



Les Galaxies

Introduction

Les origines des galaxies

Qu'est-ce qu'une galaxie ?

Les différents types de galaxies

La vie des galaxies

Les dernières découvertes du JWST

Collisions et fusions galactiques

Annexes



INTRODUCTION

Préambule : dans ce document sur les galaxies nous allons parler des distances dans l'Univers, et l'Univers est immense... et c'est peu dire. Nous trouverons **trois principales unités de mesure des distances utilisées en astronomie** : Mettons de côté et oublions les kilomètres, dont l'usage nécessiterait un grand nombre de zéros, sauf quelques exceptions comme la distance Terre-Lune.

- **L'Unité Astronomique** (ou U.A. ou A.U. en anglais). Cette mesure concerne essentiellement le système solaire et ses environs, ou d'autres systèmes stellaires comparables.
- **L'année-lumière** (ou AL ou A.L. ou al), qui n'est pas une mesure de temps mais de distance.
- **Le Parsec** (ou pc), (abréviation de **parallaxe-seconde**), une autre unité de distance dont le calcul est un peu compliqué, mais qui est très employée par les astronomes professionnels et certains amateurs éclairés.

L'unité astronomique qui sera peu ou pas employée ici dans le cadre des galaxies, est une unité arbitraire qui est égale à la distance moyenne Soleil-Terre soit, en arrondissant, environ 150 millions de km. Il sera par exemple plus facile de faire des comparaisons de distance entre les planètes du système solaire. En disant que Jupiter est à 5,2 UA, soit 5,2 fois plus loin du Soleil que la Terre, c'est plus parlant que de dire que Jupiter se trouve à 780 millions de km. Pour Saturne ce sera 10 UA, dix fois plus loin du Soleil, ce qui est mieux que dire qu'elle se trouve à 1,5 milliard de km, etc.

L'année-lumière est la distance qui est parcourue par la lumière dans le vide pendant un an. La vitesse de la lumière est très légèrement inférieure à **300.000 km par seconde**. Une année-lumière équivaut donc à 9.460.000.000.000 km (neuf mille quatre cent soixante milliards de km). Sachez que l'objet le plus lointain décelé à ce jour dans l'Univers se situe à 13,4 milliards d'années-lumière de nous !

Le Parsec, est le fruit d'un calcul de parallaxe, pas très complexe, mais il est inutile de le développer ici. Il suffit de savoir qu'un Parsec vaut 648.000 / π unités astronomiques, soit environ 3,26 années-lumière. Quand on veut exprimer des distances énormes on parlera de kilo-parsecs (kpc pour mille pc), de méga-parsecs (Mpc pour million de pc), voire de giga-parsecs (Gpc pour milliard de pc).

Définition : Une **galaxie** est un ensemble d'étoiles, de planètes, de gaz, de poussières, d'astéroïdes, de comètes, de petits corps, de vide et probablement de matière noire, contenant presque toujours un trou noir supermassif en son centre, dans un ensemble lié par la gravité. Dès les XVIII^e et XIX^e siècles ces objets étaient appelés des « **Univers-Îles** ».

Etymologie et origine du nom

Le mot « galaxie » provient du terme grec ὁ γαλαξίας / *ho galaxias* (« laiteux », sous-entendu κύκλος / *kyklos* « cercle »), dérivé du nom τὸ γάλα / *to gala* « lait ». On trouve aussi en grec ancien ὁ τοῦ γάλακτος κύκλος / *ho tou galaktos kyklos* « le cercle de lait », ou encore ὁ κύκλος γαλακτικός / *ho kyklos galaktikos*, « cercle laiteux », à cause de son apparence dans le ciel. Dans la mythologie grecque, Zeus plaça son fils Héraclès, né de son union avec la mortelle Alcmène, sur le sein de son épouse Héra lorsqu'elle était endormie afin que le bébé devienne immortel en buvant son lait divin. Lorsque celle-ci se réveilla, elle se rendit compte qu'elle allaitait un bébé inconnu qu'elle repoussa, et un jet de lait aspergea le ciel, formant cette pâle bande lumineuse appelée « Voie Lactée ». Le nom de « Voie Lactée » est emprunté, par l'intermédiaire du latin *via lactea*, au grec ancien γαλαξίας κύκλος / *galaxias kýklos* signifiant littéralement « cercle galactique », « cercle lacté » ou « cercle laiteux ». Elle fait partie des onze cercles que les anciens Grecs ont identifiés dans le ciel : le zodiaque, le méridien, l'horizon, l'équateur, les tropiques du Capricorne et du Cancer, les cercles arctique et antarctique et les deux colures passant par les deux pôles célestes. Si les interprétations mythologiques de la Voie Lactée sont nombreuses et diverses, la Galaxie est presque toujours considérée comme une rivière ou un chemin : « Fleuve » des Arabes, « Rivière de lumière » des Hébreux, « Rivière céleste » des Chinois, « Lit du Gange » dans la tradition sanskrite.

Premières observations et hypothèses sur la nature des galaxies

Dès l'Antiquité, les premières observations des comètes donnent naissance à de nombreuses mythologies de la Voie Lactée puis à des interprétations issues de la philosophie naturelle grecque. Les philosophes tentèrent de saisir la nature de la bande lumineuse connue sous le nom de Voie Lactée. Le philosophe grec Anaxagore (500—428 av. J.-C.) la concevait comme « l'effet de la lumière des astres qui ne sont pas offusqués par le

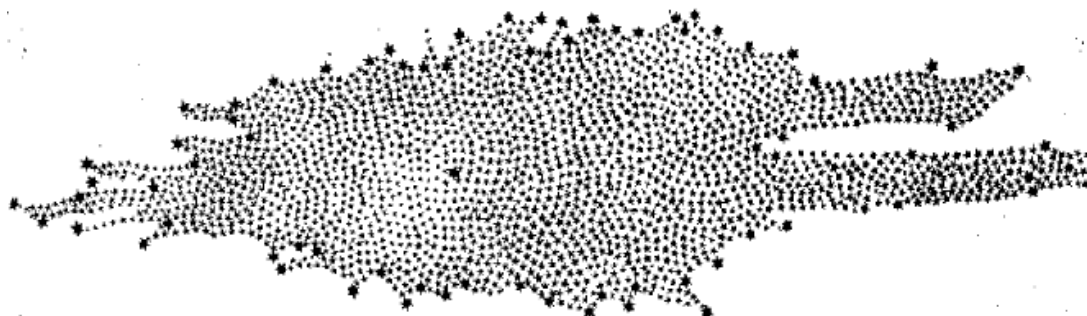
Soleil ». De la même manière, Démocrite (450—370 av. J.-C.) suggéra qu'elle était due à un grand nombre de petites étoiles trop petites pour les distinguer à l'œil nu. Cette conception stellaire de la Voie Lactée apparaît aussi en Inde. Aristote, dans son traité *Du ciel*, divise le cosmos en monde céleste, composé d'éléments sphériques parfaits, et monde sublunaire avec ses objets imparfaits. Dans son traité des *Météorologiques*, il considère la Voie Lactée comme étant la combustion d'une partie de l'air, enflammé par le mouvement des astres, donc un phénomène atmosphérique placé dans la moyenne région sublunaire. Selon Macrobe, Théophraste, disciple d'Aristote, regarde la Voie Lactée comme le point de suture des deux hémisphères qui réunit et forme la sphère céleste ; là où les hémisphères se rejoignent, elle est selon lui plus brillante qu'ailleurs.

Claude Ptolémée synthétise 500 ans d'observations dans son *Almageste* rédigé au II^e siècle (après J.C.). Il propose un modèle mathématique où la Terre est au centre de l'Univers (il épouse donc la vision philosophique d'Aristote) et les autres objets célestes tournent autour selon des parcours circulaires. L'influence aristotélicienne, grâce à l'*Almageste* de Ptolémée, reste prédominante en Occident jusqu'au XV^e siècle. Cependant, le philosophe néoplatonicien Olympiodore le Jeune dès le VI^e siècle réfute cette conception météorologique par deux arguments principaux : des planètes passent parfois devant la Voie Lactée et elle n'a aucun effet sur la parallaxe.

