que ni la dimension linéaire Δ , ni la magnitude absolue des sources, M , n'est affectée par l'évolution, qu'elles ne dépendent pas de z , et qu'elles sont uniques pour la famille d'objets étudiés. La magnitude apparente est corrigée de l'effet spectral du décalage (« correction K »). Il faut aussi tenir compte de ce que la brillance superficielle d'un astre de dimension apparente non nulle variant avec la distance, les isophotes se serrent quand z augmente et l'isophote contenant la moitié de l'énergie correspond à une dimension linéaire de plus en plus petite, toutes choses égales d'ailleurs. Les formulations de Mattig permettent ces calculs. Les courbes tracées pour H_0 donné, et diverses valeurs de q_0 et qui représentent θ_0 en fonction de m_{corr} et de z , pour des objets de Δ et de M définis, montrent que ce test ne peut donner de résultats que si $z > 0,3$. Hubble lui-même tenta d'appliquer cette technique, — évidemment sans succès. Sandage pensa plutôt l'appliquer pour déterminer q_0 — l'expansion allant, pour lui, de soi. Jaakkola et Vigier, l'appliquant aux

radio-sources doubles, crurent montrer que les observations s'interprétaient, mieux que par un univers en expansion, dans le cadre euclidien statique ; et Nottale montra que les effets de perspective modifiaient cette conclusion, sans pour autant permettre ni la vérification cosmologique, ni la détermination de q_0 .

Beaucoup plus utilisé fut le premier « test » de Hubble et Tolman.

Depuis le développement des études sur les radiosources, de nombreux auteurs ont discuté différentes formes du test de dénombrement.

Dans un univers euclidien et stationnaire, le nombre d'objets (supposés tous identiques) d'éclat magnitude supérieur à S , $N (> S)$ est proportionnel à $S^{-3/2}$. La relation entre N , H_0 , q_0 , z , m_{corr} et le signe de la courbure universelle ($k = 1,0 + 1$) est aussi établie grâce aux relations de Mattig. Là aussi, pour une valeur donnée de H_0 , Sandage calcula des courbes $N (m_{\text{corr}})$ pour diverses valeurs de q_0 , courbes dûment étalonnées par les valeurs convenues de z . Son intention était de déterminer q_0 .

Ryle, en Grande-Bretagne, Mills, Bolton... en Australie, tentèrent d'appliquer ce test aux radiosources découvertes (entre 1955 et 1964) et obtinrent un résultat difficile à comprendre : $N (> S)$ est proportionnel à la puissance $q = -1,85$, (et non $q = -1,5$) de S . Or la théorie cosmologique de Mattig prévoit, que la valeur de cet exposant peut, en valeur absolue, être inférieure à 1,5, — pas supérieure.

Un travail fondamental de Ph. Véron, en 1966, permit de comprendre mieux ce résultat global : l'échantillon exploité par les radioastronomes est loin d'être homogène ; il mélange les radiosources intrinsèquement modestes mais proches, et les quasars intenses et « lointains ». Indépendamment de toute hypothèse cosmologique, de toute hypothèse sur la distance des quasars, ces deux populations sont très différentes. Les radiogalaxies donnent un exposant $q = 1,55$; les quasars un exposant $q = 2,20$ qui peut être dû à un effet d'évolution : si les quasars sont lointains, et si leur éclat S est d'autant plus faible que la distance est grande, il est possible que les sources lointaines soient plus nombreuses (par unité de volume) que les sources proches ; il est possible aussi qu'elles soient intrinsèquement plus brillantes. Enfin (c'est la suggestion de Arp), il n'est pas exclu que, indépendamment de la distance, les quasars aient un décalage spectral intrinsèque ; la relation $N (> S)$ refléterait seulement la loi de distribution de l'éclat absolu des quasars. Ces études n'exigent pas la connaissance de z , mais supposent des échantillons très homogènes, ce qui n'est pas vérifié.

Après cette discussion, le problème a été repris bien des fois. Karatchensev (1980), sur un échantillon de galaxies faibles (magnitude bleue limite : $m_B = 26$), étudie la relation $N (m)$ et trouve une pente qui semble indiquer

l'existence d'une évolution. Les galaxies de magnitude 24 sont 3 fois plus nombreuses que les galaxies de magnitude 20, par unité de volume ; cet effet correspondrait à une variation de distance d'un facteur 6 (pour fixer les idées, ceci correspond à peu près au passage de $z = 0,08$ à $z = 0,5$). Cet effet n'est pas négligeable — mais d'autres auteurs trouvent un effet bien plus faible ; l'origine de l'effet réside peut-être dans l'homogénéité des échantillons : les sondages lointains favorisent les astres les plus brillants intrinsèquement par rapport aux plus faibles.

Les radioastronomes, de leur côté, améliorent les échantillons et trouvent des résultats très concordants (Gower, 1966, Ryle, 1968) et conformes aux premières données, dans l'ensemble ($q \sim 1,8$). Dans le détail, la fonction N/N_0 (N_0 étant le résultat d'un dénombrement théorique correspondant à un univers euclidien, homogène et stationnaire) en fonction de S à des propriétés curieuses. Au voisinage de l'observateur, cette fonction croît avec la distance (alors que S décroît), passe par un maximum, puis décroît à grande distance. Ces variations très claires aux basses fréquences, sont très atténuées aux plus hautes fréquences (5 GHz). Scheuer rend compte de ces distributions en posant la question « Sommes-nous dans un trou ? ».

Longair remarque (1966) qu'une seule interprétation est possible : il y a un effet d'évolution ; mais cette évolution ne peut être que différentielle ; seules les plus lumineuses des radiosources sont impliquées dans l'évolution (et ceci signifie aussi « les sources dont le spectre est le moins "pentu" »).

Il devint donc clair qu'il fallait comparer les observations avec des théories tenant compte d'une évolution. Les bases de ces théories sont simples. Elles considèrent, *a priori*, que z est une mesure de la distance D ; à la distance D , on se donne une fonction de luminosité ($M, M + dM$) qui puisse être une fonction de t , — donc de D —, la relation t, D dépend de z par l'intermédiaire d'une théorie cosmologique ; de plus il faudrait connaître l'évolution des propriétés diverses des quasars avec t — avec z ; enfin des effets parasites jouent un rôle : l'influence des « lentilles gravitationnelles » sur la fonction de luminosité, rôle des sélections observationnelles, effet du mélange des populations, influence des structures à grande échelle — amas, superamas, ... Les calculs récents sont beaucoup plus élaborés que ceux issus des relations de Mattig ; ils font intervenir une « fonction d'évolution » considérée comme une inconnue à déduire des mesures.

Mais l'ambiguïté n'est pas levée pour autant. Car il faudrait séparer les deux termes de l'évolution : le terme correspondant à la fois à l'expansion et à l'évolution du taux de formation des quasars, et le terme correspondant à leur évolution physique, les objets formés à grande distance n'étant pas identiques aux objets formés à faible distance, notamment par leur éclat absolu, par la fonction de luminosité. Si l'on considère la relation $q(m)$, une

augmentation de l'éclat à ρ donné (évolution physique, et une augmentation de $\rho(m)$, à éclat donné ont essentiellement le même effet. Si l'on considère au contraire le diagramme de Hubble $z(m)$, l'effet physique compte seul, — pas l'effet d'évolution en densité. Mais l'effet anormal suggéré par les observations de Arp explique aussi l'effet d'accumulation des points représentatifs des quasars dans la partie droite du diagramme de Hubble, au-dessus de la droite valable pour les galaxies ordinaires.

Un autre test important a été imaginé : le « test V/V_{\max} » développé par Schmidt et Rowan Robinson dès 1968. Ce test n'implique pas de statistiques complexes. Dans une région donnée du ciel, on recense *tous* les objets dont le flux observé, à une fréquence donnée, excède une valeur S_0 , et dont tous les z et α sont connus dans la région spectrale observée. *Chaque* objet est *reporté* à une distance plus lointaine, définie par un z_{\max} qui correspond au point où S tombe à la valeur minimale S_0 ; ceci implique une géométrie donnée, — un modèle. Puis on calcule les volumes $V(z)$ et $V(z_{\max})$ comobiles correspondant à *chaque* objet i du catalogue. On calcule $y_i = V/V_{\max}$ puis $y = \langle V/V_{\max} \rangle$ pour l'échantillon observé. Cette méthode, indépendante du comptage, permet donc de choisir des échantillons très homogènes d'un point de vue spectral ou morphologique.

Dans un univers stationnaire et euclidien, $y = 0,5$. En réalité, on trouve presque toujours $y > 0,5$. Pour les radiosources de spectre « plat », on trouve $y \sim 0,75$; pour les radiosources les plus puissantes, on trouve aussi des valeurs élevées. Les quasars et les galaxies les plus brillante ont un y élevé. Comme l'éclat absolu supposé dépend de z , on peut vérifier que y , en revanche, est presque insensible à la valeur choisie de z .

Ce résultat ne s'explique que s'il y a une évolution physique, en principe. Mais il faudrait être sûr que l'on a utilisé des échantillons bien homogènes : or cela ne semble pas toujours le cas ; le mélange d'échantillon de différentes fonctions de luminosité influence fortement la valeur de y . Il ne semble pas absolument nécessaire d'invoquer l'évolution pour expliquer les résultats.

