

Astrophysique théorique

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

COSMOLOGIE OBSERVATIONNELLE

I. *Les faits cosmologiques*

... de l'infini sur la planche !
Jules Laforgue (Hamlet)

Jusqu'à ces dernières années, la cosmologie, depuis que, grâce aux équations d'Einstein, les mathématiciens peuvent travailler sur leur mille et une solutions possibles, avait l'image d'une science mathématique. L'objet : la description de l'univers comme un tout, et de son évolution. Les outils : l'ensemble des équations d'espace-temps, véritables équations de la dynamique einsteinienne, et des conditions aux limites, nécessaires, mais encore presque parfaitement arbitraires. D'où la floraison de modèles, encore très nombreux, malgré les hypothèses restrictives imposées, homogénéité, isotropie, ..., que les faits ne suggèrent guère, mais que les équations supportent bien.

La période actuelle — disons depuis les années 1950 —, constitue une inflexion considérable de la cosmologie. De plus en plus, des *faits d'observation* caractérisent l'univers observé, bien entendu, sinon l'univers observable. Les données s'accumulent, et constituent des conditions aux limites réalistes, absentes jusqu'alors...

Mais une curieuse histoire s'amorce alors : c'est la valse-hésitation des cosmologistes, poussés par tels ou tels astronomes vers des faits « considérés », ou non, « comme cosmologiques », c'est l'influence, sournoise parfois, de connotations métaphysiques simplistes. Le but de la cosmologie, certes, c'est la connaissance de la totalité de l'univers physique. Mais les problèmes

de langage restent des obstacles difficiles. L'univers observé est une chose ; l'univers observable... — aux astronomes de nous dire quels moyens matériels utiliser pour y accéder !.. Mais la cosmologie va bien au delà ; son objet c'est *tout* — tout ce qui est observé, observable, et aussi ce qui ne sera peut-être jamais observable.

Bien entendu, un cadre mathématique, géométrique, est nécessaire à ces travaux d'extrapolation. L'espace immédiatement voisin est euclidien. Mais à cette grande distance, un espace-temps est nécessaire (citons Taylor et Wheeler (1) : « Space is different for different observers ; time is different for different observers ; space-time is the same for everyone »). Localement, actuellement, il doit être « tangent » à l'espace euclidien infini, cadre des spéculations classiques des anciens, de Newton et à ses successeurs du xx^e siècle jusqu'à l'intervention des espaces riemanniens, mais encore cadre commode des discussions relatives au laboratoire physique.

Un problème important pour la pédagogie — donc la compréhension —, de la cosmologie, est donc celui de la représentation de l'espace. Le tableau noir est notre nécessaire plan de projection ; mais peut-on avoir, à deux dimensions, des idées justes ? Le monde impossible de Max Escher ne l'est précisément que dans la mesure où il représente à deux dimensions, des images réalisables d'objets à trois dimensions qui ne peuvent exister. A deux dimensions, il existe 5 types d'espaces partout localement euclidiens ; en 3 dimensions, il en existe 18... Les caractères de connexité, d'orientabilité, d'ouverture... déterminent cette multiplicité bien connue. Le monde à deux dimensions, décrit par Abbott dans le fameux « The Flatland by a square » (2), met bien en évidence le mal que nous avons, et les raisons de ce mal, à nous « imaginer » (au sens étymologique !) un espace quadridimensionnel, et, ce faisant, met en évidence aussi la débauche de fantasmagorie absurde qui peut naître des considérations mal contrôlées sur l'univers quadridimensionnel — l'espace-temps de la cosmologie moderne.

On peut dépasser cet espace-temps, et aller, avec Wheeler, vers un superspace à cinq dimensions où, de loin en loin, quelque catastrophe conduirait à la création d'une structure d'espace-temps à 4 dimensions... Mais en a-t-on le droit ? L'espace et le temps, nous savons un peu de quoi nous parlons, comment on les mesure... Aller plus loin ? Soit ! Mais en a-t-on le droit aussi souvent qu'on l'utilise ?

La cosmologie, par ailleurs, se heurte à l'horizon du connu, voire du connaissable. Cet horizon, d'ores et déjà, est éloigné ; le concept en est d'autant plus ambigu, avec sa connotation purement géométrique. Ne doit-on pas corriger les mesures lointaines de l'effet du temps qu'a mis le signal lumineux à nous en parvenir ? Une description « retardée » des différentes portions de l'univers est donc impérative. Et, en ce qui concerne les faits

d'importance cosmologique, cette correction peut être essentielle, et si importante qu'elle conduit à des constructions différentes les unes des autres selon la façon dont on tient compte de l'évolution, par exemple, des objets lointains.

La notion de fait cosmologique, si importante aujourd'hui, évolue, avon-nous dit, avec le temps, et d'un auteur à l'autre, dans la foisonnante (et contradictoire) période contemporaine. L'astronomie précopernicienne a conduit à des cosmologies complexes, mais insuffisantes, pour rendre compte des observations précises de Tycho-Brahé. Képler vint, et sa cosmologie à cet égard fut un immense progrès... Mais les observations galiléennes — la Voie Lactée décomposée en ses étoiles — imposait une vision plus large ; on connaissait des étoiles doubles ; on imaginait d'autres systèmes planétaires. L'unité newtonnienne, dans le cadre d'un univers-cadre euclidien éternel, et infini, alarmait les philosophes (je fais allusion notamment à l'angoisse pascalienne), mais satisfaisait les astronomes, jusqu'à Herschel et Le Verrier...

Quelques observations restaient mal insérées dans la description newtonnienne ; le paradoxe d'Olbers — qui conserve une grande importance — était considéré un peu comme une curiosité ; et l'inertie galiléenne comme l'expérience d'Eötvos en 1890 et dans les années suivantes, semblaient relever de la physique de laboratoire, tout comme les fameuses expériences de Michelson et de ses collaborateurs.

De ce fait, ne doit-on pas considérer que l'ensemble de la physique est un « fait cosmologique » ? Le succès constant que l'on a obtenu en appliquant à l'univers les lois de la physique ne s'est jamais démenti ; la spectrographie astronomique fournit d'excellents exemples de ce fait. Et, allant plus loin, les interprétations relativistes des expériences de laboratoire de Michelson conduisent directement à des concepts cosmologiques. Mais la physique se satisfait encore, à petite échelle, d'une géométrie euclidienne, et le caractère de « contact géométrique » des univers cosmologiques avec un univers euclidien local reste donc nécessaire.

Utiliser des faits cosmologiques (choisis, donc, dans une certaine mesure, subjectifs), en tirer une description de l'univers dans son ensemble, pouvant impliquer une géométrie difficile — telle est la tâche du cosmologiste d'aujourd'hui, tâche ambiguë certes, par maints aspects, et loin d'être encore satisfaisante — mais à coup sûr fort riche pour l'esprit —, comme pour le collègue astronome qui peut y trouver l'inspiration guidant vers de nouvelles observations et relançant sans cesse la balle au delà des limites toujours provisoires de son champ d'observation.

Le paradoxe d'Olbers. Dans ce cours, nous avons choisi un certain nombre de faits considérés, à tort ou à raison, jadis ou naguère, comme des « faits cosmologiques » afin de les examiner de façon critique.

Sans remonter trop loin, nous admettrons que Kepler et Newton rendent compte de la quasi-totalité de l'astronomie classique, y compris celle des systèmes stellaires et des systèmes de galaxies (dans la mesure où les positions mutuelles des objets sont seules concernées), et en excluant les galaxies trop lointaines, la vision de l'univers newtonien étant instantanée. Il importe peu que la lumière se propage dans l'univers newtonien de façon instantanée, qu'elle soit rapide ou lente...

Un fait cependant constituait pour les astronomes, depuis Képler, une étrange question — que le ciel soit *noir*. Il est vrai que des accumulations d'étoiles (Voie Lactée) brillent, bien que l'œil ne puisse pas « séparer » les diverses étoiles qui mêlent leur pâle lumière. Des étoiles plus lointaines encore, au fond du ciel en quelque sorte, ne joueraient-elle pas de rôle dans l'éclat du ciel nocturne ? Leur éclat serait-il à ce point dilué que d'être inobservable ? Képler posait la question — mais répondait par un univers de masses *fini*, dans un cadre géométrique *infini* ; la réponse d'Halley était un peu différente : l'éclat des objets lointains ne pouvait compter, en raison de l'affaiblissement imposé par la distance... Mais plus la distance augmente, plus le nombre d'objets est grand : l'un des effets ne compenserait-il pas l'autre, exactement ? Si l'on suppose l'univers rempli de façon homogène (aux fluctuations près), et isotrope, d'étoiles, supposées presque semblables les unes aux autres, le Soleil étant l'une d'elles, Loys de Chéseaux montre en 1743 que, quantitativement, la compensation est exacte ; l'affaiblissement du flux d'énergie reçu d'une étoile située à la distance r est connu, et ce flux varie comme $1/r^2$, cependant que le nombre d'étoiles dans une couche sphérique, centrée sur l'observateur, de rayon intérieur r , et de rayon extérieur $r + dr$ est égal à $4nr^2 dr$ (n étant le nombre d'étoiles, supposées semblables, par unité de volume). Le flux d'énergie reçu par l'observateur issu d'une sphère centrée sur lui et de rayon R est donc proportionnel à R , et croît aussi longtemps que l'on peut faire croître R .

Ce raisonnement, repris par Olbers en 1823, n'est pas tout à fait exact ; il est en effet évident qu'il suppose négligeables les dimensions apparentes des astres ; or une étoile, si elle est placée entre l'observateur et une autre étoile, en intercepte la lumière. Un calcul plus rigoureux montre que l'éclat du ciel nocturne devrait, dans le cadre des hypothèses faites, être semblable à celui de la surface du Soleil. Intuitivement, ceci peut se démontrer aisément ; dans le cadre des hypothèses faites, tout rayon visuel doit rencontrer, près ou loin, la surface d'une étoile. Or, dans un angle solide *donné* (en vertu du même raisonnement que celui décrit ci-dessus, mais appliqué avec rigueur à une portion de surface stellaire) il y a compensation exacte entre l'augmentation de la surface rayonnante (proportionnelle à r^2) et la décroissance du flux reçu en provenance d'un centimètre carré de la surface rayonnante (proportionnelle à $1/r^2$). La surface de l'étoile, dans un angle solide donné, rayonne donc autant, qu'elle soit proche ou éloignée.

Or le ciel est noir, ou, en tout cas, beaucoup moins brillant que le Soleil. Son éclat est de l'ordre, en fait, de 0.1 magnitude apparente par degré carré, alors que le Soleil a la magnitude apparente — 26.86, et une surface angulaire de $6.8 \cdot 10^{-5}$ stéradian, soit 0.2232 degrés carrés.

Pourquoi cela ? (voir pour l'historique du problème et des réponses au paradoxe et pour la bibliographie, Jaki (3) et Pecker (4)).

La réponse de Képler (Univers fini) convient évidemment parfaitement. Mais l'évolution des dénombrements d'étoiles, à chaque pénétration instrumentale ancienne, des dénombrements de galaxies, à chaque nouvelle pénétration de l'astronomie moderne, tend à faire rejeter cette vue. Au moins n'y a-t-il encore aucune tendance observable à cette finitude, même si on ne peut la rejeter. Les contemporains de Loys de Chéseaux et d'Olbers, eux, la rejetaient fermement. Alors ? Matière interstellaire obscurcissant l'éclat des astres lointains, pensa-t-on... Mais Herschel montra, fort justement, que dans un univers en équilibre, il y a égalisation des températures entre le rayonnement et la matière traversée, et que donc, pour des raisons de pure thermodynamique, la matière interposée aurait le même éclat que les étoiles situées derrière elle.

