

**SOCIETE**

**ASTRONOMIQUE**

**DE LYON**



**REVUE TRIMESTRIELLE**

**Nouvelle série — N° 3 — 1975**



*Le départ pour la visite de l'OHP le dimanche 9 juin était fixé à 4 heures. Malgré cette heure très matinale aucun des participants ne s'est fait attendre ni au départ des deux cars place A. Poncet ni aux différents points de ramassage. Seuls les cars n'étaient pas à l'heure ! Mais le léger retard fut vite rattrapé et après l'arrêt à Apt pour le petit déjeuner, nous étions à 10 h à l'entrée de l'Observatoire. Là, une vingtaine de personnes venues en voiture se sont jointes à nous et c'est un groupe impressionnant qui fut accueilli sur la terrasse par M. Andrillat qui avait fort aimablement accepté de commenter la visite en l'absence de notre Président M. Terzan, retenu par son travail. D'abord furent présentés les deux films astronomiques dont l'un donne déjà un aperçu du grand télescope. Puis la visite du télescope lui-même avec toutes les explications nécessaires. Et, comme chaque fois, les personnes qui n'avaient jamais vu un instrument de cette taille furent frappées d'un étonnement admiratif devant la souplesse de manœuvre d'une telle masse et de la précision de son fonctionnement. Ensuite eut lieu la visite du 1 m 50 qui, quoique de dimensions moindres, intéressa également beaucoup les visiteurs. Mais le temps passait trop vite et il fallut remercier M. Andrillat puis reprendre les cars pour aller déjeuner à Mannes. M. Andrillat ne put venir avec nous comme prévu et il nous en exprima ses regrets, regrets partagés par tous les participants. Avant de nous dire au revoir, il répondit encore avec bonne grâce, courtoisie et compétence à de nombreuses questions. A Mannes, au restaurant de la Reine Rose, nous fut servi, dans une ambiance amicale et joyeuse, un excellent repas en plein air sous le beau ciel de Haute-Provence. Le retour s'effectua sans incident et après un court arrêt à l'Isle sur Sorgue pour se rafraîchir, nous étions à Lyon à 22 heures comme prévu.*

*Il n'est pas d'usage que les organisateurs d'un voyage fasse des commentaires sur la façon dont ce voyage s'est déroulé, c'est pourquoi nous nous abstenons d'en parler, mais nous osons espérer que les participants en ont été satisfaits dans l'ensemble.*

P. SOGNO

La théorie classique, complète, de la gravitation a vu le jour dans la deuxième moitié du XVII<sup>e</sup> siècle. Avant, il n'y avait que des explications mécanistes (sphères, horlogerie...), des coups de pouce divins pour expliquer le mouvement des astres.

L'héliocentrisme a frayé le chemin. Depuis Képler on savait que les planètes ne se mouvaient pas sur des cercles, ce qui rendait très difficile les explications mécanistes comme celles de Tycho-Brahé.

Parmi ceux qui ont préparé la mise sur pied de la théorie, il faut citer Wren, Hooke, mais surtout Halley.

Halley pensait que les astres étaient enchaînés par des forces en  $1/R^2$ , mais il n'arrivait pas à expliquer ainsi des orbites elliptiques, faute d'un appareil mathématique assez développé.

C'est Newton qui réunit tous ces éléments épars et établit la théorie classique complète.

En 1665, il écrit «je commençais à penser que la pesanteur s'étendait jusqu'à l'orbite de la lune».

De cette première idée émancipatrice jusqu'à l'écriture de la théorie, 18 mois s'écoulaient ! Et pourtant, c'est presque de la théorie complète qu'il s'agit :

Newton établit les deux formules

$F = m\gamma$  (formule fondamentale de la mécanique et non de la gravitation).  $\gamma$  est l'accélération d'un corps de masse  $m$  soumis à une force  $F$ .

et

$F = \frac{f.m.m'}{R^2}$  qui donne les forces s'exerçant sur deux corps de masses respectives  $m$  et  $m'$ , distants de  $R$ .  $f$  est la constante de la gravitation universelle.

Pour expliquer avec ces deux formules le mouvement elliptique des planètes, Newton met sur pied un appareil mathématique nouveau qu'il appelle «méthode des fluxions» et «méthode inverse des fluxions». Il s'agit respectivement de ce qu'on appellera plus tard calcul Différentiel et calcul Intégral.