Des efforts plus systématiques, visant à déduire la fonction d'évolution en étudiant de la distribution des points représentatifs dans le diagramme $m(z)$, où la magnitude m est calculée à la longueur d'onde voulue, — 21 cm par exemple (c'est, essentiellement, un diagramme de type Hubble). Les travaux de Roberts, Peacock et Gull, Van der Laan mettent bien en évidence, entre $z = 0$ et $z = 1$, une évolution se traduisant par une diminution du nombre relatif de sources faibles aux z les plus petits (avec le temps). Entre $z = 0,3$ et $z = 2$, on remarque des excès de radiosources par rapport au modèle euclidien stationnaire : une évolution rapide semble avoir pris place entre ces deux valeurs de z .

Wall, Pearson, Longair (1981) ont mis en évidence un « âge de décroissance » de l'activité d'un quasar. Si son éclat absolu F varie comme $e^{-t/\tau}$, τ sera cet « âge » ; ces auteurs trouvent 1/6 de l'« âge de l'univers », en comparant les dénombrements de radiosources et la théorie prenant en compte une telle fonction d'évolution physique.

D'autres auteurs (Cheney, Rowan-Robinson, 1981) font intervenir deux termes d'évolution dans les relations théoriques représentant les dénombrements ou les tests V/V_{\max} . Un terme, Q_D , caractérise la croissance exponentielle de la densité, un autre, Q_L , la croissance exponentielle de la luminosité des sources, avec le paramètre $z/(1+z)$, c'est-à-dire la décroissance avec le temps. Une discussion des dénombrements les plus récents (dans le bleu) conduit ces auteurs à admettre $Q_D = Q_L = 4$. Nous avons repris cette discussion et montré qu'en théorie elle permet certes une discrimination, mais qu'en pratique, on peut admettre seulement que les observations limitent le choix à un domaine du plan Q_D, Q_L : la séparation des deux effets de l'évolution n'est pas possible.

La conclusion des travaux « classiques » (dans leur esprit, fidèle à l'interprétation de z comme une mesure de la distance) est assez simple. Pour $z < 5$, ce sont les « âges sombres ». Les quasars commencent à apparaître vers $z = 5$. Ils se forment alors assez nombreux ; leur taux de formation décroît de $z = 4$ jusqu'à $z = 0$ assez vite, en raison du fait que la pression extérieure (la densité décroît : $\rho = \rho_0(1+z)^3$) confine le plasma du quasar de moins en moins vite ; et peut-être cet effet est-il subjectivement accru par les effets de lentille gravitationnelle des galaxies proches, qui affectent plus les quasars lointains. L'éclat moyen des quasars décroît aussi de $z = 4$ à $z = 2$ ou 1 (il rejoint alors celui des galaxies actives), à cause de la diminution de l'effet des pertes Compton dues aux photons du fond de ciel, la température de ce rayonnement variant comme $(1+z)$; ces pertes par effet Compton accélèrent l'évolution individuelle de chaque objet. La densité en galaxies actives se comporte comme celle des quasars, mais la décroissance entre $z = 4$ et $z = 0$ est nettement moins prononcée. A $z = 0,5$, on atteint l'état (stationnaire, ou quasiment tel) de l'univers proche.

Ces analyses sont cohérentes avec un univers en expansion après la grande explosion (univers du « big bang »). Cependant, les hypothèses telles que celles d'Arp peuvent tout aussi bien rendre compte des observations qui reflètent alors les propriétés des lois de distribution des décalages spectraux intrinsèques.

De plus, des difficultés graves sont rencontrées, et nous n'en citerons que quelques-unes :

L'anisotropie forte de la distribution des quasars et de leurs propriétés (Birch, Kendall et Young).

La grande hétérogénéité des échantillons utilisés, irréductible tant qu'on n'a pas mieux poussé le diagnostic spectrographique des galaxies actives et des quasars.

Les anomalies diverses de la distribution des quasars en fonction de z , non visibles sur la distribution en fonction de l'éclat apparent : « périodes » de Burbidge, des Barnothy, etc. mises récemment en évidence de façon statistiquement plus soigneuse par Depaquit et al.; « périodes » plus petites (72 km/s) de Tifft et Arp.

Sans doute certaines de ces anomalies peuvent-elles peut-être disparaître d'une étude portant sur des échantillons plus importants. Mais cela est encore loin d'être démontré.

Conclusion provisoire

Les galaxies actives, les quasars de z élevé, les radiosources, sont des objets fascinants.

Leur étude, dans le cadre de la cosmologie « standard » de la grande explosion, impose l'idée qu'entre $z = 4$ et $z = 0,5$, leur taux de formation a décréu, et que leur éclat absolu moyen a décréu plus sensiblement encore.

Cependant, si le z n'est pas une indication de la distance, alors les observations s'interprètent en associant les z élevés (z intrinsèques !) à des sources guère plus brillantes que celles de z faibles, mais de propriétés physiques différentes, et le nombre d'objets de z donné à une fonction de probabilité de ces z intrinsèques : cela reste du domaine de l'hypothèse ; et rien ne permet de justifier cette vue, — hors de la nécessité de rendre compte des divers types de décalages « anormaux » décrits par Arp, et quelques autres.

L'univers « standard » a le mérite de la cohérence des belles constructions ; les vues des « hérétiques » ont le mérite d'offrir, sinon une alternative, du moins une ouverture vers des alternatives. Le problème n° 1 reste, pour nous, de savoir si les observations de Arp sont la preuve, ou non, de l'existence de décalages spectraux intrinsèques (non fonction de la distance). Le programme le plus urgent, à notre avis, est donc de refaire ces observations, et de les multiplier.

J.-C. P.

BIBLIOGRAPHIE

La bibliographie du sujet est déjà considérable ; chaque numéro de la revue américaine d'astrophysique (*Astrophysical Journal*, un fascicule de

200 pages chaque quinzaine) contient 5 à 10 articles sur les quasars et les galaxies actives. Nous ne pouvons envisager une bibliographie limitée qui ne soit pas fortement biaisée, ni *a fortiori* une bibliographie exhaustive. Les références ci-dessus sont des indications, rien de plus — non pas toutes celles (et de loin) utilisées, mais surtout celles que nous avons citées dans le résumé du cours.

A. Articles d'intérêt historique

- W. BAADE, *Astrophys. J.*, **123**, 550, 1936.
K. SEYFERT, *Astrophys. J.*, **97**, 28, 1943.
J.S. HEY, S.R. PARSONS, J.W. PHILLIPS, *Nature*, **158**, 234, 1946.
J.G. BOLTON, G.J. STANLEY, O.B. SLEE, *Nature*, **164**, 101, 1949.
H. ALFVÉN, N. HERLOFSON, *Phys. Rev.*, **78**, 616, 1950.
T. GOLD, Proc. Conf. Dyn. of In. media. Univ. Coll. London, 1951.
W. BAADE, R. MINKOVSKI, *Astrophys. J.*, **119**, 206, 1954.
M. RYLE, P. SCHEUER, *Proc. Roy. Soc. London, A* **230**, 448, 1955.
G.R. WHITFIELD, *Monthly Not. of the R.A.S.*, **117**, 1 960, 1957.
G.R. WHITFIELD, dans I.A.U. Symp. n° 9, Radioastronomy, p. 297, 1958.
M. RYLE, *Proc. Roy. Soc. London, A* **248**, 289, 1958.
V.A. AMBARTSUMIAN, Inst. Int. de Physique Solvay, in : La structure et l'évolution de l'Univers, R. Stoops ed., Coudenberg, Bruxelles, p. 421, 1958.
R. MINKOWSKI, *Astrophys. J.*, **132**, 908, 1960.
American Astronomers Report, *Sky and Telescope*, **21**, 148, 1961.
T.A. MATTHEWS, A. SANDAGE, *Astrophys. J.*, **138**, 30, 1963.
C. HAZARD, M.B. MCKEY, A.J. SHIMMINS, *Nature*, **197**, 1 037, 1963.
M. SCHMIDT, *Nature*, **197**, 1 040, 1963.
F. HOYLE, W. FOWLER, *Monthly Not. of the R.A.S.*, **125**, 169, 1963.
H.J. SMITH, D. HOFFLEIT, *P.A.S.P.*, **73**, 292, 1963, 1961.
J.L. GREENSTEIN, M. SCHMIDT, *Astrophys. J.*, **140**, 1, 1964.
W. FOWLER, F. HOYLE, in : Quasi Stellar Sources and Gravitation Collapse, ed. Robinson et al., Chicago Univ. Press, 1964.
G. FIELD, H. ARP, J.N. BAHCALL, *The Redshift Controversy*, Benjamin, M.A., Reading, Mass., 1973.
J.L. SERSIC, *Extragalactic Astronomy*, Geophysics and astrophysics monographs, 20, Reidel, Dordrecht, 1982.

B. Taxonomie

- K. BRECHER, in : *Frontiers of Astrophysics*, Avrett E.H., ed., Harvard Univ. Press, p. 438, 1976.

