

Astrophysique théorique

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

LES FAITS COSMOLOGIQUES

II. *Le laboratoire de la physique terrestre*

Au cours de l'année écoulée, nous avons passé en revue les faits astronomiques d'observation, qui, selon les uns ou les autres, ont statué de « fait cosmologique ». Bien entendu — et cette remarque ramène à la physique terrestre le point de départ réel de l'extrapolation cosmologique —, toute extrapolation implique une certaine *unité*. Les propriétés de l'univers observé nous renseignent sur celles de l'Univers. La physique, plus simplement, nous renseigne sur l'Univers. Il s'agit, d'emblée, d'un point de vue très proche de celui qui fut développé longuement par Mach, et adopté par Einstein comme l'une des idées fondamentales dont est issue la Relativité Générale.

Pour tout dire, les conditions astronomiques de la cosmologie (la discussion du paradoxe d'Olbers pousse à la finitude, la relation de Hubble à l'expansion, le rayonnement du fond de ciel à la « grande explosion », l'abondance des éléments légers précisant les contraintes sur les conditions physiques de la grande explosion) nous semblent peut-être moins fondamentales, moins physiques, que les expériences fameuses, imaginaires ou réelles, qui, de Galilée à Einstein, ont marqué si profondément la physique d'aujourd'hui.

Elles semblent en effet plus étroitement liées à l'idée même de la conception de l'univers, qui, à travers certaines d'entre elles, apparaît comme « solidaire ». Cette solidarité démontrée, entre toutes les parties de l'univers, valorise d'autant plus certaines autres expériences, pourtant purement locales dans leur conception et leur déroulement.

Nous nous attacherons cette année à garder ce point de vue. Sans entrer dans les démarches mathématiques complexes de la RR ou de la RG (bien

connues grâce à un nombre très considérable d'ouvrages de qualité), nous nous bornerons à passer en revue certaines des expériences fondamentales, à mieux cerner leur signification cosmologique. On notera que *ces expériences suggèrent des principes*. Ceux-ci ne sont pas nécessairement, bien entendu, indépendants les uns des autres... Ainsi les expériences galiléennes de Pise, les pendules de Newton, les expériences d'Eötvös et de Dicke suggèrent-elles le « principe faible d'équivalence » (identité entre masse inertielle et masse gravitationnelle). Le seau tournant de Newton, le pendule de Foucault, etc., suggèrent l'existence d'un système de référence absolu, physique : c'est le « principe de Mach ». Les boulets de Galilée, l'expérience de Sagnac, l'ascenseur d'Einstein poussent au « principe fort d'équivalence » (celui de la relativité générale (RG) : équivalence entre les effets de la force de gravitation et ceux d'une accélération). Les expériences de Michelson-Morley, celles concernant la composition des vitesses, poussent au « principe d'invariance de la vitesse de la lumière » : c'est le principe de base de la relativité restreinte (RR). Certaines de ces expériences sont imaginaires, d'autres réelles. Certaines sont des expériences de zéro, qui ne peuvent être que négatives lorsqu'une certaine précision n'est pas atteinte. Les principes en question sont essentiels à toute construction cosmologique. Mais on se doit de poser la question de leur validité, qui n'est acquise qu'à une précision bien définie, donc limitée.

I. EXPÉRIENCES ET PRINCIPES

a) *Masse inertielle et masse gravitationnelle*

La distinction entre ces deux notions est déjà très claire dans les travaux de Galilée. On se rappellera l'expérience (en grande partie imaginaire) de la Tour de Pise (voir Dialogues, 1638). On suivra l'argument dans les expériences newtoniennes sur les pendules (voir les Principia, 1687). La mesure de Cavendish (1798) est un épisode nécessaire, par sa qualité. Puis, l'expérience d'Eötvös menée avec divers collaborateurs (de 1889 à 1922) montre, avec une grande précision, la proportionnalité de ces deux masses, — et l'on peut, sans perdre d'information, les considérer donc comme égales. En 1964, Dicke et ses collaborateurs utilisent un pendule de torsion compensée, susceptible de mettre en évidence un effet diurne ; Hughes utilise le comportement d'atomes de Lithium 7, dans un champ magnétique... Dans tous les cas, un couple est lié à la masse inertielle, un autre (avec lequel on équilibre le premier) est lié à la masse gravitationnelle. La littérature décrit abondamment ces expériences, et nous nous bornons à y renvoyer.

b) *Existence d'un système de référence absolu*

Dans un laboratoire, enceinte fermée, système de référence pour l'observateur, toute expérience imposant des *forces* aux masses présentes, leur communique de ce fait certains *mouvements*, que doivent décrire les équations de la dynamique. Mais certains mouvements, évidents pour les observateurs du laboratoire, ont lieu, non pas liés aux forces imposées au sein du laboratoire, mais liés aux mouvements du laboratoire par rapport à un laboratoire plus vaste, qui joue le rôle, en quelque sorte, de système référentiel absolu, de laboratoire absolu. Le rôle de « laboratoire absolu », mis en évidence dans une expérience donnée, est évidemment provisoire.

Le seau tournant de Newton met en évidence le fait qu'il n'est pas équivalent de dire que le seau est immobile et la salle en rotation, ou de dire l'inverse. Le seau, de fait, tourne par rapport à un référentiel que l'on peut supposer « absolu ». Dans le même esprit, le pendule de Foucault (1850) montre que la Terre tourne par rapport à un système référentiel « absolu ». Maupertuis et La Condamine ont mesuré l'aplatissement de la Terre : c'est en somme une autre expérience mettant en évidence le fait que la Terre tourne, par rapport à un système de référence « absolu ». Le problème posé est de savoir s'il existe un référentiel absolu, quelque peu vague et abstrait, un espace de référence où se déplacent toutes les masses de l'univers, ou bien s'il existe une façon plus opérationnelle de définir ce référentiel : Mach a proposé, d'une façon qui entraîne la conviction, de considérer l'ensemble des masses de l'univers comme définissant par leur distribution instantanée le référentiel absolu mis en évidence par les diverses expériences étudiées. Cette définition donne un sens au principe galiléen de l'inertie, aux descriptions coperniciennes du système solaire, etc. Le référentiel absolu machien est donc celui des « étoiles fixes ». Il n'est alors pas difficile de mieux situer la relativité galiléenne, et de définir les forces inertielles.

En résumé (et nous renverrons à Mach pour plus de détails), si l'on considère, dans le référentiel absolu machien, deux masses A et B séparées par une grande distance r , on peut bien les considérer, par simplicité (vue classique) comme indépendantes l'une de l'autre, les vitesses et directions étant constantes par rapport à l'ensemble, très éloigné des autres masses. Mais on peut aussi écrire une équation cinématique évidente qui lie ces masses, quelles que soient leurs distances (point de vue selon la « solidarité » machienne) ; cette équation s'écrit :

$$d^2 r / dt^2 = (1/r) (a^2 - (dr/dt)^2)$$

Clairement, la discussion sur la vitesse de la lumière s'inscrit dans ce cadre. C'est par rapport au référentiel absolu machien que doit se définir la vi-

tesse c de la lumière. Les mesures de la vitesse de la lumière, toujours plus précises, mettent-elles en évidence l'existence d'un tel « éther » absolu ? Entre deux points A et B de la Terre, un signal lumineux se déplace avec une certaine vitesse c ; l'atmosphère terrestre, comme la Terre, se déplace avec une autre vitesse v , par rapport à l'éther ; mais la vitesse du signal lumineux entre, par exemple, Jupiter et la Terre, concerne un autre référentiel que la Terre. Entre B et A, l'effet de l'entraînement est, sur la vitesse moyenne du parcours *aller et retour*, du *second* ordre ; on a :

$$\Delta t = 2c L_{AB} (c^2 - v^2) \quad \text{ou encore} \quad \bar{v} = 2L_{AB}/\Delta t = c (1 - v^2/c^2)$$

Entre la planète Jupiter, J, et la Terre, T, l'effet sur l'« aller simple » JT est du *premier* ordre seulement. On a :

$$\Delta c/c = 2 v/c$$

Or, à l'ordre zéro, les observations de Römer permettent la détermination de c , dès le XVII^e siècle. Mais en mesurant c sur Terre, Arago ne trouve pas par rapport aux mesures de Römer le terme complémentaire d'ordre 1. Si bien que Fresnel aboutit à l'idée d'*entraînement partiel* de l'éther par la Terre, et Stokes, en 1845, a l'idée d'un entraînement au moins *partiel*, peut-être *total*, comme si v était nul.