La découverte plus récente des décalages importants vers le rouge du spectre des galaxies lointaines suffirait à expliquer que la contribution des objets situés à distance r doit être atténuée fortement, dans le domaine visible, par un terme exponentiel. Il n'y aurait donc plus de difficulté...

Si ce raisonnement est en effet correct, dans le cas du paradoxe d'Olbers, il ne l'est pas pour le paradoxe de Seeliger, qui en est la forme gravitationnelle (5). En effet, les forces gravitationnelles décroissent selon une loi en $1/r^2$ — tout comme les flux lumineux. Deux différences majeures séparent cependant les deux problèmes. D'une part, les réponses au paradoxe d'Olbers ne répondent pas au paradoxe de Seeliger : il n'y a pas d'écran contre la gravitation, et l'observation ne porte pas sur une portion du spectre, mais sur la totalité de la force gravitationnelle. Mais d'autre part, on a d'un côté une intégration scalaire, de l'autre une intégration vectorielle : la force exercée par les masses situées dans une direction donnée est compensée exactement par celle qu'exercent les masses situées dans la direction diamétralement opposée — dans le cadre des hypothèses d'homogénéité et d'isotropie.

On ne peut donc aborder ce problème de la même façon, ni même le poser dans les mêmes termes que le problème de de Chéseaux-Olbers. Alors que des fluctuations par rapport à l'homogénéité ou l'isotropie n'affectent pas sérieusement la discussion d'Olbers, en revanche on doit se demander ce que de telles fluctuations entraînent au point de vue de la discussion de Seeliger. La résultante des forces agissant sur l'observateur est-elle nulle en général ? Ou non ? On conçoit que le calcul de fluctuation soit complexe. Sans en

donner les détails (non publiés, mais actuellement en préparation pour la publication), nous indiquerons que la fluctuation de la force agissant sur l'observateur varie en fonction du rayon R de la sphère d'intégration d'une façon énorme, sauf erreur comme $R^{3/2}$, en supposant une distribution poissonnienne des écarts par rapport à la stricte distribution homogène des masses.

A vrai dire, si l'observateur est soumis à une telle force, résultant des fluctuations par rapport à la distribution isotrope et homogène des masses de l'Univers, cela signifie que nous sommes placés à une certaine distance d'un puits de potentiel, et attirés par ce puits. Quelle en est la dimension ? Englobe-t-il l'amas local de galaxies ? Quel est le temps caractéristique de la chute au fond de ce puits ? Ce temps caractéristique est-il bref ou long par rapport au temps caractéristique des fluctuations dans l'univers ? Court vraisemblablement ; donc nous suivrions le fond du puits de potentiel dans ses déplacements, et aucune mesure ne pourra nous permettre de détecter cette force motrice liée aux fluctuations de la masse distribuée dans l'univers. Mais, par ailleurs, chaque région de l'Univers est constamment maintenue en une situation éloignée de l'équilibre... Il ressort de cette discussion que l'argumentation de Seeliger, qu'on y réponde ou non (par la solution de Charlier décrite ci-après, ou par une condition plus exigeante ; ou en admettant la finitude de l'univers des masses...) ne présente peut-être pas une très grande valeur d'argument. Au moins aura-t-elle suscité d'utiles discussions !

Le travail classique de Charlier (6) constitue une réponse aux deux paradoxes — dans le cadre d'un espace euclidien infini. La finitude de l'univers des masses en est une autre. Mais les constatations récentes sur la distribution de masses dans l'univers donnent à la description de Charlier un poids singulier, alors qu'aucune observation ne bute *encore* sur une limite de la pénétration des observations.

Charlier, inspiré sans doute par Kant et par Lambert, imagine un univers hiérarchisé. Chaque « galaxie d'ordre i » G_i contient N_i galaxies d'ordre $i-1$, a une masse M_i , un rayon R_i , une luminosité L_i . Dans l'analyse de Charlier (mais il n'y a rien d'essentiel à ces hypothèses, qui sont seulement de nature à faciliter le calcul) les G_i sont sphériques (ce qui implique des valeurs assez grandes de N_i et un remplissage assez homogène des G_i par les G_{i-1}) ; à l'ordre i , les R_i , L_i , M_i sont tous identiques ; on peut assurer un remplissage « parfait » de G_i par des sphères de rayon $q_i R_{i-1}$ (une telle hypothèse est une impossibilité géométrique — comme le savent bien les abeilles ! — mais elle fournit des ordres de grandeur intéressants et corrects) ; on a évidemment : $q_i = R_i N_i^{-1/3}$; la distance entre les G_{i-1} est de l'ordre de $2q_i$, dans ces conditions, Charlier établit les conditions auxquelles doit satisfaire cette construction pour rendre compte du fait observationnel qu'est le paradoxe d'Olbers.

Tout d'abord Charlier (qui avait mal compris les difficultés de Seeliger) constate que $M_i = N_i M_{i-1} = N_i N_{i-1} N_{i-2} \dots N_2 N_1 m_0$, où m_0 est la masse de la « galaxie d'ordre zéro » — c'est-à-dire, dans le vocabulaire de Charlier, celle d'une étoile. Il montre que la somme $M_1/R_1^2 + \dots M_i/R_i^2$ converge — et ce à la condition que M_i/R_i^2 soit *strictement* inférieur à M_{i-1}/R_{i-1}^2 (condition de d'Alembert). Ceci se traduit par la condition de Charlier :

$$R_i/R_{i-1} > N_i^{1/2} \quad (\text{A})$$

On notera que la condition du « remplissage » imposait déjà $R_i/R_{i-1} \geq R_i/Q_i$, soit $R_i/R_{i-1} \geq N_i^{1/3}$, ce qui est à peine moins contraignant.

Charlier cherche par ailleurs comment satisfaire à la condition imposée par les luminosités (condition d'Olbers). Il évalue la somme L/Q_i^2 , où Q_i est la distance de chaque structure à l'observateur ; ce calcul est élaboré, on s'en doute, car la distance Q_i dépend de la position de l'observateur et de l'objet i . Dans des géométries simplificatrices, Charlier montre que la condition (A) ci-dessus convient aussi et répond entièrement au paradoxe d'Olbers. Il en montre la généralité.

Ainsi que l'a bien noté Mandelbrot (7), la condition de Charlier est une condition imposée à la dimension fractale D de la distribution des masses. Dans un univers homogène, cette dimension est égale à 3. La condition de Charlier équivaut à dire qu'elle doit être strictement inférieure à 2.

Cette condition de Charlier appelle quelques autres remarques. Tout d'abord le coefficient q_i de remplissage ($q_i = N_i R_{i-1}^3/R_i^3$) doit donc être inférieur à $N_i^{-1/2}$, nombre déjà inférieur à l'unité.

La densité d de chaque structure G est telle que $d_i/d_{i-1} < R_{i-1}/R_i$, c'est-à-dire que la densité décroît plus vite que le rayon ne croît. L'intéressant est que l'observation montre bien une telle tendance (10). Lorsqu'on considère les étoiles, les galaxies, les amas de galaxies, il est clair que le système ne constitue pas une hiérarchie idéale, telle celle imaginée par Charlier. Mais, sans que la numérotation ait un sens physique réel (par exemple, si les étoiles ont l'indice *zéro*, mettra-t-on l'indice *un* aux galaxies, ou aux amas stellaires ? Ce n'est pas très clair...), on peut, pour chaque objet, évaluer d et R et l'on s'aperçoit que plus R est grand, plus d est petit. Une loi empirique est établie par de Vaucouleurs (8) dans le domaine exploré (des étoiles les plus petites jusqu'au volume de l'espace où l'on a effectué les dénombrements de Lick — soit jusqu'à une distance de 10^3 Mpc environ) ; elle a la forme :

$$\log d = -21.7 - 1.7(\log R - 21.7) \quad (\text{B}) \quad (d \text{ et } R \text{ en unités c.g.s.})$$

ce qui implique une décroissance nettement plus rapide de la densité moyenne que ne l'impose la condition (A) de Charlier (tant mieux !) et peut s'exprimer en disant que la dimension fractale de la distribution des masses dans l'univers

exploré est de l'ordre de $D = 1.3$. On notera que la loi empirique ci-dessus, avec la dimension 1.3 , satisfait aussi à la condition restrictive de Seeliger : on peut en effet montrer que la dimension fractale de la distribution des masses doit, pour y satisfaire, être inférieure à 1.5 (sauf erreur).

La relation entre densité et rayon appelle la comparaison avec la loi établie par Carpenter, loi limite qui suppose simplement que l'étoile (ou la galaxie...) étant visible (donc plus grande que le trou noir de même masse) sa densité doit être inférieure à la densité imposée par l'existence d'un tassement maximum de la matière. Si l'on introduit le rayon de Schwarzschild, $R_c = 2GM/c^2$, alors la densité doit vérifier l'équation $d_i < d_c = 3c^2/8\pi GR_i^2$, qui définit une région inaccessible dans le diagramme $\log d, \log R$ — et non pas comme on a pu le lire, une pente limite. De fait le coefficient Q_i de tassement ($Q_i = d_i/d_c$) est toujours inférieur à l'unité, comme l'a montré de Vaucouleurs — sauf évidemment pour les trous noirs, non considérés ici. Le coefficient de tassement est limité par la dispersion des vitesses, et de Vaucouleurs détermine la densité liée à cette dispersion, en appliquant le théorème du viriel. On peut mettre cette condition sous diverses formes.

On notera la difficulté qu'il y a à appliquer la condition d'Olbers sous sa forme initiale — qui implique la comparaison de G_i à G_{i-1} , et concerne cette seule comparaison. La relation continue $d(R)$ est plus commode d'emploi. Mais il faut aussi être prudent ; la relation empirique passe par des points concernant des astres précis ; pour des dimensions intermédiaires, la densité doit diminuer... avant d'atteindre la valeur correspondant à l'échelon suivant de la hiérarchie. Mais dès l'instant que l'on trace des courbes limites dans le diagramme en question, plutôt que de parler de pentes limites, les choses sont plus claires.

De plus, il convient de préciser que cette discussion observationnelle ne répond à la question d'Olbers-Seeliger que dans l'univers observable. Si l'univers est infini, alors pour y répondre, il faudrait qu'au delà des limites de l'exploration actuelle, la dimension fractale *reste* inférieure à 1.5 . Si au contraire, l'univers était fini — le problème ne se poserait plus. L'existence de la relation de de Vaucouleurs pour les objets définis, étoiles, galaxies, etc. se complète d'une relation analogue pour les milieux ambiants ; mais ces deux courbes se rejoignent progressivement ; le contraste est de moins en moins net entre les structures de plus en plus grandes, et le milieu dans lequel elles baignent. L'extrapolation au delà des limites de l'observation atteindra-t-elle une quasi-homogénéité ? Cela n'éliminerait pas pour autant une dimension fractale inférieure à 1.5 ... On voit que, une fois de plus, si le paradoxe d'Olbers-Seeliger a attiré l'attention sur un problème essentiel, celui de l'infini, celui aussi de la structure dimensionnelle de la distribution des masses observées, il ne permet pas pour autant de choisir une cosmologie unique ; il reste compatible soit avec un univers hiérarchisé seulement à petite

échelle, mais clos et de densité moyenne bien définie, soit avec un univers infiniment hiérarchisé de densité moyenne nulle.

Ce dernier point, si on l'adopte comme base d'une cosmologie mathématique, impose à cette cosmologie de ressembler à grande échelle, sinon à petite échelle, à l'univers de Sitter. Elle impose aussi une remarque essentielle sur le principe cosmologique. La distribution des masses, dans une hiérarchie extrapolée à l'infini, correspond à un univers « vide presque partout ». Mais comme l'a noté Mandelbrot, ceci impose une situation privilégiée à l'observateur. Pour un observateur quelconque, la densité moyenne mesurée sera nulle ; mais un « observateur » réel est toujours installé sur ou dans l'une des structures réelles. Et il faut reformuler le principe cosmologique sous la forme suivante, dite « conditionnelle » par Mandelbrot, pour tenir compte de ce que l'observateur terrestre est en somme, privilégié : « La distribution de matière suit les mêmes lois statistiques, quelles que soient l'origine et les axes du repère dans lequel elle est examinée, à condition que l'origine porte elle-même de la masse ».

