

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE LYON



REVUE TRIMESTRIELLE

Nouvelle série — N° 10 — 1977

Ce numéro comporte exceptionnellement 24 pages (au lieu des 16 pages habituelles). Le précédent numéro ayant été aussi augmenté, les numéros 9 et 10 ont le contenu de trois bulletins classiques.

Notre couverture :

Sortie de la Société Astronomique de Lyon à l'Observatoire de Haute-Provence, le dimanche 12 juin 1977.

Photo : M. SAULNIER

PROMENADE MODERNE DANS LE SYSTEME SOLAIRE

par H. ANDRILLAT

Professeur à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc

L'exploration spatiale constitue évidemment un irremplaçable moyen d'étude des astres du système solaire, soit que les sondes spatiales puissent se poser directement sur le sol des planètes et nous en transmettre des photographies, soit que, libérées des absorptions de l'atmosphère terrestre, elles puissent observer ces astres dans des domaines spectraux inobservables depuis le sol.

Il ne faudrait cependant pas oublier que l'astronomie classique avait déjà fourni un grand nombre de résultats sur le système solaire, qui non seulement se sont trouvés vérifiés lors de ces explorations directes, mais encore ont constitué les bases indispensables à l'essor de la conquête spatiale elle-même.

Parmi eux, se trouvent les lois de la mécanique céleste qui régissent le mouvement des planètes autour du soleil et qui nous apprennent notamment que l'orbite d'une planète (une ellipse de faible excentricité, presque un cercle) est une courbe plane dont le plan passe par le centre du soleil.

Les plans des diverses orbites planétaires sont peu inclinés les uns par rapport aux autres, ce qui autorise, avec une bonne approximation, une représentation des orbites planétaires par des cercles concentriques dessinés dans un même plan.

Ces mêmes lois de la mécanique céleste nous font connaître les distances moyennes des planètes au Soleil (les rayons de ces cercles que nous pourrions donc représenter à l'échelle, en prenant le rayon de l'orbite terrestre pour unité). Nous connaissons aussi les masses des planètes et leurs volumes, donc leurs densités moyennes. Le volume de la planète est évidemment sphérique et son diamètre est connu quand on connaît à la fois la distance de la planète et son diamètre apparent, directement observable.

La compilation de toutes ces données, distances, masses, densités, fait ressortir deux familles de planètes : les quatre premières (on énumère les planètes à partir du Soleil), Mercure, Vénus, la Terre et Mars, de masses comparables à celle de la Terre, et les autres, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune, Pluton de très grandes masses, à l'exception de Pluton, la plus lointaine des planètes, qui pourrait être un satellite perdu de Neptune. Le tableau suivant met bien en évidence ces deux familles de planètes ; les distances sont les distances moyennes au Soleil (rayons des orbites supposées circulaires). Pour les distances, les masses et les volumes, les valeurs relatives à la Terre sont prises comme unité. Pour fixer les idées, on se souviendra que la distance Terre-Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres. Par contre, les valeurs des densités, parlantes par elles-mêmes, sont données en valeur absolue, en g/cm^3 .

	distance au Soleil	masse	volume	densité
Mercure	0,39	0,06	0,06	5,4
Vénus	0,72	0,82	0,88	5,2
Terre	1	1	1	5,5
Mars	1,52	0,11	0,15	3,9
Jupiter	5,2	317,9	1 316	1,3
Saturne	9,5	95,2	755	0,7
Uranus	19,2	14,6	67	1,2
Neptune	30,1	17,2	57	1,7
Pluton	39,4	0,1 ?	0,1	?

On voit notamment qu'il est malaisé de représenter à l'échelle toutes les orbites. Par exemple, si celle de la Terre est représentée par un cercle de 10 cm de rayon, celle de Pluton devrait avoir un rayon de 4 mètres !

On représentera donc séparément les deux familles, la première en prenant pour unité le décimètre, la seconde en prenant pour unité le 1/2 cm par exemple.

Rappelons encore, à propos des distances, la célèbre loi de Bode, loi empirique qui permet de retrouver facilement l'ordre de grandeur des distances des planètes au Soleil. Nous considérons la suite

0 0,3 0,6 1,2 2,4 4,8 etc...

obtenue à partir de 0,3 en doublant chaque fois le terme précédent et à laquelle nous adjoignons le premier terme 0. Nous ajoutons alors 0,4 à chaque terme de la suite et nous obtenons :

0,4 0,7 1 1,6 2,8 5,2 etc...

suite qui donne bien, au terme 2,8 près, les distances des diverses planètes jusqu'à Uranus avec une assez bonne approximation.

Outre son avantage mnémorique, la suite de Bode présente l'intérêt d'attirer notre attention sur une orbite «manquante», l'orbite de rayon 2,8, où se trouve en fait la *ceinture des astéroïdes*, riche en milliers de petites planètes, dont certaines, comme la petite planète Eros, sont connues depuis fort longtemps. Cette ceinture d'astéroïdes constitue une zone des plus dangereuses à traverser pour les sondes spatiales, que l'on envoie vers les planètes lointaines, au-delà de l'orbite de Mars.

La structure générale du système solaire dont nous venons de parler s'explique bien dans l'hypothèse cosmologique, communément adoptée aujourd'hui, celle de la nébuleuse initiale qui se serait condensée pour former successivement le Soleil en son centre, puis les planètes par condensation d'anneaux concentriques. C'est une hypothèse ancienne, déjà formulée par Descartes, puis par Laplace et par le philosophe Kant. Elle s'oppose à l'autre hypothèse formulée par Buffon, l'hypothèse de la «capture» par le Soleil d'une autre étoile, dont les débris seraient devenus les planètes.

Ces hypothèses cosmogoniques et leurs très nombreuses variantes, que l'on a vu se développer au cours de l'histoire de l'astronomie, avaient autrefois un caractère assez spéculatif, qui s'expliquait bien par le peu d'informations précises dont on disposait sur les planètes. Aujourd'hui les découvertes que nous livrent les sondes spatiales viennent corroborer de façon éclatante l'hypothèse de la nébuleuse initiale. Si nous n'en voulions donner qu'un exemple on rappellerait que l'anneau de gaz, qui va donner naissance à une planète dans une phase de condensation principale, va également donner naissance, par condensations secondaires, à de très nombreux astéroïdes qui se trouvent sur la même orbite que la planète, à l'emplacement même de l'anneau. Ces derniers viendront donc s'écraser sur la planète qui, dans la mesure où une atmosphère n'y viendra point se livrer à un travail inexorable d'érosion, gardera à jamais sous la forme de nombreux cratères criblant sa surface la trace de ce gigantesque bombardement primordial. Mais, à l'exception de la lune, les planètes sont trop lointaines pour que les cratères de leurs surfaces soient visibles au télescope. Par contre, les sondes spatiales nous ont montré la surface de Mars, comme celle de Mercure, criblée de cratères et la technique des échos de radar a révélé la présence de cratères sur le sol de Vénus, au-dessous de son atmosphère.

Imaginons donc l'histoire de notre système solaire ! A l'origine, une grande nébuleuse, comme celle d'Orion, ou comme M8, dans lesquelles nous savons reconnaître ces petites structures sphériques et sombres, les globules, condensations qui vont devenir des étoiles, comme celles qui sont déjà nées dans Orion, dans la région du Trapèze. La nébuleuse solaire se condense et passe par la forme sphérique, cependant que s'amorce une gigantesque rotation de toute sa masse autour d'un axe privilégié. Dès lors, elle s'aplatira de plus en plus suivant un plan perpendiculaire à cet axe où elle prendra un aspect lenticulaire avec une importante concentration sphérique centrale. Bientôt, les densités et les températures deviendront telles au centre de cette masse sphérique, que spontanément s'amorceront les réactions hautement énergétiques de transmutation de l'hydrogène en hélium. Le Soleil est né, splendide au sein de la vaste nébuleuse. Il rayonne des vagues d'énergie qui se propagent dans cette dernière en ondes de densité, la structurant en anneaux concentriques, séparés de zones presque vides de gaz. Puis, chaque anneau se brisera, formera en condensation principale une planète, en condensations secondaires les satellites et les milliers de petits astéroïdes qui viendront s'écraser sur la planète et ses satellites, en criblant leurs surfaces de cratères.

Les derniers soubresauts de naissance du Soleil, dans sa phase d'étoile T Tauri, viendront souffler tout le résidu de la matière nébulaire entre les planètes. Le système solaire est né et tout son aspect actuel s'explique :

- toutes les orbites planétaires sont presque situées dans un même plan, parce que toute la matière nébulaire initiale était répartie au voisinage d'un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.

- à peu d'exceptions près, d'origines accidentelles vraisemblablement, toutes les planètes et tous leurs satellites tournent dans le même sens, le sens de rotation de la nébuleuse initiale.

- la forme de l'onde de densité dans la nébuleuse initialement uniforme explique la distribution des distances et la répartition des masses planétaires.

Les planètes lointaines sont nécessairement très massives : elles sont formées à partir d'anneaux de gaz très grands. Celles qui sont proches du Soleil, formées à partir d'anneaux de gaz de petits rayons, ont de petites masses.

On peut imaginer l'onde de densité tassant la matière nébulaire initialement uniforme suivant deux pics de densité successifs, le premier plus proche du Soleil contenant moins de masse que le second constituant un anneau plus vaste, le premier donnant naissance, à sa crête, à deux planètes de masse sensiblement égale, la Terre et Vénus et sur ses bords à des planètes dix fois moins massives, Mercure du côté de Vénus, Mars du côté de la Terre.