Clairement, il fallait accumuler les mesures et accroître leur précision. C'est d'abord le développement de la méthode de la roue dentée (Fizeau, 1849, 1850, 1851), de celle du miroir mobile (Arago, 1838, etc., Foucault, 1850, etc.). L'interposition d'un milieu réfringent permet à Foucault de mesurer la vitesse de la lumière $v = c/n$ (où n est l'indice de réfraction). Utilisant un double passage de la lumière dans l'eau, dans deux sens, Hoek (1868) tente la mesure du mouvement de la Terre par rapport à l'éther, l'eau dans un récipient immobile étant entraînée par la Terre. Michelson (1878 à 1927) imagine un système interférométrique qui associe une différence de localisation des franges à un éventuel mouvement de la Terre-laboratoire par rapport à l'éther. Or, Michelson et Morley aboutissent à un résultat étrange. A la précision très grande de l'expérience, la vitesse de la lumière apparaît comme *indépendante* du mouvement du laboratoire dans l'espace. Ce résultat est confirmé par des développements de l'expérience de Michelson et Morley (Kennedy-Thorndyke, 1932).

Il ne faut pas oublier, dans ce contexte, l'importance d'expériences comme celle de Fizeau (1981) qui met en évidence l'influence, sur la vitesse de la lumière, de la vitesse d'un courant d'eau traversé par le faisceau dans le sens du mouvement et dans le sens opposé. Les expériences de Sagnac, de Pogany, et aussi de Michelson et Gale, permettent, en utilisant un interféromètre monté sur un disque en rotation, de mettre en évidence la rotation de la

tesse c de la lumière. Les mesures de la vitesse de la lumière, toujours plus bilité dépendent au *premier degré* des rapports v/c , peuvent (voir Janossy) s'interpréter dans le cadre de la théorie classique, sans problème sérieux.

En revanche, l'expérience de Michelson et Morley — (et aussi les expériences de Trouton et Noble, impliquant la mise en évidence du mouvement d'un condensateur chargé par rapport à l'éther, ou celle d'Isaak, Champeney et Khan, mesurant l'effet, sur la fréquence d'une source de rayonnement gamma, du mouvement de la source mesuré par rapport à l'éther) — toutes ces expériences ont montré avec une grande précision que l'on ne pouvait mettre en évidence *aucun* mouvement de la Terre par rapport à l'éther.

Pour rendre compte de ces expériences, la transformation de Lorentz était une nécessité. Elle a été interprétée comme une véritable contraction (la contraction de Fitzgerald-Lorentz); mais alors des paradoxes comme ceux de Rindler peuvent être invoqués, et restent difficiles à comprendre. Plus raisonnablement, il faut adopter le principe sous sa forme einsteinienne, celle du caractère invariant de la vitesse de la lumière dans le vide : c'est l'hypothèse qui est à la base de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein.

Les expériences ci-dessus ont été décrites en détail dans le cours de l'année; mais nous renverrons ici aux articles originaux. Le point de vue de Janossy a été discuté également en détail. On notera que la vision très « réaliste » de Janossy le conduit à donner au principe de Lorentz une signification matérielle plus subtile que la contraction, faisant intervenir une pression du vent d'éther.

Quoi qu'il en soit, les équations de la relativité restreinte permettent l'explication de toutes les expériences. Mais on gardera de l'exposé paradoxal mais lucide, de Janossy, l'idée très claire que les phénomènes au premier ordre en v/c (effet Doppler longitudinal, aberration de la lumière, ou mesure d'entraînement par le courant d'eau de Fizeau) rentrent dans le cadre du domaine classique, cependant que la relativité restreinte est nécessaire à l'explication des phénomènes où les effets mesurables attendus dépendent de $(v/c)^2$ et sont donc des effets du second ordre.

II. L'ÉQUATION DE MACH-EINSTEIN-SCIAMA

Nous avons discuté plus en détails une conséquence du principe faible d'équivalence ($m_i = m_g$), comme suit :

a) *Démonstration*

Le principe machien de solidarité mutuelle des différentes parties de l'univers aboutit naturellement à la possibilité d'écriture d'équations faisant

intervenir certaines constantes universelles mais déterminées localement (comme G ou c) et des quantités caractéristiques de l'univers (intégrales portant sur le volume de l'Univers, ou encore valeurs moyennes prises sur ce volume). Les équations relativistes usuelles de la RG font intervenir R , rayon de courbure de l'univers, ρ , densité moyenne de l'univers, et les « constantes » G et c (on sait qu'avec $G = 0$, on retrouve la RR ; cependant que $c = \infty$ correspond à la physique newtonienne de l'interaction instantanée à distance). L'équation la plus simple qui fasse intervenir ces quatre quantités est :

$$(G/c^2) \rho R^2 = K = \text{constante} \quad (1)$$

comme le montre aisément l'analyse dimensionnelle, celle-là même qu'utilisèrent Dirac ou Jordan, dans les années 30. Mais l'analyse dimensionnelle est un trépiéd boîteux... On aurait pu obtenir d'autres expressions en ne faisant intervenir ni G ni c (par exemple $\rho R^3 = \text{constante}$, expression de la conservation de la masse, et intégrale première de Friedmann), ou en faisant aussi intervenir par exemple, h à la place de G ou de c . Il importe donc, malgré la simplicité sympathique de (1) (sympathique, mais nullement convaincante !) de démontrer cette expression en explicitant la valeur de la constante K .

Einstein s'y livre par trois fois. Une première fois, sans guère l'expliquer : « la théorie », dit-il, « fournit une relation simple entre l'étendue spatiale du monde et la densité moyenne de la matière » (1916), et, en note, le mot « simple » est accompagné de la phrase : « Pour le rayon R du monde, on obtient l'équation $R^2 = 2/\kappa\rho$. En employant le système c.g.s., $2/\kappa = 1.08 \cdot 10^{27}$; ρ représente la densité moyenne de la matière ». Ajoutons que la constante d'Einstein, κ , désigne le rapport $8\pi G/c^2$; si bien que la constante K de l'équation (1) est égale à $1/4\pi$.

Une démonstration est abordée dans l'article de 1917. Mais elle suppose l'univers statique ; et Einstein écrit alors les termes de la métrique utilisée en fonction de λ ; l'on a :

$$\lambda = \kappa\rho/2 = 1/R^2 \quad (2)$$

où λ est bien entendu la « constante cosmologique » d'Einstein.

En 1912, Einstein avait déjà abordé la question à partir du principe faible d'équivalence (masse inertielle égale à masse gravitationnelle) ; A. Kastler (1981) a récemment repris cette question. Essentiellement, on considère une masse m_g , dans l'univers et on calcule la masse m_i additionnelle liée aux masses distribuées dans l'univers, ou masse inertielle. On doit alors faire une hypothèse sur la distribution universelle des masses, une intégration, et écrire ensuite m_i/m_g . Einstein, avec les valeurs connues alors pour les masses

de l'Univers, aurait obtenu $m_i = 10^{-3} m_g$ avec des données plus modernes, Kastler trouve $0.2 m_g$; mais le calcul (qui reste essentiellement euclidien) n'est plus valable. Nous avons poursuivi ce calcul, en géométrie riemannienne, et nous avons *posé* d'emblée $m_i = m_g$. Alors l'expression à écrire devient :

$$(G/c^2) \int_0^R \frac{2\pi^2}{4\pi/3} \rho(r) r dr = \frac{1}{4\pi} \quad (3)$$

soit $(G/c^2) (3\pi/4) R^2 \rho = 1/4\pi$ dans l'hypothèse homogène. Cette expression est essentiellement identique aux expressions (1) ou (2) précédentes. Elle ne suppose pas un univers statique, mais admet que la masse inertielle liée aux masses distribuées s'ajoute à la masse gravitationnelle.