Arguments pour et contre un univers fini. Sans entrer dans trop de détails dans une question qui reste ouverte de façon permanente pour les cosmologistes, il faut ici indiquer que, dans les récentes années, l'argument utilisant la théorie de la grande explosion, à l'origine de l'expansion de l'univers, permettait de lier la densité moyenne d_0 de l'univers, considérée comme un des paramètres du calcul, à la teneur en deutérium et en hélium de l'Univers. La mesure fournit cette dernière. L'abondance de deutérium semble particulièrement sensible à la densité moyenne actuelle, et permet d'en donner comme valeur plausible $2 \cdot 10^{-31} \text{ g cm}^{-3}$. Cette valeur, inférieure à la densité critique des modèles de Friedmann, toutes choses égales d'ailleurs, permet de penser à un univers en expansion constante, ouvert, infini. Mais cette démonstration n'est pas totalement convaincante. Tout d'abord, même dans le cadre de la théorie des modèles de Friedmann, il reste une incertitude sur la valeur de la constante de Hubble, qui se répercute sur la valeur de d_0 ; et par ailleurs il n'est pas encore évident que la valeur mesurée du deutérium représente effectivement la composition de l'univers avant la formation des galaxies : l'abondance du deutérium ne semble-t-elle pas varier beaucoup d'une direction à l'autre, dans le plan galactique ?

Tout récemment, la découverte (encore non complètement établie) de l'existence d'une masse non nulle du neutrino permet de revenir à une idée ancienne, exprimée depuis plus de trente ans par Zwicky (9). La majeure partie de la masse de l'univers serait faite de neutrinos, actuellement, et d_0 serait assez élevé. Autrement dit, l'univers serait fermé, d'une part. Et d'autre part, l'évolution dynamique de l'univers, ou de ses parties, serait commandée non par la distribution de matière, mais par la distribution (inconnue) des

neutrinos. Il faudrait alors introduire cette composante nouvelle dans les cosmologies ; et notamment introduire un mécanisme permettant de prévoir la distribution des neutrinos. Sont-ils là de toute éternité ? Ont-ils au contraire été formés au cours de milliards et de milliards d'années par les réactions thermonucléaires au sein des étoiles ?

On voit qu'il s'agit du problème peut-être le plus important de la cosmologie d'aujourd'hui, d'hier et de demain... On notera qu'un univers fermé, si la durée de vie en est infinie, se doit de permettre la régénération de l'hydrogène, et si elle est finie, l'évacuation de l'entropie. Ces deux problèmes, complémentaires en quelque sorte, imposent sans doute une nouvelle thermodynamique, valable à très grande échelle. En tout cas, ils sont loin d'être posés correctement ; plus loin encore d'être résolus.

Le problème de la finitude (dans le temps) de l'univers a des connotations métaphysiques. Des théologiens éminents sont intervenus dans le débat (10) ; le pape Pie XII a été jusqu'à assimiler explicitement *Fiat Lux* et *Big Bang*... Je voudrais citer ici l'opinion de Thomas d'Aquin, telle qu'elle m'a été rapportée par M. Claude Tresmontant, à l'érudition duquel je dois cette information dont je le remercie vivement : « La question du commencement de l'Univers est distincte de la question de la création de l'Univers. Il est impossible — pensait saint Thomas au XIII^e siècle — de démontrer l'éternité de l'Univers, contrairement à ce que pensaient les aristotéliens arabes. Il est impossible aussi de démontrer que l'Univers a commencé. Mais la question du commencement est distincte de la question de la création. L'analyse rationnelle peut établir que l'Univers, qui existe, ne se suffit pas. Il n'est pas l'Être absolu et l'Être absolu est distinct de l'Univers. On peut établir par l'analyse, indépendamment de la Révélation, que l'Univers dépend actuellement et continuellement de Celui qui lui donne l'être. Si même l'Univers était éternel — ce que saint Thomas ne pense pas — cela ne changerait rien au fait qu'il est créé, c'est-à-dire dépendant du point de vue de l'être. Si l'Univers est éternel, cela ne prouve pas encore qu'il soit incréé, car il pourrait être éternel et créé, de toute éternité : telle est la position de saint Thomas, qui reproduit d'ailleurs sur ce point saint Augustin. Sur ce point, saint Thomas s'opposait à son collègue le Cardinal Bonaventure qui enseignait aussi au Quartier Latin, et qui professait, lui, que la question du commencement est impliquée d'une manière nécessaire dans la doctrine de la création et qu'en conséquence, on ne peut pas disjoindre la question de la création et la question du commencement. »

Ce à quoi M. Tresmontant ajoute : « En 1980, il faut ajouter ceci : si l'astrophysique établit que l'Univers a commencé, cela ne permet pas encore d'en conclure qu'il est créé, car il faut de toute manière une analyse ultérieure, rationnelle, pour établir que, s'il a commencé, alors il est créé. Donc l'idée de commencement et l'idée de création ne coïncident pas formellement. Elles

sont formellement distinctes l'une de l'autre. La question est de savoir quelles relations existent entre commencement et création, si tout être créé a commencé, si tout être qui commence est créé. »

On concluera ce chapitre en insistant, une fois de plus, sur le fait que, même si les espaces-cadres d'une cosmologie sont infinis, les données de l'observation, la distribution des masses physiques ne peuvent être décrits qu'en évitant de parler d'« infini ». On peut pénétrer loin, aussi loin qu'on voudra, dans l'univers. Mais toute mesure se réfère à une distance déterminée et finie... Pour le physicien, on peut dire que ni le zéro ni l'infini n'ont de réalité mesurable. (Je remercie C. Magnan de ses remarques pertinentes à ce sujet, qui m'en ont permis une meilleure compréhension.)

La relation de Hubble-Slipher. La découverte par Slipher, entre 1910 et 1920, des importants décalages spectraux, le plus souvent vers le rouge, subis par le spectre des galaxies, l'établissement par Hubble des premières échelles de distance de ces galaxies, avaient conclu, on le sait, à l'établissement d'une relation linéaire

$$V_{Ri} = H_0 L_i \quad (C)$$

où V_{Ri} est la vitesse radiale apparente d'éloignement, symbolique (déduite du décalage spectral grâce à l'utilisation de l'effet Doppler-Fizeau), de la galaxie G_i , située à la distance L_i ; H_0 est la constante de Hubble, dont la valeur (actuellement) se situe entre 50 et 100 km s⁻¹Mpc⁻¹. Cette relation de Hubble est, sans conteste, pour la majeure partie des astronomes, un fait cosmologique — sans doute le plus important de tous [voir bibliographie générale dans (11)].

On notera cependant que la dispersion de cette relation est assez grande ; les raisons en sont, en partie, les difficultés liées à la calibration des distances ; en partie il s'agit de vitesses particulières des galaxies se superposant à un phénomène d'ensemble ; enfin, il n'est pas exclu que des décalages intrinsèques affectent, pour des causes physiques inconnues (« fatigue » de la lumière ?) les décalages spectraux de certains types de galaxies.

Des problèmes de deux natures différentes se posent.

Tout d'abord, s'il existe des causes physiques de décalages spectraux autres que l'effet Doppler-Fizeau, ne peuvent-ils être la cause de l'effet Slipher-Hubble, dans sa totalité, ou en partie ? Un univers statique, ou en expansion lente, serait alors compatible avec les observations — et le fait qu'est la relation de Hubble n'aurait plus qu'une valeur cosmologique très douteuse... Nous avons discuté un peu de ce problème au cours des années précédentes, et nous n'y reviendrons pas ici. Nous noterons cependant l'existence des cosmologies à G variable [Canuto et ses collaborateurs (12)] qui supposent un

univers sans expansion, dont les apparences sont liées à la variation de G . Ces cosmologies, comme celles de la « lumière fatiguée », ont de bons arguments, comme par exemple l'existence mesurée (quoique encore contestée) d'anomalies séculaires du mouvement de la Lune.

Non moins importante est la suggestion, très étonnante, que la relation de Hubble ne soit pas linéaire, mais quadratique. Dès 1925, Lundmark fit cette suggestion. Reprise récemment par Ségal et ses collaborateurs (13), elle a suscité une levée de boucliers ! Cependant les arguments statistiques de Ségal semblent convaincants à première vue. L'enjeu est tel qu'il serait souhaitable que d'autres chercheurs s'attaquent à l'étude statistique des données, avec un esprit critique suffisant. Si Ségal a raison, alors la relation entre V_{Ri} et L_i pourrait jouer le rôle de test cosmologique, et son importance est considérable : les modèles friedmanniens prédisent une relation linéaire. La chronogéométrie de Ségal prédit une relation du type quadratique, et l'analyse statistique qu'il fait le conforte donc dans le choix de cette cosmologie statique. Une intéressante controverse s'est installée, évidemment, à la suite de ces publications. On citera notamment le travail de Soneira, qui établit la liste des biais statistiques possibles ayant pu affecter les résultats de Ségal ; celui-ci, à son tour, nie l'importance de ces biais, et montre que Soneira en calcule l'effet dans le cadre, biaisé lui-même, de l'hypothèse de l'univers usuel en expansion.

Une discussion des biais statistiques, non affectée par l'hypothèse implicite, cachée, de la validité de telle ou telle construction cosmologique, est donc une nécessité. A notre connaissance, elle n'a pas été faite. On rappellera par exemple que dans un échantillon limité en magnitude, on a tendance à trouver une trop grande valeur de H_0 ; mais corriger de ce biais, en imposant une valeur maximum de la vitesse de récession V_R aux objets de l'échantillon, introduit un autre biais, tendant à faire sous-estimer H_0 ; cette discussion du biais (dit de Malmqvist) montre la nature difficile du problème posé sur un exemple simple ; elle a été récemment développée par Jaakkola et al., et par Nottale, dans sa thèse (14).

On doit ici noter, comme troisième argument d'une discussion de la loi de Hubble considérée comme fait cosmologique, qu'elle n'est pas un fait aussi déterminant qu'on le voudrait ; la constante H_0 seule, est compatible avec de très nombreux modèles, même dans l'hypothèse restrictive de l'Univers homogène et isotrope. En effet la solution dépend aussi du choix de la constante cosmologique Λ ($\Lambda = 0$ dans les modèles friedmanniens, mais peut-être différent), du paramètre q_0 de décélération, de la densité d_0 moyenne de l'univers actuel, de la température T_0 du corps noir de fond de ciel, supposé « cosmologique »... (voir ci-après).

Le rayonnement de fond de ciel. La découverte en 1965, par Penzias et Wilson, d'un rayonnement quasiment isotrope, ayant l'intensité d'un rayonnement de corps noir porté à 3 K environ, apparut alors comme la preuve « définitive » de la validité de l'Univers de la Grande Explosion (ou du « Big Bang »).

Gamow, Alpher, Herman, n'avaient-ils pas, dans des articles nombreux, assez connus et bien diffusés, prédit, dès 1948-1954 (15) l'existence d'un tel rayonnement, à partir de la théorie de la grande explosion ? Dicke, et ses collaborateurs n'avaient-ils pas cherché ce rayonnement (sans le trouver !), sur la foi des prévisions de Gamow, Alpher et Herman ? Certes ces prévisions n'étaient, dans cette série d'articles consacrés à la nucléogénèse, qu'un sous-produit, à peine ébauché ; et les valeurs numériques étaient assez différentes d'un article à l'autre : 5 K d'abord, puis 0.7 K plus tard, ou 170 K — selon le choix des constantes du calcul (les auteurs ne pouvaient connaître les mesures modernes de H_0 , par exemple, et ceci était l'une des sources d'erreur).

