

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE LYON



STAGE D'ÉTÉ 1981 d'INITIATION A L'ASTRONOMIE

Une fois de plus les locaux de la maison des handicapés de Meaux-la-Montagne ont hébergé le camp d'été d'initiation à l'astronomie de la Société astronomique de Lyon, qui s'est déroulé du 31 août au 5 septembre. Dix-sept participants, âgés de treize à soixante-six ans, dont trois venus de la région parisienne, ont suivi ce stage.

Durant les après-midi et parfois le matin, des membres de la S.A.L. ont donné des conférences sur les sujets suivants : la construction du télescope d'amateur, la photographie astronomique, un aperçu sur les diverses catégories d'astres peuplant l'Univers, les coordonnées astronomiques et le temps, les constellations, les étoiles variables, les notions de base de spectroscopie, les sextants, les cadrans solaires.

Les stagiaires purent utiliser de nombreux instruments : deux Céléstron 8, deux télescopes azimutaux de 200 mm, un équatorial photographique de 200 mm, des jumelles, etc. Lorsque les conditions atmosphériques étaient favorables, ils purent observer les taches solaires dans la journée, et, la nuit venue, des étoiles doubles, des nébuleuses, des amas, des galaxies. Les soirs de mauvais temps, l'observation a fait place à la projection de diapositives astronomiques et à une conférence sur l'astronomie précolombienne.

Un travail particulièrement intéressant fut la réalisation par les stagiaires sous la direction de Monsieur Gilles Adam, astronome à l'Observatoire de Lyon, d'un spectrographe à réseau.

La télévision est venue faire un reportage. Hélas, celui-ci ne passa jamais sur le petit écran : le film était rayé ...

D. Sondaz.

**Photo de couverture : Cours d'été d'initiation à l'Astronomie - Meaux-la-Montagne -
Septembre 1981 - Photo : C. Beaudoin.**

LES GALAXIES

Conférence de Monsieur SONDAZ, le 26 avril 1980

Dans l'Univers, les étoiles ne sont pas isolées. Elles sont rassemblées en d'immenses groupes comprenant de 1 à 1 000 milliards d'étoiles et séparés entre eux par de grandes distances. On nomme ces groupes des «galaxies». Outre les étoiles, les galaxies contiennent aussi de la matière interstellaire. Il y a peu de matière dans l'Univers qui soit en dehors des galaxies (il s'agit de la matière dite «intergalactique»). Nous-mêmes, nous appartenons à une galaxie que l'on nomme la Galaxie (avec une majuscule) : la Voie Lactée en est la trace sur la sphère céleste. A quelques très rares exceptions près, tous les astres que l'on voit à l'œil nu appartiennent à la Galaxie. Ces exceptions sont les seules galaxies autres que la nôtre qui soient visibles à l'œil nu. Ce sont, dans l'hémisphère Nord, la galaxie d'Andromède (assez difficile à voir) et, dans l'hémisphère Sud, les deux Nuages de Magellan (de magnitudes apparentes 1,5 et 0,5, ils sont très visibles à l'œil nu).

I – HISTORIQUE DE LA DÉCOUVERTE DES GALAXIES.

Dès le Xe siècle, les Arabes connaissaient la galaxie d'Andromède. Elle ne sera redécouverte au télescope qu'au XVIIe siècle par Simon Mayer. Le compagnon de la galaxie d'Andromède (il s'agit d'une petite galaxie, satellite de la galaxie d'Andromède) sera découvert au milieu du XVIIIe siècle par J.B. Le Gentil. A la fin du XVIIIe siècle, Messier observe les «nébuleuses» ou «objets nébuleux» depuis la tour de l'Hôtel de Cluny à Paris. Il publie en 1781 son célèbre catalogue comportant 103 objets nébuleux : parmi ceux-ci il y a aussi bien des amas stellaires et des nébuleuses gazeuses situés dans notre Galaxie que des galaxies.

Il va sans dire qu'à l'époque, on ignorait totalement la nature et la distance de ces divers objets et que les télescopes n'étaient pas assez puissants pour résoudre en étoiles les galaxies même les plus proches. Néanmoins, Kant, Wright et quelques autres pensaient déjà que ces nébuleuses que l'on ne pouvait résoudre en étoiles étaient des systèmes stellaires, analogues au nôtre et situés à de très grandes distances. Kant les appelait des «univers-îles».

De 1786 à 1864, William Herschel et son fils John Herschel découvrirent et répertorièrent un grand nombre d'objets nébuleux : John Herschel publie en 1864 un catalogue qui en comprenait 5 000.

Au milieu du XIXe siècle, un astronome irlandais, Lord Rosse, découvrit avec son télescope muni d'un miroir de bronze de 1,83 m la structure spirale de plusieurs galaxies.

On se pose toujours la question de savoir si, oui ou non, toutes ces nébuleuses que l'on observe, pourront un jour être résolues en étoiles. L'étude fine de leurs spectres, dans la seconde moitié du XIXe siècle, a conduit à penser que certaines nébuleuses étaient gazeuses tandis que d'autres, en particulier celle d'Andromède, étaient formées d'étoiles.

Notons au passage, ce qui fera sans doute plaisir aux astronomes amateurs, que c'est un amateur anglais, Roberts, qui découvrit la structure spirale de la galaxie d'Andromède et qui obtint la résolution partielle des bras en étoiles (1888). Par suite de l'existence de meilleurs

télescopes et de l'amélioration des techniques photographiques, le début du XX^e siècle voit l'apparition de belles photographies de galaxies, mettant en évidence les bras faibles et résolvant les bras en images stellaires.

En conséquence, la théorie des univers-îles revient sur le devant de la scène et de grands noms de l'astronomie argumentent pour ou contre elle.

C'est en 1924 que Hubble, en étudiant sur des clichés pris au télescope de 2,5 m du Mont Wilson les bras de la nébuleuse d'Andromède, y découvrit des étoiles variables périodiques, ce qui lui permit (en s'appuyant sur une méthode dont nous parlerons plus loin) d'avoir une idée sur l'ordre de grandeur de la distance de cette nébuleuse ainsi que des Nuages de Magellan.