Tandis que plusieurs astronomes arabes et perses du Moyen Âge penchent pour son origine stellaire, Al-Biruni (973 - 1048 apr. J.-C.) réfuta lui aussi la proposition d'Aristote, en tentant de calculer la parallaxe de la Voie Lactée, et en notant que puisqu'elle est nulle, elle doit se trouver à grande distance de la Terre, et donc hors de l'atmosphère. Il proposa également que la Voie Lactée était une collection d'innombrables étoiles nébuleuses. Au début du XII^e siècle, l'astronome arabe Ibn Bajja (appelé Avempace par les andalous) est d'avis que la Voie Lactée est faite d'un grand nombre d'étoiles, mais que la réfraction de l'atmosphère terrestre lui donne l'aspect d'un « voile continu ». Pour appuyer sa thèse, il étudie la conjonction de Mars et de Jupiter de février 1117 : elle a l'aspect d'une figure élancée malgré l'aspect circulaire des deux planètes.

L'observation à l'œil nu de la Voie Lactée ne permet de distinguer qu'une très faible partie des étoiles dont elle se compose. Avec sa lunette astronomique, Galilée découvre dès 1610 que la Voie Lactée est un « amas de toutes petites étoiles » mais considère à tort qu'elle n'est pas constituée de gaz (alors qu'il s'avérera qu'elle regorge de nombreuses nébuleuses).

Dans son *Opera philosophica & mineralia* (1734), le philosophe suédois Emanuel Swedenborg avance que les galaxies sont des « univers-îles ». En 1750, l'astronome Thomas Wright, dans son ouvrage *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe*, étudie la structure de la Galaxie et imagine qu'elle forme un nuage aplati, disque parsemé d'étoiles parmi lesquelles se trouve le Soleil. L'apparence de la Voie Lactée est « un effet optique dû à l'immersion de la Terre dans une couche plate composée d'étoiles de faible luminosité », écrit-il. Le philosophe Jean-Henri Lambert parvient à des conclusions identiques en 1761. Dans un traité de 1755, le philosophe Emmanuel Kant, s'appuyant sur les travaux de Wright, spéculait correctement que la Voie Lactée pourrait être un corps en rotation composé d'un nombre immense d'étoiles retenues par la gravitation, de la même façon que le Soleil retient les planètes du Système solaire, mais à une échelle nettement plus vaste. Le disque d'étoiles ainsi formé serait observé comme une bande dans le ciel depuis la Terre (qui se trouve à l'intérieur du disque). Il suppose aussi que des nébuleuses, visibles dans le ciel nocturne, seraient des « galaxies » semblables à la nôtre. Il reprend la qualification des « nébuleuses extragalactiques » avec le terme des « univers-îles ». Dans son *Exposition du système du monde*, ouvrage de vulgarisation publié en 1796, Pierre-Simon de Laplace fait l'hypothèse que de « nombreuses « nébuleuses » sont en réalité des galaxies très éloignées, formées de myriades d'étoiles.

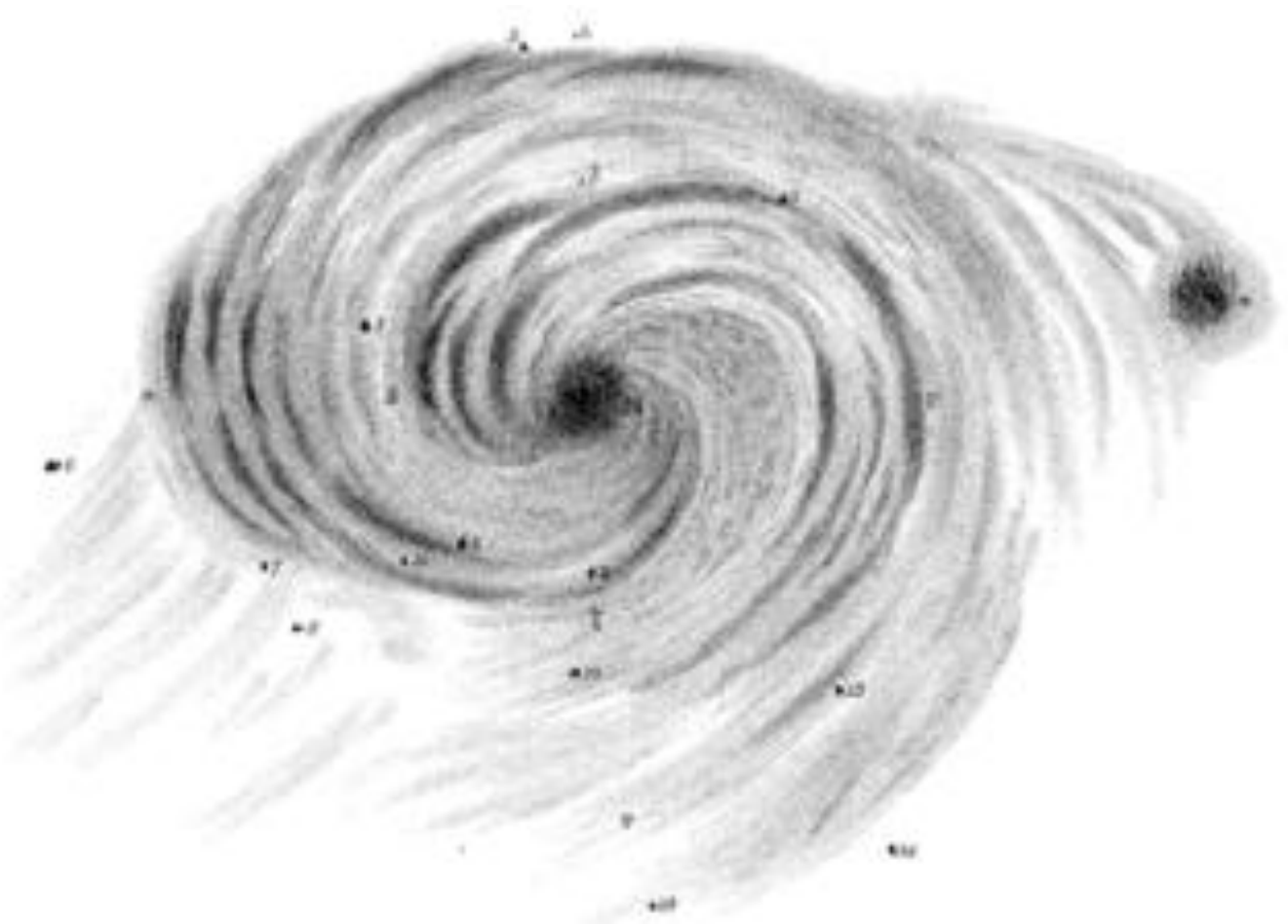


Notre Galaxie vue par William Herschel en 1785. Il supposait que le Système solaire était près du centre

La première tentative de décrire la forme de la Voie Lactée et la position du Soleil au sein de celle-ci est effectuée par William Herschel en 1785 en dénombrant les étoiles dans différentes régions du ciel. Il construit un schéma mettant le Soleil près du centre de la Voie Lactée (hypothèse fautive). Ne connaissant pas la distance des étoiles, il suppose pour élaborer son modèle quantitatif cinq hypothèses de base dont plusieurs se révéleront fausses, telles que : toutes les étoiles ont une même luminosité intrinsèque, leur distance décroît en proportion de leur magnitude apparente et absence d'extinction interstellaire.

Les autres objets nébuleux

En 1845, l'irlandais William Parsons (Lord Rosse) construit un télescope très puissant (Le Léviathan de Parsonstown) doté d'un miroir de 183 cm, qui lui permettait de différencier les galaxies elliptiques des galaxies spirales. Son instrument permet d'observer des sources de lumière distinctes dans quelques nébuleuses, ce qui conforte la conjecture de Kant.



Lord Rosse fit (en 1845) un croquis de cette nébuleuse, qui s'avèrera être la galaxie du Tourbillon ou galaxie des Chiens de Chasse (M51)

Vers la fin du XVIII^e siècle, Charles Messier établit un catalogue contenant 110 « nébuleuses », comme on appelait alors indistinctement les objets diffus observés dans le ciel. Toutes ces nébuleuses de l'époque sont aujourd'hui bien différenciées. Dans ce catalogue, désormais mondialement connu, qui va de M1 à M110, se trouvent des galaxies, des amas ouverts, des amas globulaires et des... vraies nébuleuses. Ce catalogue fut suivi d'un autre catalogue, plus grand, de 5.000 objets, établi par William Herschel. Il existe aujourd'hui un grand nombre de catalogues pour recenser les objets du ciel. John Dreyer a ensuite créé le New General Catalogue (NGC) qui recensait 7840 objets, mais il est régulièrement augmenté de nouvelles inscriptions. Les objets Messier ont souvent aussi un n° NGC. Il existe aussi un catalogue IC (Index Catalogue). Enfin d'autres catalogues, très nombreux et spécialisés sur des objets spécifiques (nébuleuses sombres, groupes de galaxies, etc.), et d'autres encore (Arp, Caldwell, Barnard, Sharpless, Melotte, Abell, UGC, etc.).