L'appauvrissement en matière nébulaire entre les deux pics se traduit par la présence d'un anneau relativement ténu, trop ténu pour que s'y développe une condensation d'importance, capable d'attirer la presque totalité de la masse de l'anneau et former ainsi une planète. Seule une multitude de petites condensations isolées peut s'y développer donnant naissance à la ceinture des astéroïdes.

D'une façon analogue, à l'extrémité la plus lointaine du système solaire, à la périphérie de la nébuleuse initiale, l'onde de densité, extrêmement atténuée par la distance parcourue, aurait donné naissance à un anneau très ténu, incapable de former une planète mais engendrant l'ensemble innombrable d'astéroïdes que sont les comètes et qui, parfois, sous l'effet de certaines perturbations gravitationnelles, quittent leur lointaine orbite circulaire pour s'approcher du Soleil sur des orbites à forte excentricité. C'est le cas aussi de certains astéroïdes dont il est arrivé que la trajectoire ainsi perturbée rencontre la Terre en produisant un splendide et gigantesque bolide.

L'hypothèse de la nébuleuse initiale explique bien aussi la composition et la structure des planètes, comme la composition de leur atmosphère éventuelle.

La nébuleuse initiale est composée pour 3/4 d'hydrogène et pour 1/4 d'hélium, approximativement, avec des traces d'autres éléments, le carbone, l'azote, l'oxygène qui joueront un rôle décisif dans la constitution des atmosphères planétaires et dans le développement de la vie. Enfin, elle contient aussi des métaux, du fer notamment, qui contribueront à la formation de la partie solide de la planète, les roches.

C'est un fait que le noyau solide d'une planète a une composition chimique identique d'une planète à l'autre. Les roches sont constituées de métaux, fer, aluminium, magnésium, d'oxydes et de silicates.

C'est notamment cette identité de composition chimique qui confère aux densités des quatre premières planètes, qui n'ont pas ou qui ont peu d'atmosphère, des valeurs presque égales (voir le tableau ci-dessus). Si, d'autre part, pour les autres planètes, la densité s'abaisse jusqu'à la valeur de 1 gr/cm^3 , c'est que l'atmosphère devient alors prépondérante. Pour qu'une planète soit capable de retenir autour d'elle une atmosphère de composition donnée, il faut qu'elle ait une masse suffisante. C'est un problème de gravitation. A chaque masse correspond une vitesse d'évasion, vitesse caractéristique de la trajectoire parabolique qui éloignera à l'infini toute particule ou objet ayant cette vitesse. Pour la Terre, cette vitesse est de 11 km/sec. environ. La vitesse moyenne des particules d'un gaz dépend évidemment de sa température mais, pour une température donnée, elle dépend de la masse moléculaire de ces particules. Considérons les masses atomiques des principaux éléments chimiques présents dans la nébuleuse initiale. Ce sont :

H = 1

He = 4

C = 12

N = 14

O = 16

Leurs principales combinaisons moléculaires sont :

le méthane $\text{CH}_4 = 16$

l'ammoniaque $\text{NH}_3 = 17$

l'eau $\text{H}_2\text{O} = 18$

le gaz carbonique $\text{CO}_2 = 44$

On voit apparaître nettement trois familles de composants :

les composants légers : H et He

les composants moyens : CH_4 , NH_3 , H_2O

les composants lourds : CO_2

Dès lors, une planète de petite masse Mercure ($m = 0,06$), Mars ($m = 0,11$) ne peuvent retenir aucune atmosphère (Mercure) ou seulement une très faible atmosphère de CO_2 (mars) avec quelques traces d'éléments moyens.

Une planète avec la masse de la Terre, par exemple Vénus, retiendra une atmosphère de CO_2 . Ce fut initialement aussi le cas de la Terre, mais, sur cet astre; les conditions physiques particulières permirent, sous l'effet du rayonnement ultraviolet solaire, et à partir des éléments CH_4 , NH_3 , H_2O , la synthèse des molécules organiques (acides aminés notamment) et le développement ultérieur de la vie. On sait alors que la fonction chlorophyllienne fixe le carbone et transforme le gaz carbonique en oxygène, constituant peu à peu l'atmosphère actuelle de la Terre par destruction de l'atmosphère primitive de CO_2 .

Les planètes de grosses masses ont des masses suffisantes pour retenir de larges atmosphères d'hydrogène et d'hélium. Jupiter par exemple est une énorme sphère d'hydrogène, moléculaire dans ses régions les plus extérieures, atomique dans les régions plus profondes. Les propriétés magnétiques de la planète sont notamment bien expliquées par la présence de cette immense couche d'hydrogène atomique, conducteur de l'électricité.

Les éléments moyens CH_4 , NH_3 , H_2O se trouvent a fortiori en abondance dans la planète mais sous forme solide (ou liquide) à cause de la basse température due à l'éloignement du Soleil. Par analogie alors avec le cas de l'eau, on parle de «glaces» pour les trois éléments cités.

La conférence se poursuit alors par la projection de diapositives présentant les principaux résultats fournis par les sondes spatiales.

On projette d'abord des photographies ultraviolettes du Soleil, prises à bord de Skylab, et qui montrent les zones lacunaires de la couronne, le «trou coronal».

La matière coronale provient des couches les plus turbulentes de la zone convective du Soleil, sous-jacente à sa surface visible. Les champs magnétiques piégés dans des sortes de tubes perpendiculaires à la surface, y émergent par les taches solaires. Les particules chargées suivent d'une tache à l'autre les lignes de force de ces champs, décrivant les orbes magnifiques des protubérances, parfois gigantesques. Mais dans les

régions non actives, sans taches ni champs magnétiques, ces particules quittent le Soleil sans retour, constituant ce courant de particules chargées, *le vent solaire*, responsable des aurores polaires et des orages magnétiques sur Terre.

Pour la première fois, Skylab photographiait ce trou coronal, cette région lacunaire de non activité magnétique, par où le vent solaire s'échappe du Soleil.

On montre ensuite une série de photographies de Mercure, prises par Mariner 10. Toutes sont remarquables de netteté et de détails. Elles montrent la surface nue de la planète, sans atmosphère, partout criblée de cratères. Suspectant que la rotation de Mercure sur elle-même est exactement les 2/3 de sa rotation autour du Soleil, on a cherché à démontrer ce résultat en donnant à Mariner 10 une orbite, dite de triple résonance.

Pour cela, on a satellisé Mariner 10 autour du Soleil, avec une période égale au double de la période T de Mercure. Ainsi entre deux passages consécutifs de Mariner 10 devant Mercure, il s'est écoulé un temps $2T$ pendant lequel la planète a fait trois tours complets sur elle-même, si sa période de rotation θ est les 2/3 de T ($2T = 3\theta$).

Les photographies prises lors de deux passages successifs de Mariner 10 devant Mercure montrent exactement les mêmes détails du sol planétaire, prouvant que la planète a bien, entre ces deux passages, effectué un nombre entier de tours sur elle-même.

Ce même Mariner 10 avait d'abord cotoyé la planète Vénus avant d'aller explorer Mercure. On montre des photographies ultraviolettes de la planète attestant, par la turbulence des structures, la rotation rapide de la très lourde atmosphère de CO_2 . On résoud par là le dilemme sur la rotation de Vénus : 4 jours pour la rotation de la partie la plus externe de l'atmosphère, 243 jours (et dans le sens rétrograde) pour la rotation de la partie solide de la planète. Les observateurs qui employaient des méthodes optiques trouvaient la première valeur, les autres, avec la méthode des échos de radar, trouvaient la seconde.

On cite encore les sondes soviétiques Vénéra, dont les premières, surprises par l'extraordinaire densité de l'atmosphère de CO_2 , n'eurent pas un temps de fonctionnement suffisant pour retransmettre les informations à recueillir sur le sol de la planète. Mais les suivantes réussirent l'exploit de mesurer au sol les conditions physiques, pression, température (750°K), éclaircissement, et photographièrent l'environnement du point d'atterrissage, apparemment un amoncellement de grosses roches blanches brisées, peut-être par la chute même de la sonde.

La température sur le sol de Vénus restait une énigme d'importance. L'opacité de l'atmosphère de CO_2 laissait-elle l'espoir de conditions propices au développement de la vie, comme ce fut le cas jadis sur la Terre ? La valeur de 750°K (presque 500°C) laisse peu d'illusions sur ce point. Par contre, elle pourrait expliquer, comme dans les phénomènes volcaniques, sièges de températures analogues, la présence de nuages de SH_2 qui donneraient la couleur jaunâtre bien caractéristique de la planète.

Les recherches sur les planètes cachent presque toujours l'espoir secret d'y découvrir la vie. Parmi les astres du système solaire, seuls Vénus et Mars remplissent les conditions indispensables. Les Soviétiques ont orienté principalement leurs recherches vers Vénus, les Américains vers Mars.

Après les spectaculaires photographies de Mars par les premiers Mariners (4, 6 et 7) qui révélaient la présence de cratères à la surface de la planète, la recherche d'une forme de vie possible sur Mars est effectuée en deux temps.

On montre ici les photographies de Mariner 9 traduisant les résultats de la première série d'investigations : il s'agit de mettre en évidence une «vie» géologique, étape préliminaire indispensable au développement d'une vie biologique. Les diverses photographies de détail de la surface de Mars montrent des cañons, des structures rappelant le lit d'une rivière avec ses affluents, des zones d'effondrement peut-être glaciaires, des régions stratifiées analogues aux strates calcaires de la Terre. Tous ces systèmes géologiques apportent la preuve d'un véritable cycle de l'eau sur Mars, au cours d'un passé sans doute reculé. Par ailleurs, la très faible atmosphère est le siège de vents violents, comme le vent de poussière qui a perturbé l'arrivée de Mariner 9. On voit aussi près des cratères des ombres blanches qui ne sont autres que des zones de poussière soufflée par les vents, de l'intérieur des cratères. Leur commune direction atteste d'un régime permanent des vents, analogue aux grands courants éoliens terrestres.