La porte de l'astronomie extra-galactique était ouverte. Désormais, parmi tous les objets que les anciens astronomes appelaient nébuleuses il faudra distinguer : les galaxies qui sont des objets semblables à notre Galaxie et situés à de très grandes distances, les amas stellaires (amas ouverts ou amas globulaires) qui sont situés dans notre Galaxie ou dans son voisinage proche (il y en a aussi au voisinage des autres galaxies) et les nuages gazeux situés dans notre Galaxie auxquels il convient de réserver le nom de nébuleuses.

II – RECENSEMENT

Comme les étoiles, les galaxies, du moins les plus brillantes d'entre elles, sont répertoriées dans des catalogues.

Nous avons déjà parlé de celui de Messier et de celui de J. Herschel. Ce dernier comporte environ 4 000 galaxies parmi les 5 000 objets qui y sont recensés. Il est connu sous le nom de General Catalogue (G.C.).

Dreyer a publié vers 1890 son célèbre New General Catalogue (N.G.C.) d'environ 8 000 objets nébuleux dont 6 000 galaxies. Il le compléta par ses deux «Index Catalogue» (I.C.) (fin du XIX^e siècle, début du XX^e siècle) portant ainsi le nombre des objets catalogués à 13 000 dont 10 000 galaxies.

Les catalogues actuellement les plus importants sont celui de Zwicky, Herzog et Wild (1960-1968) comprenant 30 000 objets et celui de Vorontsov-Velyaminov (1962-1974) comprenant 32 000 objets.

Il y a encore bien d'autres catalogues dont certains sont spécialisés dans un type particulier de galaxies : galaxies naines, galaxies en interaction, galaxies multiples, etc.

Enfin, il ne faudrait pas oublier que l'on n'a évidemment pas pu recenser toutes toutes les galaxies visibles dans les plus grands instruments. Le télescope de 5 m du Mont Palmar permettrait de dénombrer environ un milliard de galaxies !

III – CLASSIFICATION DE HUBBLE

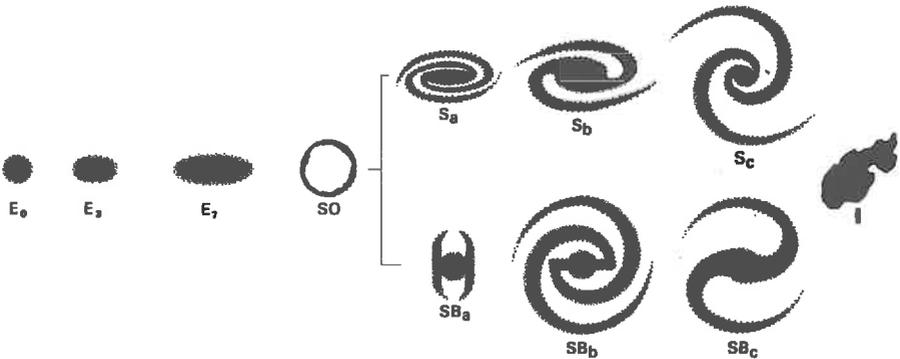
On a cherché à classer les galaxies d'après divers critères : morphologie, classe spectrale des étoiles qui les composent, etc. La plus simple et la plus connue de ces classifications est celle qui a été proposée en 1926 par Hubble. Celui-ci range les galaxies en trois classes : les

elliptiques (E), les spirales (S), les irrégulières (I). Chacune de celles-ci est elle-même subdivisée en sous-classes comme nous allons le voir.

Les galaxies elliptiques affectent la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati. Rappelons qu'un tel ellipsoïde est la surface engendrée par la rotation d'une ellipse autour de son petit axe. Il a donc deux de ses axes égaux tandis que le troisième est plus petit. Si a désigne la longueur des deux axes égaux et b celle du troisième, la quantité $\frac{a-b}{a}$ s'appelle l'aplatissement (elle est d'autant plus petite que l'ellipsoïde est moins aplati, l'aplatissement nul ($a = b$) caractérisant le cas où l'ellipsoïde est une sphère, et l'aplatissement égal à 1 ($b = 0$) caractérisant le cas où l'ellipsoïde est dégénéré en un disque). Pour les galaxies nous remplacerons cette quantité par $10 \frac{a-b}{a}$, nombre qui est donc compris entre 0 et 10. En réalité, l'observation montre que l'aplatissement des galaxies elliptiques est compris entre 0 et 7. On divise donc la classe (E) en huit types : E0, E1, ..., E7. Dire par exemple qu'une galaxie elliptique est de type E3 signifiera que son aplatissement est voisin de 3. La nature n'est évidemment pas aussi schématique et les aplatissements se répartissent de façon continue entre 0 et 7. Les galaxies E0 sont sphériques. Les plus aplaties sont les galaxies E7. Les galaxies elliptiques ont un noyau central brillant et leur luminosité décroît régulièrement du noyau jusqu'au bord. Elles ne comportent ni matière interstellaire ni étoiles supergéantes bleues.

Le type S0 a été créé en 1935 par Hubble pour y ranger les galaxies qui semblent intermédiaires entre les elliptiques et les spirales. Elles ont la forme d'un disque avec une condensation centrale d'aspect stellaire. On les nomme «galaxies lenticulaires». Contrairement aux galaxies elliptiques, elles montrent parfois des nuages absorbants.

Schéma de la classification de Hubble



Les galaxies spirales présentent un noyau sphérique ; le reste de leur matière (étoiles et matière interstellaire) est réparti dans un disque centré en ce noyau et est concentré en des bras spiraux s'enroulant autour du noyau. L'ensemble des galaxies spirales est divisé en la sous-classe des spirales normales (S) et la sous classe des spirales barrées (SB). Chez les spirales normales les bras prennent naissance directement au bord du noyau. Chez les spirales barrées, l'un des diamètres du noyau est prolongé à chacune de ses extrémités par une formation rectiligne : d'une façon imagée, le noyau paraît traversé par une barre. Les bras prennent naissance perpendiculairement aux extrémités de cette barre. Chacune des deux sous-classe (S) et (SB) est divisée en trois types a, b, c. En allant de a à c, la taille du noyau diminue, la longueur et l'épaisseur des bras augmentent, l'enroulement des bras autour du noyau diminue, la quantité de poussières interstellaires augmente.