- J.P. HALPERN, J.E. STEINER, *Astrophys. J. Lett.*, **269**, L 37, 1983.
J. KROLIK, Cours au Collège de France, 1984.
W.W. MORGAN, R.D. DREISER, *Astrophys. J.*, **269**, 438, 1983.
D.E. OSTERBROCK, O. DAHARI, *Astrophys. J.*, **273**, 478, 1983.
L. OZERNOY, *Circular Astr. Acad. Sci., Moscou*, **58**, 581, 1984.
M.M. PHILLIPS, P.A. CHARLES, J.A. BALDWIN, *Astrophys. J.*, **266**, 485, 1983.
M. SCHMIDT, R.F. GREEN, in : *Astrophysical Cosmology*, Specola Vaticana, 1982.
J.T. STOCKE *et al.*, *Astrophys. J.*, **273**, 458, 1983.
S. VAN DEN BERGH, *Astron. Astrophys.*, **12**, 474, 1971.
L. WOLTJER, G. SETTI, in : *Astrophysical Cosmology*, Specola Vaticana, 1982.

C. Théorie des spectres continus

- G.A. CHANAN, *Astrophys. J.*, **275**, 45, 1983.
J.L. DELCROIX, J.F. DENISSE, *Théorie des ondes dans les plasmas*, Dunod, Paris, 1961.
R.G. EASTMAN, G.M. MACALPINE, D.O. RICHSTONE, *Astrophys. J.*, **275**, 53, 1983.
G. FABBIANO *et al.*, *Astrophys. J.*, **277**, 115, 1984.
V.L. GINSBURG, *Theoretical Physics and Astrophysics*, Pergamon Press, Oxford, 1979.
K.J. JOHNSTON *et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **277**, L 31, 1984.
D.L. JONES, J.M. WROBEL, D.B. SHAFFER, *Astrophys. J.*, **276**, 480, 1984.
G.A. KRISS, *Astrophys. J.*, **277**, 495, 1984.
J.H. KROLIK, C.F. MCKEE, C.B. TARTER, *Astrophys. J.*, **249**, 424, 1981.
M.S. LONGAIR, in : *I.A.U. Highlights of Astronomy*, **6**, 447, 1983.
M.A. MALKAN, A.V. FILIPPENKO, *Astrophys. J.*, **275**, 477, 1983.
A.F.T. MOFFAT *et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **271**, L 45, 1983.
C. NEUGÉBAUER *et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **278**, L 83, 1984.
P. O'DEA *et al.*, *Astrophys. J.*, **278**, 89, 1984.
J.B. OKE, *Nature*, **197**, 1 040, 1963.
A.G. PACHOLCZYK, *Radiogalaxies*, Pergamon Press, Oxford, 1977.
A.G. PACHOLCZYK, *Radioastrophysics*, Freeman, San Francisco, 1979.
A. SANDAGE, in : *I.A.U. Highlights of Astronomy*, ed. L. Perek, p. 45, 1968.
E. SCHATZMAN, dans Ecole d'été des Houches, Rayonnement des plasmas, Gordon and Breach, 1960.
S.R. SPANGLER, R.L. MUTEL, J.M. BENSON, *Astrophys. J.*, **271**, 44, 1983.
H. VAN DER LAAN, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **302**, 637, 1977.
D.W. WEEDMAN, in : *I.A.U. Highlights of Astronomy*, ed. P. Wayman, 623, 1980.

D. *Tests d'évolution et tests cosmologiques*

- J.E. CHENEY, M. ROWAN-ROBINSON, *Monthly Not. of the R.A.S.*, **195**, 497, 1981.
- CHRISTIANI, P. VÉRON, E.S.O. preprint, 303, 1983.
- F.R. GOWER, *Monthly Not. of the R.A.S.*, **133**, 151, 1966.
- M.R.S. HAWKINS, N.J. STEWARD, *Astrophys. J.*, **251**, 1, 1981.
- E. HUBBLE, R. TOLMAN, *Astrophys. J.*, **82**, 302, 1935.
- I.D. KARATCHENSEV, in : Symp. U.A.I. n° 92, G.O. Abell, P.J.E. Peebles ed., Reidel, Dordrecht, p. 1, 1980.
- M.S. LONGAIR, S.J. LILLY, in : *Astrophysical Cosmology*, Specola Vaticana, p. 269, 1982.
- W. MATTIG, *Astr. Nachr.*, **285**, 1, 1959.
- S. MAVRIDÈS, *L'univers relativiste*, Masson, Paris, 1973.
- J.A. PEACOCK, S.F. GULL, *Monthly Not. of the R.A.S.*, **196**, 611, 1981.
- M. ROWAN-ROBINSON, *Monthly Not. of the R.A.S.*, **138**, 445, 1968.
- M. RYLE, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, 249, 1968.
- A.S. SANDAGE, *Astrophys. J.*, **133**, 355, 1961.
- P.A.G. SCHEUER, in : *Galaxies and the Universe*, A. Sandage, M. Sandage, J. Kristian ed., Univ. Chicago Press, p. 725, 1975.
- M. SCHMIDT, in : *Galaxies and the Universe*, A. Sandage, M. Sandage, J. Kristian ed., Chicago Univ. Press, p. 283, 1975.
- M. SCHMIDT, R.F. GREEN, *Astrophys. J.*, **269**, 352, 1983.
- H. VAN DER LAAN, R.A. WINDHORST, in : *Astrophysical Cosmology*, Specola Vaticana, p. 249, 1982.
- P. VÉRON, *Nature*, **211**, 724, 1966.
- J.V. WALL, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 656, 1977.
- J.V. WALL, T.J. PEARSON, M.S. LONGAIR, *Monthly Not. of the R.A.S.*, **196**, 597, 1981.
- J.V. WALL, in : *Origine and evolution of galaxies*, B.J.T. Jones, J.E. Jones, ed., Reidel, Dordrecht, p. 295, 1983.
- R.A. WINDHORST, R.G. KRON, D. KOO, P. KATGERT, I.A.U. Symp. n° 97, D.S. Heeschen, C.M. Wade ed., Reidel, Dordrecht, p. 427, 1982.

Colloques divers

- 8th Texas Symp. on relativistic astrophysics, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1976.
- I.A.U. Symp. n° 97, *Extragalactic Radiosources*, ed. D.S. Heeschen, C.M. Wade, Reidel, Dordrecht, 1982.
- Astrophysical cosmology*, Proc. of the study week on cosmology and fundamental physics, H.A. Brück, G.V. Coyne, M.S. Longair, Specola Vaticana, 1982.

B.J.T. JONES, J.E. JONES, *The origin and evolution of galaxies*, N.A.T.O. Adv. Stud., Series C, 97, Reidel, Dordrecht, 1983.

Highlights of Astrophysics, Reidel, Dordrecht :

- L. PEREK ed., 1967.
- P.A. WAYMAN ed., 5, 1979.
- R.M. WEST ed., 6, 1982.

Annual Review of Astronomy and Astrophysics :

- E.M. BURBIDGE, 5, p. 399, 1967.
- D.W. WEEDMAN, 15, p. 69, 1967.
- G.R. BURBIDGE, 8, p. 369, 1970.
- W.A. STEIN, S.L. O'DELL, P.A. STRITTMATTER, 14, p. 173, 1976.
- H. GURSKY, D.A. SCHWARTS, 15, p. 541, 1977.
- S.S. HOLT, R. MCCRAY, 20, p. 323, 1982.
- B. BALICK, T.M. HECKMAN, 20, p. 431, 1982.

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, 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.

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE DU L.A.T.

Elle est restée orientée vers plusieurs directions essentielles : l'étude des atmosphères astrophysiques hors équilibre, 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*

Régions actives et régions calmes (S. Dumont, J.-C. Pecker). On a continué l'étude des documents obtenus grâce à OSO-8. Après avoir établi un modèle de la zone de transition chromosphère-couronne (CCT), à partir des observations du Soleil calme et de régions actives non éruptives, avec une géométrie plus complexe, deux points de vue ont été adoptés : d'une part l'étude d'un problème archétype : le calcul du spectre émergent pour un modèle simple à géométrie variable (étude de la « rugosité »). D'autre part, à partir des observations, la détermination de la géométrie des granules chromosphériques, commandée par le champ magnétique (réf. 25 et 14). Nous envisageons de continuer ces travaux comme suit : des observations de régions actives menées avec le satellite Skylab dans 7 domaines de longueurs d'onde (dont le rayonnement provient de différentes régions, de la basse chromosphère à la couronne) nous permettront d'affiner notre modèle de transition chromosphère-couronne. De plus, l'étude de la chromosphère (voir Simon et al., 1980, et réf. 17, 25, 14) sera poursuivie dans le cadre des actions concertées du C.N.R.S. ; en particulier, de nouvelles observations (champ magnétique, raies du CaII) sont faites à Meudon au bord des facules, et nous contribuerons à leur étude, en collaboration avec les chercheurs meudonnais (Z. Mouradian, G. Simon) et divers collègues étrangers.

II. *Etoiles. Observations*

C. Bertout a principalement étudié les étoiles T Tauri et, de façon plus générale, les étoiles jeunes de masse faible. Dans le domaine optique, il tente de mettre en évidence une éventuelle relation entre rotation et activité (déterminée en particulier dans le domaine X) pour les étoiles jeunes de faible masse. Une telle relation existe pour les étoiles actives de la séquence principale et est interprétée comme la signature de phénomènes magnétiques. Le magnétisme étant souvent tenu pour responsable d'au moins une partie du phénomène T Tauri, il est intéressant de rechercher sa signature dans les étoiles jeunes. Il semble évident que d'autres phénomènes physiques jouent un rôle dans l'activité des étoiles T Tau les plus jeunes ; l'étude de l'activité magnétique dans les étoiles un peu plus âgées peut permettre de poser des contraintes sur les différents modèles physiques envisageables. La région de ρ Oph, étudiée en détail dans le domaine X par Montmerle et al., présente l'avantage de contenir des étoiles jeunes de différents niveaux d'activité et à été peu étudiée jusqu'ici. L'étude en cours se concentre donc sur cette région.