Cependant, il manque à ce stade un point important à la théorie de Newton : il admet que tout corps est équivalent dans son mouvement à un point matériel de même masse que lui, situé en son centre de gravité. (Théorème du centre de gravité). Il faudra 20 ans à Newton pour le démontrer (de nos jours, un bon élève de terminale peut y parvenir) et il attendra 1685 pour publier sa théorie. Les «Principes mathématiques de Philosophie Naturelle» restent un des livres les plus importants du génie humain.

Comment s'est diffusée la pensée de Newton ?

Sans problème en Angleterre, il y eut en France une certaine résistance, paradoxalement du côté des Cartésiens. En effet, l'idée de champ de gravitation paraissait à première vue, être un retour aux vieilles idées obscurantistes d'action à

distance sans support matériel. Il tenait des esprits comme Voltaire, Maupeou, pour démontrer la modernité des idées de Newton.

Comme conséquences immédiates, la théorie de la gravitation eut le développement du calcul différentiel, du calcul intégral. Il faut citer les noms de Leibniz, Bernouilli, Euler et surtout P. S. Laplace. Avant de quitter le XVII<sup>e</sup> siècle, mentionnons l'expérience de Rïder à Cayenne en 1672, qui constata que le pendule bat moins vite qu'à Paris : nous y reviendrons.

La théorie de Newton étant vérifiée pour les mouvements des planètes, les chercheurs se sont alors lancés dans la voie d'explications générales des phénomènes célestes et dans des applications particulières de la théorie de la gravitation. Comme la théorie classique de la gravitation reste satisfaisante dans la majorité des cas, ce mouvement n'est pas encore terminé au XX<sup>e</sup> siècle.

On dispose, pour ce faire, des lois de la gravitation et des lois fondamentales de la mécanique : principe de l'inertie ( $F = m \gamma$ ), loi de Newton ( $F = f \cdot \frac{m \cdot m'}{R^2}$ ), loi du mouvement du centre de gravité, loi d'égalité de l'action et de la réaction, du théorème des forces vives ( $E = \frac{1}{2}mv^2$  : E est l'énergie d'un corps de masse m à une vitesse v), et théorème du moment cinétique.

Le premier problème est celui du mouvement de *deux corps* s'attirant selon la loi de Newton : on retrouve les lois de Kepler : ce travail est dû à Newton, les résultats sont pleinement satisfaisants.

Deuxième problème, plus pratique, la *détermination des orbites* toujours dans le cas de deux corps. On observe une planète en trois points au moins de sa trajectoire autour du soleil, il faut trouver, en négligeant l'action des corps perturbateurs éventuels, l'équation de l'orbite. Des méthodes très efficaces ont été mises au point par Gauss, Olbers et Laplace. Ce sont des méthodes *itératives* : on ajuste très grossièrement un orbite  $O_1$  qui, en général, passe assez loin des points d'observation. Des formules permettent de passer de  $O_1$  à une orbite  $O_2$  meilleure : si c'est insuffisant on recommence. Avec les *mêmes formules* on détermine  $O_3 \dots$  puis  $O_n, O_{n+1}$  en se rapprochant de plus en plus de l'orbite réelle. L'inconvénient d'une telle méthode était évident jadis : l'énormité des calculs. Mais de nos jours ces méthodes ont un grand intérêt qui en garantit l'usage : le caractère itératif du processus le rend aisément programmable sur un ordinateur ; d'autre part ces méthodes sont pour des raisons assez fines d'analyse mathématique, relativement insensibles aux erreurs de calcul : ainsi, la détermination d'une orbite  $O'_n$  au lieu de  $O_n$  permet quand même de continuer le calcul en se rapprochant de l'orbite théorique : c'est très utile, car les ordinateurs font au cours de leurs calculs des erreurs d'arrondi et les propriétés des méthodes en question sont toujours recherchées par les spécialistes d'Analyse Numérique.