Le point de vue de Sciamia est un peu différent.

Sciamia introduit un potentiel « gravélectrique » (scalaire) et « gravimétrique » (vectoriel). Il calcule le champ de ce potentiel en un point P, pour une masse localisée en Q de valeur M. Une particule de masse m est en P, en état de mouvement absolu (translation ou rotation). L'hypothèse de Sciamia, c'est que le champ en P résultant de l'effet des masses M et des masses distribuées, est *nul* (d'où le mouvement inertiel de m). L'intégration impliquée par le calcul du potentiel dû aux masses distribuées, est arrêtée à la valeur R, dans un schéma euclidien, où Sciamia tient compte de l'expansion, et de l'existence, par suite, d'un « horizon » fixé par une expansion supposée strictement linéaire (façon schématique de traiter le problème). Dans le cadre de ce traitement simpliste, on trouve :

$$(G/c^2) \rho R^2 = 1/2\pi \quad (4)$$

qui diffère de (1) par un facteur 2, et de (2) par un facteur non euclidien $2 \times 3\pi/4 = 4.71$.

b) Discussion des bornes de l'intégration

Il est clair que le traitement de Sciamia est physiquement plus correct, mais que le rôle de l'expansion y est parfaitement *inutile*, car il ne sert qu'à fixer une limite aux bornes de l'intégration. On ne peut retrouver une expression de contrainte sur les densités, en maintenant l'intégration entre les bornes 0 et ∞ . Bien entendu, dans un univers homogène, ceci n'a pas de sens ; mais dans un univers hiérarchisé, cela ne pose pas de problème de principe. De plus dans un univers fermé (en expansion ou non) on arrête

l'intégration à la valeur R qui en fixe le rayon. L'expression en question s'écrit :

$$(G/c^2) \int_{O(R_0)}^{\infty(R)} \frac{2\pi^2}{4\pi/3} \rho(r) r dr = \frac{1}{4\pi} \quad (5)$$

Pour une dimension fractale D de l'Univers, la loi $\rho = r^{D-3}$ doit s'appliquer, au moins entre deux limites, celle de l'univers exploré (limite supérieure) et celle correspondant aux plus petits objets de la hiérarchie (limite inférieure). Selon la valeur de D (par rapport à la valeur critique $D = 1$), c'est la borne supérieure ou la borne inférieure qui posera problème. Selon de Vaucouleurs, D est proche de 1.3, si bien que (tout comme dans la discussion du paradoxe d'Olbers-Seeliger (voir cours de l'année précédente), la borne supérieure ne joue aucun rôle réel ; l'effet des masses lointaines est négligeable. Mais alors, la borne inférieure pose problème et fait sans doute intervenir dans la discussion des quantités liées à la microphysique.

On peut cependant contester la validité de la distribution hiérarchique dans tout l'univers ; la valeur de D peut n'être pas universelle ; alors l'équation ci-dessus impose simplement en fait une condition sur la densité, dans les parties non observables de l'Univers. Si $\rho = \rho_0$ dans ces régions, cette condition peut s'écrire :

$$(G/c^2) \int_{R_{\text{exploré}}}^R 6\pi^2 \rho(r) r dr = 1 - (G/c^2) \int_0^{R_{\text{exploré}}} 6\pi^2 \rho(r) r dr \quad (6)$$

soit encore, si l'on admet résolus les problèmes à l'origine :

$$(G/c^2) (R^2 - R_{\text{exploré}}^2) 3\pi^2 \rho_0 = 1 - (G/c^2) 3\pi^2 \rho_{\text{expl.}} R_{\text{expl.}}^2 \quad (7)$$

Numériquement, si $R_{\text{expl.}} = 5 \cdot 10^9$ a.l. (dénombrements de Lick), alors cela veut dire que $\rho = 2 \cdot 10^{-31} \text{ g cm}^{-3}$ impose $R \cong 10 R_{\text{expl.}}$. Une valeur inférieure de R n'est guère possible, impliquant une valeur supérieure de ρ . Une valeur supérieure, voire très supérieure, de R , n'a en revanche rien d'impossible ; mais cela éloigne nettement l'horizon réaliste, celui que peut espérer atteindre la génération prochaine des télescopes, au delà de l'éventuelle « grande explosion ». On voit l'importance de cette discussion, qui tend à augmenter considérablement le rayon de l'univers, à plus de 50 milliards d'a.l.

c) *Conclusion provisoire*

Clairement, l'importance de cette équation dont la validité semble très étendue (sous l'une des formes ci-dessus) est considérable. Si on l'écrit sous sa forme qu'elle prend dans un univers fini, sphérique et homogène,

$$(G/c^2) R^2 \rho = K \quad (10)$$

K est une constante fixée par la démonstration physique, et de l'ordre de l'unité. Comparée à l'intégrale première de Friedmann, l'équation (7) **IMPOSE**, pour un tel univers homogène, **OU BIEN** la stabilité, $R = \text{cste}$ (la démonstration de l'instabilité de cet univers, admise depuis Eddington, n'est nullement convaincante, si l'on s'attache à la démonstration de cet auteur), **OU BIEN**, si R est variable, la variabilité du rapport G/c^2 — soit, si l'on veut, de G : on rejoint alors un point de vue développé par Canuto, après Dirac et Jordan.

Il n'est pas exclu qu'une erreur importante de conception se soit trouvée à la base de notre confrontation. On doit accueillir avec prudence, par conséquent, les résultats ci-dessus, qu'il devra être possible de présenter de façon plus strictement conformes aux canons du langage de la Relativité Générale.

d) *Considérations diverses concernant l'équation de Mach-Einstein-Sciama*

On notera que cette équation se retrouve souvent dans la littérature. Dicke l'intègre dans sa théorie du champ, et dans une cosmologie à G variable. On notera qu'un de ses arguments est issu de Dirac : le nombre

$$q = m_e (G/\hbar c)^{1/2} \sim 10^{-23}$$

selon Dirac, varie avec le temps ; selon Dicke, qui discute cela, cette conclusion est incompatible avec le principe fort d'équivalence de la R.G., mais pas avec le principe faible ($m_i = m_g$). Raine retrouve l'expression (2) d'Einstein, en utilisant des métriques plus générales, qui, de toutes façons, lient la courbure de l'espace à son contenu matériel.

III. VÉRIFICATIONS ASTRONOMIQUES DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

On notera tout d'abord que le problème n'est pas de « prouver » la validité de la RG, mais bien plutôt de montrer que des théories plus élémentaires ne rendent pas compte des faits, alors que la RG en rend compte.

