

Développements récents dans l'exploration de l'Univers

Notes rédigées d'après une conférence de M. Paul COUDERC, astronome à l'Observatoire de Paris, prononcée lors d'une séance organisée par la Société Astronomique de France à l'intention des professeurs (Musée pédagogique, 9 décembre 1954).

I. HISTOIRE DES IDÉES SUR L'UNIVERS.

La valeur culturelle de l'astronomie est démontrée par l'étroite liaison qui existe entre l'histoire de l'humanité et l'évolution des idées sur l'Univers.

L'homme primitif se place tout naturellement au centre de celui-ci. De là, sans doute, le désir persistant au cours des siècles de trouver un centre à l'Univers. Pour Philolaüs, il y a un feu central ; tout au long du Moyen Age, c'est autour de la Terre que tout est ordonné, puis notre globe est dépossédé de ce rôle, mais le Soleil en hérite. Au XIX^e siècle, ce dernier n'est plus qu'une étoile ordinaire plongée dans un espace indéfini peuplé d'étoiles de façon quasi-homogène et soumis à la loi de Newton ; la recherche d'un centre de l'Univers n'est pas abandonnée pour autant et l'on propose Sirius, ou bien Persée (Argelander) ou encore Orion ou bien les Pléiades, comme centre.

Dans le « royaume des galaxies », pour reprendre l'expression de Hubble, qui impose sa loi après 1924, la découverte de l'immense amas de Coma Virgo peut, un temps, faire renaitre l'espoir d'avoir découvert enfin ce centre insaisissable. Mais aujourd'hui, le télescope Hale, de cinq mètres d'ouverture, du Mont Palomar, peut photographier un milliard de galaxies réparties dans une sphère d'un milliard d'années-lumière de rayon et, dans aucune direction, il ne permet de déceler une raréfaction ou une concentration : aussi séduisante qu'elle ait paru ou qu'elle puisse paraître encore, l'idée que l'Univers a un centre, ne rencontre aucun appui dans l'observation et semble inadéquate dans les cosmologies actuelles.

Ce raccourci historique suffit pour que nous mesurions ce qui nous sépare de nos prédécesseurs d'il y a seulement un demi-siècle : leur conception nous paraît aussi antique que devait leur paraître celle du Moyen Age. L'astronomie moderne est bien vivante : elle a tôt fait de bousculer les idées et de pousser au-delà, avant même qu'on se soit familiarisé avec celles qui nous ont le plus étonnés de prime abord.

2. LA GALAXIE.

Depuis Herschel on a remarqué la concentration des étoiles vers le grand cercle de la Voie Lactée ; on peut donc se représenter la Galaxie comme un disque.

En 1918, SHAPLEY étudie les *amas globulaires*. Leurs variables pulsantes à courtes périodes (voir plus loin, 3) lui permettent d'évaluer leurs distances. Il voit les amas se répartir dans une sphère, dont le centre indique la position du *noyau galactique*. Celui-ci reste alors inaccessible : l'importance de la matière interstellaire qui le cache impose d'ailleurs, dès 1930, une correction aux premières mesures de Shapley ; ces « fumées galactiques » augmentent de deux unités par 3.000 années-lumière de distance les magnitudes des étoiles et coupent complètement la vue dans la direction du centre de la Galaxie.

L'ancien schéma de Herschel est donc ainsi corrigé : disque de 10^5 années-lumière de diamètre ; distance du Soleil au centre, 27.000 années-lumière ; direction du centre : longitude galactique $327^{\circ}8$, latitude galactique $-1^{\circ}4$; masse totale 2×10^{11} fois la masse du Soleil dont les deux tiers sont répartis dans le noyau.

La découverte de la rotation galactique par l'astronome hollandais OORT (1928) confirme ces résultats : rotation différentielle, selon les lois de Képler, au voisinage du Soleil (dans d'autres galaxies, on a constaté des lois différentes dans la région centrale).

