

LA STRUCTURE SPIRALE DES GALAXIES

par JEAN TASSOUL

*Institut d'Astronomie et d'Astrophysique,
Université Libre de Bruxelles*

En 1784, MESSIER dressa un catalogue d'objets nébulaires non résolus dans les petits instruments de l'époque et dont la liste était nécessaire aux observateurs pour ne pas les confondre avec les comètes. W. HERSCHEL établit une distinction essentielle parmi les nébuleuses :

i) les *nébuleuses*, nuages de gaz et de poussières interstellaires qui appartiennent à notre système stellaire, la Galaxie;

ii) les *galaxies*, vastes agglomérations d'étoiles et de gaz interstellaire dont les dimensions sont comparables à celles du système galactique et situées à des distances considérables de celui-ci.

La découverte de la relation période-luminosité des céphéides et l'observation de ces étoiles dans les galaxies ont permis à E. HUBBLE de confirmer les vues de W. HERSCHEL. D'autre part, de nombreux travaux relatifs à la structure de la Voie Lactée ne laissèrent plus aucun doute quant à la similitude entre notre système stellaire et ces systèmes lointains.

1. *Le matériel observé.*

1.1. *Les galaxies.*

1.1.1. — Une classification des galaxies basée sur leurs caractères morphologiques a été proposée par E. HUBBLE (1936). Dans cette classification, les différents systèmes galactiques peuvent être groupés de la manière suivante :

i) *Elliptiques et lenticulaires* : elles sont caractérisées principalement par une *symétrie de révolution*. Pour les premières, le rapport des axes de l'ellipse observée sur les clichés est compris entre 3 et 1. Les lenticulaires, par contre, sont en général plus aplaties; elles diffèrent des elliptiques par la présence d'un anneau peu brillant entourant le noyau central. Ces deux types semblent dépourvus de matière interstellaire et d'étoiles O et B. Dans quelques elliptiques où l'on observe un peu de matière interstellaire, on observe aussi des supergéantes bleues (D.E. OSTERBROCK, 1960).

322399



ii) *Spirales normales et spirales barrées* : pour les premières, des bras spiraux prennent naissance en deux points opposés, à la périphérie du noyau central. Les spirales du second type comprennent un noyau central, une barre s'arrêtant au noyau et des bras partant de la barre. Notons que la distinction entre ces deux types n'est pas toujours très nette. Les spirales normales sont caractérisées par la présence de *super-géantes* et de *matière interstellaire*. On ne possède pour l'instant que fort peu de données relatives aux spirales barrées (E.M. BURBIDGE, 1960).

iii) *Irrégulières* : elles sont constituées d'étoiles et de nuages obscurs réunis de façon désordonnée.

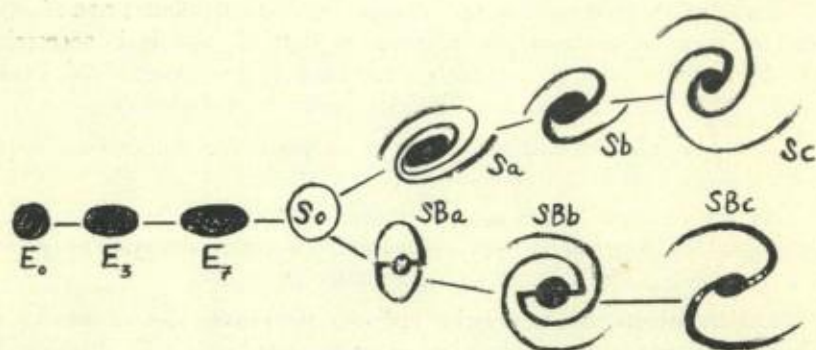


Figure 1. — Classification de E. HUBBLE.

D'après G. DE VAUCOULEURS, la proportion des galaxies des différents types serait : elliptiques 23.4 %, lenticulaires 21.0 %, spirales 50.7 % et irrégulières 4.9 %. On doit toutefois noter que cette fréquence apparente se rapporte à un échantillonnage particulier. Il est donc possible que ces proportions soient le reflet d'une certaine sélection observationnelle. En fait, les galaxies ne peuvent être décrites qu'en première approximation par la classification de E. HUBBLE car l'observation révèle en réalité une très grande variété de formes. Des classifications révisées et plus détaillées ont été proposées par G. DE VAUCOULEURS (1958a) et W.W. MORGAN (1958). Nous nous limiterons à la classification première de E. HUBBLE qui ne conserve que les propriétés essentielles des galaxies : la *symétrie de révolution* et la *structure en spirale* (A. SANDAGE, 1961).

Une étude statistique de la distribution des galaxies dans l'espace a permis de montrer qu'elles sont de préférence associées en *amas* et dans ces amas, forment des *systèmes multiples*. Les photographies à très lon-

gue pose indiquent en outre la présence entre les galaxies, de grandes traînées brillantes : les *ponts de matière* (B.A. VORONTSOV-VELYAMINOV, 1959; F. ZWICKY, 1957).

Différentes théories cosmogoniques ont été proposées pour expliquer la formation des galaxies. Toutefois, dans ce domaine, où les données de l'observation sont relativement peu nombreuses, ces théories sont encore purement spéculatives. Elles reposent toutes sur l'hypothèse d'une *condensation* au sein d'un milieu diffus.

Le problème de l'évolution des galaxies est d'un intérêt tout particulier pour les théories de la formation des bras spiraux. Selon C.F. VON WEIZSACKER (1951), le trait essentiel de l'évolution des galaxies une fois formées est dessiné par la *turbulence*. Suivant ce schéma, l'évolution se ferait dans le sens Irrégulière $\rightarrow E_0$, en passant soit par la branche des spirales normales, soit par la branche des spirales barrées. Pour V.A. AMBARTZUMIAN (1958-1960), par contre, l'évolution se ferait dans le sens opposé par *éjection* de matière hors du noyau central. D'après de récents travaux, il semble actuellement que la structure spirale n'est pas un trait permanent des galaxies; les bras spiraux se formeraient et se détruiraient continuellement au cours de l'évolution du système (P.O. LINDBLAD, 1960b). En fait, on ne possède pas encore de données de l'observation suffisantes pour pouvoir confirmer ou infirmer l'une ou l'autre de ces théories, et aucun fait ne permet de prouver actuellement que la séquence de E. HUBBLE représente effectivement l'évolution des galaxies.