Le problème des 2 corps étant parfaitement résolu, physiciens et mathématiciens se sont enhardis et ont entrepris l'étude du problème de *3 corps* s'attirant, problème beaucoup plus répandu : par exemple le triplet (Soleil, Terre, Lune) bien que cela soit encore une simplification par rapport à la nature.

pas donner (c'est démontré) une formulation explicite de la solution. Devant cette situation, plusieurs voies se sont dessinées :

1) *L'étude théorique* : il s'agit de prévoir l'allure générale des trajectoires, ou plus simplement de trouver quelques particularités du mouvement. Force est de reconnaître que peu de succès ont été obtenus : ce problème reste ouvert. On sait que selon l'énergie du système des trois corps, deux cas sont possibles : le cas stable et le cas instable où les corps s'éloignent. On connaît d'autre part des exemples de mouvements impossibles et on sait que dans certains cas, il existe des mouvements périodiques.

Il existe deux solutions particulières bien connues : les *mouvements d'Euler* où les corps sont alignés (hypothèse d'école !) et les *mouvements de Lagrange* où les trois corps restent au sommet d'un triangle équilatéral : c'est le cas du triplet (Soleil, Jupiter, planètes troyennes).

2) *Approcher la solution* : dans des cas pratiques où une attraction est prépondérante, on peut remplacer le système d'équations par un système approché plus simple, mais toujours insoluble formellement. On utilise une méthode de *développements en série* : des observations très anciennes ont montré que le mouvement des corps semble se réduire à une superposition de mouvements périodiques (évection pour la Lune par exemple, connue depuis Ptolémée). L'idée qui vient alors à l'esprit consiste à approcher la solution par une somme de fonctions périodiques, c'est-à-dire une somme d'orbites se superposant. Pour de courts intervalles de temps (moins de 1 000 ans), les résultats sont concluants. Chaque terme de la somme s'appelle une *inégalité périodique*. Malheureusement, on a pu montrer qu'il fallait introduire dans la solution des *inégalités séculaires*, c'est-à-dire des termes non périodiques proportionnels au temps, au carré du temps, etc...

En 1889, H. Poincaré montrait dans un mémoire célèbre, la *non convergence* des développements en série de fonctions périodiques, c'est-à-dire l'impossibilité de prévisions à longue échéance par cette méthode.

3) *Résoudre numériquement le problème* : c'est-à-dire utiliser les méthodes de l'Analyse Numérique et les ordinateurs. Sans entrer dans les détails, disons qu'on peut remplacer par exemple la dérivée d'une fonction  $f$  en  $x$  par  $\frac{f(x+h) - f(x)}{h}$  où  $h$  est un pas choisi. On se ramène à des équations sur des nombres et non plus sur des fonctions.

C'est une méthode approchée (encore faut-il s'assurer que les erreurs d'approximation sont faibles). On obtient des résultats approchés (aussi proches de la solution que l'on veut), mais pendant un intervalle de temps choisi. L'extrapolation est impossible, cette méthode ne permet pas la prévision.

Malgré tout, c'est au problème de trois corps, que la mécanique doit son plus éclatant succès : le problème inverse se pose, connaissant le mouvement de deux des trois corps, de trouver au moins une approximation de la masse et de la trajectoire du troisième. Ce problème a été résolu de manière satisfaisante par Le Verrier pour la découverte de Neptune en utilisant une méthode de développement en série.

Un autre grand problème, très difficile, est celui de l'*équilibre des corps en rotation*. Nous avons vu l'expérience de Rider à Cayenne. L'idée était, pour expliquer les irrégularités du pendule, que la Terre n'était pas parfaitement ronde. D'autre part, il

apparaît clairement que, ni le Soleil, ni les grosses planètes comme Vénus ne sont parfaitement sphériques. On voulut donc étudier la forme d'un corps en équilibre entre les forces centrifuges de rotation et sa propre gravitation. Vu la complexité du problème, on convint d'étudier tout d'abord le cas d'un corps *fluide homogène, tournant en bloc*.

On sait mettre ce problème en équation :

$$fV + \frac{w^2}{2} [x^2 + y^2] = k \quad (1)$$

où  $k$  est une constante,  $f$  la constante de la gravitation,  $w$  la vitesse angulaire de rotation du corps sur lui-même,  $x, y$  les coordonnées d'un point de la surface dans le plan principal d'inertie perpendiculaire à l'axe de rotation,  $V$  le potentiel de gravitation de la masse fluide.

Seulement le calcul de  $V$  est celui d'une intégrale triple dans le volume du corps dont on ignore la forme ! L'équation (1) est donc insoluble.

On ne désarme pas pour autant et l'on cherche des solutions particulières, c'est-à-dire des formes qui satisfassent l'équation (1).