Des techniques nouvelles ouvrent aujourd'hui un nouveau chapitre de l'étude de la Galaxie :

1° En utilisant des plaques photographiques sensibilisées à l'infra-rouge, les astronomes de l'Observatoire de Haute-Provence, sous la direction de J. DUFAY, ont pu apercevoir le *noyau* galactique ; les grandes longueurs d'onde percent le « brouillard ».

2° Dès 1932, l'ingénieur radioélectricien K.-G. JANSKY, étudiant la réception des ondes de l'ordre du mètre, détecte une recrudescence des parasites « atmosphériques » en coïncidence avec le passage au méridien de la région du Sagittaire et l'Ophiucus : l'émission d'ondes radioélectriques par le noyau de la Galaxie était ainsi mise en évidence. Aujourd'hui, grâce au tracé de courbes isophotes, grâce à une véritable carte radioélectrique de la Galaxie, on peut dire que les ondes de un mètre nous font « voir » le centre.

3° Plus récemment, OORT, déjà cité, a pu explorer jusqu'à 60.000 années-lumière, *au-delà du noyau*, grâce au rayonnement de 21 cm. de longueur d'onde dû à l'hydrogène neutre. (L'atome neutre de l'hydrogène peut émettre un rayonnement de 21-cm. quand il y a « renversement » de l'électron, c'est-à-dire variation de son *spin* ; pour un atome, cette variation ne se produit en moyenne qu'une fois tous les 11 millions d'années, mais l'émission devient décelable pour un nombre suffisamment grand d'atomes. On a même pu noter des variations de longueur d'onde, en plus ou en moins, par effet Doppler-Fizeau. Il est donc permis de penser que l'étude détaillée du rayonnement de 21 cm. donnera le moyen de dresser la carte de la matière absorbante au sein de la Galaxie : les spires sont déjà esquissées) (fig. 1).

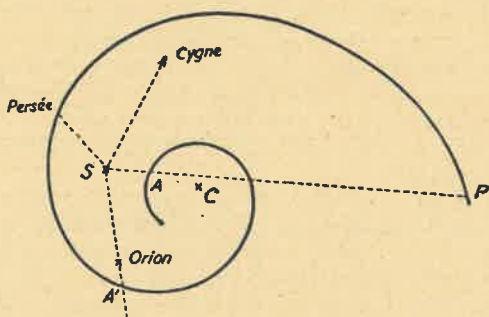


FIG. 1

3. LES DISTANCES EXTRA-GALACTIQUES ET LE COEFFICIENT 2.

L'évaluation des dimensions de la Galaxie, grâce à la loi période-luminosité intrinsèque des variables pulsantes à courtes périodes était fondée sur un étalonnage de ces étoiles du type RR Lyrae (magnitude absolue voisine de 0) qui offre toute garantie. Les Céphéides typiques, pulsantes, dont les périodes sont plus longues (de quelques jours à plusieurs semaines), étaient plus difficiles à étalonner, aucune ne se trouvant à portée suffisante pour mesurer sa parallaxe trigonométrique ou dynamique. Faute de pouvoir mieux faire, on avait donc admis que l'arc du graphique

représentatif de la loi période-luminosité de ces pulsantes était dans le prolongement de l'art relatif aux pulsantes à courtes périodes (fig. 2). L'utilisation de ce graphique

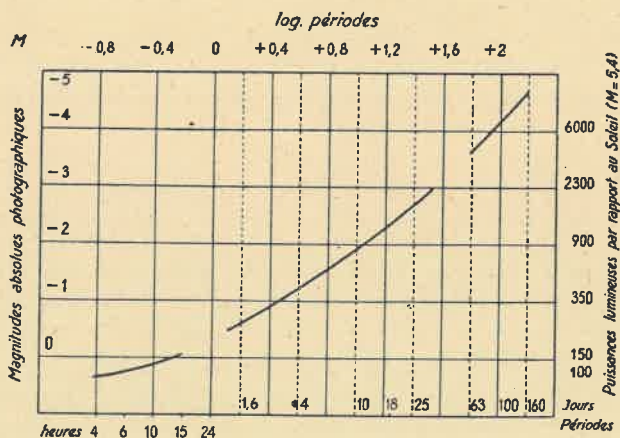


FIG. 2

avait permis la première évaluation des distances extra-galactiques, en particulier pour les nuages de Magellan (travaux de Miss Leavitt-Shapley, 1917) et de la spirale d'Andromède (Messier 31) ; cette dernière paraissait ainsi se trouver à quelque 750.000 années-lumière.