Pour la détermination de la rotation, nous utilisons deux méthodes bien différentes : l'une utilise la transformée de Fourier des spectres photosphériques (J. Bouvier) obtenus pendant des périodes de test du C.A.S.P.E.C. à La Silla ; une autre consiste à rechercher photométriquement une modulation rotationnelle attribuée à de grandes taches stellaires. Cette méthode est applicable aux étoiles jeunes à très faible raies d'émission (« post T Tauri »), dont quelques-unes ont montré des variations périodiques. Les étoiles T Tauri elles-mêmes sont le plus souvent irrégulières.

Avec J. Bouvier, C. Bertout a obtenu, au cours de plusieurs périodes d'observations à l'E.S.O., tant en spectroscopie (au 1,50 m) qu'en photométrie UBVR_I (au 1 m et au 50 cm), des spectres à moyenne dispersion, dans les domaines bleu et rouge, de toutes les sources X du nuage ρ Oph d'une magnitude visuelle inférieure à 14.5 ; J. Bouvier a pu accumuler un grand nombre de données diverses sur ces mêmes objets. Le dépouillement des données est en cours.

Dans le domaine radio, les observations d'objets stellaires jeunes à 23 GHz (dans le continu) ont été continuées à Effelberg (avec C. Thum). Malheureusement, les difficultés techniques ont été considérables. Au vu des données très supérieures obtenues par le groupe de Berkeley au V.L.A., il ne semble pas souhaitable de poursuivre ce programme d'observations à Effelberg.

Enfin le dépouillement des données obtenues au cours d'une campagne multi-télescopes d'observations d'étoiles de type YY Ori a été terminé et les résultats publiés [1].

R.N. Thomas, en collaboration avec V. Doazan et divers autres chercheurs, a principalement étudié les étoiles B et Be et notamment le caractère variable des raies caractéristiques des couches extérieures (non-thermiques) de ces étoiles. Ainsi la structure périodique de l'aile rouge de la raie 1399 du Si IV, dans l'étoile γ Cas [10], ou les changements abrupts des raies de résonance de C IV dans l'étoile θ CrB [11]. Ces études particulières conduisent à des réflexions plus générales et systématiques sur l'identification des caractéristiques [9] des étoiles Be, comme sur le caractère variable du flux de masse de ces étoiles.

Ces travaux sont en liaison étroite avec les idées développées par R.N. Thomas dans l'important ouvrage de recherche qu'il a publié cette année sur les structures atmosphériques stellaires (voir ci-dessous paragraphe IV).

III. *Théorie du transfert de rayonnement dans les atmosphères hors équilibre*

Les méthodes évoluent, en même temps que les moyens de calcul. De plus, l'astrophysique suggère souvent un problème ; mais la complexité du réel

est telle que le problème résolu, qui nous apprend de la physique, ne peut guère prétendre au « réalisme ». Deux écoles de chercheurs (avec les intermédiaires) se développent donc : ceux qui restent très près de l'observation et qui tentent de les décrire ou d'en déduire presque sans calcul des principes physiques, et ceux qui se confrontent vite à des problèmes-archétypes, souvent éloignés du problème astrophysique qui les a suggérés. Voyons d'abord les calculs de transfert de rayonnement, des plus spécifiques aux plus généraux.

a) *Solution hors ETL des équations de transfert dans des atmosphères spécifiques par des méthodes globales* (nous désignons sous ce nom des méthodes du style de la méthode Feautrier, qui impose des conditions aux limites aux deux surfaces bornant l'atmosphère - des plans parallèles en général).

S. Dumont a ainsi abordé plusieurs problèmes pratiques importants :

1. *Calculs de profils de raies* (Ca II) dans un milieu en mouvement, mais où les vitesses macroscopiques sont du même ordre que la vitesse Doppler ; les profils tiennent compte de la redistribution partielle en fréquence. Ceci l'a conduit à une collaboration d'une part avec P. et N. Mein et al. (article en préparation : *Inversion of line profile disturbances : a non linear method applied to solar Ca II*), et d'autre part avec R. et C. Cayrel et al. [7].

2. *Calcul du spectre continu de l'hydrogène* : travail en collaboration avec S. Collin et D. Péquignot pour l'établissement d'un modèle en équilibre radiatif et complètement cohérent pour la région des raies larges des quasars (suite du travail Collin et al., 1982).

3. *Calcul des modèles d'une atmosphère d'hydrogène*. Etablissement (et test) d'une nouvelle méthode approchée pour obtenir un modèle en équilibre hydrostatique dans la région de formation des raies de Balmer.

Ce sont des problèmes analogues qu'a abordés C. Bertout, qui a développé les « codes » numériques suivants :

1. *Calcul du rayonnement radio thermique dans une enveloppe sphérique*, pouvant traiter n'importe quelle loi de variation de la densité et de la température électronique. La première application de ce code a été l'étude du spectre continu radio du compagnon infrarouge de T Tauri: C. Bertout a montré que ce spectre pouvait être formé dans une enveloppe ionisée s'effondrant sous l'action de la gravité. Cet argument, et d'autres considérations énergétiques et évolutionnaires l'ont amené à suggérer que le compagnon T Tauri pourrait être le premier exemple d'une protoétoile de faible masse [2].

2. *Calcul exact des profils de raies dans des enveloppes sphériques*, en présence de n'importe quel champ de vitesses (y compris $v(r) = 0$). Ce code est fondé sur une approche nouvelle de l'intégration de l'équation de transfert, effectuée dans l'espace de fréquences plutôt que dans l'espace physique. Les avantages de cette méthode [5] sont nombreux : meilleure précision

numérique, temps de calcul réduit et utilisation d'un seul code pour n'importe quel champ de vitesses.

3. *Calcul des profils de raies de résonances de Ca II, Mg II et Na I* (en collaboration avec G. Basri, N. Calvet et L. Kuhl). Il est tenu compte de la redistribution partielle en fréquence des photons diffusés ; on traite le cas des enveloppes gazeuses étendues, avec champs de vitesses. Le but de ces calculs est de reproduire les profils obtenus à haute dispersion pour un certain nombre d'étoiles T Tauri notamment par L. Kuhl (à Lick) et par Mundt (au Multi-Mirror Telescope). L'approche générale choisie est celle de la modélisation semi-empirique, qui s'est limitée jusqu'ici, pour ces étoiles, 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 par les tenants de l'hypothèse chromosphérique.

4. *Calcul du spectre infrarouge produit dans un vent stellaire*. Ce code, développé en 1982, 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 (avec le groupe de Wolf (Heidelberg) [4, 5, 20].

5. *Calcul des profils formés dans une couche mince*. En 1982, C. Bertout avait aussi étudié les profils de raies formés dans une couche gazeuse géométriquement mince avec Wagenblast et Bastian), et montré que la raie $H\alpha$ ne pouvait pas être utilisée dans les enveloppes d'étoiles T Tau [21].

b) *Etude et application des méthodes dites « d'addition des couches ».*

C. Magnan poursuit la direction du travail de recherches de M. Gros concernant le transfert du rayonnement dans des atmosphères étendues, sphériques. Le sujet d'études est neuf par maints aspects : son mérite essentiel devrait être d'examiner des conditions physiques qui ne correspondent ni à une atmosphère de type photosphérique, dans laquelle les collisions dominent, ni à une enveloppe très ténue, de type nébuleuse planétaire, dans laquelle les processus radiatifs sont prépondérants. On s'intéresse donc à des classes d'objets intermédiaires, avec une densité assez forte (10^8 à 10^9 cm^{-3}) dont le rayon varie d'un facteur de 5 entre les parties internes et externes. Les processus radiatifs prennent en compte tous les écarts possibles à l'ETL. On se propose de calculer les émissions dans les divers continus de l'hydrogène (Balmer et Paschen notamment) décrit par un atome à 5 niveaux. L'exploitation de ce programme devrait donc conduire à prévoir l'évolution du spectre d'une région d'ionisation en fonction de la quantité totale de matière présente entre les couches profondes qui émettent un spectre de corps noir et les couches les plus extérieures.

c) *Méthodes numériques fondées sur l'utilisation d'un traitement analytique nouveau des équations.*

E. Simonneau (comme conséquence d'une collaboration avec G. Cayrel, de Strobel et R. de Batz) a repris ces méthodes (qui ont commandé son activité passée) et les a développées. La physique des enveloppes circumstellaires n'exige pas, pour l'instant, un calcul très précis du transfert de rayonnement ; elle semble avoir besoin plutôt d'un calcul rapide à partir d'une première approximation qualitativement correcte. *A priori*, les méthodes développées lors de la thèse de G. Simonneau semblaient répondre à ces caractéristiques. Mais une couche circumstellaire ne peut en rien être traitée comme une atmosphère étendue (comme l'ont noté aussi C. Magnan et M. Gros) : dans une atmosphère étendue, toute l'intensité qui se propage est formée à l'intérieur du système ; par contre, dans la couche circumstellaire, il y a une intensité incidente provenant de l'étoile, donc de l'extérieur du système. Cette intensité ne dépend pas des propriétés de la couche.