Photographie d'Isaac Roberts (1899) de la « grande nébuleuse d'Andromède », M31 ou NGC 224, qui sera plus tard appelée la galaxie d'Andromède. On y distingue également ses 2 galaxies satellites, M32 et M110.

En 1917, Heber Curtis observe la nova S Andromedæ dans la « Grande nébuleuse d'Andromède ». En analysant les archives photographiques d'Andromède, il découvre onze novas, et calcule qu'elles sont, en moyenne, 10 fois moins lumineuses que celles de la Voie Lactée. Il établit la distance des novas de la galaxie d'Andromède à 150 kpc. Il devient un partisan de la théorie des univers-îles, qui avance entre autres que les nébuleuses spirales sont des galaxies indépendantes.

En avril 1920, Harlow Shapley (1885-1972) de Harvard et Heber Curtis (1872-1942) de l'université de Pittsburgh au Smithsonian Museum engagent le Grand Débat, qui concerne la nature de la Voie Lactée, les nébuleuses spirales et la taille de l'Univers. Pour Harlow Shapley, l'univers correspondait à la Voie Lactée, et les nébuleuses (galaxies) spirales en faisaient partie. Pour Curtis, Andromède et d'autres nébuleuses constituaient des « univers-îles » indépendants de la Voie Lactée. Pour soutenir l'hypothèse que la grande nébuleuse d'Andromède est une galaxie extérieure, Curtis note la présence de bandes sombres (*dark lanes*) rappelant les nuages de poussières de la Voie Lactée, ainsi qu'un décalage de la lumière dû à l'effet Doppler-Fizeau, dont on parlera un peu plus loin, chapitre V, page 42.

Les premiers travaux quantitatifs relatifs à la structure détaillée de notre Galaxie remontent à 1918 avec Harlow Shapley. En étudiant la répartition sur la sphère céleste des amas globulaires, il parvient à l'image selon laquelle notre Galaxie est une structure symétrique de part et d'autre de son disque visible, et que son centre est situé dans la direction de la constellation du Sagittaire aux coordonnées approximatives de $17^{\text{h}} 30^{\text{m}}$, $\delta = -30^{\circ}$. Ainsi est-il établi que le Soleil ne peut être situé au centre de la Voie Lactée. Une dizaine d'années plus tard, Bertil Lindblad puis Jan Oort montrent indépendamment que les étoiles de la Voie Lactée tournent autour du centre, mais selon une rotation différentielle (c'est-à-dire que leur période orbitale dépend de leur distance au centre), et qu'un amas globulaire et certaines étoiles ne tournent pas à la même vitesse que le disque, suggérant fortement une structure en spirale.

Grâce à la résolution optique du télescope Hooker de 2,5 mètres de l'observatoire du Mont Wilson, l'astronome Edwin Hubble produit des photographies astronomiques qui montrent des étoiles individuelles dans les parties externes de quelques nébuleuses spirales. Il découvre aussi quelques céphéides, dont une dans la nébuleuse d'Andromède (M31 du catalogue de Messier) qui lui sert de repère pour estimer la distance à la nébuleuse (selon ses calculs, elle se trouve à 275 kpc du Soleil, trop éloignée pour faire partie de la Voie Lactée). Toujours dans les années 1920, il publie des articles qui rapportent l'existence d'autres galaxies. Ses travaux mettent fin au Grand Débat.

Il est important de reconnaître que certains calculs de Hubble reposent en très grande partie sur les travaux de Henrietta Swan Leavitt (1868-1921). Après de brillantes études, elle travaille à l'observatoire de l'université de Harvard. C'est elle qui a découvert la relation entre la luminosité des étoiles variables (appelées « céphéides ») et leur période de variation, ce qui a permis d'en déduire la distance. Si on évalue correctement la distance d'une céphéide située dans la galaxie d'Andromède, on peut logiquement en déduire que cette galaxie elle-même est à une distance comparable, à un faible pourcentage près (en plus ou en moins). Cette découverte est encore largement utilisée de nos jours pour évaluer certaines distances dans l'Univers. Elle fait partie des nombreuses femmes astronomes qui, du XVII^e siècle à nos jours n'ont pas bénéficié de la légitime reconnaissance scientifique de leurs travaux. Il y a pire hélas, tel le cas avéré de certains hommes indécents, abusant d'un statut hiérarchique pour spolier leurs subordonnées de découvertes capitales dont ils se sont indûment approprié tout le mérite.



Henrietta Swan Leavitt

Une des conséquences du Grand Débat est la tentative de déterminer la nature elliptique ou spirale de la Voie Lactée qui fait alors l'objet d'une quarantaine de modèles différents. Jacobus Kapteyn propose un modèle en 1920, à l'image d'une petite galaxie elliptique d'environ 15 kpc de diamètre, avec le Soleil près du centre. La mise en évidence du phénomène de rotation galactique par Jacobus Kapteyn en 1922 et celui d'extinction interstellaire par Robert Jules Trumpler en 1930 aboutissent à l'élaboration dans les années 1930 du modèle actuel de galaxie spirale avec un bulbe central. On utilisait avant le terme de « nébuleuse », qui décrivait tout objet diffus de la sphère céleste. Cette dénomination remonte à William Herschel, qui établissant son catalogue d'objets du ciel profond, utilisa le terme de « *nébuleuse spirale* » pour des objets tels que M31. Ceux-ci allaient plus tard être identifiés comme étant d'immenses agglomérations d'étoiles, et lorsque les distances entre elles commencèrent à être comprises, elles furent donc nommées « *univers-îles* ». Cependant, cette appellation tomba en désuétude au profit du terme « galaxie ».

Dans la littérature astronomique, le mot « Galaxie » muni d'un G majuscule fait référence à notre propre galaxie (la Voie Lactée), afin de la distinguer des autres galaxies.

Chapitre I – Les origines des galaxies

Un certain temps après le « Big Bang », l'Univers s'est trouvé dans un remarquable état d'homogénéité, comme le montre l'observation du fond diffus cosmologique, ou CMB (pour l'anglais *Cosmic Microwave Background*). Ses fluctuations varient en effet de moins d'une partie pour cent mille. Il n'y avait pas ou peu de structures dans l'Univers, et donc pas de galaxies. On doit alors se demander comment l'univers uniformément réparti du CMB a pu devenir l'univers agglutiné que nous voyons aujourd'hui.

La théorie la mieux acceptée concernant la façon dont ces structures sont apparues veut que toutes les structures à grande échelle de l'Univers que nous observons aujourd'hui se soient formées consécutivement à l'accroissement de la fluctuation primordiale de densité. Il s'agit d'écarts locaux et minimes de la densité de l'univers initial, alors confiné dans un volume réduit avant l'inflation. Avec l'inflation initiale puis l'expansion, l'Univers se refroidit ce qui permet l'agrégation de la matière par perte d'énergie, et donc l'entrée en jeu progressive de la gravitation. Les fluctuations primordiales ont attiré par gravitation le gaz et la matière noire vers les zones les plus denses, ce qui a engendré les graines de ce qui allait plus tard devenir des galaxies. Ces structures ont constitué les premières galaxies. À ce stade, l'Univers était presque exclusivement constitué d'hydrogène, d'hélium et de matière noire. Peu après la formation des premières protogalaxies, l'hydrogène et l'hélium gazeux dont elles étaient constituées commença à se condenser pour constituer les premières étoiles. Ainsi se formèrent les premières galaxies. En 2007, avec le télescope de l'observatoire W. M. Keck, une équipe du California Institute of Technology découvrit 6 étoiles en formation dans une galaxie située à 13,2 milliards d'années-lumière (mesure des distances en cosmologie), et donc créées lorsque l'Univers n'était âgé que de 500 millions d'années.