Une étude plus approfondie de l'extinction de la lumière dans la direction de M. 31, qui a une faible latitude galactique, avait conduit à lui attribuer le module de distance $m - M = 22,4$, ce qui correspond à une distance peu inférieure à un million d'années-lumière. Il n'y avait donc rien d'étonnant si les variables à courtes périodes ($M = 0$) n'apparaissaient pas sur les clichés de M. 31 pris au Hooker, le télescope de 2,5 m. du Mont Wilson, dont la limite de perception est la magnitude $m = 21,5$.

Par contre, avec le « Hale » de Palomar, les étoiles sont décelables jusqu'à la magnitude 23,5. L'astronome BAADÉ constata pourtant que les RR Lyrae de M. 31 n'apparaissaient toujours pas sur ses clichés. Le module de distance admis 22,5 était donc insuffisant. De combien ?

Baade fournit la réponse en montrant que les variables pulsantes sont à classer en deux catégories bien distinctes selon qu'elles appartiennent à la *population II*, celle des étoiles « vieilles », — telles les RR Lyrae (courtes périodes) et certaines variables à plus longues périodes (type W Virginis) —, ou bien à la *population I*, celle des étoiles « jeunes », — telles les Céphéides typiques, géantes, absentes des amas globulaires, mais fréquentes dans les nuages de Magellan (galaxies irrégulières) et dans les spires de M. 31. Pour ces dernières pulsantes, le graphique période-luminosité était entaché d'une erreur d'étalonnage : le raccordement avec celui des étoiles à courtes périodes n'est pas justifié. Baade a en effet montré que les variables rouges à longue période du type Mira-Ceti, — étoiles de spectre M_e , qui ne sont pas des variables pulsantes et qui ont une magnitude photographique absolue de $-1,5$ —, apparaissent sur les clichés de M. 31 obtenus au Hale avec la magnitude apparente $m = 22,4$. Par conséquent, le module de distance de M. 31 est :

$$m - M = 22,4 - (-1,5) = 23,9.$$

Parmi les nombreuses conséquences de cette découverte soulignons les plus importantes :

1° L'étalonnage des Céphéides typiques se trouve corrigé, l'arc de courbe du graphique relatif à ces pulsantes subissant une translation de $-1,5$ parallèlement à l'axe des magnitudes M (fig. 3). Toutes les distances *extra-galactiques* évaluées grâce

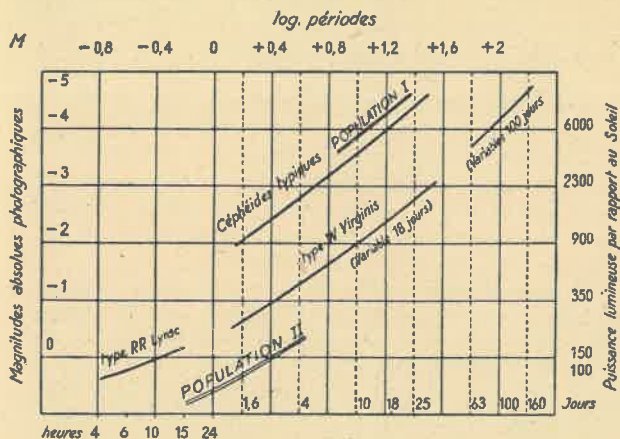


FIG. 3

à ces étoiles, devront aussi être corrigées : les éclats absolus de ces étoiles étaient sous-estimés, ils sont quatre fois plus grands ; les distances de ces astres étaient donc aussi sous-estimées, ils sont deux fois plus éloignés. Toutes les distances *extra-galactiques* évaluées avant la découverte de Baade doivent être multipliées par le coefficient 2.