Cette vie géologique ancienne a-t-elle été le siège d'une vie biologique dont il serait possible de retrouver aujourd'hui des traces fossiles ? La réponse devrait être donnée par la seconde série d'investigations, le programme Viking. Deux sondes Viking ont déjà quitté la Terre en direction de Mars, où elles arriveront dans le courant de l'été 76. Elles se poseront sur la planète. Elles sont équipées pour effectuer des prélèvements sur le sol qui révéleront peut-être la présence de fossiles.

Les programmes spatiaux vers les planètes plus lointaines sont encore plus difficiles. Déjà, deux «pionniers», 10 et 11, ont transmis de remarquables photographies de Jupiter, ont étudié sa magnétosphère et pionnier 11 est maintenant en route vers Saturne. Leurs photographies de Jupiter montrent la planète sous un aspect inhabituel. Elles révèlent notamment la région du pôle nord inobservable depuis la Terre et montrent très bien l'effet de phase. On y voit aussi de façon frappante les turbulences des régions périphériques de l'énorme atmosphère de la planète, avec les bandes sombres et les zones claires, parallèles à l'équateur jovien.

Entre les deux passages successifs des deux pionniers, une petite tache rouge disparut. Cette observation résoud vraisemblablement le problème de la grande tache rouge. Ce n'est pas une «colonne de Taylor», régime permanent de turbulence créé au-dessus d'un sommet ou d'une dépression de la surface. Comment d'ailleurs expliquer un tel relief, sous l'atmosphère de Jupiter, sur la surface vraisemblablement liquide de la planète ?

Il s'agit donc plutôt d'un gigantesque ouragan dont la permanence, apparente à l'échelle humaine, n'est due qu'à l'ampleur du phénomène.

Un phénomène semblable mais à une beaucoup plus petite échelle, la petite tache rouge, a disparu en moins de deux ans.

Pionnier 11, qui nous a livré ces précieux documents sur Jupiter, n'atteindra Saturne qu'en septembre 1979. Que dire alors d'une exploration vers Uranus, Neptune ou Pluton. Le système solaire, ce point dans l'Univers, nous confond cependant par son immensité quand nous entreprenons de l'explorer. Pourtant son exploration totale ne fait plus de doute, pas plus que la connaissance détaillée des surfaces des planètes et de leurs satellites.

Quelle moisson de résultats les vaisseaux spatiaux nous rapporteront-ils ? La découverte de la vie ailleurs que sur la Terre ? Peut-être ! Demain nous le dira. Mais au-delà de toute préoccupation scientifique, ne devons-nous pas attendre avec impatience le prochain passage de Pionnier 11 devant Saturne, pour redécouvrir en nous-mêmes, à l'approche de la splendide et mystérieuse planète, l'appel d'un émerveillement oublié.

Bibliographie et photographies : Scientific American - Sept. 75 - Vol. 233, n° 3.

LES ÉTOILES DOUBLES

conférence faite le 4 avril 1977

par D. SONDAZ

1 - Introduction

On appelle étoile double (ou étoile binaire) un ensemble de deux étoiles qui gravitent l'une autour de l'autre sous l'effet des forces d'attraction mutuelle. Evidemment si l'on considère deux étoiles quelconques dans l'espace, elles exercent bien l'une sur l'autre des forces d'attraction, mais si la distance entre ces étoiles est trop importante, ces forces sont négligeables ; ce n'est que lorsque ces deux étoiles sont suffisamment proches que les forces d'attraction ont un effet sensible.

A l'observation, une étoile double apparaît comme un couple de deux étoiles très proches. Il peut bien sûr se faire que deux étoiles très éloignées dans l'espace apparaissent proches parce que les directions dans lesquelles nous les voyons sont très voisines : il s'agit là d'une «fausse étoile double» que l'on nomme couple optique. Nous ne nous occuperons bien sûr ici que des véritables étoiles doubles ou étoiles doubles physiques.

2 - Classification des étoiles doubles

On distingue trois classes d'étoiles doubles. Une première classe est celle des étoiles doubles visuelles : ce sont celles dont on sépare les composantes à l'aide d'une lunette ou d'un télescope. Mizar est la première étoile double visuelle à avoir été découverte : c'est Galilée qui la dédoubla dans sa lunette en 1611. Il fallut attendre Herschel pour qu'on s'intéresse activement aux étoiles doubles. Depuis lors, les étoiles doubles sont répertoriées dans des catalogues : celui de Struve en donnait 3 132 en 1837, celui d'Aitken en donnait 17 180 en 1932 ; le dernier, l'Index-catalogue de Jeffers, Van den Bos et Greeb en donne 64 250 en 1963.

De nombreuses étoiles doubles visuelles échappent certainement aux investigations pour plusieurs raisons. D'abord une étoile double ne sera évidemment pas reconnue comme une double visuelle si l'écart angulaire entre ses deux composantes est

inférieur au pouvoir séparateur de l'instrument avec lequel on l'observe. Ensuite une trop grande différence d'éclat entre les deux composantes peut masquer l'étoile la moins brillante. Enfin certaines étoiles doubles sont trop peu lumineuses pour qu'on puisse les dédoubler : par exemple, si UV Ceti, étoile double constituée de deux minuscules naines rouges, était 10 fois plus éloignée qu'elle ne l'est, elle ne serait certainement pas perçue comme une étoile double.

Les mouvements orbitaux des doubles visuelles ont des périodes allant de 2,62 ans pour ϵ Ceti jusqu'à plusieurs milliers ou même dizaines de milliers d'années. Une deuxième classe est celle des étoiles doubles photométriques (ou variables à éclipses) : elles sont inséparables au télescope et apparaissent comme une étoile dont l'éclat varie périodiquement par suite de l'éclipse d'une composante par l'autre. On les distingue des véritables étoiles variables grâce à l'allure de leur courbe de lumière. La première étoile double photométrique à avoir été mise en évidence est Algol (β Persée) dont Goodricke expliqua de cette façon les variations d'éclat en 1782. On n'en connaissait que quelques-unes au début du XXe siècle ; le catalogue du Kukarkin (1969) en comprend 4 619. Là aussi, des effets de sélection nous font ignorer un grand nombre de doubles photométriques : il faut évidemment, pour que les éclipses soient perceptibles, que le plan de l'orbite soit normal ou presque à la sphère céleste.

Les mouvements orbitaux des doubles photométriques ont des périodes allant de 81 mn 38 s pour WZ Sagittaire jusqu'à 57 ans pour BM Eridan. La troisième classe est celle des étoiles doubles spectroscopiques : elles sont inséparables au télescope et apparaissent comme une étoile dont le spectre se présente comme un mélange de deux spectres dont les raies se déplacent périodiquement en sens inverse, traduisant ainsi l'approche et l'éloignement périodiques de leurs composantes. La première étoile double spectroscopique à avoir été découverte est Mizar (dont nous avons déjà parlé : Mizar est une double spectroscopique formée de deux composantes très serrées et cet ensemble de deux étoiles forme avec une troisième étoile bien plus éloignée, Alcor, une double visuelle) : c'est Pickering qui en découvrit la nature en 1889. Le catalogue de Wilson (1953) contient 1 350 doubles spectroscopiques.

Là encore, la détection de ces doubles se heurte à de gros obstacles : seules les étoiles de magnitude inférieure à 6,5 ont été prospectées systématiquement parce que le spectrographe exige des étoiles brillantes. Ensuite, pour qu'on puisse les déceler aisément, il faut que la différence des vitesses radiales des deux composantes soit suffisamment importante, ce qui exige que le plan de l'orbite soit assez voisin du plan normal à la sphère céleste (s'il est très voisin, l'étoile est aussi une double photométrique).

Les mouvements orbitaux des doubles spectroscopiques ont des périodes allant de quelques jours à plusieurs années.

Enfin on distingue une quatrième classe, un peu particulière, d'étoiles doubles : les étoiles doubles astrométriques : il s'agit de couples d'étoiles dont l'une des composantes est visible tandis que l'autre ne l'est pas ; le caractère double est décelé par les perturbations que cause la composante invisible sur le mouvement propre de la composante visible. C'est ainsi, par exemple, que l'on a découvert le caractère double de Sirius avant d'avoir pu observer au télescope son compagnon qui est une naine blanche. Le catalogue de Finsen et Worley (1970) comprend 39 doubles astrométriques.

Après avoir fait ce classement, il convient de rappeler qu'il ne correspond pas à une différence de nature physique entre ces étoiles mais qu'il nous est imposé par les

instruments dont nous disposons pour les détecter. Ainsi, par exemple, un certain nombre d'étoiles (dont ϵ Hydrae, δ Equulei, μ Orionis) sont observées comme doubles visuelles et comme doubles spectroscopiques, d'autres sont à la fois des doubles spectroscopiques et des doubles photométriques, ou encore Sirius, qui était une double astrométrique, est devenue, avec l'amélioration des télescopes, une double visuelle.

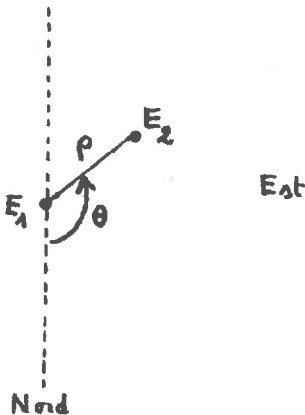
Enfin il existe des systèmes multiples (comme Mizar dont nous avons parlé), étoiles triples, quadruples, quintuples, sextuples.

