

# Introduction

**Françoise COMBES**

*Observatoire de Paris, Collège de France, Paris, France*

Les galaxies n'ont été identifiées comme des mondes à part, comme l'avait senti le philosophe Emmanuel Kant, que vers les années 1920, il y a tout juste un siècle. Auparavant, les astronomes avaient bien observé des nébuleuses, mais ne faisaient pas la distinction entre un nuage de gaz en émission, comme la nébuleuse d'Orion, et des galaxies extérieures, comme la nébuleuse d'Andromède. Au début du  $XX^e$  siècle un grand débat eut lieu pour connaître la taille de notre monde (la Voie lactée), et la distance des divers astres dans le ciel. En 1924, Edwin Hubble observa dans Andromède des céphéides, les étoiles variables, dont Henrietta Leavitt en 1909 avait démontré la qualité d'indicateur de distance. Ainsi il fut démontré qu'Andromède était une galaxie « extérieure » à la nôtre, située à environ 2 millions d'années-lumière.

Les progrès depuis ont été fulgurants. Nous connaissons aujourd'hui des millions de galaxies, et déterminons leur distance grâce à l'expansion de l'Univers et au décalage vers le rouge correspondant (*redshift*). Grâce à la vitesse finie de la lumière, nous pouvons remonter le temps, en observant les galaxies lointaines dans leur jeunesse. Nous observons ainsi des galaxies jusqu'aux confins de notre Univers, à la limite de notre horizon, ce qui permet de reconstruire leur histoire.

Dans cet ouvrage nous allons d'abord décrire les diverses morphologies et catégories de galaxies, qui sont essentielles pour mieux comprendre leur formation et évolution. Il existe plusieurs classifications, selon que l'on considère les divers composants stellaires : bulbe, disque, sphéroïde, la photométrie et les couleurs plus ou moins bleues selon le taux de formation d'étoiles, ou bien la cinématique des étoiles, c'est-à-dire une énergie cinétique soit dominée par la rotation, soit par la dispersion des vitesses, ou

*Galaxies,*

coordonné par Françoise COMBES. © ISTE Editions 2021.

encore la fraction de gaz. Les galaxies à disque contiennent en général des structures spirales ou barrées, qui sont le moteur de l'évolution. Ces structures donnent lieu à des résonances qui seront la source d'anneaux, ou pseudo-anneaux, très utiles pour connaître la vitesse des spirales et barres.

Notre galaxie, la Voie lactée, la plus connue et la plus familière, a une structure spirale barrée, qui a pris pourtant beaucoup de temps pour être identifiée, car nous sommes dans son plan : elle apparaît vue par la tranche, obscurcie par des traînées de poussière. Sa structure apparaît plus clairement en infrarouge proche. Elle comprend un disque mince, où se trouvent le gaz et les étoiles jeunes, et un disque épais, qui remonte à des milliards d'années. Elle possède un pseudo-bulbe, dû essentiellement à la barre, et à ses résonances verticales. Il existe aussi un halo d'étoiles plus ou moins sphérique, diffus, dont la formation serait essentiellement due à l'accrétion de petites galaxies satellites. Celles-ci sont détruites par interaction de marée, et se déploient en une multitude de courants stellaires. Nous pouvons remonter à l'histoire de la formation des différentes composantes, par archéologie galactique, en déterminant l'âge et la métallicité des étoiles. Le satellite astrométrique GAIA a récemment permis d'énormes progrès en précisant les distances et les mouvements propres d'un grand nombre d'étoiles.

Les galaxies se décomposent en deux grandes catégories : les galaxies à disque ou *late-type* et les galaxies elliptiques ou *early-type*. Dans notre Univers local, la majorité des galaxies sont à disque et dominant en nombre, mais comme les galaxies elliptiques sont plus massives, elles dominent en masse dans l'Univers. Les galaxies *early-type* ont une morphologie sphéroïdale, et même si elles ont parfois un disque stellaire, il est sous-dominant devant le bulbe massif. Leurs populations stellaires sont vieilles, et elles ne possèdent pas ou très peu de gaz. Pendant très longtemps, les astronomes ont pensé que l'aplatissement des sphéroïdes stellaires était dû à la rotation, mais lorsqu'il est devenu possible de mesurer leurs vitesses, on s'est aperçu que les formes de ces sphéroïdes étaient plutôt dues à l'anisotropie de la dispersion de vitesses : les elliptiques n'ont pas ou très peu de rotation. Il est alors difficile de déprojeter ces systèmes, qui peuvent être triaxiaux. On les classe en rotateurs lents ou rapides. L'origine de ces différences provient de leur histoire de formation par fusion de galaxies spirales.