Les modèles cosmologiques actuels décrivant la formation de l'univers sont basés sur la théorie du Big Bang, selon laquelle l'espace-temps, et avec lui toute la matière et l'énergie composant l'univers, a jailli dans une expansion sans commune mesure, alors qu'il était comprimé à une taille infinitésimale. Environ 380 000 ans après cet événement initial que l'on appelle la nucléosynthèse primordiale, la température avait baissé suffisamment pour permettre la formation des atomes d'hydrogène et d'hélium, dans un phénomène appelé Recombinaison. Presque tout l'hydrogène était neutre (non-ionisé) et absorbait donc la lumière, les étoiles ne s'étaient pas encore formées ; pour cette raison, cette période porte le nom « d'Âge sombre ». C'est à partir des fluctuations de densité que les plus grandes structures de la matière commencèrent à se former. Des agglomérations de matière baryonique se condensèrent à l'intérieur de halos de matière noire froide. Ces structures primordiales finiront par devenir les galaxies que nous observons aujourd'hui.

Des preuves de l'apparence des galaxies primordiales ont été trouvées dès 2006 avec la découverte de la galaxie IOK-1 qui présente un décalage vers le rouge de 6,96, ce qui correspond à seulement 750 millions d'années après le Big Bang. En mars 2016, des chercheurs travaillant sur des données du télescope spatial Hubble dans le cadre du relevé GOODS découvrent la galaxie GN-z11, qui présente un décalage vers le rouge de 11,01 et observée alors que l'Univers n'avait que 400 millions d'années. GN-z11 est à ce jour l'objet le plus ancien et le plus lointain jamais observé. L'existence de telles protogalaxies suggère qu'elles ont dû se développer durant l'Âge sombre.

Dans ses premiers âges, l'Univers était le siège de phénomènes extrêmement violents, et la croissance des galaxies s'est effectuée très rapidement, évoluant par accréation de galaxies de masses inférieures. Le résultat de ce processus est l'empreinte laissée dans la distribution des galaxies de l'Univers proche. Les galaxies ne sont pas des objets isolés dans l'espace, mais se répartissent plutôt selon de grands réseaux cosmiques de filaments. Aux croisements de ces filaments se constituent des amas denses de galaxies, qui ont commencé comme de petites fluctuations de densité. En conséquence, la distribution des galaxies est étroitement liée à la physique de l'Univers primordial.

Un milliard d'années après la formation d'une galaxie, des structures clés commencent à apparaître : des amas globulaires, le trou noir supermassif central et le bulbe galactique constitué d'étoiles de population II. La création d'un trou noir supermassif semble jouer un rôle majeur car il régule activement la croissance des galaxies en limitant la quantité totale de matière ajoutée. Durant cette époque, les galaxies subissent un sursaut majeur de formation d'étoiles.

Durant les deux milliards d'années suivantes, la matière accumulée s'installe dans les disques galactiques. Les galaxies continueront d'absorber les matériaux environnants (présents dans les nuages interstellaires rapides et dans les galaxies naines) durant toute leur vie. Ces matériaux sont principalement constitués d'hydrogène (92% en nombre d'atomes ou 75% en masse) et d'hélium. Les atomes plus lourds sont produits lors de la mort des étoiles massives, ainsi leur cycle de naissance et de mort augmente lentement la quantité de matériaux lourds, ce qui peut (entre autres choses) éventuellement mener à la formation de planètes.

Malgré ses nombreuses réussites, cette image ne suffit pas à expliquer la variété des structures que nous observons parmi les galaxies. Celles-ci apparaissent avec une grande variété de formes, depuis les galaxies elliptiques arrondies et sans particularité, jusqu'aux galaxies spirales dont la forme aplatie rappelle celles de crêpes.

Les propriétés que l'on observe couramment dans les galaxies :

Parmi les caractéristiques des structures galactiques observées (y compris celles relatives à notre Voie Lactée) que les astronomes aimeraient expliquer avec les théories de formation des galaxies, se trouvent les suivantes (liste non exhaustive) :

- Les galaxies spirales et les disques galactiques sont extrêmement fins, denses et en rotation rapide. La largeur du disque de la Voie Lactée est 100 fois supérieure à son épaisseur.
- La majeure partie de la masse d'une galaxie est constituée de matière noire, une substance qui n'est pas directement observable, et qui n'interagit d'aucune façon, excepté par l'intermédiaire de la gravité.
- Les étoiles des halos sont typiquement beaucoup plus vieilles et ont une métallicité très inférieures à celles des étoiles constituant les disques galactiques (ce qui signifie qu'elles sont presque exclusivement composées d'hydrogène et d'hélium).
- La partie externe des disques de nombreuses galaxies à disque est boursoufflée (et souvent dénommée le « disque épais ») et composée de vieilles étoiles.
- Les amas globulaires typiques sont également âgés et pauvres en métaux, mais il en existe quelques-uns qui sont loin d'être aussi pauvres en métaux, et/ou qui ont de beaucoup plus jeunes étoiles qui sont probablement le fruit de collisions entre étoiles plus vieilles. La plupart des étoiles des amas globulaires paraissent aussi vieilles que l'Univers lui-même (en employant des méthodes de mesure et d'analyse complètement différentes).
- Les nuages à haute vitesse d'hydrogène neutre aspergent les galaxies, et l'on présume que c'est le cas depuis l'origine (ils correspondraient à la nécessaire source d'un disque gazeux à partir duquel les étoiles se sont formées).
- Les galaxies affectent un grand nombre de formes et de dimensions (voir la séquence de Hubble depuis le nuage géant anodin, constitué de vieilles étoiles (appelé galaxie elliptique) jusqu'au fin disque de gaz et d'étoiles ordonné avec précision dans des galaxies spirales).
- Le centre de la majorité des galaxies géantes contient un trou noir, dont la masse s'étage depuis des millions jusqu'à des milliards de fois celle du Soleil. L'existence d'un tel trou noir est liée aux capacités de la galaxie de l'héberger. C'est ce trou noir supermassif qui assure l'équilibre gravitationnel de la galaxie.
- Nombre des propriétés des galaxies (y compris celles du diagramme couleur-magnitude des galaxies) indiquent qu'elles se répartissent fondamentalement en deux types divisés ainsi :
 - Les galaxies bleues, riches d'étoiles en formation, qui sont plutôt de type spirale,
 - Les galaxies rouges sans formation d'étoiles qui sont le plus souvent des galaxies elliptiques ou lenticulaires.

La formation des galaxies spirales

Les propriétés capitales des galaxies à disque, également couramment désignées galaxies spirales, consistent en leur extrême finesse, leur rotation rapide et leur fréquente structure spiralée. Un des principaux défis de la formation des galaxies est le grand nombre des disques fins dans l'univers local. Le problème de l'extrême fragilité des disques fait que la fusion fréquente entre les galaxies peut rapidement amener à la disparition des disques. Ces fusions peuvent prendre des centaines de millions d'années, voire quelques milliards d'années.



M101, ou NGC 5457 ou « galaxie du Moulinet », un prototype de galaxie spirale vue de face, à 22,8 millions d'années-lumière dans la constellation de la Grande ourse

Olin Eggen, Donald Lynden-Bell et Allan Sandage ont proposé en 1962 une théorie selon laquelle les galaxies à disques se forment par un effondrement monolithique de grands nuages de gaz. Lorsque le nuage s'effondre, le gaz s'établit sous la forme d'un disque en rotation rapide. Connue comme un scénario de formation vers le bas, cette théorie est assez simple, mais n'est plus aussi largement acceptée à cause des observations de l'Univers jeune qui suggèrent avec force que lors de leur formation, la croissance des objets se déroule vers le haut (c'est-à-dire que de petits objets fusionnent pour en donner de plus gros). Ce sont Leonard Searle et Robert Zinn qui les premiers ont proposé l'idée que les galaxies se soient formées par la coalescence de géniteurs de tailles inférieures.

Des théories plus récentes incluent l'agglomération de halos de matière noire dans le processus ascendant. Essentiellement, dans les premiers âges de l'Univers, les galaxies étaient surtout composées de gaz et de matière noire, et il y avait ainsi très peu d'étoiles. Comme les galaxies ont gagné de la masse en accrétant de plus petites galaxies, la matière noire est demeurée principalement dans leur partie externe. C'est parce que la matière noire ne peut interagir que gravitationnellement, et de ce fait ne se dissipe pas. Le gaz cependant peut se contracter rapidement, et de ce fait entrer en rotation accélérée, jusqu'au résultat final d'un disque très fin et en rotation très rapide.