On sait que la RG s'appuie notamment sur le principe d'équivalence fort, mais on ne peut dire qu'elle n'implique que ce principe ; sa généralité est

plus grande .Il semble que cinq groupes d'expériences, abondamment discutées dans la littérature, aient été considérées comme venant à l'appui de la RG, ou de façon plus générale, du principe fort d'équivalence.

a) La première est le *décalage spectral* vers le rouge dans un champ de gravitation, étudié souvent dans le spectre solaire, et sur Terre. La mesure montre la puissance du concept de principe d'équivalence, qui en permet une prévision quantitative. Nous renverrons aux discussions (dont certaines menées naguère dans notre laboratoire) de la bibliographie. On notera que les mesures solaires sont profondément affectées par la complexité des champs de vitesse, alors que les mesures terrestres doivent être considérées comme plus sûres.

b) La *déviaton des rayons lumineux par le Soleil* est prédite par la théorie newtonienne, qualitativement ; quantitativement, il faut la RG pour en rendre compte, avec l'utilisation de métriques permettant de calculer les géodésiques suivies par le photon ; les métriques de type Schwarzschild sont nécessaires (on est au voisinage d'une masse pesante), alors que les métriques du type Walker-Robertson conviennent dans un espace à courbure constante — celui de la cosmologie. On notera que la théorie de Brans-Dicke (qui peut se ramener à la RG pour certaines valeurs des paramètres) conduit plutôt à des valeurs plus élevées de la déviation pour les valeurs des paramètres choisies par Dicke. On notera aussi que les interactions entre la lumière et le milieu traversé, autres que gravitationnelles, peuvent conduire à des déviations variant selon une loi qui n'est plus en $1/r$ (r : paramètre d'impact du rayon dévié). Il semble que la mesure conduise en fait à un excès de déviation par rapport aux prévisions de la RG (Mikhailov, Mérat et al.).

c) La *précession du périhélie* des orbites planétaires (Mercure) peut aussi être calculée dans le cadre de la RG. Cette précession est due pour la plus grande partie à des perturbations newtoniennes ; seul un excès de 43 secondes d'arc par siècle reste inexpliqué, si l'on ne fait pas appel à la RG. L'expérience, quoique d'une interprétation encore difficile, semble donner raison à la RG d'Einstein contre la théorie plus élaborée de Brans-Dicke, lorsque celle-ci se base sur l'aplatissement solaire mesuré (avec une très grande incertitude) par Dicke.

d) Le *temps de décalage des échos radar* sur Vénus, tel que mesuré par Shapiro et ses collaborateurs, donne un bon accord avec la RG. En fait, la théorie cinématique, pour *une* planète, comporte 6 inconnues ; les paramètres observables sont au nombre de 5 ; pour deux planètes, ces nombres passent, respectivement à 10 et 8, et le problème n'est plus indéterminé.

e) L'avenir verra d'autres expériences se dérouler. L'une des plus sensibles aux prévisions de la RG est celle qui consiste à l'étude quantitative de

la *précession d'un gyroscope* emporté par un satellite artificiel en orbite autour de la Terre.

CONCLUSIONS

A la fin de ces deux années consacrées aux faits astronomiques et physiques d'intérêt cosmologique, notre discussion a mis en évidence plusieurs exigences de la théorie.

La première, et qui impose le choix d'une métrique plus générale que celle de Richardson-Walker, ou de Schwarzschild, est de tenir compte de la distribution hiérarchisée. La métrique obtenue devra se ramener à celle de Walker-Robertson loin des masses, à celle de Schwarzschild au voisinage des masses, et à l'extérieur de celles-ci.

La distribution hiérarchisée des masses impose aussi de renoncer au principe cosmologique fort, en faveur du principe cosmologique conditionnel de Mandelbrot.

Les conceptions de Mach-Sciama devraient être sérieusement discutées ; ces idées aboutissent à une équation d'univers dont la signification semble très générale, et implique sans doute d'une part, de très grandes dimensions pour l'univers, et d'autre part, la variation de la « constante » G de Cavendish.

J.-C. P.

BIBLIOGRAPHIE

I a) *Bibliographie générale sur les développements historiques*

M. BORN, *Einstein's Theory of Relativity* (Rev. ed., Dover, U.S.A., 1962).

G. COCCONI, E.E. SALPETER (*Phys. Rev. Letters*, **4**, 176, 1960).

R.H. DICKE, *Documents on modern Physics : Experimental Relativity* (Gordon Breach, New York, 1964).

R.v. EÖTVÖS, D. PEKAR, E. FEKETE (*Ann. Phys.*, **68**, 11, 1922).

R.P. FEYNMAN, R.B. LEIGHTON, M. SANDS, *Lectures on Physics*, vol. I (Cal. Tech., U.S.A., 1963).

G. GALILÉ, *Dialogues et lettres choisies* (Hermann, Paris, 1966).

V.W. HUGHES, H.G. ROBINSON, V. BENTRAN-LOPEZ (*Phys. Rev. Letters*, **4**, 342, 1960).

A. KOYRÉ, *Etudes d'Histoire de la Pensée Scientifique* (N.R.F., Gallimard, réédité par P.U.F., Paris, 1966).

E. MACH, *La Mécanique*, trad. E. Bertrand (Hermann, Paris, 1904).

C.W. MISNER, K. THORNE, A. WHEELER, *Gravitation* (Freeman, New York, 1973).

I b) *Voir références ci-dessus*

I c) *Vitesse de la lumière*

F. ARAGO (*Compt. Rendus Acad. Sc. Paris*, **7**, 954, 1838).

— (*Compt. Rendus Acad. Sc. Paris*, **30**, 489, 1850).

— (*Compt. Rendus Acad. Sc. Paris*, **55**, 792, 1962).

H. FIZEAU (*Compt. Rendus Acad. Sc. Paris*, **29**, 90, 1849).

— (*Ann. Phys.*, **79**, 167, 1850).

— (*Compt. Rendus Acad. Sc. Paris*, **33**, 349, 1851).

L. FOUCAULT (*Compt. Rendus Acad. Sc. Paris*, **30**, 551, 1838).

— (*Compt. Rendus Acad. Sc. Paris*, **55**, 501, 1862).

M. HOEK (*Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, **3**, 180, 1868).

G.R. ISAAK, D.C. CHAMPENEY, A.M. KHAN (*Phys. Letters*, **7**, 241, 1963).

L. JANOSSY, *Theory of Relativity* (Budapest, 1971).

R.S. KENNEDY, E.M. THORNDIKE (*Phys. Rev.*, **42**, 400, 1932).

A.A. MICHELSON (*Sill. J.*, **15**, 394, 1878).

— (*Sill. J.*, **18**, 390, 1879).

— (*Nature*, **21**, 94, 120, 1880).

— (*Nautical Alm.*, p. 235, 1885).

— (*Astrophys. J.*, **60**, 256, 1924).

— (*Astrophys. J.*, **65**, 1, 1927).

A.A. MICHELSON, E.W. MORLEY (*Am. J. Sc.*, **31**, 377, 1886).

A.A. MICHELSON, H.G. GALE (*Astrophys. J.*, **61**, 140, 1925).

B. POGANY (*Ann. d. Phys.*, **80**, 217, 1926).

— (*Ann. d. Phys.*, **85**, 244, 1928).

— (*Naturwiss.*, **15**, 177, 1927).

W. RINDLER, *Essential Relativity* (Springer-Verlag, N.Y., 1969).

G. SAGNAC (*Compt. Rendus Acad. Sc. Paris*, **157**, 708, 1913).

— (*J. Phys.*, **5**, 171, 1914).

F.T. TROUTON (*Proc. Roy. Soc.*, **72**, 132, 1903).

— (*Trans. Roy. Soc. London*, **202**, 165, 1903).

II. Equation Mach-Einstein-Sciama

C. BRANS, R.H. DICKE (*Phys. Rev.*, **124**, 925, 1961).

A.S. EDDINGTON (*Month. Not. Roy. Astr. Soc.*, 668, 1930).

A. EINSTEIN, *La Théorie de la Relativité Restreinte et Générale*, trad. M. Solovine (1916 ; réimprimé, Bordas-Gauthier-Villars, p. 70, 1976).

— *Quatrième conférence de Princeton*, trad. M. Solovine (1922 ; réimprimé, Bordas-Gauthier-Villars, p. 95, 1976).

— (*Ann. der Physik*, **35**, 898, 1911).

— (*Ann. der Physik*, **38**, 355 et 443, 1912).

— (*Vierteljahrsschrift für gerichtliche Medizin und öffentliches Sanitätswesen*, **44**, 37, 1912).

— (*Sitz. Preuss. Akad. d. Wissensch.*, « Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie », 1917).

P. JORDAN (*Nature*, **164**, 637, 1949).

— (*Z. Physik*, **157**, 112, 1959).