Les galaxies à disque, *late-type*, sont aussi appelées galaxies spirales. Leur structure en bras spiraux ouverts a longtemps été un mystère, car la rotation différentielle du disque devrait enrouler très rapidement les bras, et les faire ainsi disparaître. Mais ce sont en fait des ondes de densité et non des bras matériels. Les bras sont assez transitoires et plusieurs ondes se succèdent, en revanche les barres sont des structures plus robustes, qui permettent à la galaxie d'assembler sa masse, en évacuant le moment angulaire du gaz accrété. La vitesse de l'onde barrée peut se déterminer par les différentes résonances dans le plan (formant des anneaux) et perpendiculaires (formant des

cacahuètes ou des boîtes). Les disques des spirales évoluent essentiellement de façons séculaires, mais de temps en temps une interaction ou fusion avec une autre galaxie peut augmenter la masse du bulbe et la concentration de masse. La formation d'étoiles est enrichie par l'accrétion de gaz provenant des filaments cosmiques, qui maintient la galaxie bleue et active. En revanche, l'environnement d'un groupe ou d'un amas de galaxies peut tarir le réservoir de gaz et stopper la formation stellaire. La galaxie devient alors rouge et passive. Parmi les millions de galaxies connues, une bimodalité claire a été observée entre la séquence rouge et le nuage bleu.

Les interactions entre galaxies contribuent à enrichir les galaxies en gaz, ce qui peut créer une flambée de formation d'étoiles, ou *starburst*. Les interactions sont visibles même à grande distance, grâce aux bras de marée et aux perturbations morphologiques des galaxies. Bien sûr ces effets sont d'autant plus visibles dans les groupes et les amas de galaxies. Dans ces derniers, les galaxies sont balayées de leur gaz par la pression dynamique. En remontant dans le temps, on s'aperçoit que le nombre de galaxies en interaction était plus grand autrefois, dans la première partie de l'âge de l'Univers. Cela pourrait expliquer en partie l'histoire de la formation d'étoiles cosmiques.

Dans les amas de galaxies aujourd'hui, on observe une ségrégation morphologique : les spirales qui dominent en nombre dans le reste de l'Univers, disparaissent progressivement pour laisser la place aux lenticulaires et aux elliptiques. Les galaxies dans les amas ne forment plus beaucoup d'étoiles. Mais ce n'était pas le cas dans le passé. Déjà les premiers observateurs des amas lointains avaient remarqué des galaxies de couleur bleue, c'est ce que l'on appelle l'effet Butcher-Oemler. Il doit même exister un moment dans l'Univers, à la formation des amas, où les interactions entre galaxies rendent les amas ou proto-amas plus riches en formation d'étoiles qu'ailleurs dans le champ. L'évolution des galaxies et l'histoire de leur formation stellaire a fait beaucoup de progrès ces dernières années, grâce notamment à plusieurs satellites infrarouges, qui ont révélé les galaxies obscurcies par la poussière, où la formation d'étoiles est cachée dans le visible, mais ressort uniquement dans le rayonnement infrarouge de la poussière chauffée par les jeunes étoiles. La distribution spectrale du rayonnement des galaxies permet aussi de distinguer la quantité d'étoiles formées, et de séparer le chauffage qui est dû à l'énergie des trous noirs supermassifs de celui dû à l'énergie des étoiles. L'efficacité de la formation stellaire varie au cours du temps, à cause de la fraction de gaz des galaxies, bien plus grande autrefois, et aux phénomènes de rétroaction des noyaux actifs, correspondant à la croissance rapide des trous noirs.

Les énormes progrès effectués dans la connaissance des galaxies ne doivent pas nous faire oublier tout ce qu'il reste à découvrir, notamment l'essentiel de la masse d'une galaxie est faite de matière noire exotique, dont nous ne connaissons pas la nature !