2° Les anciennes évaluations des diamètres absolus des galaxies doivent être corrigées de la même façon. Le diamètre de M. 31 apparaît ainsi presque doublé de celui de notre Galaxie ; quand on disait, auparavant, que notre Galaxie était la plus grande, on ne pouvait éviter le malaise de voir ainsi renaître l'illusion anthropocentriste. Du même coup, les amas globulaires satellites de M. 31 ne sont plus systématiquement plus petits que ceux de notre Galaxie. Même standardisation, enfin, pour les associations stellaires O d'étoiles bleues.

3° Le volume de l'espace se trouve multiplié par 8 du fait de la multiplication des distances par 2, tandis que les masses des galaxies sont doublées. La densité moyenne de l'Univers est donc divisée par 4, du fait de la correction de BAADF.

4° La constante de HUBBLE, relative à la loi de récession des galaxies est divisée par 2 et le temps d'expansion est doublé.

4 L'ATLAS DE PALOMAR.

Grâce à son télescope Schmidt de 122 cm., qui explore le ciel de Californie 15.000 fois plus vite que le télescope géant, son voisin, les astronomes de Palomar ont pu commencer la publication d'un atlas photographique qui est une nouveauté d'un grand intérêt scientifique.

Cette réalisation est d'abord remarquable par la rapidité et la qualité de son exécution ; quatre années y auront suffi. L'équatorial classique de la Carte photographique du ciel travaille beaucoup moins vite et n'enregistre les astres que jusqu'à la magnitude 15. Sur les planches de 35×35 cm. du nouvel atlas on trouve au contraire tous les objets jusqu'à la magnitude 20,3 et l'aspect du « ciel étoilé » en est transformé... Non seulement les galaxies apparaissent souvent plus nombreuses que les étoiles interposées de la Galaxie, mais ces galaxies se groupent en *amas*. Ainsi ne doit-on même plus dire « l'amas Virgo », mais plutôt « les amas Virgo », car plusieurs amas s'échelonnent en profondeur, avec des diamètres apparents décroissants dans l'aire du plus proche. Moins de 5 % des galaxies sont « libres » (galaxies du

champ). Sur chaque cliché de Palomar on repère de 50 à 70 amas. Il faut donc considérer l'Univers comme constitué d'amas de galaxies ; il y a d'ailleurs des amas d'amas.

Ces clichés permettent aussi de constater qu'on avait surestimé la proportion des *spirales*. Selon l'astronome ZWICKY, de Palomar, les *ellipsoïdes* et les galaxies *irrégulières* seraient les plus abondantes (40 et 40 %), en particulier à cause d'une forte population de galaxies *naines* et irrégulières ; de ces dernières aux plus volumineux exemplaires d'amas globulaires il n'y aurait de discontinuité dans l'échelle des grandeurs. Les observations décideront s'il en est bien ainsi, ou si, au contraire, il y a un net écart entre les amas globulaires et les galaxies.

Les clichés du nouvel atlas sont obtenus, soit en lumière bleue, soit en lumière rouge. La comparaison permet une analyse élémentaire de la *couleur* des objets. Rien ne montre mieux la puissance de ce procédé que deux documents, obtenus au Hale, et qui justifient le double tirage des plaques de l'atlas :

1° En lumière rouge, BAADE a pu « résoudre » la galaxie ellipsoïdale NGC 205 d'Andromède : ses étoiles froides, de population II, y apparaissent facilement.

2° La méthode de la *photographie analytique*, développée par ZWICKY, exploite cette différence de couleur entre les étoiles bleues, donc chaudes, et les étoiles rouges, donc plus froides. Sur un cliché pris avec filtre *bleu*, les premières donneront des taches de diffraction plus étendues que les secondes (taches noires sur le négatif, blanches sur le contre-type positif). Sur la photo du même champ céleste effectuée avec filtre *rouge*, les images des étoiles froides sont au contraire les plus étalées. Cela étant, ZWICKY superpose, par exemple, le négatif rouge et le positif bleu : les étoiles rouges donnent de grandes taches noires, les étoiles bleues de grandes taches blanches à centre noir. Un cliché de la galaxie M. 51 des Chiens de Chasse, ainsi réalisé, révèle, dans les spires, le moutonnement blanc des supergéantes chaudes, qui se prolonge jusque dans le sombre (donc plus froid) célèbre satellite de cette spirale. Les combinaisons de filtre pouvant être multipliées, les ressources de la méthode nouvelle sont considérables.