A. KASTLER (*Acad. Roy. Belg. Mém. Cl. Sc.*, **54**, 1, p. 13, 1981).

D.J. RAINE, *The isotropic Universe* (**Hilger**, 1981).

D. SCIAMA (*Month. Not. Roy. Acad. Sc.*, **113**, 35, 1953).

— *The Unity of the Universe* (**Doubleday**, 1959).

— (Coll. n° 220, C.N.R.S., « Ondes et radiations gravitationnelles, C.N.R.S. ed., p. 267, 1973).

P.S. WESSON, *Cosmology and Geophysics* (**Hilger**, 1978).

III. Vérifications diverses de la Relativité Générale

M.G. ADAM (*Month. Not. Roy. Astr. Soc.*, **108**, 446, 1948).

— (*Month. Not. Roy. Astr. Soc.*, **119**, 473, 1959).

J. BORSENBERGER, J.-C. PECKER, J.-P. VIGIER (*Bull. Soc. Roy. Sc. Liège*, 44^e année, 706, 1975).

J.W. BRAULT (*Thesis, Princeton*, 1962).

M. JORAND (*Ann. Astrophys.*, **25**, 337, 1962).

V. KOURGANOFF, *Introduction to advanced astrophysics* (**Reidel**, Pays-Bas, 1980).

C. MAGNAN, E. SCHATZMAN (*Astron. Astrophys.*, **38**, 373, 1975).

P. MÉRAT, J.-C. PECKER, J.-P. VIGIER (*Astron. Astrophys.*, **30**, 476, 1974 a).

P. MÉRAT, J.-C. PECKER, J.-P. VIGIER, W. YOURGRAU (*Astron. Astrophys.*, **32**, 471, 1974 b).

A.A. MIKHAILOV (*Month. Not. Roy. Astr. Soc.*, **119**, 393, 1959).

R.V. POUND, G.A. REBKA (*Phys. Rev. Letters*, **4**, 337, 1960).

R.V. POUND, J.L. SNIDER (*Phys. Rev.*, **140 B**, 788, 1965).

F. RODDIER (*Ann. Astrophys.*, **28**, 463, 1965).

I.I. SHAPIRO *et al.* (*Phys. Rev. Letters*, **26**, 1132, 1971).

J.L. SNIDER (*Phys. Rev. Letters*, **28**, 853, 1972).

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE DU LABORATOIRE

Le laboratoire a été douloureusement affecté par le décès de Nicole Heidmann, à la date du 21 mars 1982. Nicole Heidmann était une personnalité très attachante ; elle avait effectué de remarquables travaux sur les propriétés générales des galaxies, et sur les atmosphères stellaires, notamment celle du Soleil et celles des étoiles T Tauri. Une notice la concernant sera publiée prochainement dans le Journal des Astronomes Français.

M. Parviz MÉRAT, contractuel D.G.R.S.T., est entré au Laboratoire où il travaillera sur les problèmes cosmologiques ; M. C. BERTOUT, astronome à Heidelberg a été associé au laboratoire et collaborera avec les chercheurs du groupe concernés par l'évolution dynamique des couches circumstellaires.

L'activité scientifique du laboratoire est restée orientée vers deux directions essentielles : l'étude des atmosphères solaire et stellaires, les recherches extragalactiques et la cosmologie. Le rapport ci-après résulte de la combinaison des rapports rédigés par les divers chercheurs du laboratoire.

1. *Physique solaire*

S. Dumont et J.-C. Pecker, en coopération principalement avec Z. Mouradian, ont continué l'étude des données obtenues grâce au satellite OSO-8. Au début de l'année 1981, ils ont terminé l'étude dynamique de la zone de transition chromosphère-couronne (CCT) et montré l'existence de mouvements ascendants et descendants plus importants dans les régions actives que dans les régions calmes.

Poursuivant l'étude des raies de résonance des ions Si IV et CIV, observés avec l'instrument LASP, et de O VI, observée avec l'instrument LPSP, tous deux montés sur le satellite OSO-8, ces auteurs ont mis au point trois méthodes pour déterminer l'épaisseur optique de ces raies dans la zone de transition (CCT) ; ils ont ainsi pu fixer une limite supérieure et une limite inférieure de l'opacité dans chacune de ces raies. Ces résultats ont permis d'obtenir la densité électronique dans les couches de température 63 100,

100 000 et 317 000 K (ions Si IV, C IV et O VI, respectivement) dans le soleil calme et dans les régions actives. En supposant de plus que l'atmosphère est formée de couches plan-parallèles, il a été possible de déterminer aussi le gradient de température et d'obtenir deux modèles : densité électronique et température en fonction de l'altitude, soleil calme et actif.

Ce travail a été fait en collaboration avec J.-C. Vial (LPSP) et E. Chipman (LASP).

2. *Atmosphères stellaires. Problèmes théoriques ; transfert de rayonnement*

a) C. Magnan a terminé de rédiger une première version d'un article important qui discute les problèmes de formation des raies en présence de vitesses non thermiques. On y fait une étude critique des méthodes utilisées jusqu'à présent. Ces méthodes ignorent toutes le problème, ou l'éluent, en prétendant le décrire par l'introduction de paramètres arbitraires (vitesses de microturbulence). Le point de vue défendu dans l'article consiste à aborder l'étude des champs de vitesses comme un sujet en soi au lieu de le considérer comme un phénomène gênant. L'article est à paraître dans un livre consacré à la dynamique des atmosphères stellaires, livre édité par J.-P. Zahn et D. Gough.

b) Au cours de l'année 1982, M. Gros a poursuivi la mise au point de son programme de calcul du transfert dans les enveloppes stellaires ; la méthode de résolution de l'équation de transfert est la méthode d'addition de couches. Le point plus spécialement étudié cette année a été la recherche des effets principaux du transfert en géométrie sphérique.

c) Dans le cadre de la même méthode générale, G. Debève et J.-C. Pecker ont poursuivi l'étude des régions circumstellaires ionisées d'hydrogène et d'hélium autour des étoiles chaudes.

d) E. Simonneau (en congé de longue maladie, ce qui, néanmoins n'a pas empêché des recherches théoriques) a abordé deux types de problèmes : En premier lieu, en ce qui concerne la formation des raies spectrales et la redistribution de l'énergie entre l'absorption et l'émission, le but du calcul est de calculer la population des niveaux d'énergie qui sont à l'origine de la raie, ainsi que les fonctions de distribution des vitesses des atomes dans ces niveaux, fonctions dont les profils d'absorption et d'émission sont des images.

Les résultats du calcul de la fonction de distribution des vitesses des atomes excités par leur propre rayonnement (ainsi que par les collisions électroniques) ont mis en évidence des anisotropies de cette fonction, et prouvent l'existence d'un flux d'atomes excités qui tend à compenser les gradients imposés par l'équilibre radiatif. Ces anisotropies conduisent à des

asymétries du profil du coefficient d'émission et donc à une distorsion de la forme de la raie spectrale.

M. E. Simonneau travaille actuellement à l'extension de ces résultats (qui supposent l'absence de collisions élastiques atome-atome) au cas où il faut tenir compte de ces collisions. Il a développé une nouvelle forme, plus rigoureuse que celles disponibles, du traitement de l'opérateur qui décrit ces collisions.

e) Par ailleurs, E. Simonneau, en coopération avec F. Querci, étudie le transfert du rayonnement dans des systèmes à géométrie sphérique, et travaille plus spécifiquement au calcul des modèles d'étoiles supergéantes carbonées.

f) Enfin, E. Simonneau a publié (*Ann. Phys.*) une description analytique simple des atmosphères stellaires, dans le cas hors équilibre mais linéaire ; cette description, très maniable et néanmoins suffisamment précise, a un puissant intérêt heuristique et doit permettre une compréhension des paramètres et enveloppes des étoiles.

g) M. Krikorian s'est consacré à l'étude du transfert de rayonnement, dans le cas relativiste. Ses travaux ont abouti à l'expression de la fonction de redistribution des changements de fréquence du photon lors de processus de diffusion par un gaz d'électrons relativistes. Il a montré qu'il était nécessaire de travailler dans l'espace des impulsions, et de tenir compte du couplage rayonnement incident-électrons ; à ces conditions, les expressions obtenues se ramènent aux expressions classiques dans le cas d'un gaz non-relativiste, et la probabilité de diffusion cohérente n'est pas nulle, même dans le cas du gaz relativiste. Ces recherches, en cours de publication (avec S. Kichenassamy), se prolongent par l'étude de la diffusion par un gaz relativiste d'atomes à l'équilibre thermique. Par ailleurs, des calculs préliminaires portant sur les caractéristiques des couches d'électrons en mouvement (réflectivité, transmission) montrent que la somme des coefficients de réflexion et de transmission n'est pas toujours égale à l'unité.