3 - Importance du nombre des étoiles doubles

Une question se pose : quelle est la proportion d'étoiles doubles parmi les étoiles ? Si nous comparons les quelque 70 000 étoiles doubles connues aux 870 000 étoiles de magnitude inférieure à 11 que Seares et Van Rhijn ont trouvées dans tout le ciel, nous n'aurons qu'une très mauvaise idée de cette proportion à cause de tous les facteurs limitatifs que nous avons énumérés. Pour bien voir combien la distance nous fait ignorer d'étoiles doubles, nous allons citer une statistique établie par Baize. Il considère des sphères centrées en la Terre et de rayons 4, 5, 10 et 25 parsecs. Il trouve comme proportions d'étoiles doubles dans ces sphères respectivement 52 %, 46 %, 35 % et 27 %. Comme on ne voit vraiment pas pourquoi il y aurait plus d'étoiles doubles au voisinage de la Terre, on se rend compte de l'influence de la distance sur le nombre d'étoiles doubles reconnues comme telles. Baize, Couderc et Danjon pensent que (au moins dans la région de notre galaxie où se trouve le Soleil) au moins une étoile sur deux est double ; l'astronome belge Dommanget pensait récemment qu'il y avait au moins 54 % d'étoiles doubles ou multiples. Ces chiffres suffisent à situer l'importance du phénomène.

4 - Les étoiles doubles visuelles

a) **Détermination des orbites.** Nous désignerons par E_1 et E_2 les composantes d'un couple visuel. Pour tracer l'orbite apparente de E_2 par rapport à E_1 , c'est-à-dire la projection sur le plan tangent en E_1 à la sphère céleste de l'orbite vraie de E_2 par rapport



à E_1 , on mesure l'écartement angulaire ρ des composantes E_1 et E_2 et l'angle θ que fait le segment E_1E_2 avec le nord céleste, cet angle étant compté dans le sens du nord vers l'est. On répète bien entendu ces mesures à des instants différents. La plupart des mesures sont faites visuellement à l'aide de micromètres à fils ou à double image ou interférentiels. On fait aussi des mesures photographiques qui sont 10 fois plus précises que les mesures visuelles mais qui restent limitées aux couples suffisamment séparés à cause de la diffusion de la lumière dans la gélatine.

Le problème qui se pose ensuite est de déterminer l'orbite vraie. On montre que l'on sait déterminer complètement l'orbite vraie si l'on connaît cinq éléments géométriques de cette orbite vraie (grand axe a de cette ellipse ; son excentricité e ; inclinaison i du plan de l'orbite sur le plan tangent en E_1 à la sphère céleste ;

longitude Ω du nœud ascendant, c'est-à-dire angle orienté que fait le nord céleste avec la ligne des nœuds — intersection du plan de l'orbite avec le plan tangent à la sphère céleste — ; argument ω du périastre, c'est-à-dire angle orienté que fait la ligne des nœuds avec le périastre) et deux éléments mécaniques (la période P et un instant t_0 de passage au périastre). La connaissance de l'orbite apparente permet de déterminer, à l'aide des propriétés géométriques de l'ellipse, les cinq éléments géométriques. Pour avoir t_0 , une fois le périastre déterminé par ce qui précède, on fait des observations au voisinage de ce point et on détermine t_0 par interpolation. Enfin il reste à connaître P : ou bien P est courte et on la connaît directement par les observations, ou bien P est trop longue et l'on n'a d'observations que sur une fraction de période : on mesure alors l'aire balayée par le rayon vecteur sur le dessin représentant l'ellipse apparente entre deux instants connus ; puis on mesure l'aire totale de cette ellipse et grâce à la loi des aires on en déduit la période P .

De nombreuses difficultés font obstacle au calcul des orbites (observations insuffisantes, trop longues périodes, trop forte inclinaison...) de sorte qu'à l'heure actuelle (plus précisément en août 1974) on ne connaît les orbites que de 679 étoiles doubles. Et de plus, Baize fait remarquer que parmi ces orbites, 7 % sont définitives, 11 % sont assez sûres, 23 % sont acceptables, 55 % sont médiocres et 4 % sont absurdes.

Examinons quels sont les résultats ou les relations qui se dégagent des orbites calculées. Si l'on a une valeur sûre pour la parallaxe p de l'étoile double considérée, on déduit de la valeur angulaire a du demi-grand axe de l'ellipse sa valeur A en unités astronomiques (U.A.) par $A = \frac{a}{p}$ (a et p exprimés en radians). On trouve ainsi des demi-grands axes allant de 1 ou 2 U.A. à plusieurs centaines d'U.A. Notons d'ailleurs au passage que Dommanget a démontré que si le demi-grand axe dépasse 2 000 U.A. il y a instabilité mécanique du système).

Un résultat qui apparaît clairement est que la période et le demi-grand axe varient dans le même sens (ce qui est assez logique). On constate aussi que toutes les excentricités sont possibles mais que néanmoins presque un tiers ont des excentricités comprises entre 0,4 et 0,6. Enfin une relation qui a suscité beaucoup de travaux est celle qui paraît lier la période et l'excentricité : l'excentricité serait d'autant plus grande que la période est plus longue. C'est en effet ce qu'on constate à peu près sur les couples dont on dispose et certains astronomes (dont Aitken, Baize, Wilson) pensent que cette relation est bien réelle tandis que d'autres la considèrent comme due au trop petit nombre de couples étudiés.

b) Calcul des masses stellaires. Une des applications les plus importantes des étoiles doubles est le calcul des masses stellaires. Elles constituent en effet le seul moyen direct d'évaluation des masses. Considérons une étoile double de composantes E_1 et E_2 de masses respectives m_1 et m_2 . Si nous avons déterminé l'orbite de E_2 par rapport à E_1 , nous avons le demi-grand axe a (valeur angulaire) et la période P et si, de plus, nous connaissons la parallaxe, nous avons la longueur A du demi-grand axe. Nous pouvons alors écrire la 3e loi de Képler

$$\frac{A^3}{P^2} = \frac{f}{4 \pi^2} (m_1 + m_2)$$

(f désigne la constante de l'attraction universelle).

écriture que l'on simplifie en prenant comme unités de longueur, de temps et de masse respectivement l'U.A. (demi-grand axe de l'orbite terrestre), l'année sidérale et la masse du Soleil. On a alors

$$\frac{A^3}{p^2} = m_1 + m_2 \quad (1)$$

(puisqu'avec ces unités f est telle que $1 = \frac{f}{4\pi^2}$)

Si maintenant on considère le mouvement de E_2 non plus par rapport à E_1 mais par rapport au centre de gravité G du couple, on démontre en mécanique que la trajectoire est encore une ellipse (mais de foyer G). Soit A_2 son demi-grand axe. On fait de même avec E_1 . On montre que l'on a la relation

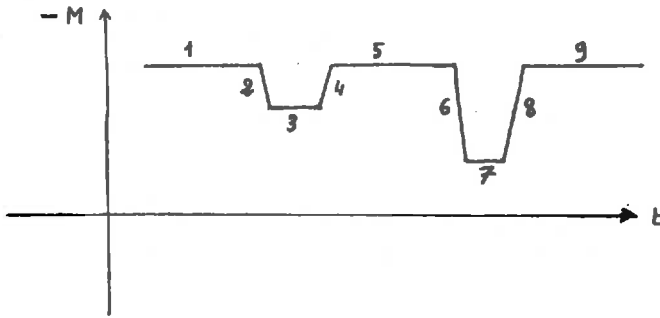
$$m_1 A_1 = m_2 A_2 \quad (2)$$

On arrive, grâce à un réfracteur à longue focale, en mesurant les déplacements des composantes par rapport aux étoiles du champ, à déterminer les orbites de E_1 et E_2 par rapport à G . On obtient ainsi A_1 et A_2 et les deux équations (1) et (2) nous donnent m_1 et m_2 .

c) Etoiles doubles visuelles et type spectral. Il y a 40 ans Aitken et, récemment, Baize, ont étudié comment se répartissaient les doubles visuelles dans les différentes classes spectrales. Bien sûr, on a éliminé les étoiles dont le caractère double n'était pas sûr ou encore les doubles dont le type spectral n'était pas connu. Lorsqu'on parle du type spectral d'une double il s'agit du type spectral de la plus brillante (cas où les deux composantes sont de luminosités inégales) ou sinon du type spectral global. Baize a fait ses statistiques sur 14 737 doubles visuelles et sur les 225 000 étoiles simples ou multiples répertoriées dans le Henry Draper catalogue. Ce qui ressort le mieux est qu'il y a plus d'étoiles F et G parmi les doubles (52 %) que parmi l'ensemble des étoiles de spectre connu (30 %). Il semblerait aussi qu'il y ait moins d'étoiles A ainsi que d'étoiles K et M parmi les doubles que parmi l'ensemble des étoiles. Mais une étude limitée au voisinage du Soleil (à moins de 25 parsecs du Soleil) confirme l'abondance des F et G parmi les doubles tandis qu'elle infirme la déficience en K et M, ce qui semble s'expliquer assez bien par le fait qu'il doit exister de nombreux couples de naines rouges des classes K et M qui doivent passer inaperçus du fait de la distance et de leur faible luminosité. Quant aux étoiles A, elles sont presque toutes très éloignées de nous, ce qui ne facilite pas la recherche de leur éventuel caractère de doubles.