\* La sphère est forcément à éliminer si  $w \neq 0$

\* Comme Jupiter, le Soleil ressemble beaucoup à des ellipsoïdes ; on peut chercher des ellipsoïdes solution.

On trouve en effet deux grandes familles d'ellipsoïdes solution, les *ellipsoïdes de Mac Laurin* qui ont deux axes égaux et les *ellipsoïdes de Jacobi* qui ont 3 axes distincts.

À la limite, ces deux figures coïncident : c'est l'ellipsoïde de *bifurcation*.

Petite parenthèse : l'aplatissement de Jupiter est de 1/17,1, celui calculé dans le cas d'un ellipsoïde de Mac Laurin est de 1/9,4. Pour Saturne on trouve respectivement 1/9,2 et 1,5/1. Par conséquent si Jupiter et Saturne sont des ellipsoïdes, ils ne sont pas homogènes, ou ne tournent pas en bloc.

Selon la valeur de  $c = w^2/2 \cdot \pi \cdot r$  ( $r$  masse volumique du corps), on a les possibilités suivantes :

|                     |                                  |
|---------------------|----------------------------------|
| $c < 0,187$         | 2 Mac Laurin, 1 Jacobi possibles |
| $c = 0,187$         | l'ellipsoïde de bifurcation      |
| $0,187 < c < 0,224$ | 1 Mac Laurin                     |
| $c \geq 0,224$      | pas d'ellipsoïde solution        |

H. Poincaré envisage alors le problème ainsi : partant d'un ellipsoïde peut-on trouver d'autres figures d'équilibre en procédant à des déformations infiniment petites ? Il trouve ainsi d'autres figures plus complexes (tesserales et sectoriales).

Le matériel mathématique est très avancé pour l'époque.

Ce problème à peu près résolu, on s'attaque à celui de corps *hétérogènes*, tournant en bloc.

Tout d'abord Clairaut et Laplace étudient le cas d'une stratification en un nombre fini de couches, puis Liapounov, Lichtenstein, Stieltjes et Voïterra étudient le cas d'un nombre infini de couches.

Un important résultat est le théorème de Stokes et Poincaré : en un point extérieur au corps, le champ de gravitation ne dépend que de la masse du corps, de la vitesse de rotation et de la forme géométrique (en particulier il ne dépend pas de la répartition des masses à l'intérieur). C'est une application d'un célèbre théorème de mathématiques, le théorème de Stokes, qui permet entre autres, l'explication correcte de la poussée d'Archimède.

Le cas de *rotations internes* sera étudié par Faye, Dive et Wavre. On a les résultats suivants :

- Sous deux conditions, il y a à l'intérieur du corps, un régime permanent de rotation, la vitesse angulaire croissant de l'équateur au pôle, ce qui correspond aux observations (Soleil).

- Dans le cas d'un aplatissement faible, il peut y avoir rotation en bloc de la couche superficielle, la vitesse croissant avec la profondeur.

Ceci amène au problème de la dérive des continents où il faut tenir compte de la viscosité du support des plaques continentales, régit par les équations de Navier. Comme l'étude de ces équations n'est pas terminée, le problème reste ouvert.

Le problème des *marées* est rattaché au nom de H. Poincaré. Pour lui, il s'agit de « petites oscillations d'un système autour de sa position d'équilibre ».

Trois forces sont à considérer :

- l'attraction combinée du Soleil et de la Lune
- l'attraction terrestre
- l'interaction Newtonienne des molécules d'eau entre elles.

Poincaré a pu montrer que le phénomène était périodique. Le développement en série de Fourier fait apparaître des termes de 12 h (semi-diurnes), 24 h (diurnes) et des termes à longue période. Pour chacun de ces mouvements on peut discerner des sous-fouilles de mouvements rattachables à une attraction particulière et appelés de ce fait lunaires, luni-solaires, solaires.

Les résultats obtenus sur les marées étant très concluants, on a pensé à les réinvestir dans l'étude des corps en rotation dans le cas de corps soumis à des perturbations gravitationnelles extérieures (par exemple le cas des étoiles doubles spectroscopiques). Le problème est loin d'être résolu à l'heure actuelle. Il faut citer les travaux de Zoenek Kopal qui a pu montrer l'existence de phénomènes de résonnance.

La difficulté vient -entre autres- de ce qu'il faut ajouter aux forces de gravitation des phénomènes très difficiles d'hydrodynamique, de viscosité, etc...