Les galaxies irrégulières, comme leur nom l'indique, ne présentent pas de structure régulière. Elles sont riches en matière interstellaire et en étoiles jeunes. On les a réparties en irrégulières de type magellanique semblant plus ou moins proches des spirales barrées (les deux Nuages de Magellan sont de ce type) et en irrégulières de type chaotique.

Certaines galaxies anormales, les galaxies N (galaxies à noyau extrêmement brillant) et les galaxies D, se rattachent aux galaxies elliptiques.

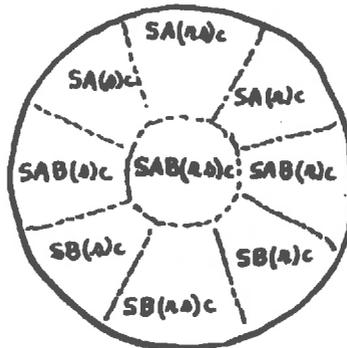
IV – AUTRES CLASSIFICATIONS.

De Vaucouleurs et Sandage ont affiné la classification de Hubble. Les classes E, SO, S, I sont conservées.

La classe E est fractionnée en E^- (galaxies elliptiques compactes), E^0 , E^+ (galaxies sphéroïdales à enveloppe étendue).

La classe SO, notée L (de «lenticulaire») par De Vaucouleurs, est aussi subdivisée en L^- , L^+ , L^0 , les L^- étant les plus proches des elliptiques et les L^+ les plus proches des spirales auxquelles la classe L est rattachée par le type intermédiaire SO/a.

Les spirales normales forment la classe (SA) et les spirales barrées la classe (SB). Les intermédiaires sont placées dans la classe (SAB). Dans chacune de ces classes, De Vaucouleurs distingue les variétés «s» à bras partant en S du noyau, «r» à bras formés d'arcs spiralés partant d'un anneau interne et «rs» intermédiaire. Enfin chacune des classes (SA), (SB), (SAB) est divisée en cinq stades a, b, c, d, m (m pour magellanique) — avec quatre stades intermédiaires ab, bc, cd, dm. On peut illustrer toutes ces subdivisions par un diagramme à trois dimensions ayant la forme d'un volume de révolution autour d'un axe portant en abscisse les stades a, b, c, d, m. Par exemple, la «tranche» d'abscisse c est la suivante :



Enfin, les galaxies irrégulières sont subdivisées en Im (les plus proches des spirales m), Im⁺ (magellaniques compactes) et I0 (irrégulières chaotiques semblant proches des SO/a).

Morgan a proposé une autre classification. Celle-ci est à trois paramètres. Le premier paramètre est l'un des types a, af, f, fg, g, gk, k. Expliquons ceci : le type a est celui des galaxies comportant beaucoup d'étoiles bleues (étoiles B, A, F) ; le type k est celui des galaxies comportant beaucoup d'étoiles rouges (étoiles G, K, M). Les autres types sont intermédiaires et les lettres af, f, ..., indiquent quelle classe spectrale d'étoiles est prédominante.

Comme deuxième paramètre, Morgan utilise les classes de Hubble (E, S, SB, I) auxquelles il ajoute les D (à peu près les galaxies lenticulaires avec en plus quelques E, Sa, Sb), les L (galaxies peu brillantes) et les N (galaxies à noyau très brillant).

Le troisième paramètre, non intrinsèque, mesure l'inclinaison de la galaxie sur le rayon visuel : c'est un nombre compris entre 1 et 7, 1 désignant les galaxies vues de face, 7 celles vues de profil.

V — LES GALAXIES DU GROUPE LOCAL

Comme illustration de ce qui précède indiquons à quels types appartiennent les galaxies qui nous sont les plus voisines. Celles-ci forment (avec la nôtre) un groupe de galaxies que l'on nomme le «Groupe Local». Il comprend cinq grosses galaxies : la nôtre (Sb ou Sc), la galaxie d'Andromède (Sb) — ces deux-ci sont les plus grosses des cinq — le Grand Nuage de Magellan (I) et deux galaxies Sc. Il comporte aussi dix-huit petites galaxies : onze elliptiques, cinq irrégulières dont le Petit Nuage de Magellan et deux spirales Sc.

VI — DISTANCE DES GALAXIES

La détermination des distances des galaxies est principalement fondée sur la formule reliant la magnitude absolue M et la magnitude apparente m d'un astre à sa distance r en parsecs (1 parsec = 3,26 années-lumière)

$$M = m + 5 - 5 \log r$$

Si dans une galaxie de distance inconnue, nous pouvons mesurer la magnitude apparente d'un certain astre (il devra donc avoir une grande luminosité intrinsèque, ce sera par exemple une étoile très brillante, un amas globulaire, etc.) et si, par ailleurs, un moyen indirect nous permet de connaître la magnitude absolue de cet astre, nous aurons sa distance, donc celle de la galaxie (étant donnée la grandeur des distances des galaxies par rapport à leurs dimensions, on considèrera bien sûr que tous les astres composant une galaxie sont à une même distance de nous). On dira qu'un tel astre est un «indicateur de distance».

Il est facile de comprendre comment on va opérer : si, dans plusieurs galaxies de distances connues, on remarque que les astres d'une certaine catégorie ont tous la même magnitude absolue, on pourra légitimement penser que les astres de cette catégorie ont la même magnitude absolue dans toutes les galaxies. Dès lors qu'on observera un tel astre dans une galaxie de distance inconnue, on lui attribuera ladite magnitude absolue et la méthode exposée ci-dessus permettra d'en déduire la distance de la galaxie.

Et comme il faut bien qu'il y ait un commencement à cette méthode en chaîne de détermination des distances, il faudra commencer par repérer dans des galaxies proches de la nôtre des astres dont nous ayons constaté que dans notre Galaxie ils avaient tous la même magnitude absolue (pour ceux-ci, leur distance aura été calculée à l'aide des méthodes usuelles de calcul des distances dans notre Galaxie).

Passons donc en revue les principaux indicateurs de distance.

a) Les Céphéides.