1.1.2. — La rotation des galaxies a été mise en évidence dès 1914 par la détermination spectroscopique de vitesses radiales. Toutefois, pour les spirales, il importe encore de connaître le sens d'enroulement des bras dans la rotation. Pour cette raison, il faut déterminer l'*orientation vraie* de la spirale dans l'espace, autrement dit, distinguer le bord du petit axe apparent le plus proche de l'observateur.

La plupart des tentatives faites pour établir l'orientation vraie des spirales dans l'espace ont été fondées sur l'analyse des *effets d'absorption* par la matière interstellaire. Deux hypothèses peuvent être envisagées relativement à la distribution de matière absorbante :

i) la matière absorbante se trouve concentrée suivant la *convexité* des bras externes et localisée dans une couche assez mince. D'après cette hypothèse, la moitié de la galaxie la plus proche de l'observateur doit être la plus assombrie. Combinée avec les vitesses radiales, cette conception oblige à conclure que les bras spiraux se ferment dans le sens de la rotation (G. DE VAUCOULEURS, 1958b);

ii) la matière absorbante se trouve au contraire concentrée suivant la *concavité* des bras et peut s'étendre fort loin du plan équatorial. Alors, la moitié la plus lumineuse de la galaxie est la plus proche de l'observateur et par suite, les bras s'ouvrent dans le sens de la rotation (B. LINDBLAD, 1946).

Cette dernière conception semble actuellement insoutenable et pour cette raison, une nouvelle interprétation a été proposée par A. ELVIUS (1956). Suivant cet auteur, l'excès de luminosité observé du côté le plus brillant du petit axe est dû à une *diffraction* de la lumière du noyau de la spirale par des particules interstellaires. Suivant ce point de vue, le côté le plus brillant est le plus proche et de ce fait, les bras spiraux s'ouvrent également dans le sens de la rotation. Cette nouvelle interprétation de A. ELVIUS semble être confirmée par l'étude de la *polarisation* observée dans les régions brillantes des galaxies.

1.2. La Galaxie.

Les grandes distances qui nous séparent des galaxies ne nous permettent pas d'étudier en détail ces vastes systèmes stellaires. Pour cette raison, notre propre système stellaire peut être envisagé comme un modèle. Les résultats de l'observation obtenus pour la Galaxie pourront être, dans une certaine mesure, extrapolés aux autres systèmes.

1.2.1. — Dans son ensemble, la Galaxie apparaît comme un système fortement aplati en rotation. Elle est constituée d'*étoiles*, de *gaz interstellaire* et de *poussières*. Ces différents objets sont répartis de part et d'autre d'un plan de concentration maximum : le plan galactique. Le Soleil est situé au voisinage de ce plan de symétrie où il occupe une position fortement excentrique par rapport au centre du système. La masse totale de la Galaxie est estimée actuellement à $1.6 \times 10^{11} M_{\odot}$. Son diamètre équatorial est de l'ordre de 30 Kpc.

Différents aspects de la structure de la Galaxie apparaissent suivant la façon dont on groupe les étoiles. En fait, on constate que lorsqu'on sélectionne les étoiles et les systèmes d'étoiles par leurs caractéristiques physiques intrinsèques, on obtient des groupements variés dont la répartition spatiale est différente. D'autre part, on constate l'existence d'une liaison étroite entre les *étoiles* et la *matière interstellaire*.

La distribution des étoiles en deux populations stellaires distinctes, avec encore de nombreuses transitions possibles entre les deux a été proposée par W. BAADE (1944). Le tableau résume les caractéristiques principales de ces deux populations (C.W. ALLEN, 1955; A. BLAAUW, 1959; H.C. VAN DE HULST, 1959).

Les deux populations de W. BAADE se distinguent à la fois par leur diagramme de Hertzsprung-Russell et par leur distribution spatiale.

Actuellement, on considère que cette distinction est liée à l'évolution même du système galactique. Les étoiles et le gaz interstellaire se seraient formés à partir du gaz initial, lorsque le système aurait acquis un certain degré de régularité. Dans ce schéma, le *disque* et le *halo* seraient la conséquence du grand nombre d'étapes successives de l'évolution de la Galaxie (B. LINDBLAD, 1955).

1.2.2. — L'observation des spirales extérieures montre que les bras spiraux sont dessinés par des étoiles chaudes et du gaz interstellaire. La présence de ces objets dans notre système stellaire a donc suggéré l'existence d'une *structure en spirale de la Galaxie*.

L'étude de la distribution spatiale des étoiles O et B met en évidence des *associations stellaires* (V.A. AMBARTZUMIAN, 1947). L'étu-

TABLEAU
Caractéristiques principales des populations I et II

	Population I	Population II
Etoiles	Séquence principale Céphéides classiques Supergéantes Géantes G à M ($M_v \sim O$) Etoiles en rotation rapide ?	Séquences d'amas globulaires Céphéides d'amas (RR Lyrae et W Vir) Etoiles O et B sous-lumineuses Variables RV Tauri
Autres objets et gaz interstellaire	Nébuleuses diffuses Grains interstellaires : <i>absorption</i> Hydrogène neutre (HI) : spectre <i>optique</i> (raie H_α) et spectre <i>radio</i> (raie 21 cm - structure hyperfine) Plasma interstellaire (HII) : spectre <i>continu</i> (rad. thermique : "free-free"; rad. non thermique : synchrotron)	Nébuleuses planétaires Plasma interstellaire (HII) : spectre <i>continu</i> (rad. non thermique : synchrotron)
Occurrence	Concentration galactique élevée (<i>disque</i>) Bras des spirales évoluées Galaxies irrégulières résolubles Amas ouverts Groupe local (Soleil) Systèmes stellaires "nouveaux"	Concentration galactique faible (<i>halo</i>) Centres des spirales des derniers types Galaxies irrégulières non résolues Amas globulaires Etoiles proches à grande vitesse Systèmes stellaires "anciens"

de des mouvements propres de ces étoiles montre que les étoiles d'associations divergent toutes à partir d'une même région de l'espace. Ces associations sont donc *instables* et possèdent une énergie totale *positive*. Lorsque l'on dresse une carte des étoiles d'associations en projection sur le plan galactique, on peut observer les bras spiraux dessinés par ces étoiles (W.W. MORGAN, 1953).