Les astronomes ne connaissent pas actuellement la nature du processus qui arrête la contraction. En fait les théories de formation des galaxies à disque ne réussissent pas à reproduire la vitesse de rotation et la taille des disques de galaxies. On a suggéré que le rayonnement provenant d'étoiles brillantes de formation récente, ou bien d'un noyau actif de galaxie, pouvait ralentir la contraction d'un disque en formation. On a aussi suggéré que le halo de matière noire peut étirer la galaxie, arrêtant ainsi la contraction.

Récemment, un grand nombre d'initiatives ont convergé pour tenter de comprendre les événements de fusion dans l'évolution des galaxies. Notre propre galaxie, la Voie Lactée a une petite galaxie satellite (la Galaxie naine elliptique du Sagittaire), actuellement en cours de dépeçage et d'absorption par la Voie Lactée. On pense que ce genre d'évènement est relativement courant dans l'évolution des grandes galaxies. La Galaxie Naine du Sagittaire orbite autour de la nôtre pratiquement à angle droit par rapport au disque. Elle traverse actuellement ce disque ; des étoiles des deux galaxies sont en train d'en être arrachées à chaque passage, et elles rejoignent le halo de notre galaxie. Il existe d'autres exemples de ces événements mineurs d'accrétion, et c'est vraisemblablement un processus continu pour de nombreuses galaxies. Des preuves de ce processus sont souvent observés sous la forme de bandes ou de courants d'étoiles s'extrayant des galaxies.

Le modèle de formation de galaxies Lambda-CDM fournit des prédictions insuffisantes pour les disques fins de galaxies dans l'Univers. La raison en est que ces modèles de formations de galaxies prédisent un grand nombre de fusions. Si une galaxie à disque fusionne avec une galaxie de masse comparable (au moins 15 % de sa propre masse), la fusion va vraisemblablement détruire, ou au moins considérablement détériorer le disque, en sorte que la galaxie résultante aura peu de chance d'être munie d'un disque. Bien que ce point demeure un problème en souffrance pour les astronomes, il ne signifie pas nécessairement que ce modèle Λ CDM soit complètement erroné. Il nécessite plus probablement d'être encore affiné, permettant de reproduire avec précision la population des galaxies observées dans l'Univers.

Les fusions de galaxies peuvent former, déformer et modifier leur aspect

Les galaxies les plus massives sont les galaxies elliptiques géantes. Leurs étoiles sont sur des orbites orientées de façon aléatoire à l'intérieur de la galaxie. C'est-à-dire que leur rotation n'est pas combinée avec celle du disque de la galaxie. Elles se composent de vieilles étoiles et ne comportent pas ou très peu de poussière. Toutes les galaxies elliptiques trouvées à ce jour recèlent un trou noir supermassif central, et la masse de ces trous noirs est en corrélation avec celle de la galaxie elliptique. Les galaxies elliptiques ne sont pas entourées d'un disque, bien que quelques bulbes de galaxies à disque paraissent les assimiler aux galaxies elliptiques. Il est plus vraisemblable de trouver des galaxies elliptiques dans les régions les plus peuplées de l'Univers, telles que les amas de galaxies.

Les astronomes voient maintenant les galaxies elliptiques comme les systèmes les plus évolués de l'Univers. Que le moteur principal de l'évolution des galaxies elliptiques soit la fusion avec des galaxies de tailles inférieures est une idée maintenant largement acceptée. Ces fusions peuvent être extrêmement violentes ; les galaxies se télescopent souvent à des vitesses de 500 km/s (soit de l'ordre de 1,8 million de km/h).



La galaxie spirale ESO 510-G13, déformée par la collision avec une autre galaxie. Après absorption complète, la déformation disparaîtra. Ce type de processus prend des millions sinon des milliards d'années.



Les Galaxies des Antennes, NGC 4038 et 4039 (ici en gros-plan) sont une paire de galaxies en collision spectaculaire dans la constellation du Corbeau. Dans ce genre de collision, les étoiles de chacune des galaxies passent près les unes des autres (virtuellement) sans incident. Ceci est dû aux distances interstellaires relativement grandes, en comparaison avec la taille individuelle relativement petite des étoiles. Cependant des nuages de gaz diffus entrent réellement en collision, et produisent des chocs qui à leur tour stimulent des flambées de formation de nouvelles étoiles. Les nœuds bleu vif indiquent les jeunes étoiles chaudes qui se sont allumées récemment, à la suite de la fusion.

Dans l'Univers, de nombreuses galaxies sont gravitationnellement liées à une autre, c'est-à-dire qu'elles n'échapperont jamais à leur attraction réciproque. Si les deux galaxies ont des tailles comparables, la galaxie résultante ne sera comparable à aucune des galaxies initiales. L'image ci-dessus représente la fusion de deux galaxies à disques d'égales dimensions. Durant la fusion, les étoiles et la matière noire de chacune des galaxies sont affectées par l'autre galaxie en approche. Vers les derniers stades de la fusion, le potentiel gravitationnel, la forme des galaxies, commence à changer si rapidement que les orbites des étoiles en sont profondément affectées et qu'elles perdent tout lien avec leurs orbites antérieures. Ce processus est dénommé la *relaxation violente*. Ainsi, lorsque deux disques galactiques entrent en collision, leurs étoiles ont d'abord une rotation ordonnée dans le plan de leurs disques respectifs. Durant la fusion, ce mouvement ordonné est transformé en

énergie chaotique : la galaxie résultante est dominée par des étoiles qui orbitent selon un réseau de trajectoires complexes et désordonnées. Et ce sont bien des étoiles sur des orbites chaotiques et désordonnées que l'on voit dans les galaxies elliptiques.

Les fusions sont aussi le lieu d'un nombre extrêmement important de formation d'étoiles. Pendant la durée d'une fusion, certaines galaxies peuvent créer chaque année l'équivalent de plusieurs centaines de masses solaires de nouvelles étoiles, ce qui est très grand en comparaison de notre galaxie qui n'en produit qu'une quantité de l'ordre de 10 étoiles chaque année. Bien que pendant une fusion, les étoiles ne se rapprochent presque jamais suffisamment pour entrer en collision, les nuages moléculaires géants tombent rapidement vers le centre de la galaxie où ils entrent en collision avec d'autres nuages moléculaires. Ces collisions induisent alors la condensation de ces nuages en nouvelles étoiles. On observe ce phénomène de fusion de galaxies dans l'Univers proche. Mais ce processus était plus prononcé pendant les fusions qui ont formé la plupart des galaxies elliptiques que nous observons aujourd'hui, ce qui s'est vraisemblablement produit il y a de 1 à 10 milliards d'années, lorsqu'il y avait beaucoup plus de gaz, et donc plus de nuages moléculaires contenus dans les galaxies. Également, à l'écart du centre de la galaxie, les nuages de gaz s'élancent l'un vers l'autre, produisant des chocs qui stimulent la formation de nouvelles étoiles dans les nuages de gaz. Le résultat de tous ces événements violents se traduit par la tendance des galaxies vers une moindre quantité de gaz disponible pour la formation d'étoiles après leur fusion. Ainsi, si une galaxie s'est impliquée dans une fusion importante, après quelques milliards d'années il ne restera que très peu d'étoiles jeunes dans cette galaxie. C'est bien ce que nous voyons aujourd'hui dans les galaxies elliptiques actuelles : très peu de gaz moléculaire et très peu de jeunes étoiles. On pense que c'est dû au fait que les galaxies elliptiques représentent le produit final des fusions majeures ayant consommé la plus grande partie du gaz initial lors des fusions, en sorte que toute formation d'étoiles postérieure à la fusion est tarie.

Dans le Groupe Local, la Voie Lactée et la Galaxie d'Andromède (M31) sont liées gravitationnellement. Elles s'approchent actuellement l'une de l'autre à grande vitesse. Si les deux galaxies se rencontrent effectivement, chacune passera à travers l'autre. La gravité leur apportera à toutes deux de sévères déformations, et elles éjecteront du gaz, de la poussière et des étoiles dans l'espace intergalactique. Elles s'éloigneront alors l'une de l'autre, ralentiront et s'élançeront à nouveau l'une vers l'autre pour une nouvelle collision. Finalement, après répétition d'un nombre variable de ces épisodes, elles fusionneront complètement, à l'exception de quelques bandes de gaz et de poussières qui flotteront dans l'espace proche de la galaxie elliptique géante nouvellement formée. M31 est réellement très distortue : les bords sont gondolés. C'est probablement dû aux interactions avec ses propres compagnons galactiques, ainsi qu'à des fusions possibles avec des galaxies naines de formes sphéroïdales dans un passé récent, dont les rémanents sont encore visibles dans le disque de la galaxie.