Rappelons que les Céphéides sont des étoiles variables périodiques dont la période est comprise entre un jour et quelques dizaines de jours. On observe des Céphéides dans les Nuages de Magellan. Si nous considérons les Céphéides d'un des Nuages de Magellan, comme elles sont toutes approximativement à une même distance de nous, les différences de magnitudes apparentes qu'elles présentent entre elles traduisent bien leurs différences de luminosité intrinsèque. En 1912, à Harvard, Miss Leavitt découvrit une propriété remarquable des Céphéides des Nuages de Magellan : la luminosité de celles-ci est fonction de leur période (si sur un diagramme on porte en abscisses le logarithme de la période et en ordonnée la magnitude photographique, les points représentant les Céphéides se répartissent sur une droite). Par conséquent dès que l'on a pu connaître la distance de quelques Céphéides de notre Galaxie, on a eu leur magnitude absolue, et comme on avait aussi leur période, cela a permis d'étalonner la courbe représentant la luminosité en fonction de la période et donc de connaître la magnitude absolue (et par conséquent la distance) de toute Céphéide extra-galactique dont on mesurait la période. C'est par ce moyen qu'en 1923-1924, Hubble eut une idée approximative des distances nous séparant des galaxies les plus proches. La principale difficulté de la méthode est qu'il faut étalonner aussi précisément que possible la courbe donnant la magnitude absolue en fonction de la période, c'est-à-dire qu'il faut connaître avec précision la distance des Céphéides de notre Galaxie. Celles-ci sont malheureusement beaucoup trop éloignées pour que les mesures de distances qui, dans notre Galaxie, sont les plus précises, leur soient applicables. C'est ainsi qu'en 1952, Baade montra que l'on avait fait jusqu'alors une erreur en étalonnant la courbe et qu'il fallait multiplier par deux toutes les distances extragalactiques calculées à l'aide des Céphéides.

Les Céphéides (dont la magnitude absolue visuelle est comprise entre -7 et -2) permettent de déterminer des distances extragalactiques jusqu'à 2 millions de parsecs.

b) Les étoiles variables du type RR Lyrae.

Les étoiles variables RR Lyrae sont des étoiles variables périodiques dont la période est comprise entre 0,2 et 1,2 jour. Elles ressemblent aux Céphéides (on les appelait autrefois «Céphéides à courte période») et elles sont bien plus nombreuses. Elles vérifient également une relation période-luminosité, ce qui permet donc de les utiliser comme indicateurs de distance. Malheureusement leur faible luminosité ($M_v \geq 0$) limite leur portée à 200 000 parsecs.

c) Les novae.

On a constaté, sur les novae de notre Galaxie, que les novae à développement rapide avaient, à leur maximum d'éclat, une magnitude absolue photographique voisine de -9 et que les novae à développement lent l'avaient, au maximum d'éclat, voisine de $-6,5$. Rappelons que l'on distingue ces deux types de novae par l'aspect de leur courbe de lumière. Comme indicateurs de distance, les novae ont l'inconvénient d'avoir une dispersion non négligeable autour de la moyenne et l'avantage d'être très lumineuses : elles permettent de calculer des distances jusqu'à 4 millions de parsecs.

Les Céphéides, les étoiles RR Lyrae et les novae sont des indicateurs de distance qui sont étalonnés à partir de notre Galaxie (on connaît leur magnitude absolue moyenne parce que,

dans notre Galaxie, il y a de tels astres dont on connaît la distance). Pour cette raison, on les appelle des « indicateurs primaires ». Les indicateurs que l'on étalonne à partir des galaxies du Groupe Local (dont on a déterminé les distances à l'aide des indicateurs primaires) sont appelés « indicateurs secondaires ». Enumérons les principaux d'entre eux.

d) Les amas globulaires.

Beaucoup de galaxies présentent, dans leur voisinage immédiat, des amas globulaires. Les amas globulaires ont une magnitude absolue visuelle moyenne voisine de $-7,5$. La portée de cet indicateur est d'une quinzaine de millions de parsecs.

e) Les étoiles non variables les plus lumineuses.

Ce sont des étoiles blanches ou bleues. Il semble que, dans les galaxies du Groupe Local, leur magnitude absolue visuelle soit sensiblement constante et voisine de -9 , ce qui en fait un indicateur de distance d'une portée de 15 millions de parsecs.

f) Les diamètres des régions H II les plus grandes.

Les régions H II sont, rappelons-le, des nuages d'hydrogène ionisé apparaissant sous la forme de nébuleuses brillantes. De Vaucouleurs et Smith ont montré que le diamètre de la plus grande région H II de forme annulaire existant dans une galaxie variait peu d'une galaxie à l'autre. Ceci donne donc un indicateur de distance qui, contrairement à tous ceux énumérés auparavant, n'est pas photométrique mais géométrique. On mesure, dans la galaxie dont on veut connaître la distance le diamètre angulaire de la plus grande région H II annulaire s'y trouvant ; on lui attribue pour diamètre linéaire la valeur déduite de l'observation des plus grandes régions H II annulaires des galaxies de distances connues ; on en déduit ainsi la distance cherchée. La portée de cette méthode est d'une dizaine de millions de parsecs.

g) Les étoiles variables supergéantes.

Il s'agit là d'une méthode assez récente (1974). Sandage et Tammann ont remarqué que les étoiles variables supergéantes bleues ou rouges d'une galaxie semblaient avoir une magnitude absolue à peu près invariable d'une galaxie à l'autre (pour les rouges, la magnitude absolue visuelle au maximum est comprise entre -8 et $-7,5$; pour les bleues, la magnitude absolue en lumière bleue au maximum est voisine de -9).

Les indicateurs que l'on étalonne à partir de galaxies plus lointaines que celles du Groupe Local sont appelés « indicateurs tertiaires ». Examinons les plus usités.

h) Les diamètres effectifs.

Si, sur le cliché d'une galaxie, on joint entre eux les points d'égale luminance, on obtient des lignes qu'on appelle isophotes (penser aux lignes de niveau que l'on obtient sur une carte quand on joint entre eux les points d'égale altitude). Le diamètre effectif d'une galaxie est le diamètre de l'isophote à l'intérieur de laquelle est émise la moitié de la luminosité totale. On peut l'utiliser comme indicateur (géométrique) de distance car il ne dépend que du type morphologique et de la classe de luminosité de la galaxie. Il est de bonne qualité mais d'un emploi difficile car il nécessite des mesures précises.

i) Les supernovae.