Par ailleurs, dans la distribution angulaire du champ de rayonnement, au rayonnement provenant directement de l'étoile correspond une nouvelle région où la valeur de l'intensité peut être assez différente de celle des autres régions. L'intensité étant très anisotrope, il faut prévoir un double « pic » pour obtenir une approximation correcte. Ceci oblige à prendre, même pour une première approximation, des méthodes numériques de plus en plus puissantes. Finalement, E. Simonneau a réussi à préparer un code de calcul simple, incluant la possibilité de diffusions avec des indicatrices permettant jusqu'à un deuxième ordre d'anisotropie.

La conclusion est que si l'on veut interpréter les observations, on aura besoin de codes de calcul de transfert comparables à ceux des réacteurs nucléaires qui sont utilisables par n'importe quelle géométrie, et même plus compliqués, car, dans une enveloppe, la densité doit être calculée.

d) *Le problème de la redistribution et celui de la cinétique des atomes excités.*

Ce problème-archétype est implicitement inclus dans les paragraphes précédents. E. Simonneau (avec J. Borsenberger et J. Oxénius) avait proposé l'étude de la redistribution des photons lors d'un processus de ré-émission. Il s'agissait en particulier d'évaluer l'importance des effets non-locaux dus au mouvement des atomes. Entre un processus d'absorption et l'émission subséquente, il s'écoule un temps égal en moyenne à la « vie moyenne » des atomes excités ; pendant ce temps, l'atome parcourt un certain espace ; le point d'émission n'est pas le même que celui d'absorption ; ses propriétés peuvent être différentes. Ces effets seront importants si le libre parcours moyen

des atomes excités est grand par rapport à une longueur caractéristique de variation de ces propriétés. Simonneau et ses collègues abordent ce problème dans le cadre du transfert de rayonnement dans un gaz d'atomes à deux niveaux où existe, dans la densité des atomes excités, un gradient provenant seulement des effets du transfert non-ETL. Le problème est donc fermé et autoconsistant : l'échelle caractéristique de variation des propriétés dépend de ϵ (paramètre d'écart à l'ETL) qui, à son tour, dépend du nombre de collisions inélastiques (électroniques) et de l'opacité. Le libre parcours moyen des atomes excités dépend de leur vie moyenne et du nombre de collisions élastiques. Le milieu est caractérisé par les rapports entre ces paramètres fondamentaux. Le problème (déjà posé par J. Oxénius en 1979) a été traité dans le cadre limité de l'approximation diffusion pour le mouvement des atomes excités ; l'étude générale apparaissait donc comme une suite logique. Ainsi a-t-on écrit, et traité numériquement, une équation cinétique pour décrire le mouvement des atomes, équation évidemment couplée à celle du transfert. Dès 1982, les résultats numériques obtenus confirment l'importance de ces effets non-locaux.

Cette année, après avoir écrit toutes les équations qui interviennent en forme non-dimensionnelle, ces auteurs ont fait une analyse formelle des deux types de transport, dans tous les cas limites ; le transfert non-ETL classique pour les photons est l'un de ces cas : la distribution de vitesse des atomes excités correspond alors à celle de l'équilibre maxwellien. Le problème complémentaire, le rayonnement étant en équilibre local à la température d'excitation, est d'en déduire la distribution de vitesses des atomes excités. Ainsi a-t-on trouvé la façon dont les paramètres caractéristiques interviennent dans la fonction de distribution de vitesses. De plus, contrairement au transport des photons, se présentent deux cas extrêmes pour le transport des particules pour les conditions aux limites : la destruction (échappement libre, adsorption) et la réflexion « optique ». Un article préliminaire « Resonance line transfer and transport of excited atoms. I. Basic relations and limiting cases », est prêt pour la publication.

e) *La formation des raies dans les milieux en mouvement.*

C. Magnan, à l'occasion de la rédaction d'un ouvrage portant ce titre, a entrepris une discussion théorique nouvelle, qui se veut non abstraite, de cette question-archétype. Elle est théorique par la rigueur des bases physiques sur laquelle elle s'appuie, mais concrète dans la mesure où on s'est attaché à la relier à des observations réelles. On a donc tenté de faire prévaloir un point de vue très physique sur la question. Sur la théorie du transfert, on a pu développer une approximation très utile permettant de résoudre entièrement le problème du couplage entre les vitesses thermiques des atomes et les pro-

cessus radiatifs d'absorption et d'émission de photons. Cette approximation se base sur le fait que les raies astrophysiques ont toujours une largeur beaucoup plus grande que la largeur thermique pure ; en conséquence, le rayonnement ne peut jamais perturber les fonctions de distribution des vitesses thermiques de façon significative. De ce point de vue, le rayonnement peut très bien être considéré comme plat, indépendant de la fréquence. Il est donc possible de considérer que la fonction de distribution des vitesses thermiques et indépendante de l'état quantique dans lequel se situe l'atome. L'approximation en question conduit à des fonctions de redistribution en fréquence beaucoup plus maniables que les fonctions classiques. De plus, l'ouvrage discute en détail, et pour la première fois dans un ouvrage, de la méthode dite « d'addition de couches » que C. Magnan a personnellement développée ; cette méthode, très physique, se prête bien à des situations très variées, telles que champs de vitesses ou cas non-linéaires. Le but ultime de l'ouvrage reste la prise en compte des champs de vitesses non-thermiques. On montre comment introduire la turbulence dans les calculs de formation de raies en ETL ou non. On espère que la publication de l'ouvrage favorisera l'essor de nouvelles techniques de traitement des raies spectrales. Tous les diagnostics de champs de vitesses sont en cause, en particulier en ce qui concerne les pertes de masse, mais aussi les déterminations d'abondance des éléments, puisque ces déterminations dépendent de façon cruciale des hypothèses relatives aux mécanismes d'élargissement des raies.

IV. *La physique des phénomènes non-thermiques*

R.N. Thomas a achevé et publié le quatrième volume de la série de monographies N.A.S.A.-C.N.R.S. sur les phénomènes non-thermiques dans les atmosphères stellaires. Cet ouvrage, « Stellar Atmospheric Structural Patterns », est la synthèse de plusieurs années de réflexion de l'auteur. D'une extrême richesse, d'une extrême densité, il est difficile de le résumer mieux qu'en donnant ci-après la table des matières de ce livre, qui fera date dans la littérature sur le sujet des atmosphères stellaires :

I. Thermodynamic Overview of the Stellar Atmosphere.

II. Thermodynamic and Gas-Dynamic Background.

III. Radial Structure of Atmosphere and Local Environment : Overview of Atmosphere and Local environment : Definition of Local Environment.

V. *Physique des gaz relativistes*

R. Krikorian a continué, avec M. Kichenassamy, l'étude des gaz relativistes. Après avoir obtenu la loi d'ionisation d'un gaz relativiste [18], ils ont établi la généralisation relativiste des relations d'Einstein-Milne [19], et des relations

d'Einstein (ce travail doit paraître prochainement). Actuellement leur activité a essentiellement pour objectif : a) l'obtention de l'expression covariante de l'équation de transfert pour un milieu avec indice de réfraction dans un champ de gravitation ; b) l'obtention, à l'aide du principe d'invariance, du rayonnement diffusé par une couche en mouvement.

VI. *Recherches extragalactiques*

1. *La dynamique des superamas.*

La relation entre le freinage de l'expansion et l'excès de la masse dépend explicitement de la densité moyenne de l'univers. Elle fournit donc un test cosmologique sur l'ouverture-fermeture de l'univers. Elle est pratiquement la seule méthode, pour l'instant, qui fasse intervenir la densité de toute la masse de l'univers, y compris celle invisible comme les neutrinos massifs. Le calcul théorique a été fait par Tolman, puis développé par Bondi et Bonnor, donnant la liaison entre l'excès de la masse et le mouvement induit dans l'univers de Robertson-Walker. Mais c'est grâce à J. Silk que nous disposons de la formulation non-linéaire que nous avons appliquée pour construire un modèle numérique.

Selon les meilleurs ajustements du modèle aux données, l'hypothèse de l'existence des neutrinos massifs dont la densité moyenne est 100 fois plus grande que celle de la masse des baryons devrait être écartée à moins que le profil de densité des neutrinos massifs et des baryons ne soit identique. Mais en tout état de cause une grande prudence s'impose, étant donné que les erreurs de « best fit » sont encore grandes et instables.

Il existerait une rotation différentielle décroissant rapidement vers la limite du Superamas. C'est une autre contrainte, si elle se confirme, aux modèles cosmologiques qui auraient du mal à fournir le moment angulaire de telle grandeur.

Le modèle dynamique du Superamas local ainsi construit est appliqué aux superamas de Coma et de Hercule. Nous regardons les superamas cette fois-ci de l'extérieur, donc projetés sur le plan du ciel comme un disque. Leur dynamique interne se manifeste autrement. C'est en terme de l'effet « centre-bord » du module de Hubble moyen que nous pouvons constater la décélération différentielle à l'intérieur de l'objet. Nous présumons que « l'effet de la traversée des amas » mis en évidence par H. Karoji, est dû, au moins partiellement, à la dynamique interne.