À notre époque, de grandes concentrations de galaxies (amas de galaxies et superamas) sont encore en cours d'assemblage.

Bien que nous ayons appris énormément de choses sur notre galaxie et sur les autres, la question la plus fondamentale sur la formation et l'évolution des galaxies n'a encore reçu que des tentatives de réponses.

Il existe cependant plusieurs modèles de formation des galaxies

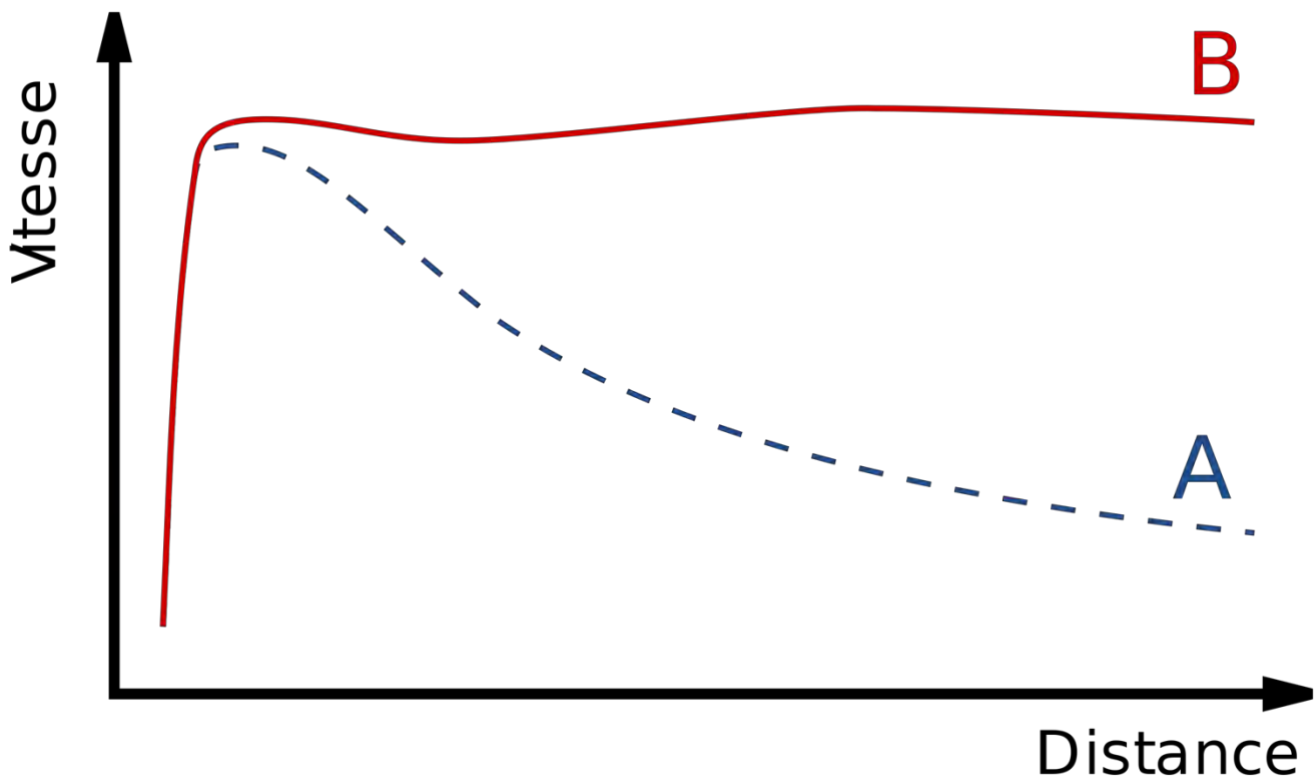
Le modèle des protogalaxies est souvent admis comme le modèle classique de la formation des galaxies. Il stipule que, dans les débuts de l'univers, les gaz étaient répartis à peu près équitablement dans l'espace jusqu'à ce que ces gaz commencent à s'effondrer en étoiles qui atteignaient régulièrement les 200 masses solaires. Ces étoiles se sont ensuite rassemblées en petits groupes sous l'effet de leur propre gravité, puis en plus grands groupes, puis en groupes encore plus grands et ainsi de suite jusqu'à former des galaxies.

Un modèle beaucoup plus récent, **le modèle des courants froids**, dit lui aussi que les gaz étaient répartis de manière uniforme, mais que la matière s'est rassemblée en courants froids convergeant vers des grumeaux plus denses. Certains de ces grumeaux se sont agglomérés, formant de gigantesques amas, d'où l'origine des galaxies elliptiques. D'autres sont encore en orbite autour de ces amas. Pendant leurs étoiles tout en se dirigeant vers ces agglomérations, ils ont formé des bras spiraux.

La rotation des galaxies et des étoiles dans les galaxies

Un graphique représentant la vitesse de rotation de la matière en fonction de la distance entre celle-ci et le centre galactique peut prendre deux formes, la courbe plate B étant la plus répandue. Analysons de plus près les formes des courbes de rotation. L'article cité en donne un grand nombre.

Près du centre galactique, la vitesse est proportionnelle à la distance au centre galactique. La vitesse angulaire de rotation est donc constante comme dans un solide. La courbe devient ensuite parabolique, ce qui correspond à une densité de masse d'étoiles constante. Après le maximum, la courbe est généralement plate, la densité d'étoiles est décroissante. Enfin, très loin du centre galactique où la densité d'étoiles est très faible, on retrouve les lois de Kepler, qui ne peuvent être vérifiées qu'en présence d'étoiles suffisamment lumineuses faisant partie de la galaxie en question.



La courbe de rotation prévue par les équations de Newton (A) et la courbe observée (B), en fonction de la distance au centre de la galaxie.

Ce n'est qu'une quarantaine d'années plus tard, dans les années 1970, que la question de l'existence de cette matière manquante, que l'on nommera « matière noire » ou « matière sombre », (*dark matter* en anglais), refait surface. À partir de l'analyse des spectres des galaxies, l'astronome américaine **Vera Rubin** étudia la rotation des galaxies spirales. Le problème est le même que celui de la comparaison entre la masse dynamique et la masse lumineuse des amas de galaxies. Il s'agit de savoir si la « masse lumineuse », c'est-à-dire la masse visible, qui est déduite de la présence des étoiles, est bien égale (à quelques corrections près) à la masse dynamique.

La masse dynamique est normalement la seule masse véritable, puisqu'il s'agit d'une mesure de la masse déduite de son influence gravitationnelle. Pour mesurer la masse lumineuse, il faut faire l'hypothèse que toute la masse de la galaxie (ou de l'amas de galaxies) est constituée d'étoiles. Ces étoiles rayonnent, et si leur distribution est connue (masse, nombre, âge, etc.), l'infrarouge proche est un bon « traceur » de masse (il est peu sensible au fort rayonnement des étoiles massives et permet de détecter l'émission des étoiles moins massives dont le spectre possède des "pics" dans l'optique et dans l'infrarouge). Mais l'infrarouge proche est à la limite d'opacité de l'atmosphère, et il faut attendre le télescope Subaru mis en service en 1999 à Hawaï pour le détecter avec une précision suffisante.

En analysant le spectre des galaxies spirales vues par la tranche, comme la galaxie d'Andromède, il est possible d'en déduire la courbe de rotation. Décrivant la vitesse de rotation de la galaxie en fonction de la distance au centre, c'est une mesure directe de la distribution globale de matière dans la galaxie. La vitesse maximale de rotation d'une galaxie spirale se trouve à quelques kiloparsecs du centre, puis elle est censée décroître, en suivant une décroissance keplérienne. En effet, les étoiles à la périphérie de la galaxie sont en orbite autour du centre, de la même manière que les planètes sont en orbite autour du Soleil. Les étoiles en périphérie de la galaxie ont une vitesse orbitale inférieure à celles qui sont situées plus près de son centre. La courbe de rotation, après un maximum, se met à redescendre.