Rappelons que l'on distingue deux types de supernovae : celles de type I ont un éclat qui décroît lentement après le maximum tandis que celles de type II ont un éclat décroissant rapidement après le maximum. Les supernovae de type I se rencontrent dans les galaxies elliptiques et irrégulières ; leur magnitude absolue photographique maximum moyenne est $-18,7$. Les supernovae de type II se rencontrent dans les galaxies spirales ; leur magnitude absolue photographique maximum moyenne est $-16,3$. Un tel éclat en fait des indicateurs à longue portée : 100 millions de parsecs (ou même bien plus si le maximum est bien observé). Par contre, il y a un inconvénient : la rareté du phénomène (on en compte en moyenne une par galaxie tous les quatre ou cinq siècles).

j) Les galaxies les plus lumineuses d'un amas de galaxies.

On a constaté que dans les amas de galaxies, les galaxies les plus brillantes avaient une magnitude absolue visuelle comprise entre -22 et -20 ; c'est surtout vrai pour les amas riches. Cet indicateur porte jusqu'à 500 millions de parsecs.

k) Les diamètres effectifs des grands amas de galaxies.

Ils constituent selon De Vaucouleurs un indicateur géométrique de distance d'une très grande portée, mais ils n'ont pas encore été utilisés de façon systématique.

l) La loi de Hubble-Humason.

On peut mesurer, sur le spectre d'une galaxie, la vitesse V qu'elle a par rapport à nous grâce à l'effet Doppler-Fizeau. Rappelons que si c est la vitesse de la lumière, si λ est la longueur d'onde au laboratoire d'une raie spectrale, si $\lambda + \Delta\lambda$ est la longueur d'onde de cette même raie dans le spectre de la galaxie, on a :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V}{c}$$

$\Delta\lambda$ devant être positif si la galaxie s'éloigne, négatif dans le cas contraire. A l'aide des distances de galaxies que l'on connaissait alors, Hubble et Humason ont, dès 1929, mis en évidence leur très célèbre loi : toutes les galaxies s'éloignent de nous et la vitesse V avec laquelle elles s'éloignent est proportionnelle à leur distance r :

$$V = Hr$$

Dans cette formule, on exprime V en km/s et r en mégaparsecs (1 mégaparsec — en abrégé 1 Mpc — est égal à 1 million de parsecs). La constante H est appelée «constante de Hubble».

Cette loi permet donc de déterminer la distance d'une galaxie dès que l'on a mesuré la vitesse avec laquelle elle s'éloigne de nous, vitesse appelée «vitesse de récession». Lorsque $\Delta\lambda$ est grand, on utilise pour calculer V une formule relativiste plus compliquée que celle donnée ci-dessus. C'est par cette méthode que l'on a déterminé les plus grandes distances extragalactiques connues : certains objets observés (certains quasars) seraient à 7 milliards d'années de lumière et même plus.

L'ennui est que la réalité n'est pas aussi simple. On n'a pas encore de valeur très sûre de H : on lui attribue à l'heure actuelle une valeur voisine de 75 km/s/Mpc. Mais il est probable que H ne soit pas tout à fait une constante : on a pensé que H varierait de 100 km/s/Mpc pour les galaxies proches à 50 km/s/Mpc pour les galaxies les plus lointaines. De plus, la loi de Hubble n'est peut-être pas isotrope : autrement dit, la constante H dépendrait (un peu) de la direction

dans laquelle on observe. Au passage, signalons que la première valeur trouvée pour H fut 600 km/s/Mpc !

VII – DIMENSIONS DES GALAXIES

Lorsqu'on connaît la distance d'une galaxie, si l'on mesure son diamètre apparent (angle sous lequel on la voit), on peut en déduire son diamètre. Le problème est compliqué par le fait que les galaxies n'ont pas de frontière bien nette : la luminosité décroît depuis le centre pour s'annuler de façon continue.

On peut estimer que les plus grandes galaxies spirales ou elliptiques ont un rayon au moins égal à 20 kpc. Notre Galaxie a un rayon de 15 kpc (ce qui fait un diamètre d'environ 100 000 années-lumière). Il existe beaucoup de galaxies qui sont bien plus petites. Par exemple, dans le Groupe Local, il y a plus de petites galaxies que de grandes.

VIII – ROTATION

Lorsqu'on fait passer dans un spectrographe la lumière provenant de différents points d'une galaxie, on constate que (après correction du décalage dû à la loi de Hubble) dans les spectres provenant des points situés d'un même côté du petit axe de l'image de la galaxie, les raies sont toutes décalées vers les courtes longueurs d'onde, tandis que dans les spectres provenant des points situés de l'autre côté, les raies sont toutes décalées vers les grandes longueurs d'onde. Ceci prouve donc que les galaxies sont animées d'un mouvement de rotation autour de leur axe.

Lorsqu'on a affaire à une galaxie suffisamment brillante, on peut faire l'étude détaillée des décalages des raies, et, par conséquent, des vitesses de rotation des divers points de cette galaxie. On met ainsi en évidence un phénomène de rotation différentielle : tous les points d'une même galaxie ne tournent pas avec la même vitesse angulaire, autrement dit, une galaxie ne tourne pas comme un corps solide. D'une façon précise : dans une région voisine du centre – s'étendant jusqu'à une distance au centre environ égale au quart du rayon de la galaxie – la vitesse angulaire est constante ; cette région tourne donc comme un corps solide et la vitesse linéaire d'un point de cette région croît, avec sa distance au centre de 0 à 300 km/s ; au-delà de cette région, la vitesse angulaire décroît rapidement. Rappelons que l'on a mis en évidence un tel phénomène dans notre Galaxie.

Dans la galaxie d'Andromède, la période de rotation de la région centrale est de 520 000 ans. La période de rotation des régions périphériques d'une galaxie est de l'ordre de la centaine de millions d'années.

IX – BRAS SPIRAUX

On a longtemps cru que les bras d'une galaxie spirale étaient formés par de la matière éjectée par le noyau et qu'ils prenaient leur allure de spirales par suite de la rotation de la galaxie. Il est assez facile de voir qu'il n'en est rien : compte tenu, d'une part de l'âge des galaxies (plus de 10 milliards d'années), d'autre part de la période de rotation des régions périphériques (une ou deux centaines de millions d'années), les bras des galaxies spirales

devraient présenter de très nombreux enroulements. Or l'observation montre qu'ils ne s'enroulent que de un à quelques tours.