3. *Recherches sur les étoiles :*

Phénomènes non-thermiques dans les atmosphères

a) R.N. Thomas a continué ses travaux de coordination scientifique des Monographies N.A.S.A.-C.N.R.S. sur les phénomènes non-thermiques dans les étoiles. Les deux premiers volumes, fort bien accueillis par les milieux spécialisés, sont sortis des presses, et concernent : 1) *The Sun as a Star* (le Soleil en tant qu'étoile) ; 2) *B and Be stars* (les étoiles B et Be). Il a poursuivi la rédaction de l'ouvrage de cette série dont il est l'auteur, sur les phénomènes non-thermiques, en général, dans les atmosphères stellaires.

Il a, de plus, poursuivi, avec V. Doazan, l'étude (dans l'UV spatial notamment, grâce au satellite IUE) de diverses étoiles B-Be à comportement variable, comme 59 Cygni.

b) J. Zorec, avec R. Thomas et V. Doazan, puis avec L. Divan et D. Briot, a poursuivi (en vue de son mémoire de thèse) ses travaux sur les étoiles Be et B à enveloppe (« shell »). A partir de spectres IUE de 59 Cygni, L. Divan et J. Zorec ont déterminé l'extinction interstellaire et discuté de l'éclat absolu de l'étoile et de sa variation. Ils ont étudié les corrections bolométriques, et ont discuté de ce problème dans le cadre d'une calibration générale en température effective et magnitudes bolométriques des étoiles O et B.

Ces travaux se complètent d'une recherche théorique sur les phénomènes physiques liés à l'apparition des différentes caractéristiques spectrales (émission et « shell ») des étoiles étudiées.

En complément de ces travaux, J. Zorec travaille à la confection du catalogue d'entrée du satellite Hipparcos de calibration astrométrique et photométrique.

4. *Galaxies actives*

S. Dumont (avec S. Collin-Souffrin) a étudié les galaxies de Seyfert et les quasars.

Au cours d'une mission à l'observatoire de Nice en janvier 1981, elles ont achevé, avec H. Frisch et Ph. Delache, une étude critique des approximations fréquemment utilisées dans l'étude des raies d'émission de l'hydrogène des quasars. En comparant les solutions approchées à la solution exacte, elles ont montré que, dans un milieu d'épaisseur finie où les raies subordonnées ne sont pas très épaisses, l'approximation « probabilité d'échappement, semi-infini » surestime le flux des raies. Elles ont de plus proposé une forme modifiée de l'approximation « probabilité d'échappement » pour un milieu d'épaisseur limitée ; cette approximation donne de bons résultats.

Ensuite, avec J. Tully, elles ont discuté les calculs de modèles de la région qui émet les raies larges (BLR) dans les quasars et les galaxies de Seyfert. Elles proposent finalement un modèle composé de deux régions physiquement distinctes : 1) une région « photoionisée » comprenant une région H II et une région H II avec éventuellement une zone de transition ; 2) une région chaude et dense, chauffée par collisions.

Ce travail est poursuivi actuellement par l'étude, avec M. Joly, d'un modèle « épais ».

5. Implications cosmologiques des observations extragalactiques

a) S. Depaquit s'est consacré plus particulièrement à l'étude des quasars. Il a ainsi étudié la distribution du décalage vers le rouge des raies d'émission des quasars. Cette étude s'est traduite par un article actuellement soumis pour publication : *Do selection effects really influence the redshift distribution law of quasars?* (S. Depaquit, J.-C. Pecker, J.-P. Vigier). Les travaux en cours portent sur :

- l'étude des effets de magnitude dans l'histogramme des quasars (en liaison avec l'article précédent) ;
- la répartition des quasars dans les différentes zones du ciel ;
- l'étude des échantillons de quasars aux très grands décalages vers le rouge obtenus par la méthode du prisme (ou réseau) objectif. Ces travaux se poursuivent en liaison avec divers astronomes étrangers, notamment H. Arp (U.S.A.), J.M. Barnothy (U.S.A.), T. Jaakkola (Finlande).

b) H. Karoji, dans le cadre de son travail de thèse, s'est préoccupé de représenter et de « modéliser » la dynamique du Superamas local et son voisinage immédiat à l'aide de la relation de Hubble des galaxies individuelles. Cette analyse doit faire 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. M. Karoji examine :

- 1) si la relation de Hubble est perturbée par la présence de l'amas Virgo (décélération de l'expansion par une concentration importante de matière) ;
- 2) s'il y a, dans l'intérieur du Superamas, une rotation différentielle suggérée par G. de Vaucouleurs ;

1) et 2) engendrent deux questions importantes de la cosmologie, à savoir respectivement, la détermination de Ω (donc 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 grande échelle (~ 30 Mpc et plus).

Ses premiers résultats montrent que :

- a) Le paramètre de Hubble n'est pas en augmentation derrière le centre du superamas (derrière l'amas de Virgo).
- b) Le « flux » de l'expansion générale est freiné dans le Superamas, d'une façon bien déterminée.
- c) L'existence d'une rotation apparaît significative.

Ces résultats sembleraient en contradiction avec une classe de solutions exactes d'Einstein décrivant des insertions denses dans un milieu par ailleurs

homogène et isotrope, seules solutions pour l'instant capables de représenter les amas (ou superamas) de galaxies, puisqu'elles donnent toutes une accélération de l'expansion dans l'amas, à moins d'hypothèses très particulières (deux temps « cosmiques » différents pour l'amas et pour le reste, par exemple).

c) J.-C. Pecker a discuté des équations d'Univers associées à la formulation par Sciama du principe de Mach (voir cours, ci-dessus).

d) H. Karoji a participé à la préparation des expériences PCN et PIRAMIG (programmes spatiaux franco-soviétiques) en particulier pour la recherche des composantes diffuses extragalactiques, qui constituent une donnée de base pour la cosmologie. Une étude a été faite sur la faisabilité et l'estimation de l'ordre de grandeur ; les résultats en ont été positifs. Nous attendons le retour des clichés d'observation pour les analyser.

SÉMINAIRES ET CONFÉRENCES

Les séminaires ont eu lieu du 8 décembre 1981 au 2 février 1982 sur le thème : *Physique globale du Soleil et des étoiles* :

- Oscillations et structure interne (J.-P. ZAHN), le 8 décembre 1981.
- Les oscillations : observations nouvelles (E. FOSSAT), le 15 décembre 1981.
- Cycles d'activité solaire et stellaire : Caractéristiques globales (P. SIMON), le 5 janvier 1982.
- Cycle solaire et structure interne (L. PATERNO), le 12 janvier 1982.
- La diffusion dans les étoiles et le problème des abondances (G. ALECIAN), le 19 janvier 1982.
- Champs de vitesses non thermiques (C. MAGNAN), le 26 janvier 1982.
- Structure interne et évolution. Le problème des neutrinos (E. SCHATZMAN), le 26 janvier 1982.
- L'atmosphère non thermique : Mécanismes de chauffage (J. HEYVAERTS), le 2 février 1982.
- Conclusions et perspectives (R. CAYREL), le 2 février 1982.