On a ici un exemple clair d'une déduction logique plus sentimentale que convaincante. Du fait qu'une cosmologie prévoit une observation, puis que cette observation est faite en effet, on en déduit que la cosmologie est correcte !.. Ce serait vrai si cette cosmologie était la seule à pouvoir faire la prévision en question. Or tel n'est pas le cas !

En 1954, en effet, presque en même temps que Gamow, un autre chercheur, Finlay-Freundlich (16), à partir de la théorie de la « lumière fatiguée », avec l'approbation de Max Born, prévoyait une valeur de 1.9 K à 6 K ; après correction tenant compte des estimations actuelles de la constante de Hubble, le calcul de Finlay-Freundlich aurait abouti à une valeur de 1.1 à 3.3 K. Dans un second article, il précise que « 1.5 K ne serait pas une valeur déraisonnable ». Il est amusant de préciser que dans la note qui suit l'article de Finlay-Freundlich, Born (le premier !) évoque la possibilité d'observer le rayonnement de fond de ciel dans la zone spectrale de la radioastronomie... Effectivement, c'est dans les longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques que se sont développées les mesures du rayonnement en question.

Cette édifiante histoire est rapportée en partie par Weinberg (17) : le rôle de Gamow, les relations entre Penzias et Wilson (qui ne savaient pas trop ce qu'ils avaient découvert !) et Burke, Peebles et Dicke, sont décrites de façon fort amusante, et vivante... Mais Weinberg ignore complètement le rôle de Born, et surtout de Finlay-Freundlich...

A posteriori, il est juste de noter aussi que dès 1941, McKellar, à partir de l'étude de raies moléculaires de CN, déduisit la nécessité de l'existence d'un rayonnement de corps noir à 2.3 K. C'est la température d'excitation

des niveaux $J = 1$ et $J = 2$, responsables des raies observées dans le milieu interstellaire dans la bande 387.4 nm du cyanogène CN.

Le rayonnement de fond de ciel observé ne prouve pas plus la validité de la théorie de Finlay-Freundlich que celle de Gamow, ne justifie pas mieux une cosmologie statique qu'une cosmologie expansionniste. Et l'on peut ajouter que Canuto (cosmologie à G variable) et Segal (chronogéométrie) rendent compte du rayonnement de fond de ciel... Il est donc abusif de parler de rayonnement « cosmologique » — ce qui implique en effet qu'il permette de justifier une conception cosmologique bien définie.

Les observations, depuis Penzias et Wilson, se sont affinées, posant de nouveaux problèmes. Le rayonnement d'un corps noir, en principe, a un spectre bien défini (par la loi de Planck) ; il est isotrope ; le corps noir est opaque. Les observations montrent que le « corps noir » de fond de ciel n'a pas ces propriétés. Tout d'abord, il n'est pas isotrope ; un écart systématique, dont la valeur maximum est de $1.9 \pm 0.8 \text{ mK}$ est observée par divers auteurs ; la distribution sur le ciel de cet écart suggère qu'il pourrait résulter du mouvement du Soleil dans une direction bien définie, l'« apex », avec une vitesse de l'ordre de 300 km s^{-1} ... Malheureusement l'apex ainsi déterminé ne correspond pas à l'apex déterminé par rapport aux galaxies de l'amas local, ou par rapport à des galaxies plus lointaines. Malheureusement aussi, il ne semble pas y avoir, entre les trois valeurs de la vitesse du Soleil vers l'apex, une réelle continuité : ceci implique une distribution très étrange en vérité du moment angulaire dans l'Univers. Cette situation conduit à penser que l'hypothèse d'un rayonnement de fond de ciel par une origine « locale » est possible : de fait cette hypothèse est impliquée par les versions modernes de la théorie de la lumière fatiguée [voir bibliographie dans (18)].

Par ailleurs, la distribution spectrale du rayonnement s'écarte de celle d'un rayonnement de corps noir. Quelle peut être la signification de ce fait ? Ségal semble être le premier à en avoir abordé une théorie, en admettant que la théorie du corps noir doit être transformée pour tenir compte d'un transfert global de moment angulaire global du milieu aux particules. Cet aspect de la théorie de Ségal implique une origine locale du phénomène ; elle peut évidemment s'appliquer indépendamment du choix de la cosmologie ; et par suite elle n'est en rien incompatible avec la théorie de la lumière fatiguée, sous sa forme moderne.

Une autre façon de voir les choses, dans le cadre d'une cosmologie de la grande explosion, c'est d'imaginer que le découplage entre matière et rayonnement s'est produit alors que l'équilibre thermodynamique n'était pas atteint ; l'écart au spectre du corps noir serait alors le résidu de la distribution statistique, hors équilibre, des énergies particulières au moment du découplage. D'autres tentatives ont été faites ; ainsi Puget et Heyvaerts (19) font-ils

appel dans ce même cadre classique de la cosmologie expansionniste, à une distorsion du spectre liée à l'interaction entre le rayonnement et la poussière prégalactique.

A ce stade, nous devons donc considérer que la théorie de la lumière fatiguée permet, aussi bien que la théorie de la Grande Explosion, d'interpréter la relation de Hubble, et le rayonnement de fond de ciel. On notera que dans cette théorie, sous sa forme moderne, les photons de fond de ciel résulteraient d'une désintégration spontanée des bosons pseudo-scalaires produits [selon, par exemple, Mikaelian (20)] dans les régions actives des étoiles (ou des galaxies). Ces photons sont « locaux », par opposition aux photons issus des sources lointaines, qui, du fait de leur interaction avec ces mêmes bosons scalaires, seraient affectés par des décalages spectraux vers le rouge (perte d'énergie des photons au bénéfice des bosons distribués). Nous renvoyons, pour une description contemporaine de l'état actuel de la théorie de la « lumière fatiguée », à quelques-uns des articles publiés (18).

Notre conclusion provisoire, c'est donc que le rayonnement du fond du ciel n'est pas forcément un « fait cosmologique », et que, à coup sûr, si c'est un fait cosmologique, il ne permet guère de trancher entre des cosmologies rivales...

L'abondance des éléments légers. La théorie de l'Univers de la Grande Explosion reconnaît trois faits cosmologiques essentiels : la relation de Hubble, l'existence du rayonnement de fond de ciel, et enfin l'abondance des éléments légers dans l'univers, deutérium, et hélium.

Des auteurs comme Gamow, Alpher, Herman, plus tard Fowler, M. et G. Burbidge, Hoyle... ont établi l'essentiel des réactions de nucléogénèse qui accompagnent la Grande Explosion, au cours du refroidissement rapide des premières minutes de la vie de l'univers de cette cosmologie (17).

On sait par ailleurs que les observations conduisent à des valeurs de l'abondance de deutérium et d'hélium qui sont incompatibles avec ce que les étoiles peuvent synthétiser en leur sein au cours de leur évolution normale. En fait, les observations sont rares et difficiles : la Terre et les météorites donnent lieu à des mesures très approximatives ; l'abondance de l'hélium, gaz rare, non combinable, peut diminuer par dégazage. Les mesures des noyaux alpha dans le rayonnement cosmique donnent de meilleures valeurs ; ces données sont cependant affectées d'erreurs systématiques ; ainsi dans les éruptions solaires, les mécanismes d'accélération dépendent de la charge des ions : si bien que les mesures d'abondance ne reflètent pas l'abondance réelle, là où les jets particuliers prennent naissance. Les implications des mesures du flux de neutrinos solaires, selon la théorie de Schatzman et Maeder de la diffusion turbulente (21) donnent pour l'intérieur du Soleil des valeurs raisonnables mais imprécises.

L'hélium neutre et l'hélium ionisé ont de nombreuses raies spectrales ; peu sont observables aisément : la raie IR à 1 083 nm, et diverses raies, dans le domaine UV, sont les principales raies connues dans le Soleil ; dans les étoiles chaudes, de type O et B, un assez grand nombre de raies (414, 403, 447 nm notamment) servent de critères de classification spectrale. D'où des déterminations d'abondances dans la chromosphère, les protubérances, les éruptions du Soleil — entachées malheureusement des difficultés de diagnostic de ces phénomènes inhomogènes, irréguliers, et variables, où le degré d'ionisation n'est pas toujours bien connu ; dans les étoiles O et B, on dispose de meilleures valeurs ; de même est-ce le cas dans les nébuleuses planétaires, notamment certaines d'entre elles associées à des amas globulaires, et dans celui de diverses régions H II. Enfin, dans un petit nombre de galaxies, des déterminations ont pu être faites. Bien entendu l'interprétation des spectres doit faire appel à une théorie hors équilibre thermodynamique, les mécanismes de population et de dépopulation des niveaux étant traités séparément les uns des autres. Exprimées en fonction du nombre d'atomes, les valeurs du rapport $N(\text{He})/N(\text{H})$ varient de 6 à 8 %. Or la nucléosynthèse stellaire permet d'enrichir la Galaxie, depuis 10^{10} ans, de seulement 0.1 à 2 % : il convient donc d'expliquer cette différence, significative malgré les incertitudes des calculs de nucléosynthèse.

Un argument essentiel de l'observation [voir (22)] tend à montrer que l'hélium est primordial (c'est-à-dire préexistant à la galaxie elle-même) : c'est l'existence d'une relation linéaire entre les nombres Y et Z, proportions (en masse) respectives de l'hélium, et des éléments lourds, dans les étoiles. Si l'on admet que $Z = 0$ correspondrait au mélange stellaire primordial, cette relation linéaire extrapolée à $Z = 0$ aboutit à $Y = 0.25$ (soit $N(\text{He})/N(\text{H}) = 8.6\%$).

Or les calculs des « premières minutes » de la grande explosion permettent de fabriquer une quantité d'hélium, correcte, de l'ordre de 10 %, avec des valeurs raisonnables des paramètres usuels de ces cosmologies.

On peut donc penser que ce succès est décisif, car il est en effet difficile de trouver d'autres processus de fabrication ; le cas du deutérium (non examiné dans le cours de cette année) est encore plus probant, *a priori*, dans la mesure où son abondance est très sensible aux paramètres de la cosmologie utilisés dans le calcul.

Pourtant, une certaine place reste ouverte à la controverse. En effet, en ce qui concerne le deutérium, une certaine inhomogénéité d'abondance, détectée dans la Galaxie, prouve qu'une certaine fraction de deutérium, au moins, n'est pas « primordiale ». De plus, dans la phase T Tauri de la vie d'une étoile (23), il semble que puissent se former, et être évacués vers le milieu interstellaire par des vents stellaires puissants, une quantité importante de

protons énergétiques, qui, par bombardement des grains solides du milieu interstellaire, conduirait peut-être à la formation de deutérium ; cette hypothèse rendrait alors inutile le recours à une formation « primordiale ».

En ce qui concerne l'hélium, il faudrait faire appel à un autre processus, qui a été suggéré de façon semi-quantitative (24) : au début de sa vie, notre Galaxie (comme les autres d'ailleurs) serait passée par une « phase active » ; le noyau, source de rayonnement UV intense, pourrait alors expulser des atomes d'hydrogène neutre (par la « pression » exercée par le rayonnement à 122 nm), tout en retenant les atomes neutres d'hélium, la raie à 58,5 nm étant utilisée à ioniser l'hydrogène au sein du centre (ou des centres) actif (s) de la Galaxie. L'ionisation des masses d'hydrogène éjectées serait ensuite produite par l'accroissement temporaire de la dimension de la région active, et la fuite, dans la direction privilégiée des pôles, de photons d'énergie supérieure à 13.6 eV ; l'hydrogène ionisé resterait confiné par un champ magnétique intergalactique, de l'ordre du μG , ou même moins. De tels processus, en effectuant un tri des éléments, contribuent à l'enrichissement en hélium de toute galaxie. Une analyse meilleure du point de vue quantitatif, tenant compte correctement de la théorie du transfert de rayonnement notamment, pourra-t-elle confirmer ou infirmer ce qui pour l'instant n'est qu'une hypothèse de travail ? Il serait imprudent de l'affirmer...