C'est C. Lin qui a trouvé l'explication correcte : les bras sont des ondes de densité. Expliquons de quoi il s'agit. Il y a effectivement plus de matière (étoiles, matière interstellaire) dans les bras que dans l'espace interbras, mais ce n'est pas toujours la même matière qui s'y trouve. Les étoiles et les nuages de gaz, lorsqu'ils tournent autour du centre de la galaxie, restent plus longtemps dans les bras que dans l'espace interbras. E. Athanassoula a employé, dans un article de la revue «La Recherche» (septembre 1979), pour faire comprendre ce concept, l'image suivante. Imaginons une autoroute à deux voies sur laquelle des voitures circulent à vive allure. Supposons que sur l'une des voies se trouve un véhicule lent. Derrière celui-ci, il va y avoir une accumulation de voitures, c'est-à-dire une onde de densité. Ce ne seront pas toujours les mêmes voitures qui seront dans cette accumulation puisqu'elles doublent le véhicule lent les unes après les autres ; mais tandis que les premières doublent, il en arrive à l'arrière de l'accumulation, de sorte que celle-ci ne se défait pas.

D'après la théorie de C. Lin, les bras tournent autour du centre de la galaxie mais avec une vitesse inférieure à la vitesse des étoiles et des nuages qui les constituent (l'onde de densité se propage dans la matière à une vitesse inférieure à la vitesse de rotation de cette matière). Dans l'image précédente, le «bouchon» formé derrière le véhicule lent se déplace à la vitesse de celui-ci, donc à une vitesse inférieure à celle des voitures rapides constituant la circulation normale de l'autoroute.

Les bras spiraux posent encore un gros problème : une onde de densité, si elle n'est pas entretenue, devrait disparaître en un temps bien inférieur à la durée de vie d'une galaxie. Il y a donc un mécanisme qui entretient ces ondes ou qui en reforme périodiquement. Beaucoup d'hypothèses ont été formulées. Pour le moment, aucune ne donne entièrement satisfaction et le problème reste ouvert.

X — MASSE

Envisageons une galaxie de distance connue. On peut alors, ainsi que nous l'avons vu, connaître son rayon r . Proposons-nous de calculer la masse M de cette galaxie. Pour ce faire, considérons une étoile située à la périphérie de la galaxie : elle est donc à la distance r du centre de la galaxie et, en première approximation, son mouvement autour de ce centre pourra être considéré comme circulaire et uniforme. Si nous désignons par m la masse de cette étoile, si nous désignons par G la constante de l'attraction universelle et si nous écrivons la relation fondamentale de la dynamique en exprimant que cette étoile est attirée par le centre de la galaxie en vertu de la loi de l'attraction universelle, nous obtenons (v désigne la vitesse de l'étoile en question) :

$$\frac{m v^2}{r} = \frac{G m M}{r^2}$$

d'ou

$$M = \frac{v^2 r}{G}$$

On a donc obtenu M en fonction de quantités connues (G , r ; quant à v elle est mesurable grâce à l'effet Doppler). En ce qui concerne les galaxies doubles, une méthode analogue à celle

employée pour calculer les masses des étoiles doubles, méthode fondée, rappelons-le, sur la troisième loi de Képler, fournit aussi la masse de ces galaxies. Ces méthodes montrent que les masses des galaxies sont comprises entre 10^9 masses solaires et 10^{12} masses solaires. A titre de comparaison, celle de notre Galaxie est égale à 2×10^{11} masses solaires.

Ces calculs de masses ont mis en évidence l'existence d'une relation entre la masse d'une galaxie et sa luminosité (c'est-à-dire la puissance de tout le rayonnement qu'elle émet), mais cette relation dépend du type de galaxies considéré (le rapport masse/luminosité est une trentaine de fois plus élevé chez les elliptiques que chez les irrégulières).

XI — SPECTRE, COULEUR, POPULATION

Le rayonnement global que nous recevons d'une galaxie est constitué par le rayonnement de toutes les étoiles qui la composent. Le spectre global d'une galaxie spirale ressemble au spectre du Soleil avec, en plus, la présence d'un assez fort rayonnement ultraviolet et infrarouge. Ceci peut s'expliquer ainsi : les étoiles naines semblables au Soleil sont les plus nombreuses, donc contribuent pour une large part au rayonnement global de la galaxie, les géantes et supergéantes bleues (classe O et B) sont peu nombreuses mais fournissent du rayonnement ultraviolet et les naines rouges très nombreuses mais très peu lumineuses donnent du rayonnement infrarouge. Le spectre global des galaxies spirales comporte des raies d'absorption (en particulier les raies H et K du calcium) et des raies d'émission (en particulier les raies H_{α} , H_{β} ... de la série de Balmer).

Rappelons que l'indice de couleur d'un astre est d'autant plus élevé qu'il est plus rouge, d'autant plus petit qu'il est plus bleu (cet indice est égal à la différence $m_{pg} - m_{pv}$ entre les magnitudes apparentes photographique m_{pg} et photovisuelle m_{pv}). L'indice de couleur des galaxies elliptiques et lenticulaires vaut 0,8 et leur classe spectrale est G ou K ; l'indice de couleur des galaxies spirales vaut 0,6 chez les Sa (classe spectrale G ou K), 0,4 chez les Sb (classe spectrale F ou G), 0,2 chez les Sc (classe spectrale F) ; enfin l'indice de couleur des irrégulières vaut 0,1 et leur classe spectrale est A.

Les galaxies spirales ont une population semblable à celle de la nôtre. Dans le halo (sphère entourant la galaxie, d'un diamètre un peu supérieur à celui de celle-ci et centrée au centre de la galaxie), la population est de type II : étoiles vieilles pauvres en métaux, sous-naines, RR Lyrae de période supérieure à 0,4 jour, étoiles des amas globulaires, variables à longue période. La population du disque est formée des étoiles du noyau, des RR Lyrae de période inférieure à 0,4 jour, des novae. Enfin les bras spiraux ont une population de type I : étoiles jeunes associées à de la matière interstellaire, étoiles bleues des classes O, B, A, supergéantes, Céphéides, étoiles des amas galactiques jeunes.