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^{me} Ruth GALL, Professeur à l'Université Nationale Autonome du Mexique a donné une conférence sur le sujet suivant : *Vistas on geomagnetic effects on Cosmic Rays*, le 12 novembre 1981.

— M. Kinsey ANDERSON, Professeur à l'Université de Berkeley (Californie) a donné une série de 4 leçons sur le sujet suivant : *Fields, Particles and Plasmas in the Solar System*. 1. *Magnetic fields of planets and their satellites, I*, le 10 novembre 1981. 2. *Magnetic fields of planets and their satellites, II*, le 17 novembre 1981. 3. *Shock waves and particle acceleration, I*, le 24 novembre 1981. 4. *Shock waves and particle acceleration, II*, le 1^{er} décembre 1981.

— M. Claude BERTOUT, astronome à l'Observatoire de Heidelberg, a donné une conférence sur le sujet suivant : *Progrès récents sur les étoiles T Tauri*, le 3 décembre 1981.

— M. Ronald G. GIOVANELLI, Professeur, C.S.I.R.O. Division of Applied Physics, Lindfield (Australie), a donné une série de 10 leçons sur le sujet suivant : *Solar Magnetic fields and the Sunspot Cycle* : 1-2. *Solar magnetic fields. Magnetic canopies in quiet and active regions*, le 15 avril 1982. 3. *The geometry of sunspots*, le 22 avril 1982. 4. *Properties of magnetic flux tubes in the Sun's atmosphere*, le 22 avril 1982. 5. *Intermediate scales of convection*, le 29 avril 1982. 6-10. *The sunspot cycle*, les 6 et 13 mai 1982.

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} A. L'HEVEDER (secrétaire, Collège de France), M^{lle} P. HAOUR (secrétaire, Collège de France), M^{me} N. HEIDMANN (astronome-adjoint, Observatoire de Paris, jusqu'en mars 1982), M. H. KAROJI (maître-assistant à Paris VII), M. R. KRIKORIAN (maître-assistant, Collège de France), M. M. LOUCIF (étudiant de D.E.A. jusqu'en juillet 1981), M. C. MAGNAN (sous-directeur du laboratoire, Collège de France), M. P. MÉRAT (ingénieur D.G.R.S.T. depuis avril 1982), 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 (attaché de recherche au C.N.R.S.).

Chercheurs associés : J.-P. VIGIER (Institut Henri-Poincaré), C. BERTOUT (Laboratoire d'Heidelberg), S. SAHAL (Observatoire de Meudon), S. COLLIN-SOUFFRIER (Observatoire de Meudon).

De plus des personnalités étrangères ont effectué au Laboratoire d'Astrophysique Théorique des séjours courts ou prolongés, ou répétés : M. P. DELACHE, Observatoire de Nice ; M. T. JAAKKOLA, Université d'Oslo ; M. L. GOLDBERG, Kitt Peak Observatory ; M. APPENZELLER, Laboratoire d'Heidelberg ; M. J.-P. ZAHN, Observatoire du Pic du Midi ; M. E. SCHATZMAN, Observatoire de Nice.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

D. BRIOT, J. ZOREC, *Spectral type dependence of the characteristics of Be stars (Workshop on pulsating B stars, 1981, Nice, Ed. L.E.V.O.N. and C. Sterken, p. 109).*

D. BRIOT, L. DIVAN, J. ZOREC, *Correlations between BCD parameters of the continuous spectrum and the Balmer decrements of Be stars (1981, I.A.U. symposium n° 98, Be stars, Ed. M. Jaschek and H.G. Groth, p. 53).*

— *Far-ultraviolet colours of B stars with and without emission lines (1981, I.A.U. symposium n° 98, Be stars, Ed. M. Jaschek and H.G. Groth, p. 419).*

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., 1981, 104, 264).*

S. COLLIN-SOUFFRIN, S. DUMONT, J. TULLY, *Hydrogen line spectrum in quasars. II. A critical discussion of model calculations for the broad line region (Astron. Astrophys., 1982, 106, 362).*

R. COSTERO, V. DOAZAN, R. STALIO, R.N. THOMAS, *Implications of stellar variability and individuality on stellar evolution (Proceedings of I.A.U. colloquium n° 59, on Mass-loss and Stellar evolution, 1980, ed. R. Stalio, Trieste, Reidel publ., p. 131).*

S. DEPAQUIT, J.-C. PECKER, J.-P. VIGIER, *Do selection effects really influence the redshift distribution law of quasars ? (soumis à Monthly Notices of the R.A.S.).*

L. DIVAN, V. DOAZAN, J. ZOREC, *Intrinsic reddening of Be stars and its relation with H emission intensities (1981, I.A.U. symposium n° 98, Be stars, Ed. M. Jaschek and H.G. Groth, p. 57).*

L. DIVAN, J. ZOREC, *BCD spectrophotometry of the Be-shell star 88 her (1981, I.A.U. symposium n° 98, Be stars, Ed. M. Jaschek and H.G. Groth, p. 61).*

— *Absolute magnitudes and other basic parameters of O and B stars* (1982, *The scientific aspects of the Hipparcos space astrometry mission*, ESA SP-177, p. 101).

— *Behaviour of the energy distribution of 59 Cyg in the far-ultraviolet and in the visible* (Third European I.U.E. conference, Madrid, 10-13 May 1982, sous presse).

V. DOAZAN, R. STALIO, R.N. THOMAS, *Proposed three-phase modeling of Be stars from combined visual and I.U.E. observations* (1981, *Proc. of coll. on the second year of I.U.E. at Goddard*, N.A.S.A. conference publ. 2171, p. 149).

V. DOAZAN, M. FRANCO, R. STALIO, R.N. THOMAS, *Rotational velocity versus mass loss in Be stars* (1981, *Proc. of the I.A.U. symposium n° 98, Be stars*, ed. M. Jaschek and H.G. Groth, Reidel publ., 1982).

— *Gross structural pattern for the atmospheres of Be and similar stars* (1981, *Proc. of the I.A.U. symposium n° 98, Be stars*, ed. M. Jaschek and H.G. Groth, Reidel publ., 1982).

V. DOAZAN, C. GRADY, L. KUHI, J.M. MARLBOROUGH, T.P. SNOW, R.N. THOMAS, *The active UV phase of 59 Cyg* (1981, *Proc. of the I.A.U. symposium n° 98, Be stars*, ed. M. Jaschek and H.G. Groth, Reidel publ., 1982).

V. DOAZAN, R.N. THOMAS, *Global Picture of a Be star* (in : *Be stars with and without emission lines*, ed. A. Underhill and V. Doazan, *Monograph series on non-thermal phenomena in stellar atmospheres*, N.A.S.A.-C.N.R.S. publ., 1982).

S. DUMONT, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, *Structure and physics of solar faculae. I. Principles and observational procedures from ground-based instruments and OS08 satellite* (*Solar Physics*, 1982, **78**, 71).

S. DUMONT, Z. MOURADIAN, J.-C. PECKER, J.-C. VIAL, E. CHIPMAN, *Structure and physics of solar faculae. III. Densities on the chromosphere-corona transition zone* (*Solar Physics*, sous presse).

M. GROS, *Le milieu interstellaire* (*C.R. de l'école d'été de Grasse*, août 1981).

H. KAROJI, *Dynamics of the supercluster of galaxies. I. Representation of the variation of the Hubble ratio* (soumis pour publication).

R. KRİKORIAN, *The relativistic Doppler broadening of the line absorption profile* (*J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1982, vol. 27, **6**, 653).

— *The redistribution function for scattering by relativistic electrons* (*J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, sous presse).

M. LOUCIF, C. MAGNAN, *Line profile fluctuations in a turbulent atmosphere* (*Astron. Astrophys.*, sous presse).

Z. MOURADIAN, S. DUMONT, J.-C. PECKER, E. CHIPMAN, G.E. ARTZNER, J.-C. VIAL, *Structure and physics of solar faculae. II. The non-thermal velocity field above faculae* (*Solar Physics*, 1982, **78**, 83).