(Le cours de l'année suivante continuera à passer en revue de façon critique les « faits » considérés par tel ou tel groupe de chercheurs comme « cosmologiques » voire « d'importance cosmologique ».)

J.-C. P.

BIBLIOGRAPHIE

(1) E.F. TAYLOR, J.A. WHEELER, *Spacetime Physics* (W.H. Freeman ed., San Francisco, 1966).

(2) E.A. ABBOTT, *Flatland, A romance of many dimensions* (Blackwell, Oxford, 1974).

(3) S.J. JAKI, *The Paradox of Olbers paradox* (Herder & Herder ed., New York, 1969 ; voir aussi R. CHAMEAUX, *Bull. Soc. Astr. Toulouse*, **57**, n° 485, 1966).

(4) J.-C. PECKER, *Pour la Science* (**44**, 124, 1981).

(5) H. SEELIGER, *Sitz. math. Phys. Cl. d. K. (B. Akad. d. Wiss. z., München*, **26**, 373, 1896).

(6) C.V.L. CHARLIER (*Ark. f. Mat. Astr. Fys.*, **4**, n° 24, 1908 ; *ibid.*, **16**, n° 21, 1921).

(7) B. MANDELBROT, *Les objets fractals* (Flammarion ed., Paris, 1975).

(8) G. DE VAUCOULEURS (*Science*, **167**, 1203, 1970 ; *P.A.S.P.*, **83**, 113, 1971).

(9) F. ZWICKY, *Morphological Astronomy* (Springer ed., Berlin, 1957).

(10) PIE XII, *Discours du 22 nov. 1951 prononcé au cours de la réception de l'Académie Pontificale des Sciences.*

Saint Thomas d'Aquin, 1270, Sum. Theol. I., question 46, a.2, *De aeternitate mundi contra murmurantes.*

(11) Voir par exemple : S. MAVRIDÈS, *L'univers relativiste* (Masson ed., 1973) ; J. HEIDMANN, *Introduction à la cosmologie* (P.U.F. ed., Paris, 1973).

(12) V. CANUTO, P.J. ADAMS, S.-H. HSIEH, E. TSIANG (*Phys. Rev.*, D **16**, 1643, 1977).

V. CANUTO, S.-H. HSIEH (*Ap. J. Suppl.*, **41**, 243, 1979).

V. CANUTO, S.-H. HSIEH, J.R. OWEN (*Ap. J. Suppl.*, **41**, 263).

V. CANUTO, J.R. OWEN (*Ap. J. Suppl.*, **41**, 301, 1979).

V. CANUTO, H.-S. HSIEH (*Ap. J.*, sous presse, 1981).

(13) I.E. SEGAL (*Proc. Nat. Ac. Sc. U.S.A.*, **72**, 2473, 1975 ; *ibid.*, **77**, 10, 1980).

I.E. SEGAL (*M.N.R.A.S.*, **192**, 755, 1980).

J.F. NICOLL, D. JOHNSON, I.E. SEGAL, W. SEGAL (*Proc. Nat. Acad. Sc. U.S.A.*, **77**, 6275, 1980)

H.P. JAKOBSEN, M. KON, I.E. SEGAL (*Phys. Rev. L.*, **42**, 26, 1979).

R.M. SONEIRA (*Ap. J.*, **230**, L 163, 1979).

(14) T. JAAKKOLA, H. KAROJI, G. LE DENMAT, M. MOLES, L. NOTTALE, J.-C. PECKER, J.-P. VIGIER (*M.N.R.A.S.*, **177**, 191, 1976).

L. NOTTALE (Thèse, Univ. Paris VI, 1980).

(15) G. GAMOW (*Phys. Rev.*, **70**, 572, 1946 ; *ibid.*, **74**, 505, 1948).

G. GAMOW (*Nature*, **162**, oct. 1948).

G. GAMOW (*Mat. Fys. Medd. kob.*, **27**, n° 10, 1953).

R.A. ALPHER, R. HERMAN (*Nature*, **162**, n° 4 124, 1948).

R.A. ALPHER, R. HERMAN (*Phys. Rev.*, **75**, 1089, 1949).

R.A. ALPHER, R. HERMAN (*Rev. Mod. Phys.*, **22**, 153, 1950).

R.A. ALPHER, H. BETHE, G. GAMOW (*Phys. Rev.*, **73**, 803, 1948).

R.A. ALPHER, R. HERMAN, G. GAMOW (*Phys. Rev.*, **74**, 1198, 1948 ; *ibid.*, **75**, 332, 701, 1949).

A.J.W. FOLLIN Jr., R. HERMAN (*Phys. Rev.*, **92**, 1347, 1953).

(16) E. FINLAY-FREUNDLICH (*Nachr. Ak. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl.*, **7**, 95, 1953).

E. FINLAY-FREUNDLICH (*Phil. Mag.*, **45**, 503, 1954).

E. FINLAY-FREUNDLICH (*Proc. Phys. Soc.*, **A 67**, 192, 1954).

M. BORN (*Nachr. Ak. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Kl.*, **7**, 102, 1953).

M. BORN (*Proc. Phys. Soc.*, **A 67**, 193, 1954).

(17) S. WEINBERG, *Les trois premières minutes de l'Univers* (Seuil ed., Paris, 1978).

(18) J.-C. PECKER (*Coll. U.A.I. n° 37/C.N.R.S. n° 263*, 451, 1977).

J.-C. PECKER, *Einstein 1879-1955* (C.N.R.S. ed., p. 167, 1980).

Z. MARIC, M. MOLÈS, J.-P. VIGIER (*Astron. Astrophys.*, **53**, 191, 1976).

M. MOLÈS (Thèse, Univ. Paris VI, 1978).

J.-C. PECKER, J.P. VIGIER (*Astrofizika*, **12**, 315, 1976 ; bibliographie plus complète dans ces articles).

(19) J. HEYVAERTS, J.-L. PUGET (*Astron. Astrophys.*, **83**, L 10, 1980).

(20) K.O. MIKAEKIAN (*C.R. Ac. Sc. Paris*, t. 288, Sér. B, 93, 1979).

(21) A. MAEDER, E. SCHATZMAN (*C.R. Ac. Sc. Paris*, 291, **2**, Sér. B, 81, 1980 ; *Astron. Astrophys.*, 1980).

(22) H. REEVES (*Coll. Liège* 1978).

(23) M. JAVOY, L. MERLIVAT, F. ROBERT (*C.R. Ac. Sc. Paris*, 288, Sér. B, 375, 1979).

(24) J.-C. PECKER (*Astron. Astrophys.*, **18**, 253, 1972).

J.-C. PECKER, *Astron. Papers dedicated to Bengt Strömberg* (A. Reiz et T. Anderson ed., Copenhagen, Univ. Obs. Publ., 285, 1978).

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE DU LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE THÉORIQUE

Le laboratoire (désigné par le sigle L.A.T.), est, depuis sa création, installé à l'Institut d'Astrophysique de Paris (ou I.A.P.), laboratoire propre du C.N.R.S., dont le 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. est la préoccupation commune aux chercheurs qui le composent, de s'occuper, à travers les faits astrophysiques, de la nature des phénomènes physiques qui en commandent les aspects, et dont bien souvent, l'astrophysique seule permet l'étude. D'où la diversité de nos travaux, explicités dans le rapport d'activité 1979-1980, et décrite ci-après de façon plus succincte.

I. SOLEIL

a) *Etudes des facules (régions actives) de l'atmosphère solaire*

L'étude des observations menées au sol et par le satellite OSO-8 s'est poursuivie dans deux directions : 1) établir un modèle d'une atmosphère différente de celle du Soleil calme pour comparer aux atmosphères stellaires et rechercher les paramètres caractéristiques ; 2) faire une étude détaillée des facules solaires et de leur structure.

L'étude de la *zone de transition* chromosphère-couronne est en voie d'achèvement (Z. Mouradian et al., 1981 ; Dumont et al., 1981). Dans la *chromosphère*, nous avons mis en évidence un phénomène non encore observé : l'augmentation de la turbulence au bord d'une facule (voir Simon et al., 1980 ; Dumont et al., 1980). Ceci nous a conduit à envisager d'autres observations et une étude théorique des ondes de surface (dans le cadre de l'ATP « Soleil actif » du C.N.R.S.). Dans la *photosphère*, nous avons fait une étude statistique des champs magnétiques et trouvé une bonne corrélation entre le champ magnétique et la structure faculaire (Mouradian et al., 1980).

Ce programme est poursuivi par Simone Dumont et J.-C. Pecker en collaboration avec Michèle Desmerger (I.A.P.), Zadig Mouradian et Guy Simon (Observatoire de Meudon) et en coopération sur différents points de ce programme, avec J.-C. Vial et G. Artzner (L.P.S.P.), E. Chipman (L.A.S.P.), E. Hiei (Observatoire de Tokyo).

M^{me} Nicole Heidmann étudie l'application, aux éruptions, des phénomènes de superradiance.

b) *Divers* : on se reportera à la bibliographie où divers articles de revue de J.-C. Pecker sur la physique solaire et les relations Soleil-Terre sont mentionnés. Par ailleurs, J.-C. Pecker poursuit à l'aide de l'atlas de Liège, l'étude du champ magnétique stochastique dans le Soleil calme ; on trouve (valeur provisoire) $\langle B \rangle \sim 200 \text{ G} \pm 100 \text{ G}$ (ce travail reprend des résultats anciens, non publiés, de M. Fitremann).

II. ÉTOILES PARTICULIÈRES

a) *Recherches sur les étoiles Be*

En collaboration avec V. Doazan (Observatoire de Paris), R.N. Thomas a mis sur pied un programme d'observations de 5 étoiles Be dans le « visible », l'ultraviolet lointain, et les rayons X, de façon simultanée. Ces étoiles montrent des comportements frappants par les variations des paramètres non-thermiques qui déterminent la structure de leur atmosphère extérieure.

Dans le même domaine, et sous la direction de M^{lle} L. Divan (I.A.P.), de M^{me} V. Doazan (O. Paris) et de R.N. Thomas, J. Zorec a contribué à l'étude de la distribution d'énergie dans le spectre de ces étoiles au cours de leurs phases successives [normale, à émission, à enveloppe (« shell »)] et des corrélations entre les diverses caractéristiques spectrales, raies de Balmer, divers continus.

Ces études s'appuient sur les observations des satellites I.U.E., et Einstein, et sur des campagnes d'observations à l'O.H.P. et à l'E.S.O.

b) *Recherches sur les étoiles de Wolf-Rayet et Of*

J. Zorec a étudié le diamètre de ces étoiles, en vue d'une comparaison physique avec les étoiles O, à partir de l'analyse des spectres continus, permettant la mesure des flux absolus, à condition d'accepter les modèles « thermiques » des atmosphères. Les distances sont déterminées grâce aux amas stellaires auxquels ces étoiles sont associées. On trouve que par dimension décroissante, les étoiles se classent dans l'ordre : supergéantes O, WN, géantes normales, WC, ce qui semble exclure le schéma classique d'évolution des étoiles Of vers les WN et de celles-ci vers les WC.

J. Zorec a étudié aussi un modèle de l'enveloppe de γ_2 Vel.

c) *Préparation des observations du satellite HIPPARCOS*

J. Zorec a poursuivi au Chili des mesures de calibration de la classification BCD en termes de magnitude absolue.

d) *Monographies C.N.R.S.-N.A.S.A. sur les différents types d'étoiles : « Non-thermal structure and evolution of stellar atmospheres »*

Au cours des années précédentes, le programme a été décrit, et se poursuit sous l'impulsion de R.N. Thomas, coordinateur de la série pour l'Europe, et de J.-C. Pecker, conseiller scientifique de la série pour le C.N.R.S. (leurs contreparties aux U.S.A. étant S. Jordan, N.A.S.A., et Leo Goldberg, K.P.N.O.).