Les galaxies elliptiques sont constituées de population de type II.

Dans les irrégulières, il semble que la population de type II soit régulièrement répartie et que ce soit la population de type I qui donne l'allure irrégulière de ces galaxies.

XII — LES AMAS DE GALAXIES

Un certain nombre de galaxies (10 à 20 % selon De Vaucouleurs) sont isolées dans l'espace. Les autres se rassemblent en amas d'une dizaine à quelques milliers de galaxies.

Nous avons déjà mentionné que notre Galaxie appartenait à un amas d'une vingtaine de galaxies, le Groupe Local.

Jusqu'à une distance de 16 Mpc, De Vaucouleurs a compté 54 amas de galaxies, distants en moyenne de 7 Mpc et ayant de 0,4 à 4 Mpc de diamètre. Tous ces amas, à l'exception de l'un d'entre eux, celui de la Vierge, comportent chacun très peu de galaxies (en moyenne, moins d'une dizaine). A une distance de 11 Mpc, se trouve l'amas de la Vierge qui a la particularité de comporter plus de 1 000 galaxies bien que son diamètre ne soit que 2,7 Mpc. Il est surtout composé de spirales et d'elliptiques (dont quelques galaxies elliptiques supergéantes).

A une distance de 70 Mpc, on rencontre un amas encore plus peuplé : l'amas de la Chevelure de Bérénice. On y a dénombré presque 30 000 galaxies de magnitude apparente photographique inférieure à 19 et, dans un diamètre égal à celui de l'amas de la Vierge, on trouve trois fois plus de galaxies que dans ce dernier. Il est surtout formé de galaxies elliptiques, mais il comporte aussi beaucoup de lenticulaires.

Les grands amas de galaxies peuvent se classer en amas diffus et en amas sphériques. Les amas diffus ont une forme irrégulière et ne présentent que peu de concentration centrale. L'amas de la Vierge est un amas diffus. Les amas sphériques possèdent la symétrie sphérique et ont une forte concentration centrale. L'amas de la Chevelure de Bérénice est un amas sphérique.

Les amas qui, comme ceux de la Vierge et de la Chevelure de Bérénice, comportent un très grand nombre de galaxies, sont appelés des «amas riches». Abell en a recensé 2 700 en 1958. Environ 10 % des galaxies appartiennent à un amas riche.

XIII — LE PROBLEME DE LA MASSE MANQUANTE

Les amas riches posent un problème qui n'a pas encore été résolu. En appliquant aux amas de galaxies un résultat de mécanique connu sous le nom de «théorème du viriel», on peut calculer la masse de l'amas en fonction de la distance moyenne entre deux galaxies de l'amas et de la vitesse moyenne des galaxies de l'amas, quantités que l'on connaît si l'on a déterminé la distance de l'amas (l'effet Doppler permet de calculer les vitesses radiales après correction due à la loi de Hubble-Humason ; faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas de direction privilégiée pour les vitesses, on peut en déduire la vitesse moyenne des galaxies). En divisant la masse de l'amas par le nombre de galaxies qu'on y observe, on trouve la masse moyenne de celles-ci. L'ennui est que l'on trouve une masse moyenne 20 fois supérieure à la masse moyenne des galaxies déterminées par les méthodes dont il a été question précédemment. Autrement dit, la plus grande partie de la masse des amas riches reste à découvrir !

On a pensé aux nuages de gaz intergalactiques : l'étude de ceux-ci dans le domaine des rayons X (étude faite à partir de satellites artificiels) a montré que leur masse était de l'ordre de celle des galaxies. Certains astronomes, ayant remarqué que l'on trouve souvent au centre des amas riches une galaxie elliptique supergéante, ont pensé que celle-ci était une sorte de «gouffre gravitationnel» : par suite de la grande densité des amas riches au voisinage du centre, les collisions entre galaxies y seraient fréquentes et auraient pour effet de faire tomber ces galaxies vers la galaxie supergéante centrale ; celle-ci absorbant une partie de la matière des galaxies tombées serait de ce fait de plus en plus massive ; le reste des étoiles provenant des galaxies tombées formerait un grand halo autour de la galaxie supergéante, halo difficilement décelable puisque formé d'étoiles isolées et non d'étoiles groupées en amas ou en galaxies. On tiendrait

ainsi tout ou partie de la masse manquante. Dans l'état actuel des connaissances, il est prudent de dire que l'on n'a pas encore résolu de façon satisfaisante le problème de la masse manquante.

XIV – LES AMAS D'AMAS

Il semble probable que les amas de galaxies soient eux-mêmes groupés en des sortes de «superamas». Pour De Vaucouleurs, notre Groupe Local appartient à un tel superamas d'une trentaine de Mpc de diamètre, centré en l'amas de la Vierge et que l'on appelle le Superamas Local. Abell a compté, à l'aide de son catalogue d'amas riches, une cinquantaine d'amas d'amas, comprenant chacun une dizaine d'amas riches en moyenne et ayant un diamètre moyen de 60 Mpc.

Quelques remarques s'imposent. Tous les amas n'appartiennent pas à un amas d'amas et même la majeure partie des amas ne serait pas dans un superamas. Ensuite, à cause des grandes dimensions des amas par rapport à leurs distances mutuelles, les frontières des amas d'amas ne sont pas bien définies. Enfin, certains astronomes ne sont pas convaincus de l'existence de ces superamas.