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

— *Caractères météorologiques du climat et activité solaire : quelques remarques* (En hommage au Professeur J. Xanthakis, 1982, E.G. Mariopoulos et al. eds., *Compendium in Astronomy*, 151-160, Reidel Publ.).

— *The star « Sun » - l'étoile « Soleil »* (*Proc. of the VI European Meeting in Astronomy*, Dubrovnik, oct. 1981, sous presse).

— *Solar activity. « Summary and general discussion »* (*Proc. of the third European Solar Meeting of the E.P.S.*, Oxford, avril 1981, p. 233).

— *Champs de vitesses et champs magnétiques à petite échelle dans l'atmosphère solaire* (1981, *C.R. Acad. Sc. Paris, Vie Académique*, T. 293, p. XV).

E. SIMONNEAU, *Atmosphères stellaires* (1981, *Ann. Phys. Fr.*, **6**, 107).

R.N. THOMAS, *Empirical velocity-patterns from combined I.U.E. and visual observations : The Be stars* (*Third European I.U.E. Conference*, Madrid, May 1982, E.S.A.-S.P., sous presse).

— *Empirical velocity-patterns from combined I.U.E. and visual observations : The Be-similar stars* (*Third Goddard I.U.E. conference*, Washington, March 1982, N.A.S.A.-S.P., sous presse).

— *The effect on empirical atmospheric modeling of the mass-flux as an empirical parameter* (1982, *Astrophys. J.*, sous presse).

PUBLICATIONS DIVERSES

J. DIEUDONNÉ, F. GROS, L. MICHEL, J.-C. PECKER, F. PERRIN, R. THOM, *Pourquoi Sakharov a été élu associé étranger à l'Académie des Sciences de Paris* (*Le Monde*, 28 mai 1981).

S. DUMONT, *Du nouveau au Palais de la Découverte* (*L'Astronomie*, 1981, juin, p. 307).

— *Le passage de Voyager 2 près de Saturne* (*L'Astronomie*, 1982, février, p. 55).

D. FRANCOU, S. DUMONT, *Dépouillement du questionnaire sur « l'Astronomie »* (*L'Astronomie*, 1982, avril, p. 207).

L. MICHEL, J.-C. PECKER, Préface à l'ouvrage sur *Andreii Sakharov* (1982, éd. Seuil).

J.-C. PECKER, *Cent ans d'astronomie à travers « L'Astronomie »* (*L'Astronomie*, mars 1982, 123-151).

— *A propos du colloque de Cordoue* (*Revue de l'Union Européenne de Radiodiffusion*, 1982, XXXIII, 43).

— Préface au numéro « *Solaire* » du *Bull. Jeunes Années magazine* (1982, 146, 1). Texte sur les « *Cadrans Solaires* » du même numéro.

— *L'Astronomie et les droits de l'homme. Contributions au volume collectif « Sciences et droits de l'homme »* (coll. *Libertés Fondamentales*, Hatier, sous presse).

— Dans *Débat* : « *vraies* » et « *fausses* » sciences. Réponse à Yves Jaigu (*Le Monde Dimanche*, 7 juin 1981).

— *A propos des structures de l'Observatoire de Paris* (1981, *B.I.O.P.*, **471**, 120).

— *Le rôle culturel de la science* (1981, *Contact*, **207**, 3, et *Contact*, **209**, 3).

— *Le centenaire de l'Observatoire de Nice* (*A.D.I.O.N. bull.*, 1980-1981, **18**, 17).

— *La recherche spatiale et la connaissance de l'univers* (*La Pensée*, sous presse).

— Réédition revue et corrigée de deux ouvrages de Paul Couderc : — *Histoire de l'Astronomie classique* — *L'Univers* (P.U.F., sous presse).

— Postface à la réédition en fac-similé de l'ouvrage de Camille Flammarion, *Les étoiles et les curiosités du ciel* (1981, éd. Flammarion, Paris).

— Préface à l'ouvrage de L. Gouguenheim, *Méthodes de l'astrophysique* (1981, Hachette).

— Citation in *Astronomy* (1981, *Science*, **214**, 254).

— *L'Atmosphère solaire. Du modèle à la physique* (dans *Analogie et Connaissance*, T. II, *De la poésie à la science*. 1981, recherches interdisciplinaires, séminaires du Collège de France, Maloine éd., Paris, p. 237).

— *Les faits cosmologiques* (1982, *La Médecine Praticienne*, **6**, 5-7).

— Présentation d'ouvrages à l'Académie des Sciences, Paris : *Etoiles et curiosités du ciel* (C. Flammarion, réédition); *Méthodes de l'astrophysique* (L. Gouguenheim); *Clefs pour l'astronomie* (J.-C. Pecker); *The Sun as a star* (N.A.S.A.-C.N.R.S. monographie), (1981, *C.R. Acad. Sc. Paris, Vie Académique*, T. 293, p. 97). Présentation des ouvrages édités en l'honneur de MM. Coulomb et Thellier (1981, *Vie Académique*, **292**, 143).

COLLOQUES, SÉMINAIRES, MISSIONS

Colloque à Londres en janvier 1981 : *Plans pour le satellite X-ray, EXOSAT* (R.N. THOMAS).

Réunion de travail à l'Observatoire de Nice, janvier 1981 (S. DUMONT).

Colloque I.A.U. Symposium n° 98, *Be stars*, à Munich, avril 1981 (J. ZOREC, R.N. THOMAS).

Colloque à Amsterdam en juin 1981 : *Plans pour le satellite X-ray EXOSAT* (R.N. THOMAS).

Congrès de la Société Française de Physique à Clermont-Ferrand, juillet 1981 (S. DUMONT).

Colloque à Byurakan (U.R.S.S.) consacré au principe d'invariance d'Ambarsumian, novembre 1981 (C. MAGNAN).

Colloque sur *I. The scientific aspects of the Hipparcos space astrometry mission. II. La structure du petit nuage de Magellan*, février 1982, à Strasbourg (J. ZOREC, J.-C. PECKER).

Réunion du groupe « évolution galactique » à l'Institut d'Astrophysique de Paris : communication de J.-C. PECKER sur *Les premiers stades de l'évolution galactique*, en mai 1982.

Colloque *Third European I.U.E. conference* à Madrid, mai 1982 (J. ZOREC, R.N. THOMAS).

R.N. THOMAS : Afin d'établir les programmes de collaboration scientifique pour la série des monographies C.N.R.S.-N.A.S.A., R.N. THOMAS a effectué plusieurs séjours à la N.A.S.A., à l'Université du Colorado et à l'Observatoire de Trieste (Italie). En septembre 1981, missions d'observation pour le satellite I.U.E. à Madrid.

C. MAGNAN : Séminaire à Heidelberg en avril 1982 sur : *Models to investigate the formation of spectral lines in a randomly moving atmosphere*.

J.-C. PECKER : Séminaire à Jussieu, dans le cadre des séminaires de l'École Normale Supérieure, Groupe de Physique des Solides, en mars 1982 sur le sujet : *Discussion de la distance des étoiles et des galaxies*.

J.-C. PECKER : Conférence à Nice sur le Soleil à l'occasion de la remise de la Médaille de l'A.D.I.O.N., mars 1982, sur le sujet : *Soleil global et dermatologie solaire*.

DISTINCTIONS, NOMINATIONS

J.-C. PECKER a reçu la 17^e Médaille annuelle de l'A.D.I.O.N. 1980. Il a été nommé Officier de la Légion d'Honneur.

J. ZOREC a été nommé Attaché de Recherche au C.N.R.S.

C. BERTOUT a soutenu sa thèse de Docteur ès Sciences en janvier 1982.
Sujet : *Etudes observationnelles et théoriques de l'évolution des étoiles de faible masse avant la séquence principale.*