D'autre part, la découverte de la raie 21 cm de l'hydrogène neutre a apporté une nouvelle méthode pour étudier la distribution spatiale du gaz interstellaire. Les cartes établies de cette manière mettent également en évidence les bras spiraux de la Galaxie (J.H. OORT, 1958; R.N. BRA-CEWELL, 1959).

Dans l'ensemble, on vérifie de façon satisfaisante l'identité entre les bras d'hydrogène neutre et les bras dessinés par les associations O et B. Les cartes obtenues montrent que les bras spiraux de la Galaxie s'ouvrent en sens inverse du mouvement de rotation. Ceci semble donc confirmer les récents travaux de G. DE VAUCOULEURS sur le sens de rotation des spirales.

Notons encore l'existence possible d'une structure en spirale du *noyau* ("3-Kpc expanding arm"). Les observations radioélectriques sur 21 cm mettent en évidence un très net mouvement d'expansion dans la région du centre galactique. On observe également, sur la même longueur d'onde, d'importants écarts au mouvement circulaire. Ces constatations suggèrent ainsi une forme spiralée du noyau galactique (J.H. OORT, 1959).

1.2.3. — L'existence possible d'un *champ magnétique* interstellaire dans notre Galaxie a été indirectement suggérée par plusieurs considérations. Citons en ordre principal :

- i) les rayons cosmiques primaires (E. FERMI)
- ii) la radiation de synchrotron (I. SHKOLVSKY)
- iii) la forme des filaments interstellaires
- iv) la polarisation interstellaire (W.A. HILTNER, J.S. HALL).

Etudions plus en détail ce dernier point. Dans toutes les hypothèses envisagées, la polarisation de la lumière reçue des étoiles résulte de la *diffusion* par des particules interstellaires. Un tel effet pourrait être causé par des grains solides anisotropes présentant une orientation commune. Deux questions se posent alors : la *nature* des particules polarisantes et le *mécanisme d'orientation* de ces particules. (Les particules solides dans les astres, 6^e Col. Intern. d'Astrophysique, Liège, 1954; L.O. LODEN, 1961).

Suivant la théorie de L. SPITZER et J.W. TUKEY (1951), les grains anisotropes sont *ferromagnétiques* et un champ magnétique permet l'orientation de ces particules. Toutefois, un champ de l'ordre de 100 G est alors nécessaire pour rendre compte de la direction de polarisation observée ($1 \text{ G} = 10^{-5}$ oersted). Dans cette hypothèse, le champ interstellaire est perpendiculaire au plan galactique.

Pour L. DAVIS et J.L. GREENSTEIN (1951), les particules sont *paramagnétiques* et s'orientent par *relaxation* dans un champ magnétique. Suivant ce schéma, les lignes de force sont parallèles au plan galactique et la valeur du champ nécessaire pour l'orientation des particules est de l'ordre de 1 à 10 G. Selon J. HENRY (1958), l'orientation des particules anisotropes par *relaxation ferromagnétique* est également possible; dans ce cas, un champ magnétique de 0.1 G suffit pour expliquer la polarisation interstellaire.

De récentes observations radioélectriques destinées à étudier l'*effet Zeeman* sur 21 cm n'ont pas mis en évidence l'existence d'un tel effet (J.A. GALT, 1960). Plusieurs auteurs admettent que ce résultat négatif permet néanmoins de fixer une limitation supérieure pour le champ magnétique; cette limite est fixée actuellement à 3 G (L. WOLTJER, 1961). D'autre part, S. CHANDRASEKHAR et E. FERMI (1953) ont évalué la valeur du champ interstellaire par deux méthodes différentes. Les ordres de grandeur de ces deux évaluations concordent avec la valeur théorique de L. DAVIS et J.L. GREENSTEIN. Notons encore que plusieurs auteurs suggèrent l'existence d'un champ magnétique *hélicoïdal* orienté le long des bras spiraux de la Galaxie. Une telle configuration, qui s'oppose à l'idée première de S. CHANDRASEKHAR et E. FERMI, semble plus conforme aux observations actuelles de la polarisation interstellaire (A. ELVIUS et N. HERLOFSON, 1960; J.G. IRELAND, 1961).

D'autre part, une importante partie du rayonnement hertzien continu du halo galactique n'est pas d'origine thermique. La génération d'un tel rayonnement par le mécanisme de *synchrotron* (électrons relativistes en mouvement dans un champ magnétique) est en bon accord avec la génération des *rayons cosmiques primaires*. Ceci suggère donc l'existence d'un champ magnétique dans le halo de la Galaxie. Des travaux destinés à mettre en évidence la polarisation du rayonnement galactique continu sur 408 MHz (73 cm) sont en cours actuellement (H.C. VAN DE HULST, 1961). Les résultats préliminaires déjà obtenus semblent confirmer les travaux de W.A. HILTNER (1951).

L'étude de la *polarisation* dans les spirales extérieures montre également l'existence possible d'un champ magnétique orienté le long des bras spiraux de ces galaxies (A. ELVIUS, 1956). Le champ magnétique semble donc une caractéristique essentielle des spirales normales. On ne possède toutefois pas encore d'études relatives aux spirales barrées.

De nombreuses questions se posent encore : quelle est l'origine de ce champ observé dans les bras spiraux et dans le halo, quelle est la nature de ce champ et quelle est son influence sur la dynamique des systèmes stellaires ?