La série de monographies est cautionnée conjointement par le C.N.R.S. et la N.A.S.A. ; elle a débuté au printemps 1977 et devait s'achever en 1980-1981 ; mais le délai a été repoussé de deux ans, par suite de circonstances indépendantes de la volonté des coordinateurs. Le premier tome sortira en fin de printemps ou en début d'été 1980 : le Soleil.

Le second a été rédigé au L.A.T. cette année ; il est édité conjointement par A.B. Underhill et V. Doazan et traite des étoiles B et Be. Le volume est sous presse.

R.N. Thomas rédige un volume ultérieur de la série, sur la thermodynamique des atmosphères des étoiles.

Enfin C. Magnan rédige un chapitre d'un autre volume ultérieur, sur les phénomènes dynamiques. Il y examine les problèmes de transfert du rayonnement en présence de champs de vitesses.

III. PROBLÈMES ARCHÉTYPES DES ATMOSPHÈRES STELLAIRES

a) Christian Magnan et Monique Gros ont rédigé un article (sous presse) exposant de *nouvelles méthodes numériques de résolution des équations de transfert en présence de plusieurs raies et continus couplés entre eux*. L'étude en cours a pour but de décrire l'état d'excitation et d'ionisation des atomes d'hydrogène illuminés par une source centrale dans le cas où l'atmosphère n'est ni très peu (atmosphère plan parallèle classique) ni très loin (nébuleuses planétaires) de la source de rayonnement. Monique Gros poursuit son travail de thèse en généralisant la méthode au cas sphérique et en exploitant les programmes sur des modèles d'atomes de plus en plus complexes.

b) Sous la direction de Christian Magnan, Mohamed Loucif termine la rédaction de sa thèse de troisième cycle, thèse qu'il doit soutenir en juin 1981. Il y a étudié les *variations dans le profil d'une raie spectrale hors équilibre thermodynamique en fonction de la vitesse de la dernière couche traversée*. L'ensemble du milieu dans lequel le transfert est traité est animé de vitesses non thermiques aléatoires et spatialement corrélées.

c) *Systèmes à géométrie sphérique*

E. Simonneau a mis en évidence le parallélisme existant dans la résolution de l'équation de transfert, entre les deux types de géométrie : plane et sphérique. Il a montré également que la méthode dite des moments, est la plus adéquate pour résoudre cette équation en géométrie sphérique. L'application de ce procédé dans la construction des modèles d'atmosphères d'étoiles supergéantes froides est en cours, en collaboration avec F. Querci (Observatoire

de Meudon). E. Simonneau a également développé une théorie simplifiée qui permet d'obtenir explicitement, avec des formules analytiques, une très bonne première approximation des modèles d'atmosphères ETL ; dans cette théorie, il a mis clairement en évidence l'influence des paramètres fondamentaux, comme la température, la gravité et la composition chimique. Ces premiers modèles peuvent être considérés comme solutions de départ dans des algorithmes d'itération pour la construction de modèles plus perfectionnés ; le fait de disposer d'une bonne première approximation comme solution de départ, assure une convergence rapide.

d) *Formation des raies spectrales*

Redistribution de l'énergie entre l'absorption et l'émission

Ces travaux poursuivent ceux qui ont été décrits dans le rapport précédent. Cette année E. Simonneau et J. Borsenberger (O. Meudon) ont préparé les outils mathématiques nécessaires pour résoudre, de façon couplée, une équation cinétique pour la fonction de distribution des vitesses des particules capables d'émettre et une équation de transfert du rayonnement. Ces outils — forme matérielle de l'opérateur des collisions élastiques, transformation entre la fonction de distribution des vitesses des atomes excités et le coefficient d'émission ainsi que la relation entre le champ de rayonnement et le terme de création des atomes excités — vont être maintenant utilisés dans un algorithme d'itérations permettant de résoudre les équations citées et d'obtenir le champ de rayonnement et la population des niveaux.

Au point de vue de la théorie, le problème s'éclaircit alors considérablement, mais il se pose dans des termes cependant beaucoup plus compliqués que ceux proposés par Oxenius (*Astron. Astrophys.*, 1979, 76, 312). Il est clair maintenant qu'il faut étudier les fonctions de distribution des vitesses pour chaque degré interne (virtuel) d'excitation, c'est-à-dire pour chaque énergie à l'intérieur de chaque niveau (Oxenius suppose implicitement une moyenne sur tous les degrés d'excitation internes, virtuels, de chaque état).

e) *Effet Compton inverse dans les atmosphères stellaires*

Ces questions ont fait l'objet de la thèse d'Etat de R. Krikorian, soutenue en mai 1981. R. Krikorian a montré l'importance de la rigueur dans le traitement relativiste des problèmes de collisions entre photons et électrons relativistes, et a mis en évidence les conséquences d'erreurs classiques dans ce traitement sur la compréhension de l'émission non thermique d'étoiles telles que les étoiles T Tauri. Ce travail a été dirigé par S. Kichenassamy (I.H.P.) et poursuivi en collaboration avec A. Nikoghossian.

Un problème analogue est abordé par Nicole Heidmann à propos des phénomènes « actifs » intenses et rapidement variables. Elle a développé

l'interprétation de ces phénomènes par un mécanisme d'émission cohérente de rayonnement — la *superradiance*. Il s'agit d'une émission spontanée, collective, par une assemblée d'atomes présentant tous une inversion de population sur une transition déterminée, et corrélés entre eux par leur couplage avec le champ de rayonnement. Ce phénomène se superpose à l'émission induite dans la mesure où le champ de rayonnement peut être en partie résultant de la désexcitation spontanée d'un seul de ces atomes. M^{me} N. Heidmann a appliqué la théorie, due à Dicke, au cas des éruptions solaires, et principalement à leur observation dans les rayons X (raies de Fe XV, Fe XVI, puis Fe XXIII et Fe XXIV), ainsi qu'au cas des étoiles éruptives du type T Tauri et aux quasars. Les effets d'un champ magnétique élevé, et d'une géométrie impliquant des variations brutales des conditions physiques sont peut-être importants. D'autre part, Nicole Heidmann pose le problème des atmosphères calmes, où ces processus peuvent jouer.

IV. GALAXIES, QUASARS, COSMOLOGIE

Ces travaux prolongent les études poursuivies au cours des années précédentes, et s'orientent en partie vers des problèmes plus spécifiques.

a) *Etude des images de galaxies*

Ces études sont poursuivies par M. H. Karoji (au sein de l'équipe de S. Koutchmy, I.A.P.), et ont pour but l'identification de caractères morphologiques d'objets possédant des propriétés spectrographiques anormales. M. Karoji poursuit également l'installation et l'étude du sensitomètre du télescope d'Almeria, en collaboration avec l'Observatoire de Madrid.

b) *Composantes diffuses extragalactiques*

H. Karoji participe à la préparation de l'expérience spatiale PCN et s'intéresse à la recherche des composantes diffuses extragalactiques.

c) *Quasars et galaxies actives*

Depuis quelques années, un groupe s'est constitué autour de S. Collin (O. Meudon) pour l'étude physique des galaxies. Dès 1978-1979, Simone Dumont, Nicole Heidmann, et Monique Joly (O. Meudon) ont participé à son activité théorique, concentrée sur l'interprétation des spectres et la modélisation des régions ionisées. Ce premier travail a porté sur les raies permises de Fe II (Collin-Souffrin et al., 1979 et 1980). L'étude des raies de divers éléments a été poursuivie par d'autres membres du groupe (raies de Fe II et Si II) pendant que S. Collin et S. Dumont ont abordé l'étude

du spectre de l'hydrogène dans les quasars. Par la suite, Ph. Delache et H. Frisch (O. Nice) ont participé à ce travail (Collin-Souffrin et al., 1981). Dans ce premier article, il est montré que les méthodes approchées utilisées par plusieurs auteurs pour calculer le spectre de l'hydrogène peuvent donner des flux dans les raies affectées par des erreurs importantes. Nous proposons une méthode approchée avec laquelle les erreurs sont au plus d'un facteur 2. Dans un deuxième article (S. Collin et S. Dumont, en préparation), nous montrons que les modèles « photoionisés » existants dans la littérature ne permettent pas de rendre compte des observations. Pour la suite, une collaboration avec D. Péquignot est commencée pour évaluer l'ionisation des différents éléments — et de l'hydrogène — par le rayonnement continu de la source centrale.

M^{me} Nicole Heidmann étudie l'application aux quasars des phénomènes de superradiance.

d) *Dynamique du Superamas local*

H. Karoji a cherché à représenter et « modéliser » la dynamique du Superamas local et son voisinage immédiat à l'aide de la relation de Hubble de galaxies individuelles. Cette analyse fera apparaître un apex du mouvement de notre Galaxie, qui doit être comparé à ceux déterminés par rapport aux différents référentiels extragalactiques, notamment au corps noir « cosmologique » de 3 K. L'étude porte sur les questions suivantes : 1) La relation de Hubble est-elle perturbée par la présence de l'amas Virgo ? 2) Y a-t-il à l'intérieur du Superamas, une rotation différentielle ? Ces deux questions sont liées à deux problèmes importants de la cosmologie, à savoir respectivement, la détermination de la densité moyenne actuelle de l'univers par la méthode dynamique, et la discrimination des théories de formation des galaxies par le moment angulaire à la grande échelle (~ 30 Mpc et plus). Les résultats préliminaires semblent montrer que $\Omega \sim 0.1$, et affirmer l'existence de la rotation supergalactique.

e) *Etudes des décalages spectraux anormaux vers le rouge*

Ces travaux, menés comme par le passé, en collaboration avec de nombreux chercheurs, notamment J.-P. Vigier, I.H.P., ont été poursuivis, principalement, par S. Dépaquit. Il a consacré une partie importante de son temps à rassembler les données expérimentales, relatives aux QSO, et notamment à constituer des échantillonnages complets, exempts de biais statistiques. Une analyse statistique de l'ensemble des données du catalogue de Burbidge a permis de mieux cerner l'incidence des divers effets de sélection observationnels (notamment spectroscopique, par excès d'UV) sur l'histogramme des QSO. Cette première étape (qui manquait à la littérature consacrée à ce sujet) a

permis de pousser plus loin la réflexion sur la distribution des QSO par : 1) la comparaison d'échantillons homogènes caractéristiques d'une méthode de sélection ; 2) l'étude d'échantillons complets. Il ressort de ce travail que les effets de sélection observationnels : a) rendent bien compte de la distribution du z d'émission des quasars optiques ; b) mais ne sauraient entièrement expliquer la périodicité mise en évidence dans l'histogramme des quasars radio. Le compte rendu détaillé de ce travail est rédigé. Il a fait l'objet d'une note interne et est soumis pour publication à la revue *Nature* (plus une note aux *C.R. Ac. Sc.*). Cette étude sera complétée par une recherche sur la distribution des z d'absorption des QSO selon les mêmes critères.

f) *Faits d'importance cosmologique*

Ce thème de recherches, qui est aussi celui du cours de l'année, a donné lieu à quelques travaux originaux.

D'un côté, reprenant le « test » de Hubble-Tolman, S. Depaquit a entrepris un travail sur la statistique des dimensions des quasars radio (doubles) en relation avec l'étude de divers modèles d'univers. Cette réflexion est poursuivie en liaison avec les données, aujourd'hui abondantes, sur la densité des QSO observables.