On a pu remarquer le rôle joué dans ces études par de grands mathématiciens du XIXe siècle comme H. Poincaré, à la solide réputation de mathématicien « pur ». C'est tout simplement que la mécanique, la gravitation sont à l'origine de la plupart des êtres mathématiques introduits au XVIIIe et XIXe siècles, qui ont été inventés pour résoudre ces problèmes et constituent encore de nos jours la base de notre mathématique.



Les succès remportés au XIX<sup>e</sup> siècle ont eu un tel retentissement que la mécanique Newtonienne a pris une place absolument prépondérante dans la science. C'était l'époque où l'on pensait que tous les phénomènes de la nature étaient redevables d'explications mécanistes. L'acquis très important a été l'idée de l'Universalité de la science. La gravitation enchaînant tous les corps de l'Univers. Des explications cosmogoniques basées sur la gravitation ont été avancées et on a commencé à envisager la naissance des astres à partir de contractions gravitationnelles dans des masses de gaz.

En contre partie l'idée fautive d'une science finie commençait à apparaître. Fort heureusement des failles se sont dessinées :

*L'avance du périhélie de Mercure* posait un problème. L'essai d'explication par la présence d'une planète intra mercurienne (Vesta) se soldait par un échec. L'expérience de Michelson, la *relativité restreinte* amenait d'autres difficultés avec des corps dont la masse variait avec la vitesse, des systèmes de référence vraiment trop privilégiés : les référentiels galiléens dans lesquels les lois de Newton restent valables.

Tout cela nécessitait une révision, un nouveau point de vue : but atteint par la théorie de la *Relativité générale* :

Pour Newton, il existe deux types de forces : les forces *réelles* (gravitation) et les forces *fictives* (force centrifuge par exemple). La théorie de la relativité générale réunit ces deux points de vue et supprime cette distinction : dans une région limitée de l'espace, il n'y a pas de différence entre le champ de forces créé par un système accéléré et un champ de gravitation, il ne s'agit que de points de vue différents.

La principale conséquence de la relativité générale est la «géométrisation» de la notion de champ, qui prend l'aspect de modifications de la géométrie de l'espace. La difficulté de la vulgarisation de ces notions provient de ce que l'appareil mathématique utilisé pour décrire la nature n'est plus, comme dans le cas classique, celui de la géométrie analytique (où la connaissance des coordonnées des points par rapport à des axes suffisait à décrire tout l'espace), mais un appareil beaucoup plus évolué, la géométrie différentielle (Riemannienne), mis au point pour résoudre de tels problèmes de physique. Ce qu'il faut voir dans ces méthodes mathématiques, c'est qu'au voisinage de tout point d'un tel espace, tout se passe pratiquement comme dans notre espace classique : ainsi en va-t-il de même quand nous nous promenons à la surface de la terre, surface courbe s'il en est, où nous avons l'impression de nous promener sur un plan (le plan tangent à la sphère terrestre).

La Relativité générale est au cœur de toute la cosmologie moderne et permet de voir en la gravitation les plus intéressants problèmes-actuels :

- trous noirs : prévus et peut-être en cours de détection ;
- ondes de gravitation : activement recherchées, mais très difficiles à mettre en évidence dans le bruit de fond terrestre.

Des expériences sont en cours un peu partout à la surface du globe. En corrélant les observations, peut-être pourra-t-on trancher à ce sujet.

Il y a là les bases de vérifications sérieuses de la relativité. Pour l'instant on connaît quelques expériences particulièrement concluantes de vérification de la relativité générale :

- l'avance du périhélie de Mercure ;
- le déplacement des rayons lumineux au voisinage des grandes masses (Soleil).

Ce n'est pas tout. La physique quantique apporte d'autres points de vue : celui des *potentiels d'échange* par exemple.

Pour des raisons électrostatiques évidentes (2 protons, 1 électron), on ne peut pas expliquer la stabilité de l'ion  $H^{2+}$ . La physique quantique permet de lever ce paradoxe : l'électron est, en quelque sorte, mis en commun, échangé par les deux protons. Les calculs, assez simples, sont satisfaisants. On explique ainsi la majorité des liaisons chimiques.

En 1935 Yukawa montrait que les forces nucléaires devaient s'expliquer par l'échange virtuel d'une particule, le pion, effectivement découverte en 1946.