5 - Etoiles doubles photométriques.

Pour étudier une double photométrique on trace sa courbe de lumière, c'est-à-dire la courbe représentant la variation de magnitude en fonction du temps. Considérons une étoile double photométrique constituée d'une étoile E_1 et d'une étoile E_2 plus grosse et moins brillante que E_1 . On supposera que E_1 décrit un cercle de centre E_2 et que, de plus, le plan de cette orbite est normal à la sphère céleste.



A quoi va ressembler la courbe de lumière ? Pendant qu'aucune des deux étoiles n'éclipse l'autre, l'éclat est constant et nous avons le segment (1). Ensuite E_1 passe entre E_2 et nous : il y a une brusque décroissance (2) de l'éclat (E_1 pénètre dans le disque E_2). Le segment (3) correspond au temps que dure le passage de E_1 devant E_2 . Quand E_1 sort du disque E_2 il y a une brusque croissance (4) de l'éclat. Nous avons ensuite un segment (5) semblable au segment (1). La brusque décroissance (6) de l'éclat traduit le début de l'éclipse de E_1 par E_2 . Le segment (7) est décrit pendant que E_2 cache totalement E_1 (son ordonnée est inférieure à celle de (3) parce que E_1 est plus brillante que E_2). A la brusque croissance (8) correspond la réapparition de E_1 . Le segment (9) décrit la même situation que le segment (1). La courbe se reproduit ainsi périodiquement.

Bien sûr, la réalité est souvent beaucoup plus compliquée : l'orbite peut être elliptique (les segments (1) et (5) sont de longueurs inégales) ; des phénomènes de marée peuvent déformer considérablement les étoiles (alors (1), (5), (9) sont remplacés par des courbes) ; le plan de l'orbite peut ne pas être normal à la sphère céleste (les minima (3) et (7) sont alors incurvés) ; enfin une étoile ne se présente pas comme un disque uniformément brillant mais plus sombre sur le bord (dans notre cas de figure, cela arrondirait (3)).

On a classé les étoiles doubles photométriques en deux types principaux : le type β Persée dont la courbe de lumière, en dehors des minima, se présente sous la forme de segments de droite horizontaux et le type β Lyre dont la courbe de lumière est arrondie en dehors des minima. En réalité on peut distinguer dans ce dernier type celles qui sont vraiment du type β Lyre (classe spectrale entre O et B9 et enveloppe gazeuse commune) et celles qui sont du type W Grande Ourse (classe spectrale entre F5 et M ; période de moins d'un jour).

L'étude des courbes de lumière établies grâce aux moyens photo-électriques modernes permet d'obtenir un certain nombre de renseignements : rapport des luminances des deux étoiles, rapport de leurs températures, rapports de leurs rayons au

demi-grand axe de l'orbite, inclinaison et excentricité de l'orbite, argument du périastre, période, époque du minimum principal. Dans les doubles photométriques du type β Lyre, la forme de la courbe de lumière qui traduit la déformation en ellipsoïde de ces étoiles (due aux marées) peut permettre de trouver les excentricités de ces ellipsoïdes. Enfin on a même pu parfois trouver la loi d'assombriement du disque vers le bord.

Notons un résultat qui ressort des mesures précédentes : les excentricités des orbites sont faibles ou nulles.

Au point de vue classification spectrale, parmi les doubles photométriques, il y a beaucoup d'étoiles B, peu de K et M, beaucoup de sous-géantes, très peu de géantes ou de supergéantes (dont ϵ Aurigae, φ Aurigae, VV Cephei).

6 - Étoiles doubles spectroscopiques

Quand on étudie une double spectroscopique, on trace les deux courbes donnant les vitesses radiales des deux composantes en fonction du temps, vitesses qui sont déduites, grâce à l'effet Doppler-Fizeau, du déplacement des raies dans les deux spectres. Dans les cas moins favorables (l'une des composantes est trop peu brillante) on n'a qu'un seul spectre dont les raies oscillent périodiquement, donc une seule courbe de vitesse radiale. Remarquons que, pour avoir la vitesse radiale par rapport au Soleil, on est obligé de corriger la vitesse radiale obtenue (qui est mesurée par rapport à la Terre) en tenant compte du mouvement de la Terre. Lorsqu'on étudie la courbe de vitesse radiale d'une composante, on obtient divers renseignements sur l'orbite de cette composante, son mouvement étant considéré non par rapport à l'autre mais par rapport au centre de gravité du système : on obtient le produit $a_1 \sin i$ (a_1 : demi-grand axe ; i : inclinaison du plan de l'orbite sur le plan tangent à la sphère céleste), l'excentricité e , l'argument ω du périastre et la période P .

Dans le cas où l'on connaît les spectres des deux composantes, on peut aussi obtenir le rapport $\frac{m_1}{m_2}$ des masses. Malheureusement on ne peut connaître la somme des masses (ce qui permettrait de calculer m_1 et m_2) que si l'inclinaison i est connue. Ce n'est pas le cas en général. Cependant, dans le cas très favorable où la double spectroscopique est en plus une double photométrique, on connaît i , donc on peut déterminer m_1 et m_2 . Dans un tel cas on a encore bien d'autres renseignements : on connaît $a \sin i$ parce que c'est une double spectroscopique (a désignant le demi-grand axe de l'orbite relative, c'est-à-dire de l'une par rapport à l'autre) et connaissant i parce que c'est une double photométrique, on en déduit a (en km ou en U.A.) ; de plus, toujours parce que c'est une double photométrique, on connaît les rapports $\frac{R_1}{a}$ et $\frac{R_2}{a}$ (R_1 et R_2 rayons des composantes), on peut donc en déduire les valeurs des rayons R_1 et R_2 . Résultats obtenus : les excentricités sont faibles ; les demi-grands axes varient de quelques millions de km à quelques U.A.

Les couples très serrés présentent des phénomènes physiques complexes : courants de gaz entre les étoiles (β Lyrae, UX Monocerotis), anneau de gaz tournant autour des deux composantes (RW Tauri), enveloppe gazeuse commune. C'est l'étude des spectres qui a permis de les détecter.

Au point de vue du type spectral, les statistiques montrent une très forte proportion d'étoiles O, B, A et une proportion relativement faible d'étoiles G, K, M.

7 - Etoiles doubles astrométriques

C'est l'observatoire Sproul aux Etats-Unis qui recherche les binaires astrométriques à l'aide d'une lunette de 60 cm d'ouverture et de 12 m de focale. On étudie très soigneusement sur des clichés les mouvements propres des étoiles afin de déceler une éventuelle perturbation due à un compagnon invisible. On se limite pour le moment aux étoiles proches. Historiquement Bessel avait remarqué en 1842 que le mouvement de Sirius était perturbé et Auwers, en 1861, que celui de Procyon l'était ; leurs compagnons, des naines blanches, furent découverts respectivement par Clark vingt ans plus tard et par Schaeberle trente-cinq ans plus tard. La troisième double astrométrique à avoir été résolue est Ross 614 dont le compagnon a été photographié au Mont Palomar en 1955. Ce sont les trois seules à avoir été résolues. Un des intérêts de ces recherches est qu'elles permettent de détecter des compagnons de masse faible qui sont peut-être à la limite entre le stade d'étoile et celui de planète.

8 - La relation masse luminosité

Le calcul des masses stellaires à l'aide des étoiles doubles a permis de mettre en évidence une relation entre la masse et la luminosité (c'est-à-dire l'énergie rayonnante totale) des étoiles. Lorsque, sur un graphique, on porte en abscisses les magnitudes absolues bolométriques et en ordonnées les logarithmes des masses, on s'aperçoit que les points représentant les étoiles se répartissent très sensiblement sur une droite. On a une relation de la forme

$$\log m = \alpha M_{bol} + \beta$$

Il s'agit alors de déterminer les coefficients α et β de cette droite. C'est ce que de nombreux astronomes (Baize, Eggen, Kuiper, Moore, Mashevich, Parenago, Russell, Van de Kamp) ont fait depuis les années 30 jusqu'à nos jours. Leurs résultats ne coïncident pas tout à fait : cela est dû aux erreurs dont sont entachées les masses et les magnitudes bolométriques. Citons, à titre d'exemple, la relation obtenue par Baize : $\log m = 0,1117 (M_{bol} - 4,77)$. Certains astronomes pensent que la relation concernant les étoiles de masse inférieure à 0,6 masse solaire est un peu différente mais, compte tenu du matériel parfois trop réduit dont on dispose pour faire des statistiques et de l'incertitude de certaines mesures, tous ne sont pas d'accord là-dessus. On sait aussi que les naines blanches sont exclues de cette relation et que certains couples très particuliers (couples très serrés avec enveloppe gazeuse commune) ne la suivent pas non plus. Enfin il faut rappeler que, dès 1916, Eddington avait prévu, par la théorie, cette loi (dont il avait d'ailleurs exclu les naines blanches).

En faisant l'hypothèse que cette relation masse-luminosité est suivie par toutes les étoiles (même non doubles) autres que les naines blanches (hypothèse qui est d'ailleurs étayée par la théorie d'Eddington) nous avons là un moyen indirect pour calculer les masses stellaires. Alors que l'on sait que les dimensions des étoiles peuvent varier dans d'énormes proportions, au contraire, on trouve que les masses varient entre des limites assez restreintes, de 0,1 à 20 masses solaires (rarement plus, jusqu'à environ 40 masses solaires par exemple pour l'une des composantes de ϵ Aurigae). En conséquence les densités varient énormément : ainsi, par exemple, l'une des composantes de VV Cephei a une densité de 5.10^{-6}g/dm^3 tandis que celle de Sirius B est 110 t/dm^3 .