Or, Vera Rubin a observé que les étoiles situées à la périphérie de la galaxie d'Andromède, comme pour d'autres galaxies spirales, semblent tourner trop vite (les vitesses restaient pratiquement constantes au fur et à mesure que l'on s'éloignait du centre). La courbe de rotation des galaxies spirales, ou en tous cas de certaines d'entre elles, était plate. De nombreuses autres observations similaires sont effectuées dans les années 1980, venant renforcer celles de Vera Rubin. Cette observation pose de profondes questions, car la courbe de rotation mesure bien la masse dynamique. Aucune hypothèse au sujet de l'âge, de la distribution de masse des étoiles n'est nécessaire. La seule supposition est que les étoiles, sources de la lumière qui forme le spectre analysé, sont bien des traceurs de la masse de la galaxie, mais ces étoiles ne semblent pas obéir aux lois de la gravitation.

Une explication possible est d'imaginer l'existence d'un gigantesque halo de matière non visible entourant les galaxies ; un halo qui représenterait jusqu'à près de 90 % de la masse totale de la galaxie, voire plus dans certaines galaxies naines. Dans les 2 000 galaxies qu'ont cartographiées l'astronome canadienne Catherine Heymans et sa partenaire Megan Gray, seulement 10 % sont composées de gaz surchauffés et 3 % seulement de matière visible. Le reste était de la matière noire. Ainsi toutes les étoiles se trouvent presque au centre de l'extension véritable de la « galaxie » (cette fois-ci composée de la galaxie visible et du halo de matière sombre), et tournent donc normalement. Cela revient à dire que les étoiles, même celles à la périphérie visible de la galaxie, ne sont pas « assez loin » du centre pour être dans la partie descendante de la courbe de rotation. Personne n'a jamais observé cette matière noire.

La présence de matière noire est l'une des explications possibles. En effet, les astronomes pensent que les galaxies contiennent des astres très peu lumineux (comme les naines brunes, naines blanches, trous noirs, étoiles à neutrons) qui peuvent constituer une partie importante de la masse totale de la galaxie, mais qui ne sont pas visibles avec les instruments optiques habituels. Avec la mesure de la courbe de rotation plate le plus loin possible du centre, l'observation des galaxies spirales dans d'autres longueurs d'onde (afin de mieux caractériser la présence d'objets peu lumineux dans le domaine visible) sont un des efforts majeurs de l'astronomie pour étudier le problème.

La présence de matière noire serait une explication au fait que les vitesses de rotation des étoiles se trouvant loin du cœur de leur galaxie est beaucoup plus rapide que ne le prédisent les lois de Newton, qui sont pourtant exactes et vérifiées ailleurs, (*voir sur le schéma de la page précédente*).

D'après des résultats publiés en août 2006, de la matière noire aurait été observée distinctement de la matière ordinaire grâce à l'observation de l'amas de la Balle, constitué de deux amas voisins qui sont entrés en collision il y a environ 150 millions d'années. Les astronomes ont analysé l'effet de mirage gravitationnel afin de déterminer la distribution totale de masse dans la paire d'amas et ont comparé cette distribution avec celle de la matière ordinaire telle que donnée par l'observation directe des émissions de rayons X en provenance du gaz extrêmement chaud des amas, dont on pense qu'il constitue la majorité de la matière ordinaire (baryonique) des amas. La température très élevée du gaz est due précisément à la collision au cours de laquelle la matière ordinaire interagit entre les deux amas et est ralentie dans son mouvement. La matière noire quant à elle n'aurait pas interagi, ou très peu, ce qui explique sa position différente dans les amas après la collision.

La preuve de l'existence de la matière noire serait cependant apportée soit par une observation directe de l'interaction de particules de matière noire avec des détecteurs terrestres (tels les projets CDMS (*Cryogenic Dark Matter Search*), XENON ou WARP (WIMP Argon Programme), soit par la création de telles particules dans un accélérateur, comme au Grand collisionneur de hadrons (LHC). Ce type de mise en évidence aurait l'avantage de déterminer précisément la masse de ces particules et d'analyser en profondeur la forme de leurs interactions.

Toutefois, le 17 décembre 2009, deux conférences tenues à l'université Stanford et au Fermilab laissent entendre que la détection présumée de deux particules de matière noire, encore appelées « Wimps », par le détecteur du CDMS n'est pas significative. En 2011, l'expérience européenne EDELWEISS du laboratoire souterrain de Modane a annoncé que deux sur cinq signaux observés pourraient marquer le passage de particules de matière noire à travers ses détecteurs : « bien qu'aussi lourde que 10 à 10 000 protons, la matière noire traverse la matière aussi discrètement qu'un neutrino de masse quasi nulle. ». Le spectromètre AMS, installé sur la Station spatiale internationale, a fourni ses premiers résultats sur la question de la matière noire en 2013. Il a notamment détecté un excès d'antiprotons qui serait explicable par certains modèles de matière noire.

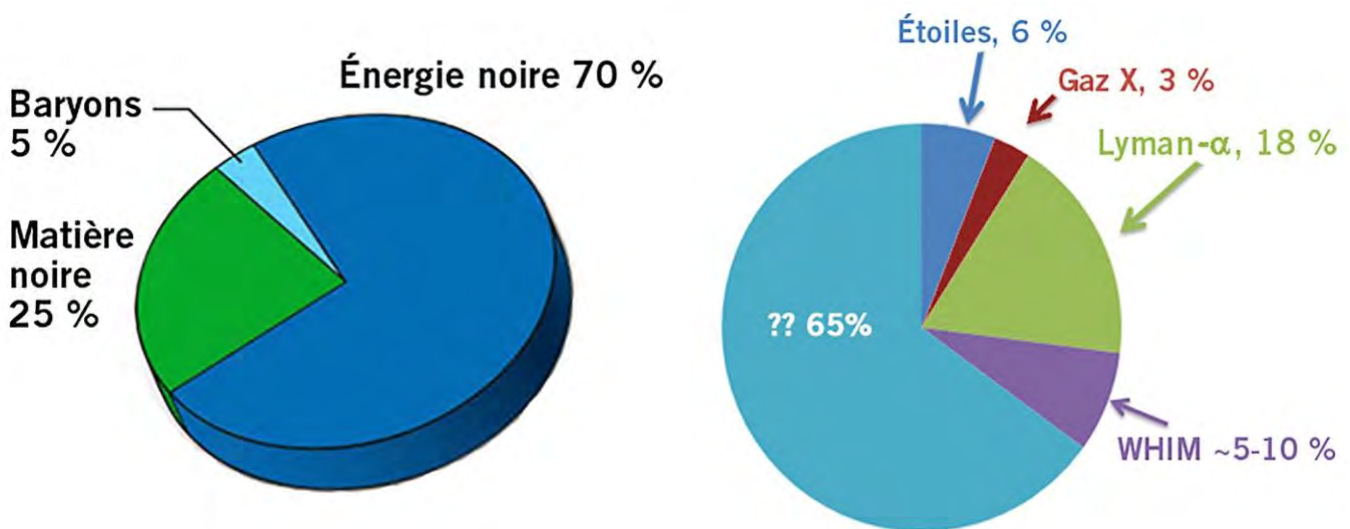
En novembre 2013, l'expérience LUX (*Large Underground Xenon*) s'est terminée sans avoir pu détecter de matière noire. Si les résultats de cette expérience n'invalident pas l'existence de la matière noire, la sensibilité de ses détecteurs pose une limite supérieure plus basse que les autres sur la section efficace de la matière noire.

En juillet 2018, les analyses du satellite Planck confirment cependant un modèle cosmologique où la matière ordinaire que nous connaissons ne représenterait que 4,9 % de l'Univers. Voir ci-après...

Totalité des composants dans l'Univers

Ceci n'est qu'une théorie, mais elle est supportée par un grand nombre d'astrophysiciens. En effet, en dehors de la matière « baryonique » (**la seule « visible »** dans plusieurs longueurs d'onde) qui ne compte que pour 5 % du total, il y aurait de la matière noire (ou sombre) pour 25 à 26 %, essentiellement dans les halos des galaxies et surtout de « l'énergie sombre » pour 69 à 70 % du reste.