Les forces électromagnétiques peuvent aussi s'expliquer par l'échange de photons.

L'idée vient alors d'expliquer ainsi toutes les forces et en particulier la gravitation. La particule responsable serait alors le graviton, indécélable à l'heure actuelle.

La gravitation n'a pas fini de poser des problèmes !

L'histoire de l'astronomie est celle d'une plongée dans l'infini : les Grecs connaissaient la distance de la Lune ; celles du Soleil et des planètes furent déterminées au 17<sup>e</sup> siècle, celles des étoiles au 18<sup>e</sup> siècle. Ce n'est qu'en 1924 que Baade détermina celles de quelques galaxies, dont l'existence était connue depuis le 18<sup>e</sup> siècle mais qui passaient jusque là pour des objets propres à notre Galaxie.

## LES GALAXIES

Dès 1924-26, Hubble proposa une classification qui, bien que ne tenant compte que de l'aspect des galaxies, semble avoir une profonde signification physique ; elle fut améliorée par Sandage et Hubble lui-même. Depuis, d'autres auteurs (de Vaucouleurs par exemple), ont tenté de la raffiner, sans être tout à fait convaincants.

On distingue donc les galaxies elliptiques (E) dont les formes évoluent de la sphère parfaite (E0) à l'ellipsoïde très aplati (E7). Puis les galaxies lenticulaires divisées en deux séries (SO et SBO) qui se distinguent des précédentes par leur condensation centrale. Elles conduisent aux deux séries parallèles des spirales « normales » (S) et « barrées » (SB). Enfin ces séries se fondent dans la classe des galaxies irrégulières (Irr) dont le nom trahit l'aspect.

Cette classification est purement morphologique, et ne doit pas faire penser à une quelconque filiation d'un type à l'autre. On a de bonnes raisons, au contraire, de penser que les caractères morphologiques d'une galaxie sont fixés pour sa vie entière par les caractéristiques du nuage gazeux qui lui a donné naissance.

Les galaxies les plus connues du public sont assurément les spirales ; en un sens ce n'est que justice car ce sont les plus courantes : parmi les galaxies proches, et donc bien connues, on compte 61 % de spirales, 13 % d'elliptiques, 21,5 % de lenticulaires et 2,5 % d'irrégulières, plus quelques objets inclassifiables.

Les elliptiques comptent dans leurs rangs les plus brillantes galaxies connues, comme les plus faibles. On les classe de E0 à E7 par ordre d'aplatissement croissant, et on remarque que les différents sous-types sont également représentés dans l'univers.

Parmi ces galaxies elliptiques, certaines sont anormales ; on en connaît qui ont deux noyaux, d'autres sont entourées d'un large halo diffus, ou bien sont au contraire d'un volume extrêmement réduit pour leur masse.

Une des caractéristiques de ce type de galaxies est la pauvreté en hydrogène et en poussières, ce qui donne à penser qu'elles ne peuvent pas être le théâtre de la naissance de nouvelles étoiles.

Les galaxies lenticulaires (SO 1 à SO 3) se distinguent des précédentes par la présence d'une structure plus nette : un disque aplati, une condensation centrale et une vaste enveloppe diffuse, le disque contenant parfois un peu de gaz et de poussières.

Les galaxies spirales (Sa, Sb, Sc et SBa, SBb, SBc) ont une forme bien connue : une condensation centrale, un disque très aplati montrant une structure spiralée, et un halo sphérique contenant surtout des amas globulaires, à forte concentration centrale. Elles sont riches en hydrogène et en poussières, ce qui produit les nuages sombres bien visibles sur les photographies de galaxies vues par la tranche ; c'est sans doute aux dépens

de ce gaz que se forment les étoiles, ce qui explique l'association très étroite entre l'un et les autres. On pense plus précisément, aujourd'hui, que les bras spiraux ne sont que le témoignage du passage d'une onde de densité ; au passage du front d'onde, le gaz du disque est comprimé, ce qui provoque la formation de nouvelles étoiles. Puis l'onde s'éloigne, le gaz se détend, et les étoiles créées entament leur longue évolution. La structure spirale, fine et serrée dans le sous-type a, s'ouvre progressivement tandis que l'aplatissement du disque augmente, jusqu'au sous-type c où elle devient quasi chaotique, annonçant déjà les irrégulières. Dans le type S, les bras spiraux qui s'enroulent autour du noyau pour donner cet aspect caractéristique de «soleil de feu d'artifice» partent directement du noyau, alors que dans le type SB ils partent des deux extrémités d'une barre brillante qui traverse le noyau et les régions centrales.