D'un autre côté, J.-C. Pecker a repris le problème posé par Seeliger de l'extension, aux champs de gravitation, du paradoxe d'Olbers (voir cours). Il a également affiné la démonstration de l'équation de Sciama, basée sur la forme donnée par Einstein au principe de Mach, et sur les faits d'observation que constitue l'inertie galiléenne, et le principe d'équivalence.

Enfin, J.-C. Pecker et S. Simonneau, avec E. Molès (Madrid) et J.-P. Vigier (I.H.P.), dans le cadre d'une controverse avec E. Schatzman, ont étudié le problème du transfert de rayonnement par un milieu diffusant à caractéristique « pointue », problème étroitement lié au développement des cosmologies du type « lumière fatiguée ».

SÉMINAIRES ET CONFÉRENCES

Les séminaires ont eu lieu du 8 janvier 1981 au 5 février 1981 sur le thème : *Atmosphères stellaires*. Ils ont été organisés avec l'aide de M. Celnikier.

— Les atmosphères, d'où ? (L. CELNIKIER), le 8 janvier 1981.

— Le rapport H/He dans les atmosphères de Jupiter et de Saturne (D. GAUTIER), le 13 janvier 1981.

- Le deutérium dans le système solaire (M. JAVOY), le 15 janvier 1981.
- Les atmosphères de Jupiter et de Saturne vues par Voyager (G.E. HUNT), le 22 janvier 1981.
- Etude radio-astronomique des magnétosphères planétaires (A. BOISCHOT), le 27 janvier 1981.
- L'atmosphère de Vénus (J.E. BLAMONT), le 29 janvier 1981.
- Les atmosphères des comètes (E. GÉRARD), le 3 février 1981.
- Formation abiotique et évolution de composés organiques dans les atmosphères planétaires (F. RAULIN), le 5 février 1981.

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

— M. Arthur NICOGHOSSIAN, Astronome à l'Observatoire de Buyrakan, Professeur à l'Université d'Erevan (U.R.S.S.) a donné une conférence sur le sujet suivant : *Rayonnement non thermique dans les étoiles et les galaxies*, le 4 décembre 1980.

— M. Leo GOLDBERG, Professeur, Kitt Peak National Observatory, Tucson (Arizona), a donné une série de 12 leçons sur le sujet suivant : *Stellar mass loss* : (1) Observation of mass loss of early-type stars — rate determination. (2) Mechanisms of mass loss from early-type stars. (3) Observations of mass loss from late-type stars — optical, infra-red and radio technics — rate determinations. (4) Mechanisms for late-type stars. (5) Effects of mass loss on (a) stellar evolution, (b) surface abundances, (c) enrichment of interstellar medium. (6) Special projects, measurement of diameters of chromospheres by lunar occultations, speckle interferometry, NGT's etc. Ces leçons ont été données les 4, 6, 12, 13, 18, 20, 25, 27 novembre, et les 2, 4, 9, 18 décembre 1980.

— M^{me} Anne B. UNDERHILL, Professeur, N.A.S.A. Goddard Space Flight Center, Greenbelt (Maryland), a donné une série de 8 leçons sur le sujet suivant : *The early-type stars* : (1) The art of spectroscopic diagnosis ; observational material on hand. (2) Highlights of the theory of early-type spectra. (3) Chief characteristics of early-type stellar spectra : a) main-sequence and supergiant stars ; peculiar stars. (4) Chief characteristics of early-type stellar spectra : b) emission-line objects ; subluminoous stars. (5) A bipartate model atmosphere ; related problems in physics. (6) Photospheres of early-type stars : position in the HR diagram. (7) The mantles of early-type stars : a) absorption-line stars. (8) The mantles of early-type stars : b) emission-line stars. Ces leçons ont été données les 17, 24 février et 3 et 10 mars 1981.

— M. Ichtiak RASOOL, Directeur Scientifique du Bureau des Applications Spatiales et Terrestres de la N.A.S.A., a donné une série de 8 leçons

sur le sujet suivant : *Climatologie planétaire* : (1.2.) Notions sur les origines et l'évolution des atmosphères planétaires. (3.4.) Les variations des climats sur la Terre : échelle à long terme et à court terme : les méthodes de mesures et les résultats. (5) Les modèles et les hypothèses sur les variations climatiques. (6) Le problème du gaz carbonique. (7) Les volcans, les poussières et les climats. (8) Avenir de la climatologie. Ces leçons ont eu lieu les 3, 5, 13, 15, 22, 27, 29 février 1981.

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

M^{me} J. BRUNEL (aide-comptable, Collège de France), M. S. DEPAQUIT (ingénieur 1 A, C.N.R.S.), M^{lle} S. DUMONT (astronome-adjoint, Observatoire de Paris), M^{me} M. GROS (assistant, Observatoire de Paris), M^{lle} D. GUENNOUN (aide de laboratoire, en remplacement de M^{lle} A. L'HEVEDER en congé de longue maladie), M^{lle} P. HAOUR (secrétaire, Collège de France), M^{me} N. HEIDMANN (astronome-adjoint, Observatoire de Paris), M. H. KAROJI (maître-assistant à Paris VII), M. R. KRICKORIAN (maître-assistant, Collège de France), M. M. LOUCIF (étudiant de D.E.A.), M. C. MAGNAN (sous-directeur du laboratoire, Collège de France), M. J.-C. PECKER (professeur, Collège de France), M^{lle} S. PERRET (documentaliste, C.N.R.S.), M. E. SIMONNEAU (attaché de recherche, C.N.R.S.), M. R.N. THOMAS (maître de recherche, C.N.R.S.), M. J. ZOREC (boursier du Collège de France, Argentine).

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

Une coopération régulière se poursuit aussi, dans la région parisienne, avec plusieurs groupes : celui de M. J.-P. VIGIER (Institut Henri-Poincaré, notamment avec M. G. LE DENMAT, M^{me} C. MICHELL, M. J.-P. VIGIER ; celui de M^{me} S. COLLIN (Observatoire de Meudon, notamment avec S. COLLIN et L. NOTTALE ; celui du L.P.S.P. du C.N.R.S. à Verrières-le-Buisson, notamment avec MM. G. ARTZNER et J.-C. VIAL ; celui du D.A.S.O.P. (Observatoire de Meudon), notamment avec Z. MOURADIAN et G. SIMON ; à l'Observatoire de Paris, avec V. DOAZAN et D. BRIOT. De nombreuses coopérations internationales (Observatoire de Tokyo, L.A.S.P. à Boulder, Observatoire de Trieste) se poursuivent.

De plus, des personnalités étrangères ont effectué au Laboratoire d'Astrophysique Théorique des séjours courts ou prolongés, ou répétés : P. DELACHE,

Observatoire de Nice, S. JORDAN, N.A.S.A., novembre 1980, R. STALIO, Laboratoire d'Astronomie de Trieste, novembre 1980, M^m B. LYND, Kitt Peak National Observatory, Tucson, en décembre 1980, G. HUNT, University College London, janvier 1981, R.J. RUTTEN, Space Research Laboratory, Utrecht, en mars 1981, L.V. KUHI, Laboratoire d'Heidelberg, en mars 1981, T. SNOW, Université du Colorado, en avril 1981, C. BERTOUT, Laboratoire d'Heidelberg, avril 1981, R. VIOTTI, Instituto Astrofisica Spaziale, Frascati, en mai 1981, T. JAAKKOLA, University d'Oslo, en avril 1981.

PUBLICATIONS

G. ARTZNER, S. DUMONT, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, G. SIMON, J.-C. VIAL, *Microturbulence near the Edge of a Solar Plage* (*Astron. Astrophys.*, **89**, L 8, 1980).

G. ARTZNER, E. CHIPMAN, S. DUMONT, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, J.-C. VIAL, *Structure and Physics of Solar Faculae. II. The non-thermal velocity field above faculae* (soumis à *Solar Physics*, 1981).

G. ARTZNER, E. CHIPMAN, S. DUMONT, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, J.-C. VIAL, *Vitesses non thermiques dans la zone de transition entre la chromosphère et la couronne du Soleil (régions actives)* (*C.R. Acad. Sc. Paris*, **290 B**, 317).

D. BRIOT, L. DIVAN, J. ZOREC, *Correlation between BCD parameters of the continuum and Balmer decrements of Be stars* (*Proc. I.A.U. symp.*, n° 98, sous presse, 1981).

D. BRIOT, L. DIVAN, J. ZOREC, *Far ultraviolet colours of B stars with and without emission lines* (*Proc. of I.A.U. Symp.*, n° 98, sous presse, 1981).

R. CAYREL, S. DUMONT, P. MARTIN, *Small scale versus large scale motions in the solar atmosphere derived from a non-LTE calculation of multiplet 38 of Ti I.* (*Proc. coll. Stellar turbulence*, London, Ontario, p. 298, 1979).

G. CHAPMAN, S. DUMONT, Ch. FANG, Y. FENG, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, *The magnetic field flux in facular regions* (*Proc. of the Japan-France coll. on Solar Physics*, p. 121, ed. F. Moriyama and J.-C. Hénoux, 1980).

E.G. CHIPMAN, S. DUMONT, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, *Discussion of the semi-empirical determination of the optical depth of chromosphere-corona transition C IV lines* (*Proc. of the Japan-France coll. on Solar Physics*, p. 118, 1980).

S. COLLIN-SOUFFRIN, Ph. DELACHE, S. DUMONT, H. FRISCH, *Hydrogen Line Spectrum in Quasars. I. Approximation procedures for line transfer versus an exact treatment (Astron. Astrophys., sous presse, 1981).*

L. COSTERO, V. DOAZAN, R. STALIO, R.N. THOMAS, *Implications of stellar variability and individuality on stellar evolution (Proc. of I.A.U. Coll. on Mass-Loss and Stellar evolution, Trieste, sous presse, 1980).*

L. DIVAN, J. ZOREC, *BCD spectrophotometry of the Be-shell star 88 Her (Proc. I.A.U. Symp., n° 98, sous presse, 1981).*

L. DIVAN, V. DOAZAN, J. ZOREC, *Intrinsic reddening in the Paschen continuum and its relation with H α emission in Be stars (Proc. I.A.U. Symp., n° 98, sous presse, 1981).*

V. DOAZAN, L.V. KUHI, R.N. THOMAS, *Variable mass-flux in the Be star 59 cyg (Astrophys. J., 235, L 17, 1980).*

V. DOAZAN, P. SELVELLI, R. STALIO, R.N. THOMAS, *T $_e$ -structure of the wind in γ Cas (Proc. Second European I.U.E. conf. E.S.A., SP-157, p. 145, 1980).*

V. DOAZAN, L.V. KUHI, J.M. MARLBOROUGH, T.P. SNOW, R.N. THOMAS, *Variable wind-velocity in 59 Cyg (Proc. Second European I.U.E. conf., E.S.A., SP-157, p. 151, 1980).*

V. DOAZAN, R. STALIO, R.N. THOMAS, *Proposed three-phase modeling of Be stars from combined visual and I.U.E. modeling (Proc. of N.A.S.A.-Goddard Symposium on Second Year of I.U.E., sous presse, 1980).*

S. DUMONT, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, *Structure and physics of Solar Faculae. I. Principle and observational procedures from ground-based instruments and OSO-8 satellite (soumis pour publication, 1981).*

S. DUMONT, *Du nouveau au Palais de la Découverte (L'Astronomie, sous presse, 1981).*

M. GROS, C. MAGNAN, *The method of addition of layers to solve non-linear radiative transfer problems (Astron. Astrophys., 93, 150, 1981).*

N. HEIDMANN, R.N. THOMAS, *A scheme of atmospheric regions. III. Chromospheres of emission-line stars. Formation of H emission line cores in T Tauri-type stars (Astron. Astrophys., 87, 36, 1980).*

A. KASTLER, J.-C. PECKER, *Le flou, le ténébreux, l'irrationnel (Le Monde Dimanche, 14 septembre 1980).*

S. KICHENASSAMY, R.A. KRİKORIAN, *Comments on the evaluation of the inverse Compton flux using $\epsilon_F \gamma^2 \epsilon_1$ (Astrofisika, sous presse, 1981).*

S. KICHENASSAMY, R.A. KRİKORIAN, *The relativistic Doppler broadening of the line absorption profile* (soumis pour publication, 1981).