2. *Les mouvements stellaires dans la Galaxie.*

Dès la fin du siècle dernier, un grand nombre d'observations astronomiques a permis l'établissement de catalogues de positions et de vitesses spatiales d'étoiles appartenant au voisinage du Soleil. De l'étude de cet ensemble de données il apparaît des régularités statistiques entre les mouvements stellaires et leurs coordonnées. C'est l'objet de la *statistique stellaire*. L'étude du gaz interstellaire est relativement plus récente et l'on ne possède encore que fort peu d'informations concernant son mouvement dans la Galaxie. Il apparaît toutefois, d'après les données actuelles fournies par la radioastronomie, qu'en moyenne les étoiles et le gaz interstellaire se meuvent solidairement.

Les travaux purement descriptifs de la statistique stellaire présentent un très grand intérêt car ces régularités observées sont en fait la traduction des lois dynamiques qui régissent le système galactique dans son ensemble. Une théorie dynamique complète du système galactique devra donc rendre compte de cet ensemble de régularités statistiques.

2.1 *Les régularités statistiques.*

Sélectionnons un groupe d'étoiles appartenant au voisinage du Soleil. Le mouvement de chaque étoile d'un tel groupe par rapport au Soleil peut être décomposé en un *mouvement d'ensemble* et un *mouvement résiduel* distribué au hasard et dont la moyenne est nulle pour l'ensemble des étoiles de ce groupe. Le mouvement d'ensemble est en fait le mouvement du groupe d'étoiles par rapport au Soleil. Une fois obtenu ce mouvement d'ensemble du groupe stellaire considéré, on peut obtenir aisément le mouvement résiduel de chaque étoile du groupe.

A un certain degré d'approximation, on peut considérer que la distribution des vitesses résiduelles des étoiles est *ellipsoïdale* (SCHWARZSCHILD, 1914). On observe que deux axes de l'ellipsoïde des vitesses sont situés dans le plan galactique. Le grand axe est approximativement dirigé dans la direction du centre galactique (vertex). On doit toutefois noter un certain écart à cette direction (*déviations des vertex*) ainsi qu'une déformation de l'ellipse des vitesses dans le plan galactique (P. BOURGEOIS et R. COUTREZ, 1945).

Pour les étoiles appartenant au groupe local et dont la vitesse résiduelle est supérieure à 63 km/sec, une asymétrie nettement caractérisée se manifeste. Tous les points configuratifs d'étoiles à vitesses élevées se

placent d'un seul côté de sorte qu'il n'est plus possible d'accorder à l'hypothèse ellipsoïdale un sens physique pour l'ensemble de la distribution.

Cependant, si l'on subdivise l'ensemble des étoiles en divers groupes déterminés chacun par une communauté de propriétés physiques (type spectral, masse, emplacement dans le diagramme de Hertzsprung - Russell, discontinuité de Balmer, indice de couleur,...), on constate que les vitesses stellaires dans chacun de ces groupes, suivent à nouveau une distribution pratiquement ellipsoïdale; on n'a plus affaire ici à une seule distribution, mais à une série de distributions ellipsoïdales autour de vitesses moyennes qui ne coïncident plus.

Ce dernier phénomène a été étudié par STRÖMBERG (1925). Il montre que le Soleil possède par rapport à chaque groupe une vitesse différente en grandeur et en direction (*apex solaire*). Si l'on projette sur le plan galactique les différentes vitesses d'apex, on constate que les points configuratifs de ces vitesses sont approximativement alignés sur une droite perpendiculaire à la direction du centre galactique. Cette distribution particulière constitue la loi du *courant asymétrique*. Elle traduit simplement la rotation des différentes catégories stellaires envisagées autour de la Galaxie dans le même sens mais avec des vitesses angulaires différentes. Une relation quadratique relie la dispersion des vitesses dans chaque groupe à la vitesse moyenne du groupe.

Le courant asymétrique a permis d'établir la rotation d'ensemble de la Galaxie. Mais cette rotation doit équilibrer l'attraction des masses du système tout entier; la rotation galactique ne peut donc s'effectuer comme celle d'un corps solide. Les différentes parties de la Galaxie doivent tourner autour du centre avec des vitesses différentes. Cette *rotation différentielle* est effectivement mise en évidence à l'aide d'observations astronomiques. La représentation de cet effet différentiel nécessite l'introduction du paramètre

$$A = - \frac{r}{2} \frac{d\Omega}{dr}$$

où Ω est la vitesse angulaire du système à une certaine distance r du centre galactique. La "constante" A de rotation différentielle peut être déterminée au voisinage du Soleil à l'aide d'observations. On adopte généralement la valeur (M. SCHMIDT, 1956)

$$A = + 0.020 \text{ km/sec. pc, } \pm 0.002 \text{ (e.m.q.)}$$

Pour certains groupes d'étoiles, une représentation correcte nécessite l'introduction d'un second paramètre K . Cet *effet K* est particulièrement important pour les étoiles O et B.

2.2. *Le modèle galactique de J.H. OORT et B. LINDBLAD (1927).*

En 1927, J.H. OORT et B. LINDBLAD ont développé une théorie dynamique qui a permis de retrouver les principales régularités statistiques mises en évidence par la statistique stellaire. Les principes qui sont à la base de cette théorie peuvent s'énoncer de la manière suivante :

i) La Galaxie est un système *stationnaire* possédant une *symétrie de révolution*; elle est formée de différents sous-systèmes plus ou moins aplatis tournant autour d'un axe commun.

ii) Les mouvements moyens sont représentés par des *mouvements circulaires*; chaque sous-système est animé d'un mouvement de *rotation différentielle* qui est fonction de l'aplatissement de la population stellaire considérée.

iii) Les mouvements stellaires individuels sont *quasi-circulaires*; ils sont régis par un *potentiel moyen de gravitation* qui représente l'action du système tout entier sur chaque étoile individuelle.

La théorie développée à partir de ces trois principes est seulement qualitativement correcte. Le troisième principe conduit en particulier à une distribution ellipsoïdale des vitesses. Il permet en outre d'établir un lien entre cette distribution particulière des vitesses et la rotation différentielle du groupe stellaire considéré. On peut démontrer la relation

$$A = \Omega \left(1 - \frac{\beta^2}{\alpha^2} \right)$$

où α et β représentent les dispersions des vitesses suivant les deux axes principaux de l'ellipsoïde dans le plan galactique. On observe que le rapport des axes est en général appréciablement différent du rapport calculé.