Dans la ligne de ces travaux extragalactiques, M. Karoji doit achever sa thèse d'Etat, étant donné que les travaux relatifs au problème des décalages spectraux à la dynamique des superamas s'achèment vers une conclu-

sion. De plus, M. de Vaucouleurs (Université du Texas) a suggéré une collaboration pour essayer d'appliquer le modèle dynamique de H. Karoji aux observations plus riches et plus homogènes effectuées ces derniers temps. H. Karoji envisagerait de répondre à son invitation et de passer un certain temps à Austin pour réaliser la collaboration projetée l'année dernière.

2. La distribution des quasars (en fonction de leur décalage spectral et de leur distribution spatiale) a été étudiée par S. Depaquit (avec J.-C. Pecker et J.-P. Vigier). Un article ([8], sous presse) concerne la réalité des effets (suggérés par Arp, Burbidge) d'un accroissement significatif du nombre de QSS au voisinage de certaines valeurs de z régulièrement distribuées. Ce travail a ensuite été poursuivi en direction de l'étude des effets de sélection donc la distribution des raies d'absorption des quasars. De même en ce qui concerne divers échantillons particuliers (raies d'émission) : complets, sélectionnés rayons X, zones particulières du ciel, sélectionnés par la méthode du prisme ou réseau objectif, etc. Une attention particulière est actuellement portée sur les implications cosmologiques de l'association en paires des quasars dans le ciel (associations dans des superclusters de Oort ou de Ritter, associations quasars-galaxies de H. Arp ?). La distribution m , $\log(1+z)$ a aussi été faite sur divers échantillons en relation avec l'étude de la sélection observationnelle.

3) Les noyaux actifs de galaxies (qui ont fait, cette année et feront l'an prochain, l'objet du cours) ont donné lieu à un travail régulier (depuis le premier atelier organisé à l'île d'Yeu en 1982) sur les corrélations entre les diverses caractéristiques spectrales de ces objets et leur variabilité, du domaine X au domaine radio. En particulier, S. Dumont et J.-C. Pecker établissent un catalogue de la variabilité, dans le domaine optique, des quasars et galaxies actives. On espère aboutir à des modèles cohérents des régions d'émission des différentes catégories de galaxies actives.

De plus des études dans l'UV et l'IR sont en cours de préparation (H. Karoji) avec diverses collaborations internationales.

4) Le domaine de la cosmologie a inspiré le séminaire de l'année. Des recherches sur les cosmologies à variation des constantes ont été poursuivies par P. Mérat ; un article de revue est en préparation. Dans ce domaine, P. Mérat a entrepris une réflexion susceptible de développements intéressants : à partir des constantes d'interactions relatives aux quatre forces gravitationnelle, faible, électromagnétique et forte, une hiérarchie nouvelle, dans l'esprit de l'hypothèse des grands nombres de Dirac, est établie. Ceci permet d'écrire des rapports unificateurs entre les quatre interactions fondamentales de la Nature et de formuler une nouvelle variante de cosmologies à variation des constantes.

P. Mérat s'est également posé le problème de l'univers hiérarchisé (q étant fonction de R) en relativité générale. Pour essayer de résoudre (dans le cadre de la relativité générale et des variantes de cette théorie) le problème de propagation des signaux électromagnétiques et gravitationnels à travers le milieu hiérarchisé qu'est l'Univers, avec ses « sous-univers » composés d'amas de galaxies et de galaxies, P. Mérat a commencé le développement d'un algorithme algébrique, permettant d'obtenir sur ordinateur l'expression du tenseur d'Einstein en fonction d'une métrique donnée. P. Mérat a travaillé à développer la théorie relativiste d'objets non ponctuels dans un espace à huit dimensions, considéré non comme un espace de phase mais comme un continuum espace-temps-énergie-impulsion. La géométrie non euclidienne de cet espace à huit dimensions correspond à une généralisation de la théorie de Kaluza-Klein. A la suite des démonstrations données par Frederiksson et al. (Phys. Rev. Lett., 51, 2179, 1983), P. Mérat a commencé à développer un nouveau modèle du cœur d'étoile à neutrons, où les quarks sont remplacés par les diquarks.

SÉMINAIRES ET CONFÉRENCES

Les séminaires ont eu lieu du 6 mars au 29 mai 1984 sur le thème : *Critique de la raison cosmologique*. Ce séminaire, associé au cours, a été organisé avec l'aide de J. SCHNEIDER, de l'Observatoire de Meudon, que je tiens à remercier de son aide ainsi que du résumé suivant des idées débattues.

— 6 mars : Introduction (J.-C. PECKER). Problème de l'homogénéité de la distribution des galaxies (L. NOTTALE).

— 13 mars : Problème de l'origine exclusivement expansionniste et/ou cosmologique du décalage spectral (C. VANDERRIEST).

— 27 mars : Problème de l'origine cosmologique du rayonnement de fond de ciel à 3 K (A. BLANCHART).

— 17 avril : Problème de l'origine cosmologique des éléments légers (A. VIDAL-MADJAR).

— 24 avril : Discussion du scénario standard de l'univers « très primordial » (J. SCHNEIDER).

— 2 mai : Cosmologies à variation des constantes (P. MÉRAT).

— 9 mai : Univers cosmologique à bipartition (J.-M. SOURIAU).

— 15 mai : Les univers froids (R. HAKIM).

— 22 mai : Cosmologies dérivées de l'éther de Dirac (J.-P. VIGIER).

— 29 mai : Alternatives à la Relativité (M. DAMOUR). Discussion générale et conclusion.

Avec l'apparition des théories de « grande unification », la recherche en cosmologie a reçu une impulsion nouvelle. Il faut bien dire que les enjeux sont plutôt purement techniques car à part la possibilité d'un début absolu du temps les enjeux philosophiques sont faibles. C'était l'occasion pour prendre du recul vis-à-vis de l'engouement parfois non critique pour la théorie de l'explosion primordiale. C'est ainsi qu'au cours des dix séminaires de l'année, ont été passés au crible de la critique les hypothèses fondamentales du modèle orthodoxe de l'expansion de l'univers (dit souvent « modèle standard ») : L'univers est-il vraiment homogène ? (L. Nottale) ; le décalage spectral est-il vraiment une preuve de l'expansion ? (C. Vanderriest) ; le rayonnement à 3 K ne peut-il s'expliquer autrement que comme résidu de l'explosion primordiale ? (A. Blanchard) ; l'abondance des éléments légers ne rencontre-t-elle aucune difficulté ? (A. Vidal-Madjar) ; existe-t-il actuellement un modèle non contradictoire de l'univers très primordial ? (J. Schneider) ; la Relativité générale est-elle la seule théorie possible de la gravitation ? (M. Damour).

Il semble que le modèle orthodoxe présente suffisamment de souplesse pour offrir une théorie relationnelle suffisante de l'ensemble des observations. Des tests cruciaux nouveaux ont été évoqués.

Cependant il est indispensable de rester ouvert à la possibilité d'autres modèles : les constantes fondamentales (e , G ...) pourraient varier au cours du temps (P. Mérat). Le point faible semble être le caractère ad hoc de ces variations. Dans un univers à l'origine de température nulle, une transition de phase peut se produire à l'époque où les quarks libres se confinent en hadrons ($t \simeq 10^{-5}$ sec). Il se produit alors un réchauffement qui explique le rapport n_ν/n_B actuellement observé. L'évolution ultérieure de l'expansion est la même que dans le modèle orthodoxe. Peut-être ce modèle « froid » s'en distingue-t-il par une densité de monopoles différente (R. Hakim). Il existe actuellement dans la distribution observée des quasars une bande vide dans le ciel. Celle-ci jouerait le rôle d'un véritable « équateur » cosmique. Il reste à en confirmer l'existence et éventuellement à en comprendre l'origine (J.-M. Souriau). Il existe un modèle de la mécanique quantique à paramètres cachés non locaux qui est compatible avec les expériences d'Aspect. Le photon y est un soliton (dans un « milieu subquantique » qui perd progressivement son énergie au profit du milieu — « éther de Dirac » (J.-P. Vigier). On a ainsi un mécanisme de décalage spectral non lié à l'expansion. Il faut attendre le résultat de nouvelles expériences de laboratoire, éventuellement cruciales, avant de conclure.

En définitive ce domaine reste très vivant et au cours des années à venir, on peut espérer que, grâce à des observations astronomiques et des expériences de laboratoire nouvelles, soit le modèle orthodoxe sera renforcé, soit des modèles autres s'avèreront plus conformes à l'expérience.

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

M. Guillermo TENORIO-TAGLE (Max Planck Institute für Astrophysik (Munich) a fait une série de leçons sur les sujets suivants : Interstellar matter : energetics and evolution. 1. The Interstellar Medium : a review (8.11.83) 2. Radiation hydrodynamics : shock waves and ionization fronts (15.11.83). 3. Ionized nebulae : formation and evolution (22.11.83). 4. Supernova explosions and their remnants (29.11.83). 5. Stellar wind models. The formation of Herbig-Haro objects (6.12.83). 6. Giant H II regions. Galactic holes and shells (13.12.83). 7. The intermediate and high velocity clouds (20.12.83). Summary and future prospects (20.12.83).

M. Stuart POTTASCH (Université de Groningue, Pays-Bas), a fait une conférence sur le sujet suivant : IRAS studies of protoplanetary nebulae (14.11.83).