5. LA MATIÈRE INTERGALACTIQUE.

Il y a encore peu d'années l'espace situé entre les galaxies paraissait *vide*. Plusieurs faits sont venus anéantir cette conception :

1° Il y a des étoiles bleues « vagabondes » et qui sont probablement extérieures à la Galaxie (sujet à l'étude).

2° L'extension des confins d'une grande spirale, telle que M. 31 est telle que ses satellites, M. 32 et NGC 205 y baignent.

3° On a cité plus haut la thèse de ZWICKY, selon laquelle il y aurait des galaxies « naines » peuplant l'espace (fait à vérifier).

4° Enfin et surtout, de véritables « ponts de matière » ont été décelés entre galaxies voisines. Sur chaque cliché de l'atlas Palomar il y aurait ainsi une douzaine de systèmes doubles ou triples. On note souvent, à l'antipode du « pont », qui joint une galaxie à sa voisine un appendice libre, conforme à ce que fait prévoir l'application de la théorie des marées à ce phénomène de perturbations mutuelles des galaxies.

Une conséquence importante de l'existence de la matière intergalactique est l'absorption non uniforme de la lumière dans les diverses directions. Dresser la carte détaillée des matériaux absorbants est une tâche immense et difficile. Il se peut que cette matière intergalactique, même cent fois plus abondante qu'on ne le pense aujourd'hui, ait un effet négligeable sur les magnitudes apparentes *m*, sauf en des points d'accumulation particuliers, tant l'espace est vaste et la *matière* transparente (à

l'exception des « fumées » dont les grains mesurent quelque 0,1 micron). Mais là où on pourra être certain qu'il y a une « brume » appréciable, les modules actuels seront à corriger par *diminution*, c'est-à-dire dans le sens contraire de la correction de BAADE, et d'une quantité qui devra être appréciée pour chaque direction : les objets seront donc *moins* éloignés qu'ils n'avaient paru l'être. Remarquons, en passant, que si de telles corrections s'imposaient et se généralisaient, c'est la notion même de module de distance qui devrait être revue. Quoi qu'il en soit, ces absorptions compliqueront la mesure des distances puisque aucun coefficient unique, comme celui de BAADE ne permettra de passer des anciennes distances, qui sont hétérogènes, à des nouvelles qui seraient correctes.

Du moins est-on sûr que la sous-estimation systématique de l'éclat total des galaxies dans le passé conduira à un allongement de l'échelle. La meilleure évaluation de l'éclat apparent des *banlieues* des galaxies proches conduit à diminuer leur magnitude absolue *totale*, par exemple $M = -16$ au lieu de $M = -15$, l'éclat étant plus grand qu'on ne pensait. Or ces galaxies proches servent d'étalons, de standards de comparaison pour évaluer le module de distance des amas lointains de galaxies. L'image d'une galaxie très lointaine est ponctuelle et l'on recueille *toute* sa lumière quand on mesure sa magnitude apparente m . Par conséquent, pour calculer correctement son module de distance, il faut, à côté de son m total écrire un M *total*, et si le M est passé de -15 à -16 , le module est augmenté d'une unité. Un coefficient 4, au lieu du coefficient 2 de BAADE, pourrait alors intervenir pour les galaxies qui n'appartiennent pas à l'amas local. Pour la spirale Messier 81 de la Grande Ourse, le coefficient 4 est d'ores et déjà établi.