D'autres écarts entre la théorie et l'observation doivent encore être notés :

L'*effet K* est contenu dans la théorie de J.H. OORT et B. LINDBLAD mais celle-ci n'en donne pas une explication satisfaisante. Cet effet peut être considéré comme une "dilatation" de certains groupes stellaires. Il est étroitement lié au mouvement d'expansion des étoiles d'associations et à la structure spirale de la Galaxie (P. BOURGEOIS, 1955).

La *déviatiou des vertex* n'est pas expliquée par la théorie. En 1949, R. COUTREZ a donné une explication à cet effet en introduisant les invariants périodiques de la distribution. Par après, B. LINDBLAD et F. NAHON (1954) ont également montré que cette déviation est un effet périodique dû à la dispersion des étoiles et du gaz interstellaire sous l'action de la rotation différentielle du système galactique.

Différents auteurs réétudient actuellement le problème de la dynamique galactique d'un point de vue différent : ils supposent que le système galactique n'est pas stationnaire et que de plus, des écarts à la symétrie de révolution doivent être pris en considération.

D'autre part, des courants électriques peuvent prendre naissance dans le plasma interstellaire. Le flux de ces courants en présence d'un champ électromagnétique extérieur crée des forces mécaniques qui modifient le mouvement du système. Il convient actuellement d'établir quelles sont les modifications apportées par ces forces nouvelles au modèle galactique idéal de J.H. OORT et B. LINDBLAD.

3. *La structure spirale des galaxies.*

La structure spirale des galaxies a suscité de nombreuses tentatives d'interprétations. De toutes les théories proposées pour expliquer ce phénomène, celles de B. LINDBLAD et de ses collaborateurs sont sans conteste celles qui ont reçu le plus de développement; elles sont en outre l'objet de la part de leurs auteurs de confrontations avec les données de l'observation. Des exposés détaillés de ces travaux ont été publiés principalement dans les *Annales de l'Observatoire de Stockholm* (1927 à 1960). Nous nous bornerons à exposer les grandes lignes de ce problème fondamental de l'astronomie stellaire.

Trois voies d'accès différentes ont été proposées.

3.1. *La théorie microscopique : les mouvements stellaires individuels* (1927).

L'étude du mouvement d'une étoile individuelle dans un système stellaire nécessite la connaissance de l'ensemble des forces qui agissent sur cette étoile. On peut supposer que ces forces dérivent d'un potentiel général de gravitation qui représente l'action du système tout entier sur une étoile individuelle. D'une manière générale, il n'est pas possible d'expliciter complètement cette fonction. Pour cette raison, le sphéroïde de Maclaurin fournit un *modèle* de galaxie. Ce modèle ne représente évidemment pas exactement la réalité, mais il permet le calcul et fournit les grandes lignes du phénomène réel.

En 1927, B. LINDBLAD a montré que lorsque l'excentricité de l'ellipse méridienne du sphéroïde dépasse une certaine valeur critique, il apparaît à la périphérie équatoriale du système une *zone d'instabilité*. Une étoile animée d'un mouvement circulaire au bord du système ellipsoïdal dont l'excentricité est supérieure à l'excentricité critique, pourra ainsi quitter son orbite circulaire si son mouvement subit une petite perturbation : elle décrira alors dans le plan équatorial une *orbite spirale*, asymptotique à son orbite circulaire primitive. De cette manière, les bras spiraux s'ouvrent dans le sens de la rotation du système.

En se basant sur un critère d'instabilité établi par B. LINDBLAD, on peut montrer que l'apparition d'une telle zone d'instabilité est rendue possible par une concentration de matière vers le plan équatorial combiné avec un gradient radial de densité.

L'intégration numérique de l'équation différentielle des orbites spirales individuelles permet de déterminer la forme de ces trajectoires pour différentes valeurs de l'excentricité critique. Il est alors possible de comparer la forme de ces bras théoriques à celle des bras spiraux observés. La figure 2 montre les résultats de cette comparaison pour la spirale Messier 81.