J.-C. PECKER, *Avant-propos pour la revue INFOS-ASTRO, revue des Clubs d'astronomie* (février 1980, n° 13, spécial spectrographie expérimentale pour l'amateur).

J.-C. PECKER, *La découverte de l'Univers* (in *La nouvelle frontière technologique*, compte rendu des journées d'études organisées par l'Association des ingénieurs des Ponts et Chaussées, Anciens E.N.P.C. ed., p. 257, 1980).

J.-C. PECKER, *L'anisotropie des propriétés de l'Univers* (*Acad. Roy. de Belgique, Bull. de la Classe des Sciences*, 5° série, t. LXVI, p. 273, 1980).

J.-C. PECKER, *Le rôle de l'image dans la vulgarisation des sciences et des techniques* (*Bull. d'information de l'A.E.S.F.*, **29**, 5, oct. 1980).

J.-C. PECKER, *Espansione si o no ?* (*L'Astronomia*, **6**, 10, 1980).

J.-C. PECKER, *Obituaries : Daniel Chalonge* (*Quart. J. Roy. Astr. Soc.*, **21**, 481, 1980).

J.-C. PECKER, *Le vent solaire* (in *Planetarium*, Planetarium ed., Bruxelles, p. 81, 1979-1980).

J.-C. PECKER, *Observations mal comprises dans le cadre classique* (*Coll. du Centenaire Einstein*, C.N.R.S. ed., 6-9 juin 1979).

J.-C. PECKER, *L'Union Astronomique Internationale vit...* (*L'Astronomie*, **94**, 527, 1980).

J.-C. PECKER, *La Science et le Nouvel Ordre Economique Mondial* (*Sciences*, Paris, T. 9, **1-2**, 4, 1979).

J.-C. PECKER, *Le principe et le développement par Bernard Lyot du coronographe* (*C.R. Acad. Sc. Paris*, T. 291, *Vie Académique*, 17 novembre 1980, p. 79).

J.-C. PECKER, *The active Sun as a star* (in *Proc. of the Japan-France seminar on solar physics*, Tokyo, ed. F. Moriyama and J.C. Hénoux, 1980).

J.-C. PECKER, *L'Univers en 1979* (*Rev. des travaux de l'Acad. des Sc. Morales et Politiques*, 4° série, p. 141, 1979).

J.-C. PECKER, *Le Soleil, une étoile comme les autres* (*La Recherche*, **118**, 91, 1981).

J.-C. PECKER, *Remarques à propos d'un pli cacheté de M. Grassi du 11 septembre 1843. Histoire des Sciences* (*C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 292, 1981 ; *Vie Académique*, p. 37, 19 janvier 1981).

J.-C. PECKER, *About the facts of cosmological significance, in Essays in Honor of Wolfgang Yourgrau* (Plenum Press, New York, Alwyn der Merwe ed., 1981, to be published).

J.-C. PECKER, *Le ciel est noir... ou le paradoxe d'Olbers* (*Pour la Science*, 44, 124, 1981).

J.-C. PECKER, *Les faits cosmologiques* (*La Médecine Praticienne*, sous presse, 1981).

J.-C. PECKER, *L'« embryologie » des étoiles* (*La Médecine Praticienne*, sous presse, 1981).

J.-C. PECKER, *Caractères météorologiques du climat et activité solaire : quelques remarques* (En hommage au Professeur J. Xanthakis, Reidel Publ. Co., sous presse, 1981).

J.-C. PECKER, *Halte aux fausses sciences* (*Le Monde*, 26 avril 1981).

J.-C. PECKER, *Paul Couderc* (*Bull. de l'Union Rationaliste*, sous presse, 1981).

J.-C. PECKER, *Summary and general discussion* (*Third European Solar Meeting in Oxford*, in *Proc. of the meeting*, sous presse, 1981).

J.-C. PECKER, *Les faits cosmologiques* (*Proc. réunion du groupe de contact pour l'astronomie et l'astrophysique*, Univ. Catholique de Louvain, sous presse, 1981).

J.-C. PECKER, préface : à l'ouvrage de R. Kandel, *Earth and Cosmos* (Pergamon press ed.) ; à l'ouvrage de P. Van de Kamp, *Stellar Paths* ; à l'ouvrage de L. Goughenheim, *Méthodes de l'Astrophysique* (Hachette).

J.-C. PECKER, en préparation : Postface à l'ouvrage réédité de C. Flammarion, *Les étoiles et les curiosités du ciel* ; publication d'une nouvelle version de deux ouvrages de P. Couderc, *Histoire de l'astronomie*, et *L'Univers*.

J.-C. PECKER, *Clefs pour l'Astronomie* (ed. Seghers, Paris, sous presse, prévu pour novembre 1981).

E. SIMONNEAU, *Transfert de rayonnement dans les atmosphères étendues* (*Bull. Soc. Roy. Sc. Liège*, sous presse, 1980).

E. SIMONNEAU, *Atmosphères stellaires* (*Ann. Physique*, sous presse, 1981).

J. SAHADE, J. ZOREC, *The radii of the WR stars and the extent of their chromosphere-corona formation* (*Mem. S. A. It.*, sous presse, 1981).

J. ZOREC, *Subionization and decelerated-flow in the vicinity of a B-shell star* (*Proc. of I.A.U. Coll.*, n° 59, sous presse, 1980).

CONGRÈS, COLLOQUES, RÉUNIONS

Participation à l'école d'été d'astronomie de Grasse, 26 août-4 septembre 1980 (M. GROS a donné un cours sur l'analyse de la lumière, cours publié dans le compte rendu de l'école).

Réunion de discussion sur les étoiles WR à Washington du 10 au 16 mai 1980 (J. ZOREC).

Fifth European Regional Meeting I.A.U.-E.P.S., Université de Liège, Belgique, 28 juillet - 1^{er} août 1980 (J.-C. PECKER).

HAO's 40th Anniversary Symposium on « the Solar Interior and Photosphere » Boulder, Colorado, 8-10 octobre 1980 (J.-C. PECKER, communication : Forty years of research : the Sun as a whole ; its photosphere).

Colloque Franco-Japonais, on Solar Physics, Tokyo, octobre 1980 (J.-C. PECKER : the active Sun as a star).

Colloque Franco-Soviétique « Astronomie infrarouge et submillimétrique » à l'Institut d'Astrophysique, 31 mars - 3 avril (J.-C. PECKER, communication sur le rayonnement « cosmologique » et l'écart au corps noir ; S. DEPAQUIT, H. KAROJ).

Réunion du groupe de contact pour l'astronomie et l'astrophysique, Institut Georges Lemaître, Université Catholique de Louvain, 19 mai 1981 (J.-C. PECKER, communication sur les faits cosmologiques).

Table ronde franco-belge sur « Physique solaire et planétaire » ; Académie des Sciences, Paris, 28 avril 1981 (J.-C. PECKER).

Third European Solar Meeting on Solar Activity, Oxford, 13-15 avril 1981 (J.-C. PECKER).

Sixth European Regional Astronomy Meeting on « Sun and Planetary System », Dubrovnik, 19-23 octobre 1981 (J.-C. PECKER).

Colloque « Couleurs et Population des galaxies », Institut d'Astrophysique, Paris, septembre 1980 (E. SIMONNEAU, communication sur les atmosphères stellaires).

III^e Assemblée d'Astronomie et d'Astrophysique à Almería (Espagne), octobre 1980 (E. SIMONNEAU, communications : distribution cinétique des atomes excités ; déplacements vers le rouge produits dans certains processus de scattering).

Colloque U.A.I. n° 59 on effects of mass loss on stellar evolution, Trieste, septembre 1980 (R.N. THOMAS, J. ZOREC).

Colloque E.S.A.-Allemagne sur les résultats des deux premières années de I.U.E. à Tubingen, mars 1980 (R.N. THOMAS, communication).

Colloque N.A.S.A.-Goddard sur les résultats des deux premières années de I.U.E., mai 1980 (R.N. THOMAS, communication).

Colloque N.A.T.O. Advanced Study Institute on Solar phenomena in stars and stellar systems, 24 août - 5 septembre 1980 (N. HEIDMANN).

SÉJOURS A L'ÉTRANGER, MISSIONS, CONFÉRENCES

H. KAROJI, mission d'observation et mise en installation du sensitomètre à l'Observatoire d'Almería (Espagne), juin 1980 ; préparation de l'expérience PCN dans le cadre des missions du cosmonaute français à bord de Saliout soviétique à Moscou (janvier 1981).

Séminaire à l'Observatoire du Pic du Midi, sur « Anisotropie et inhomogénéité de la constante de Hubble » (février 1981) ; séminaire au Laboratoire de Physique Théorique de l'Institut Henri Poincaré sur « La dynamique du superamas local et son influence sur la relation de Hubble » (mai 1981).

C. MAGNAN, conférence à Mons (Belgique) sur « ce que nous dit l'Univers », 13 novembre 1980.

J.-C. PECKER, conférence du soir d'intérêt général, Collège de France, « Atmosphères stellaires, du modèle à la physique », 17 janvier 1980 ; série de conférences en Espagne sur « l'Univers est-il en expansion ? », 11 au 16 février 1980 ; séminaire interdisciplinaire au Collège de France, « Analogie et Astrophysique », 22 mars 1980 ; conférence au Collège Universitaire Fontenaisien, Maison de la Culture de Fontenay-aux-Roses, « Le Soleil et nous », 14 novembre 1980 ; séminaire à l'Institut d'Astrophysique, « Opération OSO-8 Facules », 16 janvier 1981 ; conférence à l'O.N.U., Genève, « Notre Soleil », 25 mars 1981 ; participation au Centenaire de l'Observatoire de Nice, 23 mars 1981, « Un siècle de recherches à l'Observatoire de Nice » ; exposé à Romorantin, école publique de Bourgeau, 20 mars 1981 ; conférence à la Société Philomatique de Paris, « La controverse cosmologique », 4 février 1981 ; Maison de la Culture de Brest, « L'Univers est-il en expansion ? », 11 mars 1981.

E. SIMONNEAU, conférences à l'Université Autonome de Madrid, février 1980, sur « Observation et expérimentation ; des exemples en physique stellaire » ; Université de Santiago de Compostela, mars 1980, sur « Théorie de la couleur stellaire » ; Observatoire de Meudon, décembre 1980, sur « Transfert hors ETL en présence de transport d'atomes excités ».

R.N. THOMAS, plusieurs séjours à la N.A.S.A.-Goddard (U.S.A.) à propos de la série de monographies et du satellite Solar Orbiting Telescope, ainsi qu'à l'Université du Colorado (juin-septembre 1980) ; missions d'observation à l'Observatoire de Saint-Michel (août 1980) avec V. DOAZAN et J. ZOREC ; missions d'observation à Madrid en mai 1980 pour les observations IUE dans l'UV lointain.

J. ZOREC, plusieurs missions d'observation à l'Observatoire de Haute-Provence en juillet et octobre 1980, ainsi qu'en avril 1981 ; mission pour l'information du système BCD au C.D.C.A. à Nice en avril et septembre 1980 ; mission d'observation à l'E.S.O. au Chili du 16 novembre au 10 décembre 1980.

DISTINCTIONS, NOMINATIONS

J.-C. PECKER a été élu « Fellow » of the American Association of the Advancement of Sciences, le 7 janvier 1981. J.-C. PECKER est Membre des Comités C.O.D.H.O.S. et C.O.T.A.S. (Commission pour la Technique et les Applications des Sciences) de l'Académie des Sciences, et du Comité de Lecture des Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.