On peut noter enfin que les bras, prédominants sur le plan de la luminosité, n'ont que peu d'importance sur le plan de la dynamique, c'est-à-dire au point de vue des masses.

Les galaxies irrégulières, qui n'ont pas de structure géométrique simple, se divisent en deux sous-types : dans le premier, qui prolonge en quelque sorte les types Sc et SBc (il y a d'ailleurs des intermédiaires), on trouve du gaz, des poussières et des étoiles supergéantes très lumineuses. Dans le second, au contraire, ces dernières sont absentes. Les nuages de Magellan sont un bon exemple du premier type.

Dans tous ces types, on trouve des géantes et des naines, sauf peut-être pour les spirales : ce genre de structure ne semble pas pouvoir se développer dans des objets de trop petite masse.

Pour citer un exemple, notre Galaxie est une spirale Sb, dont la masse est de l'ordre de 200 milliards de masses solaires. La condensation centrale, légèrement aplatie, mesure 3 Kpc sur 2 Kpc. Le rayon du disque est de 15 Kpc, l'épaisseur du système gaz/poussières/étoiles jeunes étant de 200 à 250 pc. La majorité des étoiles est regroupée dans une «galette» de 1 Kpc d'épaisseur environ.

La galaxie spirale la plus massive que l'on connaisse est celle d'Andromède, dont la masse est de 400 milliards de masses solaires ; le record absolu appartient à une elliptique géante : M 87, avec 2 600 milliards de masses solaires !

Rappelons au passage que  $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ années-lumière} = 3.10^{13} \text{ km}$  (c'est-à-dire 3 suivi de 13 zéros).

Les galaxies sont fréquemment associées en systèmes multiples, et les grosses galaxies ont souvent des satellites (par exemple M 32 et NGC 205 pour la nébuleuse d'Andromède ; les nuages de Magellan, à 50 Kpc de notre Galaxie). Ces groupes ont très certainement une origine commune, donc le même âge ; leurs types sont souvent très différents, ce qui montre encore une fois que le type n'est pas lié à l'âge de façon simple.

## LES AMAS DE GALAXIES

L'observation montre encore qu'à plus grande échelle, les galaxies sont regroupées en amas, tantôt très riches (plus de mille galaxies) et à belle structure symétrique fortement concentrée, tantôt plus pauvres et de forme irrégulière. Ces derniers sont les plus fréquents, et regroupent des galaxies de types variés. Un bon exemple est le «groupe local» qui comprend une trentaine de galaxies dont la nôtre, Andromède, M 33, le nuage de Magellan, dans un diamètre de l'ordre de 1 Mpc. Ou encore l'amas de la Vierge, qui rassemble plus de 1 000 galaxies dans un diamètre de

2 Mpc. Le premier type, par contre, est celui d'amas formés exclusivement de galaxies elliptiques ou lenticulaires, comme celui de la Chevelure de Bérénice, peuplé de plus de 10 000 galaxies.

On connaît des milliers d'amas de galaxies, répartis sur toute la sphère céleste. Chacun d'eux est évidemment une structure gigantesque ; les dimensions varient de 100 Kpc à plus de 8 Mpc, soit de  $3.10^{18}$  Km à  $2,4.10^{22}$  Km !

On a enfin remarqué que les grands amas étaient assez souvent dominés par une ou deux elliptiques géantes dont la magnitude absolue est à peu près constante, ce qui donne un moyen d'apprécier la distance de l'objet, grâce à la relation du module de distance bien connue.

La stabilité de ces amas est un problème fondamental, mais actuellement les différentes méthodes d'étude donnent des résultats inexplicablement divergents.

## LES OBJETS «ANORMAUX»

Un fait est frappant dans toutes les sciences : le raffinement des moyens d'observation fait peu à peu disparaître la notion d'objet «normal», en mettant en valeur les fines différences qui donnent son caractère d'unicité à l'objet le plus banal.