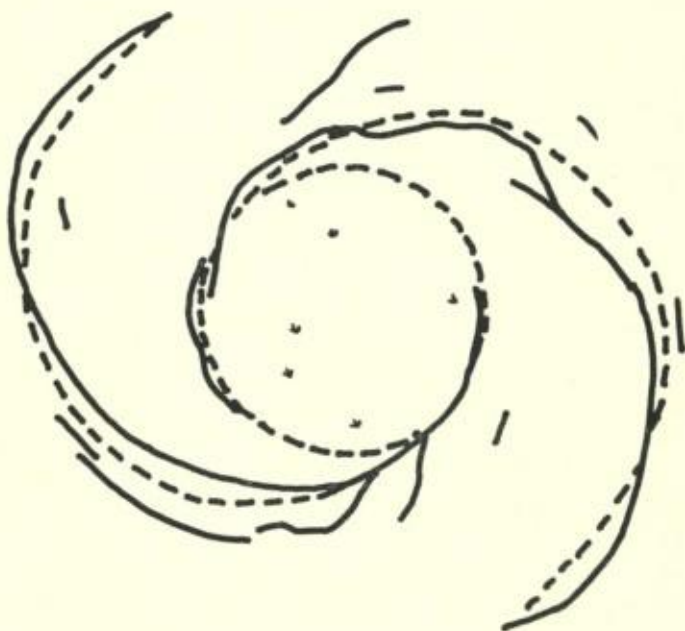


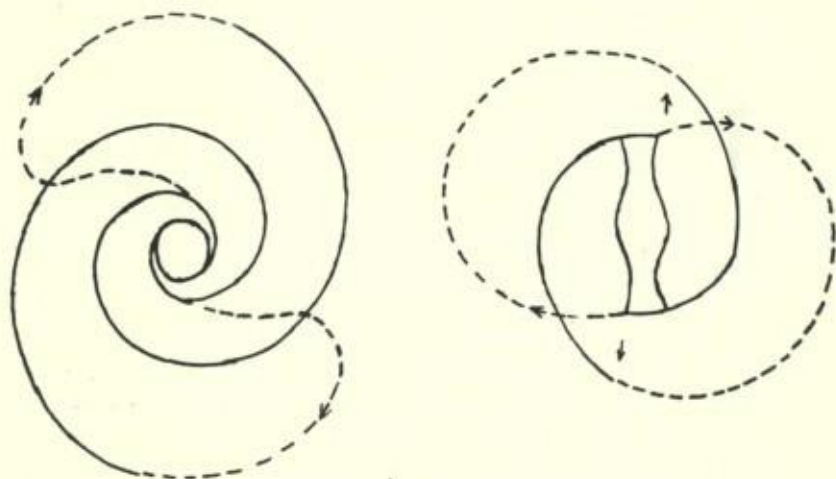
Figure 2. — Spirale MESSIER 81 (d'après B. LINDBLAD, 1927).

En conclusion, ce premier travail de B. LINDBLAD montre que l'instabilité des trajectoires circulaires d'étoiles individuelles dans un système stellaire symétrique fournit la principale raison du développement de la structure spirale des galaxies. De plus, lorsque la condition d'instabilité est vérifiée, cette théorie décrit le processus de formation des bras spiraux. Toutefois, elle ne permet, ni de déterminer les causes qui conduisent à l'instabilité du système, ni de prendre en considération les spirales barrées.

3.2. *La théorie semi-macroscopique : les oscillations de masses* (1948).

Afin de compléter les résultats de la première théorie, il est nécessaire de tenir compte de facteurs autres que l'instabilité décrite précédemment; il faut prendre en considération les *oscillations de masses* à l'intérieur des systèmes stellaires. De cette manière, différentes *ondes* peuvent être mises en évidence. Sous certaines conditions, ces ondes peuvent devenir instables, c'est-à-dire peuvent varier exponentiellement au cours du temps. Lorsqu'il y a *résonance* entre le mouvement des masses et les oscillations décrites par les étoiles individuelles les étoiles peuvent alors être projetées dans la région où les orbites circulaires sont définitivement instables.

Dans cette nouvelle théorie, les spirales normales et les spirales barrées peuvent être étudiées. En effet, le développement des calculs met en évidence deux ondes qui jouent un rôle essentiel :



Figures 3a et 3b. — Formation schématique des spirales (d'après B. LINDBLAD, 1950).

i) l'onde de Riemann qui provoque une déformation de la frontière du sphéroïde sans toutefois altérer le mouvement des masses à l'intérieur de celui-ci. Cette onde a pour action d'allonger le système le long d'un diamètre et de le raccourcir le long du diamètre à angle droit du premier; elle suit le système avec la vitesse angulaire $\Omega/2$.

ii) l'onde de densité qui induit une redistribution des masses dans le système avec un minimum de déformation de sa frontière. Sous l'action de cette onde, la matière du système se concentre le long d'un diamètre tournant avec la vitesse angulaire de celui-ci. La barre ainsi formée suit donc de très près le mouvement moyen du milieu.

L'onde de Riemann semble être la cause de la structure des spirales normales. Par résonance entre cette onde instable et les oscillations libres des particules dans les régions extérieures du système, de nombreuses particules pourront être éjectées le long d'orbites pouvant s'étendre à des distances considérables du système. Or, comme cette éjection suit l'onde de Riemann avec la vitesse angulaire $\Omega/2$, les trajectoires des particules éjectées ne coïncideront pas avec les orbites asymptotiques dans un système fixe de coordonnées. A une certaine distance du centre, les trajectoires vont s'incurver et se déplacer dans le sens inverse du mouvement du système. Nous appellerons, avec B. LINDBLAD, ces trajectoires des "bras spiraux singuliers" (figure 3a).

Par un effet de marée, les "bras singuliers" vont déplacer vers l'extérieur la matière qui suit les points d'éjection de ces bras. La matière éjectée va créer ainsi une nouvelle onde que nous appellerons "onde de dispersion". Dans un système de coordonnées attaché à la masse en rotation, cette "onde de dispersion" se propagera le long de la frontière dans le sens opposé au mouvement du système. Elle va être accélérée et, après un certain temps pourra entrer en résonance avec les oscillations libres des particules à l'intérieur du système. Il se formera ainsi deux nouveaux points d'éjection qui se déplaceront avec la vitesse angulaire Ω du système dans le sens opposé au mouvement. Cette nouvelle éjection de matière par deux points fixes dans l'espace représentera les bras spiraux observés qui, à présent s'ouvrent dans le sens de la rotation. Les "bras spiraux singuliers" apparaîtront plus ou moins comme l'enveloppe des extrémités des différentes branches des bras observés.

Notons encore que l'onde de Riemann devient instable lorsque l'ellipticité de la section méridienne du sphéroïde atteint la valeur 0.7; si l'on dépasse cette valeur critique, le système elliptique se transforme en une spirale normale, comme il vient d'être décrit. Ce fait est remarquable dans la théorie car il permet d'expliquer la limite d'ellipticité des galaxies elliptiques dans la séquence de E. HUBBLE ($E_0 \dots E_7$).

Pour les spirales barrées, le processus d'amorçage du phénomène est entièrement différent. Dans ce cas, c'est l'onde de densité, et non plus l'onde de Riemann, qui est la cause de la forme si caractéristique de la "barre". Nous supposons, avec B. LINDBLAD, qu'un tel système était à l'origine formé d'un noyau central symétrique entouré par un ou plusieurs anneaux périphériques dans le plan équatorial. Lorsque le système devient modérément aplati, l'onde de densité devient instable, le noyau central se déforme lentement et la matière de ce noyau se concentre le long d'un diamètre tournant avec la vitesse angulaire Ω . Une telle concentration va évidemment perturber les anneaux périphériques. On montre que l'énergie des particules qui suivent immédiatement la barre croît : il y aura donc éjection de matière dans ces régions. La matière éjectée va propager une perturbation le long de la frontière dans le sens opposé à la rotation du système. Une telle perturbation, même assez faible au départ, pourra après une révolution de 180° , croître suffisamment pour pouvoir briser l'anneau derrière la barre (figure 3b). Suivant ce schéma de B. LINDBLAD, les bras s'ouvrent également dans le sens de la rotation.