BIBLIOGRAPHIE

Le lecteur intéressé par les galaxies trouvera des renseignements sur celle-ci dans les ouvrages suivants :

- 1) Introduction à l'astronomie, par M. Dumont et G. Oudenot, publié par la Société astronomique de France (ouvrage d'initiation).
- 2) Atlas d'astronomie, édité par Stock (P. 196-203) (ouvrage facile à lire).
- 3) Initiation à l'astronomie, par A. Acker, édité par Masson (p. 101-107).
- 4) Astronomie générale, par P. Bakouline, E. Kononovitch, Y. Moroz, éditions de Moscou (chap.XIII) (Bon ouvrage, peu coûteux, de niveau moyen à élevé).
- 5) Encyclopédie de l'univers - Tome 3 «La Galaxie, l'Univers extragalactique», par le Bureau des Longitudes, édité par Gauthier-Villars (excellent ouvrage de niveau élevé).
- 6) Cours d'astronomie de l'École Polytechnique, par J. Delhaye (chap. XV).
- 7) Introduction à la cosmologie par J. Heidmann (surtout chap. I, II, V) (les chapitres de cosmologie demandent des connaissances mathématiques de haut niveau mais ceux concernant les galaxies se lisent facilement).
- 8) Astronomie, Encyclopédie de la Pléiade (p. 863-910) (gros ouvrage où ne figurent pas les découvertes récentes)

- 9) Le monde des galaxies, par G De Vaucouleurs, édité par l'Observatoire de Besançon (ouvrage de très haut niveau).

Rappelons à nos sociétaires qu'ils peuvent consulter à la bibliothèque de la S.A.L. les ouvrages 1, 2, 3, 4, 5, et 9.

D'autre part, la revue «L'Astronomie» (Bulletin de la Société astronomique de France) et les revues «La Recherche» et «Pour la science» publient fréquemment d'intéressants articles sur les galaxies, notamment les découvertes récentes. On peut citer par exemple :

- 1) Etudes récentes sur le superamas local de galaxies, par G. De Vaucouleurs, l'Astronomie, janvier 1976.
- 2) Les galaxies elliptiques et l'évolution des galaxies, par L. Gouguenheim, l'Astronomie, juillet-août 1978.
- 3) L'énigme des galaxies elliptiques, par L. Gouguenheim, La Recherche, juin 1978.
- 4) M 87 a le cœur gros, par L. Vigroux, La Recherche, mars 1979.
- 5) Les Nuages de Magellan, par L. Vigroux, La Recherche, avril 1979.
- 6) Pourquoi y a-t-il des galaxies spirales ? par E. Athanassoula, La Recherche, septembre 1979.
- 7) Les rencontres de galaxies, par F. Combes-Bottaro, La Recherche, février 1980.
- 8) Le mode de groupement des galaxies, par E. J. Groth, J. Peebles, M. Seldner et R. Soneira, Pour la science, janvier 1978.
- 9) Des amas riches en galaxies, par P. Gorenstein et W. Tucker, Pour la science, janvier 1979.
- 10) L'évolution des galaxies à disque, par S. et K. Strom, Pour la science, juin 1979.

NOTES DE LECTURE

Encyclopédie scientifique de l'Univers. La Galaxie. L'Univers extragalactique.

sous la responsabilité du Bureau des Longitudes.

Édité par Gauthier-Villars - Prix (en 1980) : 120 F

Comme pour le premier tome d'astronomie de cette encyclopédie scientifique de l'Univers (voir Bulletin 17), il faut préciser qu'il s'agit d'un livre de niveau élevé nécessitant des connaissances mathématiques et physiques du niveau d'un premier cycle de l'Université.

La première partie de cet ouvrage étudie notre Galaxie. Elle comprend quatre chapitres : cinématique et dynamique statistique, amas et associations, la matière interstellaire, la Galaxie.

La seconde partie porte sur les galaxies et l'Univers dans son ensemble. Elle comporte cinq chapitres : les galaxies proches, galaxies actives et quasars, cosmologie observationnelle, théorie de l'évolution de l'Univers, l'origine des éléments chimiques.

La troisième partie est consacrée à cette branche toute récente de l'astronomie qu'est l'astrophysique des hautes énergies (les observations ne pouvant se faire dans ce cas que par satellites puisque l'atmosphère absorbe les rayons γ et les rayons X). Elle est divisée en deux chapitres : astronomie du rayonnement γ et l'astronomie des rayons X.

Chaque chapitre est rédigé par l'un des meilleurs spécialistes français de la question. Ceux-ci ont fait l'effort de mettre leur texte à la portée du plus grand nombre. Cela nous a valu un ouvrage clair, au contenu très dense, mentionnant les découvertes les plus récentes. Ajoutons pour terminer que la présentation et la typographie de ce livre sont agréables.

Histoire de l'Univers

Sous la direction d'Avram HAYLI – Édité par Hachette

Cette Histoire de l'Univers est un gros et beau volume (grand format, 446 pages) couvrant l'ensemble des domaines de l'astronomie. Quoiqu'il soit d'un bon niveau, il est avant tout un ouvrage de vulgarisation : il s'adresse à toute personne intéressée par l'astronomie, même si elle n'a pas de culture scientifique supérieure et si ses connaissances astronomiques de départ sont faibles (ou nulles ...).

Ce livre a été écrit, sous la direction de notre ancien Président, Monsieur Avram HAYLI, par des spécialistes des diverses branches de l'astronomie. Il est divisé en cinq parties : le monde des étoiles et la Voie lactée (l'observation et les propriétés des étoiles ; la structure, l'énergie et l'évolution des étoiles ; le milieu interstellaire ; la Galaxie), inventaire et histoire du système solaire (le Soleil, la planète Terre, le système solaire), l'univers extragalactique (la découverte et l'exploration de l'univers extragalactique, l'évolution des galaxies normales, les galaxies actives et les quasars), cosmologie (la constante de Hubble et le paramètre d'accélération de l'Univers, l'évolution de l'Univers, quelques grands problèmes cosmologiques actuels), sommes-nous seuls dans l'Univers ? (vie, intelligence et communication dans l'Univers).

Les explications figurant dans cet ouvrage sont les plus complètes qu'on puisse donner sans entrer dans les détails techniques et sans faire usage de trop de mathématiques. De nombreux dessins facilitent la compréhension. Trente-quatre planches photographiques (en noir et blanc et en couleurs) fort bien choisies complètent agréablement ce livre.

D. Sondaz

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

Dépôt Légal : 4ème trimestre 1981 - N° de la publication : 15740/400 - Le Directeur : D. SONDAZ

Société Astronomique de Lyon
69230 – Saint-Genis-Laval

SOMMAIRE

- 1 – Stage d'été 1981 d'initiation à l'astronomie
- 2 – Les Galaxies - Conférence de Monsieur Sondaz,
le 26 avril 1980
- 14 – Bibliographie
- 15 – Notes de lecture par Monsieur Sondaz

PRIX : 10 F