Une autre application de la relation masse-luminosité est le calcul des parallaxes dynamiques. Reprenons une étoile double. Nous avons écrit la 3e loi de Képler

$$\frac{a^3}{p^3 p^2} = m_1 + m_2$$

(a : valeur angulaire du demi-grand axe ; p : parallaxe). Supposons que nous connaissions a et P et que nous ne connaissions ni $m_1 + m_2$ ni p . On donne alors à $m_1 + m_2$ une valeur approchée déduite des caractères spectraux (jadis, on prenait simplement $m_1 + m_2 = 2$) ; on en déduit une valeur de p , donc une valeur de la magnitude absolue bolométrique M_{bol} (grâce à la formule

$$M_{bol} = m_{bol} + 5 + 5 \log p$$

la magnitude apparente bolométrique m_{bol} s'obtenant directement). La relation masse-luminosité fournit alors une nouvelle valeur de $m_1 + m_2$ et on recommence le processus que l'on continue ainsi par approximations successives. La valeur obtenue pour la parallaxe est dite parallaxe dynamique. Pour les étoiles proches, la parallaxe dynamique a une précision comparable à la parallaxe trigonométrique ; mais pour les systèmes éloignés ou très éloignés, cette dernière devient pratiquement inutilisable alors que la parallaxe dynamique est encore précise (à condition que l'orbite soit bien déterminée).

9 - Origine des étoiles doubles

On sait que, bien que les étoiles paraissent fixes en première approximation, elles sont animées de mouvements et il semblerait assez naturel de penser qu'une étoile double se forme quand deux étoiles passent suffisamment près l'une de l'autre pour que les forces d'attraction cessent d'être négligeables. En considérant un milliard d'étoiles réparties dans une sphère de 1 000 parsecs de rayon et animées d'une vitesse moyenne de 40 km/s, Jeans a calculé qu'il y aurait un rapprochement fortuit de deux étoiles à moins de 200 U.A. en 30 millions d'années. Cela est tout à fait incompatible avec la fréquence des étoiles doubles. à

On est donc obligé d'admettre qu'elles se forment par scission. On sait, d'après les travaux de mathématiciens tels que Mac Laurin, Jacobi, Darwin, Poincaré, sur les masses fluides en rotation, qu'une telle masse, lorsque sa rotation s'accélère, se déforme et peut finir par se scinder. Après la scission, les deux composantes sont très proches l'une de l'autre et leurs orbites sont circulaires ; puis apparaissent des marées qui ont pour résultat d'agrandir les orbites et d'augmenter l'excentricité et la période. On voit que tout ceci coïncide très bien avec ce que l'on a dit des doubles photométriques et spectroscopiques. Ensuite, pour expliquer comment une telle double se transforme en une double visuelle, il faut faire intervenir l'intense rayonnement corpusculaire qui, selon Ambartsoumian et Fessenkov, accompagne l'évolution d'une étoile : ce rayonnement produit une perte de masse sensible qui a pour effet d'augmenter la période et le demi-grand axe. Enfin pour expliquer que certaines orbites ont une grande excentricité, Martin et Chiara ont supposé que la perte de masse augmentait périodiquement lors du passage au périastre, ce qui a pour effet d'augmenter l'excentricité.

Il s'agit là d'un nouveau type d'étoiles doubles découvertes très récemment. Elles sont constituées d'une étoile normale et d'une minuscule étoile hyperdense émettant une formidable énergie sous forme de rayons X. On connaît huit de ces systèmes dont six ont été découverts grâce au satellite Uhuru lancé en 1970 depuis le Kenya. Ce sont les variations périodiques très régulières du rayonnement X, dues à l'éclipse de l'étoile dense par son compagnon, qui ont fait découvrir le caractère double de ces systèmes. Dans cinq parmi les huit couples connus, la grande étoile est une supergéante bleue ; le fait est à noter car on estime à 1 000 seulement le nombre de ces étoiles parmi les 100 milliards d'étoiles de notre galaxie. Quant au compagnon invisible, il s'agit d'une naine blanche ou d'une étoile à neutrons ou même d'un trou noir. L'énergie émise sous forme de rayons X par la petite étoile va, selon les couples, de 10^3 à 2×10^5 fois l'énergie du Soleil. Quant aux périodes, elles vont de 1,7 jour à une quinzaine de jours. On explique le rayonnement X de la façon suivante : de la matière passe de la grande étoile sur le compagnon invisible ; lorsqu'elle arrive sur celui-ci, son accélération est énorme et sa température extrêmement élevée (plusieurs dizaines de millions de degrés) ; on pense que c'est ce qui produit le rayonnement X.

1 - Couleurs apparentes des étoiles doubles

Terminons par un phénomène qu'ont remarqué tous ceux qui ont observé des étoiles doubles. On sait que lorsqu'on regarde une étoile isolée, celle-ci ne présente pas de couleurs très vives : sa teinte peut aller du blanc bleuté au rouge feu. Par contre lorsqu'on regarde une étoile double, si le couple est serré et formé de deux étoiles de magnitudes très différentes, on verra par contraste ces deux étoiles colorées de couleurs bien plus tranchées qu'elles ne le sont en réalité. Quelques exemples : λ Orionis est un couple de deux étoiles blanches : elles paraissent à l'observateur, l'une jaune blanchâtre, l'autre rouge ; les deux étoiles de ξ Serpentis sont légèrement jaunâtres mais paraissent l'une blanc verdâtre, l'autre pourpre ; celles de ζ Orionis sont blanches et paraissent l'une jaune, l'autre bleue.

L'ACTIVITÉ SOLAIRE AU XVII^e SIÈCLE

Conférence faite le 22 janvier 1977

par F. LINK, Maître de Recherche à l'I.N.A.G.

Institut d'Astrophysique de PARIS

Le problème de l'activité solaire au XVII^e siècle, et en particulier dans la seconde moitié de celui-ci, a intrigué les astronomes depuis le temps de Lalande (1792) qui, le premier, a attiré l'attention sur une carence en observations de taches solaires pendant cette période.

Depuis la découverte de Schwabe confirmée par Wolf (1848), nous savons que le nombre et l'étendue de taches solaires varient dans une période moyenne de 11 ans. A la suite de l'initiative de Wolf on a adopté comme indice de l'activité solaire, dont la manifestation visible sont les taches, le nombre de Wolf R défini par

$$R = 10g + f$$

où g est le nombre de groupes et f le nombre total de taches sur le disque solaire.

Or, si nous rassemblons les maigres observations solaires du XVII^e siècle, il semble, à première vue, que toute activité solaire ait cessé entre 1650 et 1705 environ. Spörer (1883), Maunder (1894, 1921) et tout récemment, Eddy (1976), ont émis cette idée qui, si elle était confirmée, donnerait du fil à retordre à ceux qui s'occupent de la physique solaire.

A ce propos, il faut d'abord remarquer que déjà en 1883, Wolf, qui était sur la piste d'une autre période solaire qu'il a estimé à 80 ans environ et dont le minimum tombant sur la seconde moitié du XVII^e siècle, a proposé cette explication de notre phénomène. Il semble que l'idée de Wolf n'a pas été retenue ni par Maunder, ni par Eddy qui ont préféré parler à ce propos d'une anomalie plutôt que d'une superposition des périodes de onze et quatre-vingts ans.

A présent la longue période de Wolf (quatre-vingts ans en moyenne) est solidement établie et son explication ci-dessus semble plausible.

Nous y avons apporté quelques preuves supplémentaires en étudiant les fluctuations de l'activité aurorale qui est en étroite relation avec l'activité solaire.

Nous devons les observations de taches solaires à quelques astronomes du XVII^e siècle qui n'observaient pas encore suivant la formule de Wolf mais regardaient l'astre du jour plutôt occasionnellement que pour la surveillance de son activité.

Par contre, les aurores boréales, grâce à leur aspect spectaculaire, suscitaient l'attention d'un très large public et c'est pour cette raison que nous trouvons leurs descriptions dans les chroniques et les gazettes de l'époque. Ces relations ont ensuite servi à l'établissement des catalogues des aurores. C'est ainsi qu'en s'adressant aux observations aurorales nous avons plus de chance d'obtenir l'image fidèle de l'activité solaire que ne le donneraient les observations sporadiques des taches.

Dans ce but, nous avons représenté le numéro d'ordre des aurores N en fonction de l'année A (fig. 1) pour obtenir une courbe $N = f(A)$. On y trouve plusieurs ralentissements ou paliers qui marquent les minima successifs du cycle de onze ans.

Si l'allure générale de la courbe $N = f(A)$ confirme l'idée de Wolf sur l'affaiblissement de l'activité solaire entre 1660 et 1710 dû à la période de quatre-vingts ans, elle infirme les idées de Maunder et d'Eddy sur la suspension totale du cycle de onze ans.

L'intervention de la période de quatre-vingts ans à l'époque considérée se vérifie encore par une autre voie. D'après les observations modernes discutées par Waldmeier (1957), il s'avère que sur la branche ascendante de ce cycle, c'est-à-dire entre le minimum et le maximum suivant, il existe une prépondérance de taches sur la moitié nord du disque solaire et que l'inverse a lieu sur la branche descendante entre le maximum et le minimum suivant. Cette dissymétrie combinée avec la position variable de la Terre par rapport à l'équateur solaire au cours de l'année, influe sur la variation annuelle des aurores.