Des phénomènes comme l'émission d'ondes radio, que l'on croyait réservés à quelques «monstres», semblent bien être le lot de toute galaxie, au moins à un certain moment de son existence. Dans notre Galaxie, considérée comme très sage, des phénomènes violents ont été mis en évidence : ionisation et expansion de gaz dans le bulbe central, éjection possible de matière par les pôles, satellites d'hydrogène pur, de distance inconnue, retombant à 100 km/s sur notre Galaxie...

Un nombre sans cesse plus grand d'objets étranges est découvert : spirales à un seul bras, ou au contraire à trois, dix bras ; spirales sans noyau, à noyau multiple ; paires de galaxies très proches et violemment distordues, peut-être par effet de marée ; chaînes de galaxies, etc... Certaines de ces «anomalies» sont si fréquentes, en fait, qu'il a fallu créer un type de galaxie spécial. C'est le cas des galaxies de Seyfert dont le noyau très lumineux est le siège de phénomènes violents d'origine inconnue. Leur éclat en infrarouge est des milliers de fois supérieur à celui d'une galaxie ordinaire, et varie de plus rapidement ; on a calculé l'énergie qu'elles dissipent et elle est proche de celle, phénoménale, dissipée par un quasar. C'est encore le cas pour les «galaxies compactes» sur lesquelles Zwicky a attiré l'attention : à masse égale, elles sont dix à cent fois moins volumineuses qu'une galaxie ordinaire. Elles semblent extraordinairement riches en hydrogène, et certaines sont des galaxies de Seyfert. On peut leur adjoindre les galaxies de type N, un peu analogues, mais qui sont de puissants émetteurs d'ondes radio. Très lointaines, leur étude est malheureusement difficile.

En 1963, la collaboration de l'astronomie optique et de l'astronomie radio a permis d'identifier optiquement la radiosource 3C273 ; il s'agissait d'un objet d'aspect anodin, une très modeste étoile apparemment. Un spectre de l'objet fut pris et révéla que cet objet modeste était en fait situé à deux milliards d'années-lumière, et devait donc être aussi lumineux que cent galaxies d'Andromède, compte tenu de son éclat apparent ! Faute de mieux on le baptisa «Quasi Stellar Object» (QSO), que l'on abrège en «quasar». Les découvertes se multiplièrent par la suite, le record de distance actuel étant détenu par le quasar 3C9 avec 7 milliards d'années-lumière.

Très lumineux en ultraviolet et en infrarouge (leur spectre ne ressemble pas du tout à celui des étoiles), les quasars sont de très petit diamètre apparent. Certains sont émetteurs radio, et présentent souvent des structures complexes dans ce domaine, avec par exemple plusieurs composantes, chacune d'entre elles présentant un spectre qui lui est particulier. Certains sont de plus extrêmement variables, ce qui ajoute un problème supplémentaire au problème de base : où les quasars trouvent-ils l'énergie prodigieuse qu'ils rayonnent ? Pour tourner ce problème, on a d'ailleurs tenté de trouver des explications « locales » : si le quasar est proche, alors il n'est pas si lumineux que ça, et tout va bien du côté énergétique. Mais alors il faut trouver une explication au déplacement des raies spectrales qui ne soit pas l'explication cosmologique usuelle ; on a pensé à un effet gravitationnel : le quasar serait un objet très petit et très massif, et l'intensité du champ de pesanteur à sa surface produirait l'effet cherché. On se heurte alors à de nombreux problèmes, dont celui de la stabilité de cette « super étoile ». On a aussi pensé à des objets relativement proches que le noyau de notre Galaxie aurait éjectés dans le passé. En principe, le noyau en question semble un peu trop calme pour être capable de cela... En fait, aucune théorie n'est vraiment satisfaisante à l'heure actuelle, et il faut encore accumuler les observations pour pouvoir avancer.

Ces objets nous amènent aux frontières de l'univers observable, à des distances vertigineuses de notre infime Terre ; et pourtant les cosmologistes déplorent le peu de pénétration de nos moyens d'observation ! Nous ne savons que peu de choses de l'univers à très grande échelle, et rien de l'univers dans son ensemble, si tant est que l'on puisse parler de l'univers dans son ensemble.

Mais ceci, disait Kipling, est une autre histoire...



**Société Astronomique de Lyon**

*69230 Saint-Genis-Laval*

## **Sommaire**

**1 – Visite de l'Observatoire de Haute-Provence**

**2 – La gravitation**

**9 – L'univers extragalactique**

**Prix : 5 F**