3.3. La théorie gravitationnelle (1960).

La théorie du mouvement des masses rend compte de la majeure partie des données de l'observation. Elle permet surtout d'expliquer la formation des deux types de spirales. Toutefois, dans cette théorie, les bras précèdent dans la rotation. Or, il semble actuellement, d'après les récents travaux de G. DE VAUCOULEURS, que dans de nombreux cas, les bras spiraux se ferment dans la rotation.

En 1954, dans une nouvelle étude de la distribution des vitesses résiduelles des étoiles, B. LINDBLAD et F. NAHON ont montré le rôle important que joue la *rotation différentielle* des systèmes stellaires. L'observation montre que les bras spiraux des galaxies sont formés de nuages d'étoiles et de gaz interstellaire. Sous l'action de la rotation différentielle, ces nuages vont se disperser au cours du temps le long de certaines orbites dont la forme va dépendre du système de coordonnées. Nous pouvons choisir un système de coordonnées de telle manière que les trajectoires des étoiles individuelles coïncident avec ces orbites. Nous les appellerons "*anneaux de dispersion*".

Ces travaux théoriques de B. LINDBLAD sur la formation des "anneaux de dispersion" et les données de l'observation, ont permis à P.O. LINDBLAD de développer une théorie *gravitationnelle* de la structure spirale des galaxies (1960b).

A l'aide de calculatrices électroniques, l'action gravitationnelle d'un "anneau de dispersion" sur des anneaux circulaires peut être étudiée. Les calculs montrent que cette action est très importante dans les régions

extérieures d'une galaxie à la distance de résonance, où la vitesse du mouvement circulaire est égale à la vitesse angulaire de la ligne des apsides de l'anneau de dispersion. La perturbation cause une élongation des anneaux circulaires extérieurs et des concentrations de matière se forment le long de ces anneaux. Ces condensations massiques auront une action perturbatrice sur la matière environnante et les différents anneaux auront tendance à se grouper entre eux et à se transformer en bras spiraux qui, dans les premiers instants de leur formation, *précèdent* dans la rotation. Mais, à cause de la décélération des régions qui précèdent les bras et de l'accélération des régions qui suivent les bras, après un certain temps, les bras spiraux *traîneront* dans la rotation.

Comme dans la théorie du mouvement des masses, la formation des spirales barrées est liée à l'onde de densité qui concentre la matière le long d'un diamètre tournant approximativement avec la vitesse angulaire du mouvement circulaire. L'action perturbatrice d'une telle "barre" sur des anneaux circulaires périphériques peut être étudiée par les méthodes numériques. On montre également, que dans les premiers instants de leur formation, les bras spiraux *s'ouvrent* dans le sens de la rotation. Après une période de transition, les bras spiraux, comme précédemment, *se fermeront* dans le sens de la rotation.

Notons encore qu'un autre programme a été entrepris par P.O. LINDBLAD (1960a). L'auteur étudie les forces de *marées* qui agissent entre les galaxies multiples. Sous l'action gravitationnelle d'un satellite ou d'une galaxie suffisamment proche, des bras spiraux peuvent effectivement se former dans une galaxie et des ponts de matière peuvent être éjectés du système reliant ainsi entre elles les différentes galaxies.

4. Conclusions.

Les travaux de B. LINDBLAD et de ses collaborateurs mettent en évidence le rôle important que jouent les *forces de gravitation* et les *forces hydrodynamiques* dans la formation des bras spiraux des galaxies.

Les observations actuelles, et particulièrement les observations radio-astronomiques dans le domaine spectral des ondes hertziennes, ont renouvelé le problème :

i) une galaxie est constituée principalement de *gaz neutre* (région HI), de *gaz ionisé* (région HII, plasma interstellaire), de *poussières interstellaires* et d'*étoiles*. De plus, les étoiles se forment continuellement en groupe dans ce milieu gazeux (associations stellaires);

ii) les différentes populations d'une galaxie ont des âges très différents. La *population I* (population jeune) caractérise les spirales normales, tandis que la *population II* (population vieille) caractérise les noyaux d'elliptiques;

iii) un *champ magnétique* de l'ordre de 0.1 à 1 G est orienté le long des bras spiraux des spirales normales. Toutefois, on ignore encore à l'heure actuelle la manière dont les lignes de force de ce champ se ferment. On observe également un champ magnétique dans le halo de la Galaxie, mais on ne connaît ni la valeur de ce champ, ni l'orientation de ses lignes de force.