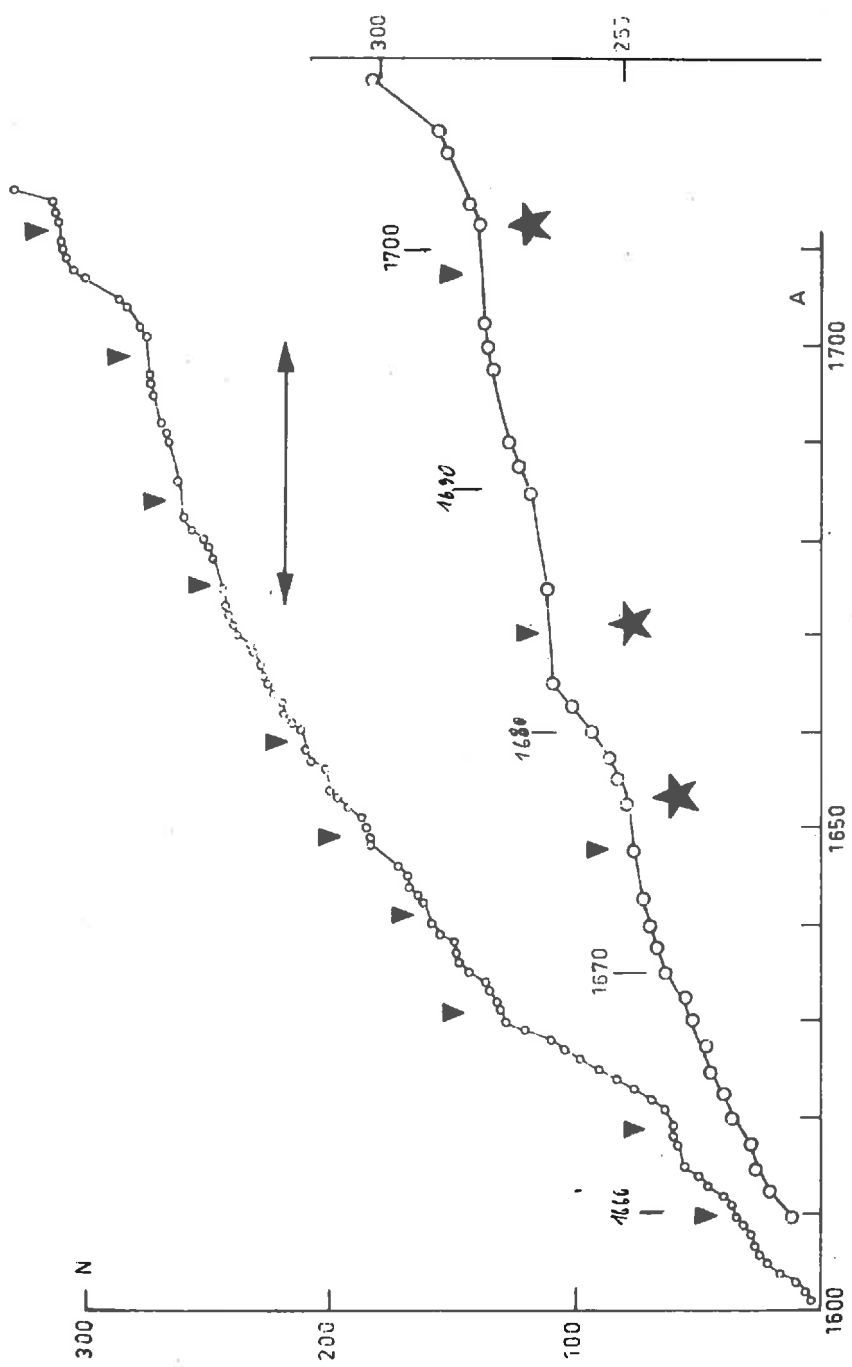
Celles-ci doivent être plus nombreuses de janvier à la mi-mai que de juillet à la mi-novembre sur la branche descendante du cycle de quatre-vingts ans par rapport à la branche ascendante où l'inverse doit avoir lieu. Et en effet, les statistiques des aurores ont conduit aux chiffres suivants :

Branche du cycle de 80 ans	Années	Nombre d'aurores	
		I - 1/2 V	VII - 1/2 XI
Descendante	1570 - 1590	38	25
	1630 - 1670	60	30
	Total	98	55
Ascendante	1590 - 1630	34	67
	1670 - 1712	28	27
	Total	62	94

qui, sauf la dernière partie, 1670-1712, confirment la règle de Weldmeier et en même temps l'action de la période de quatre-vingts ans entre 1570 et 1670.

Si l'on peut invoquer encore d'autres signes de l'activité solaire à la fin du XVIIe siècle comme l'épaisseur et la teneur en isotope C-14 des cernes annuels d'arbres, rien ne nous autorise de parler d'un *minimum solaire prolongé où les manifestations normales des cycles de onze ans étaient suspendues* comme l'a écrit Maunder et comme voudrait admettre Eddy. Le faible intérêt porté aux observations solaires par les astronomes de l'époque, combiné avec le minimum de la période de Wolf de quatre-vingts ans, suffit à notre avis, à démystifier toute l'affaire.

Figure 1 : Courbes de $N = f(A)$, en haut de 1600 à 1710, en bas de 1660 à 1710. Les flèches indiquent les minima plausibles de l'activité aurorale (= solaire), les astérisques, les sauts en latitude de taches solaires qui accompagnent normalement les minima de l'activité solaire.



L'UNIVERS EST-IL VRAIMENT EN EXPANSION ?

Conférence faite le 13 novembre 1976 par H. Andrillat
Professeur à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc

La relation entre le décalage spectral, z , d'une galaxie et sa distance, d , est linéaire tant que cette distance n'est pas trop grande. Cela explique la forme initiale donnée par Hubble à la loi qu'il découvrit sur la récession des galaxies, à une époque où, par ailleurs, on interprétait tout décalage spectral comme un effet Doppler-Fizeau dû à la vitesse radiale, v_r , de la source. La loi de Hubble s'écrivait donc :

$$v_r = H \cdot d$$

$$\text{ou} \quad c \cdot z = H \cdot d$$

La constante de proportionnalité H est la constante de Hubble.

Ultérieurement, les développements de la relativité générale conduisirent à une autre interprétation du décalage spectral des galaxies. Celles-ci sont supposées immobiles par rapport au système général de coordonnées ; c'est la métrique de l'espace qui varie. L'univers est en « expansion », son « rayon » R augmente au cours du temps cosmique, t . On montre alors aisément que le décalage, z , d'une source distante est donné par la relation :

$$1 + z = R(t_0) / R(t_e)$$

$R(t_e)$ étant le « rayon » de l'univers à l'instant t_e d'émission des photons par la source et $R(t_0)$ sa valeur à l'instant t_0 de réception de ces mêmes photons par l'observateur.

Le diagramme donnant $c \cdot z$ en fonction de d est donc représenté par une courbe caractéristique de la fonction $R(t)$, c'est-à-dire du modèle d'univers, mais qui se confond pour les petites valeurs de d avec une droite dont la pente est précisément la constante de Hubble.

On voit alors se dessiner les deux grands axes de recherches dans le domaine de l'univers extragalactique :

1) Déterminer la pente de la partie rectiligne de la courbe précédente, c'est-à-dire déterminer la constante de Hubble.

2) Déterminer, à plus grande distance, les écarts à la loi linéaire de Hubble pour connaître la fonction $R(t)$ et, partant, le modèle d'univers.

Or, déjà la mise en œuvre de la première étape se heurte à des difficultés considérables, à cause de l'imprécision avec laquelle les observations nous livrent les distances des galaxies. On s'en rendra compte de façon plus nette en se souvenant que les premières déterminations de distances avaient conduit Hubble à adopter une valeur de la constante de proportionnalité proche de 500 km/sec/Mpc, alors que les déterminations actuelles de la constante de Hubble tendent vers la valeur de 50 km/sec/Mpc !

Or, malgré les progrès récents concernant les calibrations de distances, effectuées notamment à l'aide des astres des nuages de Magellan, il apparaît impossible de préciser la valeur de la constante de Hubble dans l'intervalle 100 à 50 km/sec/Mpc. Les mesures radio dispersent les points entre les deux droites de pente 50 et 100, c'est

«l'éventail radio» et les mesures optiques, semble-t-il, plus précises, fournissent alternativement l'une ou l'autre des deux valeurs citées. L'explication de cette surprenante indétermination de la constante de Hubble semble résider dans un effet *d'anisotropie* entre deux grandes régions du ciel, effet bien mis en évidence par Rubin et Ford et désigné désormais sous le nom d'effet Rubin-Ford, cet effet étant universellement reconnu, même de l'équipe du Palomar (Sandage, Tammann, etc...) pourtant si attachée à l'idée de l'isotropie de la loi de Hubble. Les observations de Rubin et Ford ont le mérite de constituer un matériel très homogène, portant sur des galaxies assez brillantes (m_v de l'ordre de 14 à 15), de type bien déterminé (ScI), avec des décalages de l'ordre de 5 000 km/sec. La différence de redshifts entre les deux régions du ciel séparées par ces observations est importante, de l'ordre de 1 400 km/sec.

Par ailleurs, un groupe de jeunes chercheurs travaillant en France sous la direction de Pecker et Vigier, étendirent cette étude de l'anisotropie de la loi de Hubble, jusqu'à des redshifts de l'ordre de 20 000 km/sec., utilisant des données d'observation publiées par divers auteurs et portant sur des galaxies de types variés, notamment les galaxies de Seyfert et de Markarian. Ils ont ainsi mis en évidence un effet systématique d'excès de redshift sur les galaxies lointaines, vues à travers un amas de galaxies proches. Cet effet apparaît dès lors comme une généralisation de l'effet Rubin-Ford : les deux régions du ciel séparées par ces derniers correspondent en effet à des observations faites pour la première région du ciel à travers le superamas local (qui contient notamment l'amas de la Vierge et dans lequel l'amas local de l'observateur occupe une position marginale) et, pour la seconde région, dans une zone claire du ciel.