M. Julian KROLIK (Harvard College Observatory, Cambridge, Massachusetts), a fait une série de leçons sur le sujet suivant : Active galactic nuclei. 1. Review of the relevant observations (10.04.84). 2. The dynamics of the narrow line region (17.04.84). 3. The dynamics of the broad line region (24.04.84). 4. The release of energy (31.04.84).

M. Halton ARP (Mount Wilson and Las Campanas Observatories, Californie), a fait une série de leçons sur le sujet suivant : Quasars, galaxies and redshifts. 1. Distribution of quasars on the sky : concentrations and lines of high and low redshift quasars, luminosities of quasars in nearby groups (15.05.84). 2. Non velocity redshifts in galaxies : new evidence from analysis of very accurate redshifts in over 80 of the nearest group of galaxies (22.05.84). 3. Quantization of galaxy redshifts : new solutions for solar motion and their effect on galactic rotation and true velocity motions (29.05.84). 4. Detailed associations of quasars and galaxies. New multiple associations and connection with X-ray and radio material (30.05.84).

Un colloque organisé au Collège de France par le C.N.R.S. et le J.S.P.S. japonais, a traité de : « Active phenomena in the outer atmosphere of the Sun and Stars », du 3 au 7 octobre 1983. Un ouvrage a été édité en 1984 (ed. J.-C. PECKER et Y. UCHIDA, Observatoire de Paris).

Séminaires informels organisés par la chaire

En plus des cours donnés au Collège par des professeurs invités, du cours et du séminaire, dont on a ci-dessus résumé le contenu, le L.A.T. a organisé plusieurs ateliers ou séminaires :

A l'I.A.P., le D^r Halton ARP a donné un exposé, le 6 décembre 1983, sur « New observations of quasars-galaxies associations ».

A l'I.A.P., et avec l'aide de J. ROLLAND, que je tiens à remercier ici, un atelier a traité des *radiosources extragalactiques*, en une série de huit exposés (du 20 au 23 mars 1984).

Deux exposés d'une heure ont eu lieu chaque après-midi pour laisser libre les matinées et permettre ainsi les discussions entre les personnes intéressées. Deux exposés, par R. HANISCH (Dwingeloo) et G. MILEY (Leiden), étaient consacrés aux propriétés observationnelles des composantes étendues des radiogalaxies. Deux exposés, par J. ROLAND (Paris) et G. PELLETIER (Grenoble), passaient en revue les problèmes théoriques de la formation des radiosources étendues. Les deux exposés suivants, L. NOTTALE (Paris) et H. VAN DER LAAN (Leiden), étaient liés aux problèmes cosmologiques que peut résoudre l'étude des radiosources extragalactiques. Et enfin les deux derniers exposés, I. PAULINY-TOTH (Bonn) et M. ABRAMOWICZ (Trieste) étaient consacrés d'une part aux propriétés observationnelles, et d'autre part aux modèles théoriques des radiosources compactes associées aux noyaux de galaxies. En plus de ces exposés, un certain nombre de résultats expérimentaux ou théoriques ont été présentés lors de courtes communications par les radio astronomes de Jodrell Bank et par E. ASSEO de l'Ecole Polytechnique.

Cette série de séminaires a été rendue possible grâce à une étroite collaboration entre le Collège de France et l'Institut d'Astrophysique. Elle a permis aux personnes intéressées par l'étude des radiosources extragalactiques et des phénomènes de la physique des hautes énergies, d'entrée en contact avec les radio astronomes des principaux centres européens et de créer ainsi des échanges scientifiques particulièrement fructueux qui se sont traduits par des invitations d'astronomes français dans ces centres européens.

Le L.A.T. a organisé, en septembre 1983, à l'île d'Yeu, un atelier sur *les galaxies actives* où participaient des membres du L.A.T. et des chercheurs de l'Observatoire de Meudon (S. COLLIN, S. DUMONT, M. JOLY, J.-L. MASNOU, L. NOTTALE, J.-C. PECKER, H. SOL).

Un autre atelier, en juin 1984, à l'île d'Yeu également, a traité des *méthodes d'addition de couches dans les problèmes de transfert en milieu à symétrie sphérique* (C. BERTOUT, G. DEBÈVE, M. GROS, C. MAGNAN, J.-C. PECKER).

COMPOSITION DU LABORATOIRE

(juin 1983 - juin 1984)

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.), A. L'HÉVEDER (techn. Coll. de Fr., décédée nov. 1983), C. MAGNAN (ss. direct. Labo. Coll. de Fr.), P. MÉRAT (ingénieur C.N.R.S., depuis janv. 1984), 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 : F. BELIME (vacataire), D. FATTACIOLI (stagiaire D.E.A.), H. KARAMI (vacataire), E. GIRAUD (thèse d'Etat, Montpellier).

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) : M.H. DEMOULIN-ARP (mai-juin 1984), K. NAMOTO (avril 1983), M. YORKE (janv. 1984), A. NICOGHOSSIAN (nov. 1983), S. TAMURA (juin-sept. 1984), P. DELACHE.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

(Le nom des membres du L.A.T. est souligné, dans le cas de publications avec d'autres auteurs.)

[1] A. AIAD, I. APPENZELLER, C. BERTOUT, S. ISOBE, M. SHIMIZU, O. STAHL, M.F. WALKER, B. WOLF, *Coordinated Spectroscopic observations of YY orionis Stars (Astron. Astrophys., 130, 67, 1984).*

[2] C. BERTOUT, *T. Tauri stars : an overview (Reports on Progress in Physics, 47, 111, 1984).*

[3] C. BERTOUT, *L'énigmatique compagnon de T. Tauri (L'Astronomie, 173, avril 1984).*

[4] C. BERTOUT, *T. Tauri South : a Protostar ? (Astron. Astrophys., 126, L 1, 1983).*

[5] C. BERTOUT, *An efficient method for computing spectral line profiles in extended envelopes (Astrophys. J. (soumis), 1984).*

[6] C. BERTOUT, C. LEITHERER, O. STAHL, B. WOLF, *Infrared studies of early-type stars in OB associations. II. A discussion of density and temperature distributions in stellar winds* (Astron. Astrophys., sous presse, 1984).

[7] R. CAYREL, G. CAYREL-DE STROBEL, B. CAMPBELL, N. MEIN, P. MEIN, S. DUMONT, *Evidence of high chromospheric activity in Hyades dwarfs from spectroscopic observations* (Astron. Astrophys., **123**, 89, 1983).

[8] S. DEPAQUIT, J.-C. PECKER, J.-P. VIGIER, *Do selection effects really influence the redshift distribution law of Quasars?* (Astron. Nachr., sous presse, 1984).

[9] V. DOAZAN, R.N. THOMAS, *Possible identifying characteristics of Be stars* (Proc. of the 4th European I.U.E. Conference, Rome, mai 1984).

[10] V. DOAZAN, G. SEDMARK, R. STALIO, R.N. THOMAS, A.J. WILLIS, *An Episodic Red-Wing Structure of Si IV λ 1394 in γ Cas* (Proc. of Goddard Symp. « The Future of Ultraviolet Astronomy », avril 1984).

[11] V. DOAZAN, C. MOROSI, A. STALIO, R.N. THOMAS, A.J. WILLIS, *Abrupt changes in the CIV Resonance Lines of θ CrB* (Astron. Astrophys., **131**, 210, 1984).

[12] V. DOAZAN, R.N. THOMAS, *Variability of Mass-Flux in Be stars* (Proc. of Workshop on Rapid variability in Early-Type stars, ed. P. Harmanec, 1984).

[13] S. DUMONT, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, J.-C. VIAL, E. CHIPMAN, *Structure and Physics of solar faculae. III. The densities in the Chromosphere-Corona transition zone* (Solar Physics, **83**, 27, 1983).

[14] C. FANG, Z. MOURADIAN, G. BANOS, S. DUMONT, J.-C. PECKER, *Structure and Physics of solar faculae. IV. Chromospheric granular structure* (Solar Physics, sous presse, 1984).

[15] M. GROS, *Le milieu interstellaire* (Bull. Union des Physiciens, **659**, déc. 1983).

[16] M. GROS, *Calculs d'enveloppes stellaires. Effets de géométrie* (Compte rendu du groupe de travail de la R.C.P. 615 sur les étoiles Mira, ed. M.O. Ménessier, Univ. Montpellier, 1983).

[17] H. HIEI, Z. MOURADIAN, S. DUMONT, J.-C. PECKER, *Active regions of G type stars* (Proc. of the French-Japan coll. on Active phenomena in the outer atmosphere of the Sun and stars, p. 272, 1983).

[18] S. KICHENASSAMY, R. KRIKORIAN, *The ionization equation in a relativistic gas* (J. Phys. A., **16**, 2 347, 1983).

[19] S. KICHENASSAMY, R. KRIKORIAN, *Relativistic generalisation of the Einstein-Milne relations*. (Phys. Rev. A., **29**, 1 552, 1984).

[20] C. LEITHERER, C. BERTOUT, O. STAHL, B. WOLF, *The Cool wind of the B hypergiant Cygnus OB 2 No. 12 in the infrared* (*Astron. Astrophys.*, sous presse, 1984).

[21] C. LEITHERER, C. BERTOUT, B. WOLF, *Infrared Continuum Radiation from Stellar Winds of OB stars* (*Mitt. Astron. Ges.*, sous presse, 1984).