De nombreux travaux récents mettent en évidence le rôle que peuvent jouer les *forces magnétiques* sur le mouvement du gaz ionisé dans un système stellaire. Toutes ces publications montrent que la cause ultime de la structure spirale des galaxies est extrêmement complexe; elle fait appel à toutes les forces qui agissent dans un système stellaire. Une théorie faisant intervenir à la fois les *effets gravitationnels* et les *effets magnétiques* permettra peut-être d'expliquer entièrement le phénomène spiral.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN C.W. (1955) — *Astrophysical quantities*, Athlone Press, London, 212.
- AMBARTZUMIAN V.A. (1958) — On the evolution of galaxies, 11^e Conseil de Physique (Solvay), Stoops éd., Bruxelles, 241.
- (1960) — On the evolution of stellar systems, *Quarterly Journ. R. Astron. Soc.* **1**, 152.
- BAADE W. (1944) — The resolution of M32, NGC 205 and the central region of the Andromeda Nebula, *Astrophys. Journal* **100**, 137.
- BLAAUW A. (1959) — Co-ordination of galactic research, *Symposium Union Astr. Int. n° 7* (Stockholm), Cambridge Univ. Press, 14.
- BOURGEOIS P. et COUTREZ R. (1945) — L'effet K et le caractère spiral de la Voie Lactée, *Ann. Obser. R. Belgique*, 3^e série, tome III.
- BOURGEOIS P. (1955) — "Intrinsic" studies of stellar movements in the Milky Way, *Vistas in Astronomy*, Pergamon Press, 221.
- BRACEWELL R.N. (1959) — The large-scale structure of galaxies, *Symposium Union Astr. Int. - Union Rad. Sc. Int.* (Paris), Stanford Univ. Press, 403.
- BURBIDGE E.M., BURBIDGE G.R. and PRENDERGAST K.H. (1960) — Motions in barred spiral galaxies, *Astrophys. Journal* **132**, 654.
- CHANDRASEKHAR S. and FERMI E. (1953) — Magnetic fields in spiral arms, *Astrophys. Journal* **118**, 113.
- COUTREZ R. (1949) — Contribution à l'étude de la dynamique des systèmes stellaires, *Ann. Obser. R. Belgique*, 3^e série, tome IV.
- DAVIS L. and GREENSTEIN J.L. (1951) — The polarization of starlight by aligned dust grains, *Astrophys. Journal* **114**, 206.
- DELHAYE J. (1953) — *Astronomie stellaire*, Armand Colin, Paris.
- DE VAUCOULEURS G. (1958a) — L'exploration des galaxies voisines, Masson, Paris, 27.
- (1958b) — Tilt criteria and direction of rotation of spiral galaxies, *Astrophys. Journal* **127**, 487.

- DUFAY J. (1954) — Nébuleuses galactiques et matière interstellaire, Albin Michel, Paris.
- ELVIUS A. (1956a) — Diffraction of light by interstellar particles in spiral galaxies, *Stockholm Ann.* **18**, n° 9.
- (1956b) — Polarization of light in the spiral galaxy NGC 7331 and the interpretation of interstellar polarization, *ibid.* **19**, n° 1.
- ELVIUS A. and HERLOFSON N. (1960) — On the dynamics of galaxies with large-scale magnetic fields, *Astrophys. Journal* **131**, 304.
- GALT J.A., SLATER C.H. and SHUTER W.L.H. (1960) — An attempt to detect the galactic magnetic field using Zeeman splitting of the hydrogen line, *Monthly Notices R. Astron. Soc.* **120**, 187.
- HENRY J. (1958) — Polarization of starlight by ferromagnetic particles, *Astrophys. Journal* **128**, 497.
- HILTNER W.A. (1951) — Polarization of stellar radiation, the polarization of 841 stars, *Astrophys. Journal* **114**, 241.
- HUBBLE E. (1936) — The realm of the nebulae, Yale Univ. Press.
- IRELAND J.G. (1961) — On the effect of a helical magnetic field on the polarization of starlight, *Monthly Notices R. Astron. Soc.* **122**, 461.
- KURTH R. (1957) — Introduction to the mechanics of stellar systems, Pergamon Press.
- LINDBLAD B. (1927) — On the spiral orbits in the equatorial plane of a spheroidal disk, *Kungl. Svenska Vetensk.* **4**, n° 7.
- (1948) — On the dynamics of stellar systems, *Monthly Notices R. Astron. Soc.* **108**, 214.
- (1955) — On the evolution of stellar systems, *Vistas in Astronomy*, Pergamon Press, 1711.
- LINDBLAD B. and BRAHDE R. (1946) — On the direction of rotation in spiral nebulae, *Astrophys. Journal* **104**, 211.
- LINDBLAD B. and NAHON F. (1954) — On the theory of star-streaming, *Stockholm Ann.* **18**, n° 2.
- LINDBLAD P.O. (1960a) — On tidal interaction between galaxies, *Stockholm Ann.* **21**, n° 3.
- (1960b) — The development of spiral structure in a galaxy approached by numerical computations, *ibid.* **21**, n° 4.
- (1960c) — Gravitational resonance effects and the formation of spiral structure, *Stockholm Medd.* n° 121.
- LODEN L.O. (1961) — A polarimetric investigation of 1300 stars, *Stockholm Ann.* **21**, n° 7.
- MORGAN W.W., WHITFORD A.E. and CODE A.D. (1953) — A preliminary determination of the space distribution of the blue giants, *Astrophys. Journal* **118**, 318.
- MORGAN W.W. (1958) — A preliminary classification of the forms of galaxies according to their stellar population, *Publ. Astr. Soc. Pacific* **70**, 364.
- OORT J.H., KERR F.T. and WESTERHOUT G. (1958) — The galactic system as a spiral nebula, *Monthly Notices R. Astron. Soc.* **118**, 379.
- OORT J.H. and ROUGOOR G.W. (1959) — Symposium on radio astronomy (Indiana Univ., Bloomington), National Academy of Sciences, 1.

- OSTERBROCK D.E. (1960) — Interstellar matter in elliptical galaxies, *Astrophys. Journal* **132**, 325.
- PECKER J.C. et SCHATZMAN E. (1958) — *Astrophysique générale*, Masson, Paris.
- SANDAGE A. (1961) — The Hubble atlas of galaxies, Carnegie Institution of Washington **618**.
- SCHMIDT M. (1956) — A model of the distribution of mass in the galactic system, *Bull. Astr. Inst. of the Netherlands* **468**, 15.
- SPITZER L. and TUKEY J.W. (1951) — A theory of interstellar polarization, *Astrophys. Journal* **114**, 187.
- VAN DE HULST H.C. (1959) — The interstellar plasma, n° 1 del suppl. al Vol. **13**, serie X del Nuovo Cimento, 205.
- VON WEIZSACKER C.F. (1951) — The evolution of galaxies and stars, *Astrophys. Journal* **114**, 165.
- VORONTZOV-VELYAMINOV B.A. (1959) — Atlas and catalogue of interacting galaxies, I, Sternberg Astr. Inst., Moscow.
- WOLTJER L. (1961) — The magnetic field intensity in the galaxy, *Astrophys. Journal* **133**, 352.
- ZWICKY F. (1957) — *Morphological astronomy*, Springer-Verlag, Berlin, 229.

J. T.

Bruxelles, novembre 1961.