Ces mises en évidence d'effets d'anisotropie de la loi de Hubble rejoignent le problème plus général des redshifts anormaux, dont un autre exemple extragalactique important était les excès de redshift de certaines galaxies compactes dans les amas. Ce dernier effet était surtout basé sur les observations de Arp, qui, à l'aide de techniques photographiques élaborées, révélait des «ponts de matière» semblant rattacher la galaxie compacte avec les structures d'une autre galaxie de l'amas.

Ces faits sont actuellement très contestés. D'une part, l'emploi systématique des techniques photographiques utilisées dans cette étude (hypersensibilisation des plaques IIIaJ à l'azote) a révélé systématiquement des structures externes aux galaxies compactes (résultats présentés au Congrès de l'U.A.I. à Grenoble). Ainsi la galaxie compacte anormale peut être projetée par perspective parmi les autres galaxies de l'amas et ses structures externes prises pour des ponts de matière. D'autre part, l'observation d'une de ces galaxies au télescope de 6 m soviétique permet de mieux détailler la structure externe, l'effet de superposition de la galaxie par perspective ne fait plus de doute sur les photographies obtenues. Enfin, la découverte d'une supernova a montré dans le cas du Quintette de Stefan, que le décalage spectral «anormal» de la compacte correspondait bien à son décalage cosmologique et que cette galaxie n'appartenait pas au reste de l'amas.

Plusieurs essais d'explications théoriques de ces différents effets observés sont actuellement avancés. Les décalages anormaux isolés étant, d'après ce qui vient d'être dit, des plus contestables, il reste essentiellement à expliquer le grand problème de l'anisotropie de la loi de Hubble. L'excès de redshift se produisant, semble-t-il, à la traversée d'un amas de galaxies, le problème de l'interaction d'un champ gravitationnel sur le rayonnement a été étudié par Papapetrou (Institut Henri Poincaré) dans le cadre de la relativité générale. Le résultat est négatif : l'effet existe mais il est si petit qu'il reste absolument inobservable. Des effets d'anisotropie observés, l'équipe du Palomar ne retient que l'effet Rubin-Ford. Nous reviendrons ultérieurement sur les raisons de cette

attitude qui pourrait sembler, a priori, arbitraire. Sandage propose une explication par effet Doppler. L'amas local se déplacerait par rapport au superamas et sa vitesse augmentée aussi de celle du soleil par rapport à la Galaxie atteindrait les 600 ou 700 km/sec nécessaires à expliquer la différence de redshifts de 1 400 km/sec entre les deux régions du ciel distinguées par l'étude de Rubin et Ford.

Cette explication se heurte à une objection sérieuse : la parfaite isotropie du rayonnement de 3 K incompatible avec un tel mouvement de l'observateur. Une explication plus élaborée a été présentée par Mlle Mavridès (Institut Henri Poincaré) en collaboration avec Papapetrou. Elle consiste à introduire une inhomogénéité de densité de matière dans les modèles cosmologiques habituels de la relativité générale. Une première région de l'espace (à symétrie sphérique) contenant l'observateur et présentant une plus forte densité de matière que le reste de l'univers est représentée par un modèle de Friedmann avec une expansion correspondant à la valeur forte de la constante de Hubble (100 km/sec/Mpc). Cette zone est plongée dans le reste de l'espace cosmique où la densité moyenne est plus faible et qui est représenté aussi par un modèle de Friedmann de même type, mais avec une expansion moins rapide correspondant à une valeur de la constante de Hubble de 50 km/sec/Mpc. Une densité seulement quatre fois plus forte (dans cette région de l'amas local et du superamas local) que la densité moyenne de l'univers suffit pour rendre compte des deux valeurs observées de la constante de Hubble (50 et 100) conformément à l'effet Rubin-Ford.

Il est donc important de noter que l'effet principal d'anisotropie de la constante de Hubble s'explique bien à l'aide des théories habituelles (décalages Doppler ou modèles cosmologiques particuliers de la relativité générale).

D'autres théories ont été proposées pour expliquer ces anomalies, théories que l'on pourrait appeler «hérétiques», en ce sens qu'elles n'utilisent pas les résultats de la relativité générale ou même contredisent cette dernière par les principes mêmes qu'elles supposent. Dans cet esprit, notons par exemple la *multibang cosmology* d'Ambartsumian, où non plus une seule explosion primordiale mais plusieurs se produiraient en des lieux différents de l'espace et à des époques différentes, définissant des zones d'univers présentant des taux d'expansion différents.

D'autres théories jouent sur la notion de temps. On sait que dans les métriques de la relativité générale, le temps est une coordonnée «orthogonale» aux coordonnées d'espace. On en déduit l'existence d'un temps propre commun à toutes les particules (en l'occurrence les galaxies) comobiles avec le système de coordonnées. Ce temps propre commun à toutes les galaxies est le temps cosmique. La *chronogéométrie* de Segal est, en un sens, une généralisation de la cosmologie relativiste habituelle, en ce sens qu'elle renonce à cette orthogonalité du temps. Il n'existe plus de temps cosmique. Des événements très éloignés dans l'espace ne sont plus synchronisables à l'aide d'une même et seule variable temporelle. Ils ne sont reliables entre eux que par continuité sur des événements intermédiaires. C'est là une situation propice à expliquer des effets d'anisotropie sur les décalages cosmologiques.

De même une variation des constantes fondamentales de la physique (qui se ramène en fait à la seule variation de G, constante de gravitation) a été envisagée par Hoyle et Narlikar. Au décalage cosmologique habituel se superposerait une sorte de décalage gravitationnel, dépendant fortement de l'âge de l'objet, à cause de la variation de G avec le temps cosmique. Cette théorie serait de nature à expliquer surtout les décalages anormaux isolés de certaines galaxies compactes qui n'auraient pas le même âge que les autres galaxies de l'amas envisagé.

Enfin Pecker et Vigier proposent une théorie pour expliquer les décalages cosmologiques et leurs éventuelles anomalies, théorie basée sur l'idée du vieillissement du photon. La théorie a aussi des applications non extragalactiques: Elle suppose l'existence d'une masse au repos non nulle pour le photon. C'est là une telle révolution concernant l'ensemble de la physique à un niveau si fondamental qu'il convient de se donner le temps de prendre un certain recul pour la confirmer ou l'infirmer.

Par contre, même du simple point de vue qualitatif immédiat, il est clair que cette théorie est la plus apte à expliquer la diversité des décalages anormaux si cette diversité existe. Plus le milieu traversé par la lumière est dense (galaxie compacte ou passage des photons à travers un amas de galaxies ou phénomènes stellaires), plus grand sera l'excès de rougissement.

C'est le moment de revenir sur le point de vue de l'équipe du Palomar présenté par Tammann. Les difficultés que l'on rencontre à vouloir étendre l'étude de l'effet Rubin-Ford bien au-delà des 5 000 km/sec sont de deux ordres :

1) la difficulté de réunir un matériel d'observation homogène. Les résultats sont puisés dans les travaux de divers auteurs sans possibilité d'accéder à leur matériel d'observation ou même à leurs méthodes de détermination des distances.

2) la difficulté de tenir compte des effets d'évolution. Les objets très lointains (galaxies de Seyfert, de Markarian, les quasars, etc...) peuvent être des galaxies très jeunes dont la luminosité est sans doute très différente de la luminosité standard adoptée pour les galaxies proches beaucoup plus évoluées. Enfin les décalages anormaux isolés sont à vérifier dans chaque cas particulier avec le plus grand soin.

Les conclusions à tirer de ces divers travaux dessinent alors de façon claire les directives de recherche dans ce domaine passionnant de l'astronomie qui devrait attirer beaucoup de jeunes chercheurs dans un avenir proche : d'une part, sur le plan théorique, il convient de mener à bien les implications *quantitatives* de la théorie de Pecker et Vigier, sans perdre de vue qu'il s'agit là sans doute d'un travail de très longue haleine à cause de l'aspect très fondamental de la théorie. D'autre part, dans l'étude de l'anisotropie de la loi de Hubble, il faut se défier des travaux de compilation qui peuvent introduire des erreurs systématiques à partir d'un matériel d'observation inhomogène ; enfin il faudra tenir compte des effets d'évolution dès que le décalage spectral devient grand (10 000 ou 20 000 km/sec), en se souvenant qu'à une échelle plus petite, il reste beaucoup de travail à faire pour préciser la valeur de la constante de Hubble et que nous disposons désormais en France de moyens d'observation compétitifs pour améliorer et compléter le travail essentiel de calibration des distances sur les galaxies proches.

H. ANDRILLAT

Imprimerie du Centre Régional de Documentation Pédagogique de l'Académie de Lyon
47, rue Philippe de Lassalle – 69316 LYON Cedex 1

Dépôt légal : 4e trimestre 1977 - N° de la publication : 12119/400 - Le Directeur : R. PRUD'HOMME

Société Astronomique de Lyon

69230 — Saint-Genis Laval

Sommaire

1 — Promenade moderne dans le système solaire

par H. Andrillat

8 — Les étoiles doubles

par D. Sondaz

18 — L'activité solaire au XVI^e siècle

par F. Link

21 — L'univers est-il vraiment en expansion ?

par H. Andrillat

Prix : 5 F