[22] C. MAGNAN, *Physics of Line Formation in Moving Astrophysical Media* (ouvrage de 300 pages environ, à paraître).

[23] C. MAGNAN, *Redistribution Functions for Astrophysical Cases* (*Astron. Astrophys.*, sous presse, 1984).

[24] C. MAGNAN, *Line Formation in the Presence of Turbulence* (en préparation, 1984).

[25] Z. MOURADIAN, S. DUMONT, C. FANG, J.-C. PECKER, *Photospheric and chromospheric magnetic fields structure* (Proc. of the French-Japan coll. on Active phenomena in the outer atmosphere of the Sun and stars, p. 63, 1983).

[26] J.-C. PECKER, *L'atmosphère du Soleil et des étoiles*, in : *Understanding the Universe* (Proc. of International Astron. Seminar, Unispace 82, United Nations/I.A.U., Vienne, Autriche, août 1982 ; D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 1983).

[27] E. SIMONNEAU, I. HUBENY, J. OXENIUS, *Absorption and emission line profile coefficients of multilevel atoms. I. Atoms profile coefficients* (*J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, sous presse, 1983).

[28] E. SIMONNEAU, I. HUBENY, J. OXENIUS, *Absorption and emission line profile coefficients of multilevel atoms. II. Velocity-averaged profile coefficients* (*J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, sous presse, 1983).

[29] E. SIMONNEAU, J. BORSENBERGER, J. OXENIUS, *Resonance line transfer and transport of excited atoms. I. Basic relations and limiting cases* (*J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, sous presse, 1984).

[30] R.N. THOMAS, *Stellar atmospheric structural patterns* ; vol. 4 of the N.A.S.A.-C.N.R.S. monograph series : *Non Thermal Phenomena in Stellar Atmospheres* (1984).

COLLOQUES, SÉMINAIRES, MISSIONS

Colloque « *Rapid variability in early-type stars* », Hvar, Yougoslavie, septembre 1983 (R.N. THOMAS).

Colloque franco-japonais « *Active Phenomena in the outer atmosphere of the Sun and stars* », 3-7 octobre 1983, Collège de France, Paris (J.-C. PECKER, S. DUMONT, R. KRİKORIAN, H. KAROJI).

Second Trieste Workshop on *Non Equilibrium Thermodynamics in Astronomy*, octobre 1983, Trieste, Italie (R.N. THOMAS).

Table ronde « *Actions incitatrices* », Observatoire de Meudon, 28 novembre 1983 (S. DUMONT).

Colloque Planetarium. Conseil de l'Europe, Strasbourg, 7-8 mai 1984 (S. DUMONT, M. GROS).

C. BERTOUT : Mission à Heidelberg (avril 1984) et séjour aux U.S.A. (août 1983 - février 1984). Séminaire à Los Angelès (janvier 1984) « *The region of T Tauri stars* ».

R. KRİKORIAN : Mission à l'Observatoire de Byurakan (Arménie) en juillet 1983 sur les problèmes relativistes de transfert de rayonnement ; un séminaire a été donné sur l'équation d'ionisation relativiste et application à la généralisation relativiste des relations d'Einstein-Milne.

R.N. THOMAS : Plusieurs séjours aux U.S.A. pour l'élaboration des monographies « *Non Thermal Phenomena in Stellar Atmosphere* » (juin, juillet, août, novembre 1983 ; avril, juin, juillet, août 1984), et à Munich (24-28 avril 1984).

J.-C. PECKER a donné une série de conférences et d'interview : « La correspondance scientifique de Renan et de Berthelot sur le scientisme » (Collège de France, 19 mars 1983). « Les systèmes planétaires et l'évolution protostellaire (Académie des Sciences, 22 novembre 1983). « Les faits cosmologiques ; l'univers 1983 » (La Louvière, 16 novembre 1983). « Un siècle à l'Observatoire de Juvisy » (Société Astronomique de France, 14 décembre 1983). « L'univers 1984 » (Lille, 18 janvier 1984 ; C.A.E.S. du Collège de France, 26 janvier 1984 ; Assemblée Concours Général, 1^{er} février 1984 ; Saint-Lô, 18 mai 1984 ; déjeuner Paul Gauthier, novembre 1983). Participation au colloque « Science et Art », en janvier 1984, à l'Hôpital Bicêtre avec une communication « Construction de l'abstraction ». Conférences à l'Union Rationaliste, le 23 janvier 1984 sur « Les avions renifleurs », le 26 mars sur « Mon athéisme » ; le 21 janvier 1984 au C.L.E.A. sur « Les oscillations solaires » ; le 29 mai au Cercle Républicain sur « Les limites de l'astrophysique ». Participation à une série de 6 émissions avec P. AUGER à France-Culture « Les grandes avenues de la science », et de 2 émissions avec G. CHARBONNIER ; émission télévision (Antenne 2) sur « Le métier de penseur ». Participation aux rencontres organisées par le C.N.R.S. avec des enfants sur l'astronomie, le 23 juin 1984. Présentations d'ouvrages à l'Académie des

Sciences, « The A-type stars », monographie C.N.R.S.-N.A.S.A., « Les premières théories planétaires chinoises », de M. TEBOUL (préface de J.-C. PECKER).

ACTIVITÉS DIVERSES

L'activité scientifique des chercheurs du L.A.T. est l'aspect essentiel qu'il convient de décrire dans un tel rapport. On notera cependant les activités d'enseignement (Paris VI) de H. KAROJI. La rédaction d'articles de synthèse relève de cette activité d'enseignement : C. BERTOUT a rédigé un article de synthèse assez complet sur les propriétés et les modèles d'étoiles T Tauri pour *Reports on Progress in Physics* [2] ainsi qu'un article à caractère moins spécialisé pour l'Astronomie [3].

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, « *L'Astronomie, Science du ciel* », 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. De même nature est sa participation au Haut Collège de Philosophie ou au C.E.S.T.A., ou à la Fondation de France.

On notera également l'achèvement cette année de l'ouvrage de J.-C. PECKER, « *Sous l'étoile Soleil* », sous presse chez Fayard.

En vue d'un ouvrage largement accessible de philosophie scientifique, C. Magnan a également entrepris un travail de réflexion sur les rapports que le physicien établit entre la nature et la théorie : la thèse soutenue consiste essentiellement à affirmer la spécificité profonde de chacun des domaines en cause ; les différences entre le monde et les modèles mathématiques sont radicales ; l'attitude consistant à assimiler le monde à un formalisme mathématique est condamnable. Cette attitude est présentée comme typiquement « masculine ». D'un point de vue scientifique, C. MAGNAN essaie de présenter les théories maniées par les physiciens et ce d'une façon résolument explicite, pour faire comprendre ce qu'est vraiment et concrètement une théorie scientifique. On examine ainsi les modèles d'univers et les cosmologies relativistes, la mécanique quantique et la structure de la matière (sans oublier les trous noirs et autres singularités, comme celle de la naissance de notre Univers). L'ouvrage voudrait affirmer la place de la science dans la connaissance mais sans lui attribuer pour autant un pouvoir absolu.

Enfin, comment ne pas mentionner, encore que cette activité soit de nature purement scientifique, le rôle essentiel joué par R.N. THOMAS dans la coordination de la série d'ouvrages (monographies) éditées par la N.A.S.A. et le C.N.R.S. sur le thème : « *Physiques des phénomènes non thermiques dans les atmosphères stellaires* ». Huit volumes constituent cette série. Quatre sont parus (dont un, cette année, déjà cité, et dont l'auteur est R.N. THOMAS), quatre paraîtront d'ici 1986. R.N. THOMAS est également responsable, avec des collègues italiens et français, de l'organisation de la série des Ateliers de Trieste sur la thermodynamique hors équilibre en astrophysique (deux ateliers à ce jour, septembre 1982, octobre 1983), et de l'édition des comptes rendus de ces ateliers.

PUBLICATIONS DIVERSES

J.-C. PECKER, *La correspondance scientifique d'Ernest Renan et de Marcelin Berthelot* (*Bull. Etudes Renaniennes*, **53**, 10, 1983).

— *Humanism and the fight for humanity* (*Free Inquiry*, vol. 3, 4, 20, 1983).

— *Une fausse science* (*Ça m'intéresse*, **30**, 11, 1983).

— *Des Lyonnaises en grimoire dans Ravenne* (*Débat*, **29**, 167, ed. Gallimard, 1984).

DISTINCTIONS, NOMINATIONS

S. DUMONT a reçu le prix des Dames de la Société Astronomique de France en juin 1983 ; elle a été nommée Chevalière dans l'Ordre des Palmes Académiques, en juillet 1983.

C. MAGNAN a reçu de l'Académie des Sciences le prix Damoiseau, en 1982, destiné à récompenser l'auteur du mémoire de théorie, suivie d'applications numériques qui paraîtra le plus utile aux progrès de l'astronomie.

J.-C. PECKER a été nommé membre du Conseil Scientifique du C.E.S.T.A., membre du Haut Conseil de Réflexion du Collège International de Philosophie, membre du Conseil Scientifique de la Fondation de France, membre du Jury de la Fondation Cino et Simone del Duca ; il est Président d'Honneur du C.L.E.A. (Comité de Liaison Enseignants-Astronomes), membre du Jury du prix de la Fondation Guinness. Il a reçu le prix de l'Union Rationaliste 1983.