6. CONCLUSION.

Dans l'image du monde, tel que nous pouvons aujourd'hui le concevoir, nous comprenons qu'il faut associer au schéma *spatial*, le facteur *temps*. Si la théorie de la Relativité ne nous y avait habitués déjà, les découvertes qui s'accumulent nous imposeraient l'association indissoluble de l'espace et du temps en cosmologie. Pas de cosmologie satisfaisante sans cosmogonie cohérente. Mais, alors qu'hier encore, — du temps de Poincaré, par exemple —, le problème cosmogonique restait facultatif et hypothétique, notre vision des galaxies lointaines (et vues par conséquent telles qu'elles étaient il y a des centaines de millions d'années) peut fournir les bases sûres d'une théorie de l'évolution de l'Univers et nous oblige à en tenir compte. C'est en ce sens que l'on peut sans doute fixer le « début » de la phase actuelle à 5 milliards d'années dans le passé.

Ces faits nouveaux peuvent-ils ébranler la théorie de l'expansion ? Il y a des faits troublants ; l'afflux des découvertes transforme le panorama que la jeune théorie de l'expansion avait la juste ambition d'ordonner. Il est encore plus vrai que l'accroissement de notre connaissance de l'Univers nous rend plus exigeants quant à la théorie de son évolution. Mais pour M. Paul Couderc, la théorie de la Relativité généralisée reste le roc solide auquel on ne trouve encore rien à opposer ; certes, il suit attentivement les enquêtes comme celle de ZWICKY, qui peuvent apporter des éléments décisifs dans le débat ; mais, pour l'heure, on a le droit de rester partisan de l'expansion.

7. L'ENSEIGNEMENT DE L'ASTRONOMIE.

M. COUDERC profite de l'occasion de cette conférence pour assurer les collègues de l'intérêt qu'il porte personnellement au problème de l'enseignement de l'astronomie. Qu'ils sachent bien aussi que la Société Astronomique de France ne demande qu'à les aider dans leur tâche.

Par sa longue expérience de professeur de lycée, comme par son expérience

actuelle de l'enseignement à Polytechnique, aussi bien d'ailleurs que par ses contacts avec les collègues, M. COUDERC sait les difficultés qui se présentent le plus souvent ; étroitesse des emplois du temps et étendue des programmes, urgence de l'étude des matières à examen, manque de préparation des élèves qui n'ont que bien rarement observé le ciel. Il y a aussi cette particularité qu'à côté des chapitres « stables » de l'astronomie générale, il y a le domaine mouvant de l'astrophysique. Un exemple : en 1923, la série des raies de Balmer était ignorée du programme d'agrégation ; aujourd'hui, rien n'est plus familier à l'astrophysicien. L'enseignement de l'astronomie exige donc du professeur une mise au point permanente de sa documentation : le moyen pratique est de suivre les publications de la Société Astronomique de France.

L'œuvre entreprise par la S.A.F., avec l'approbation et l'appui de l'Education Nationale, pour développer le goût de l'observation et de la recherche parmi les jeunes, mérite, en retour, d'être soutenue par les professeurs ; leur tâche d'enseignement ne peut d'ailleurs que bénéficier du relèvement du niveau des connaissances initiales de leurs élèves.

M. COUDERC voit, dans les échanges d'idées, qu'une réunion comme celle-ci peut provoquer la source d'une réflexion utile pour chacun sur l'éternel problème d'un enseignement efficace, goûté par les élèves et agréable pour les professeurs de cette vieille science toujours jeune, l'astronomie (1).

(Texte résumé par G. WALUSINSKI et revu par P. COUDERC).

(1) Il n'est pas inutile de préciser que la belle conférence de M. Paul COUDERC fut suivie par un nombreux auditoire qui emplissait la salle de cinéma du Musée Pédagogique et que des professeurs de physique, des géographes, des philosophes, etc... avaient rejoint leurs collègues de mathématiques pour l'étude d'un problème qui les intéresse tous. La séance fut complétée par la projection du film « Flammes du Soleil », qui rend justement hommage aux travaux remarquables de Bernard LYOT sur les protubérances. Ce document très éducatif fait partie de la cinémathèque de la S.A.F. (à la disposition de ses adhérents).