Cette « énergie sombre » serait essentiellement présente dans l'Univers plutôt lointain, entre les galaxies et les amas de galaxies, et elle pourrait expliquer (entre autres) les phénomènes d'expansion de l'Univers et de l'accélération de l'éloignement des galaxies les unes par rapport aux autres (à l'exception du cas particulier des amas de galaxies, où celles-ci ont tendance, localement, à se rapprocher les unes des autres).



*Composition de l'Univers d'après les dernières déterminations de la mission Planck (à gauche).
 Détail de la matière ordinaire, les 5 % de baryons (à droite).*

Les étoiles des galaxies ne correspondent qu'à 6 % des baryons et le gaz très chaud dans les amas à 3 %. L'étude des absorbants dans la raie Lyman- α de l'hydrogène montre qu'environ 18 % d'entre eux pourraient se trouver sous forme de gaz ionisé dans les filaments cosmiques intergalactiques. On pense aussi qu'une grande partie des baryons pourrait se trouver dans un état tiède ou chaud (WHIM pour warm-hot intergalactic medium). Plus de la moitié est encore inconnue et devrait se trouver sous forme de gaz chaud ou froid.

Chapitre II – Qu'est-ce qu'une galaxie, quel est leur nombre ?

Rappelons qu'une **galaxie** est un ensemble d'étoiles, de gaz, de poussières, de vide et peut-être de matière noire, contenant souvent un trou noir supermassif en son centre.

La Voie Lactée, la galaxie dans laquelle se trouve le Système solaire, compte quelques centaines de milliards d'étoiles (10^{11}) et a une extension de l'ordre de 80.000 à 100.000 années-lumière. Un rapport de la mission spatiale européenne Gaia a rendu publique, le 25 avril 2018, la position de 1 692 919 135 étoiles de notre galaxie, ce qui représente moins de 1 % de la totalité des étoiles présentes dans notre galaxie. La plupart des galaxies typiques comportent un nombre similaire d'astres, mais il existe aussi des galaxies naines comptant à peu près une dizaine de milliards d'étoiles (10^{10}), et des galaxies géantes comptant plusieurs milliers de milliards d'étoiles (10^{12}). **Sur la base de ces chiffres et de la taille de l'Univers observable, on estime que celui-ci compte de 200 à 400 milliards de galaxies de masse significative.** La population de galaxies naines est cependant très difficile à déterminer, du fait de leur petite masse et de leur luminosité très faible. **Il pourrait donc contenir jusqu'à 2.000 milliards de galaxies**, mais cela ne pourra être confirmé qu'avec les observations des futurs télescopes, tels le Télescope géant européen (l'ELT de 39 mètres au Chili) ou le TMT (Thirty Meter Telescope), télescope américain de 30 mètres, en construction à Hawaï.

Les galaxies, en tant que systèmes stellaires de grande taille, ont été mises en évidence dans le courant des années 1920, principalement par l'astronome américain Edwin Hubble, bien que des premières données indiquant ce fait remontent à 1914. Les galaxies sont de trois types morphologiques principaux : elliptiques, spirales, irrégulières. Une description plus étendue des types de galaxies a été donnée à la même époque par Hubble et est depuis nommée séquence de Hubble.

Même si la très grande majorité des étoiles sont situées dans les galaxies, toutes ne le sont pas. S'il semble établi que c'est au sein des galaxies que se forment les étoiles, celles-ci sont susceptibles d'en être expulsées, soit du fait d'interactions entre galaxies, soit du fait de rencontres rapprochées entre une étoile et un astre très massif, tel un trou noir supermassif situé au centre d'une galaxie. On observe ainsi certaines étoiles dotées d'une vitesse élevée par rapport à leur galaxie, signe qu'elles n'y sont plus liées gravitationnellement. De telles étoiles sont de ce fait appelées « étoiles en fuite ». Plusieurs représentantes de cette classe sont connues, telles SDSS J090745.0+024507 et GRO J1655-40, toutes deux en train de quitter la Voie Lactée. La première est probablement issue d'une rencontre rapprochée avec le trou noir central de notre galaxie, Sgr A*, la seconde est sans doute issue d'une supernova asymétrique dont le résidu compact a été expulsé de la région où l'explosion a eu lieu.



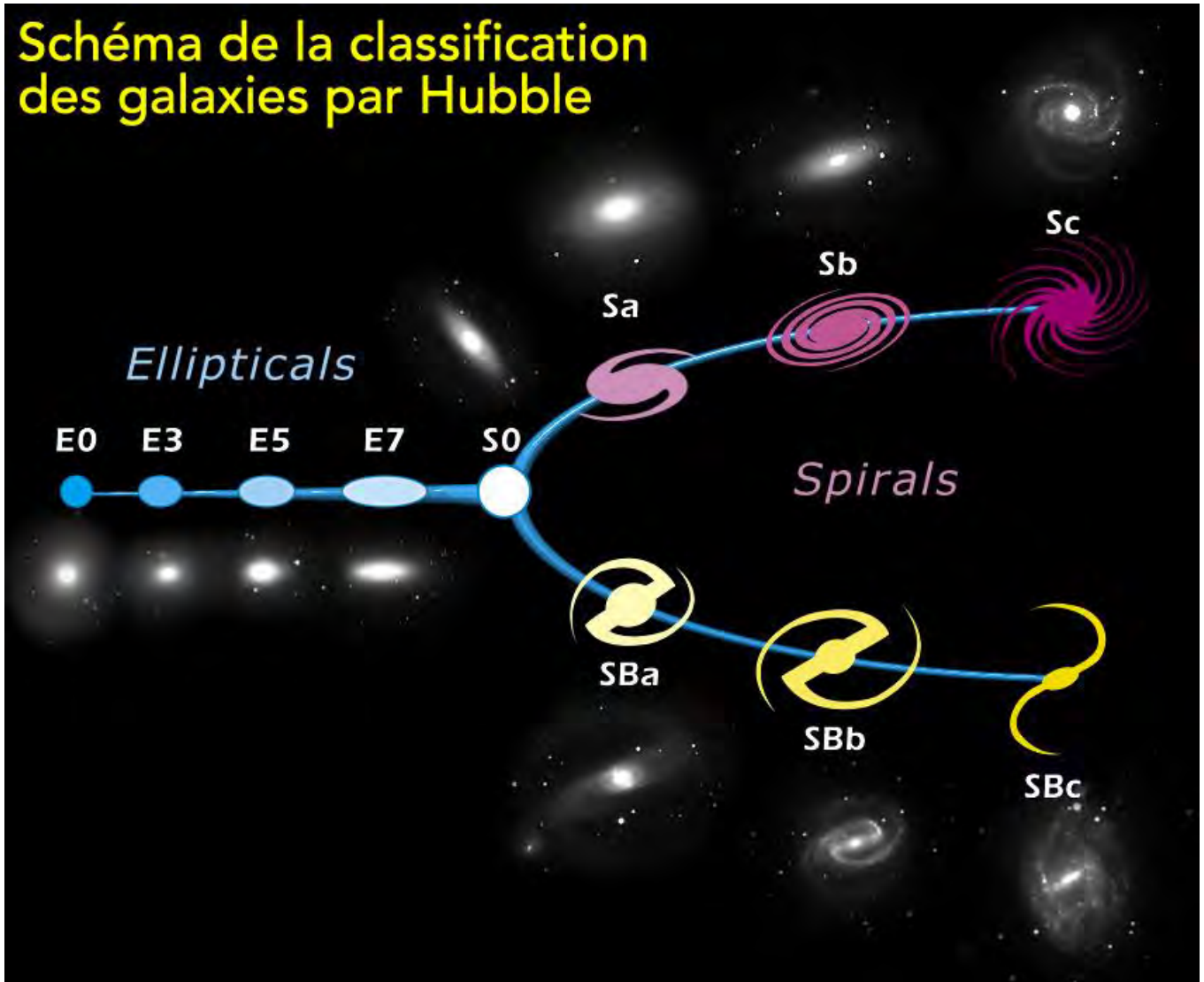
La galaxie spirale du Tourbillon (en anglais Whirlpool galaxy), M51, ou NGC 5194, située dans la constellation des Chiens de Chasse, et son compagnon, la galaxie irrégulière NGC 5195

Chapitre III – Quels types de galaxie, leur morphologie ?

Il existe plusieurs types de galaxies, dont certains ont déjà été mentionnés dans les pages précédentes.

Classification des galaxies de Hubble

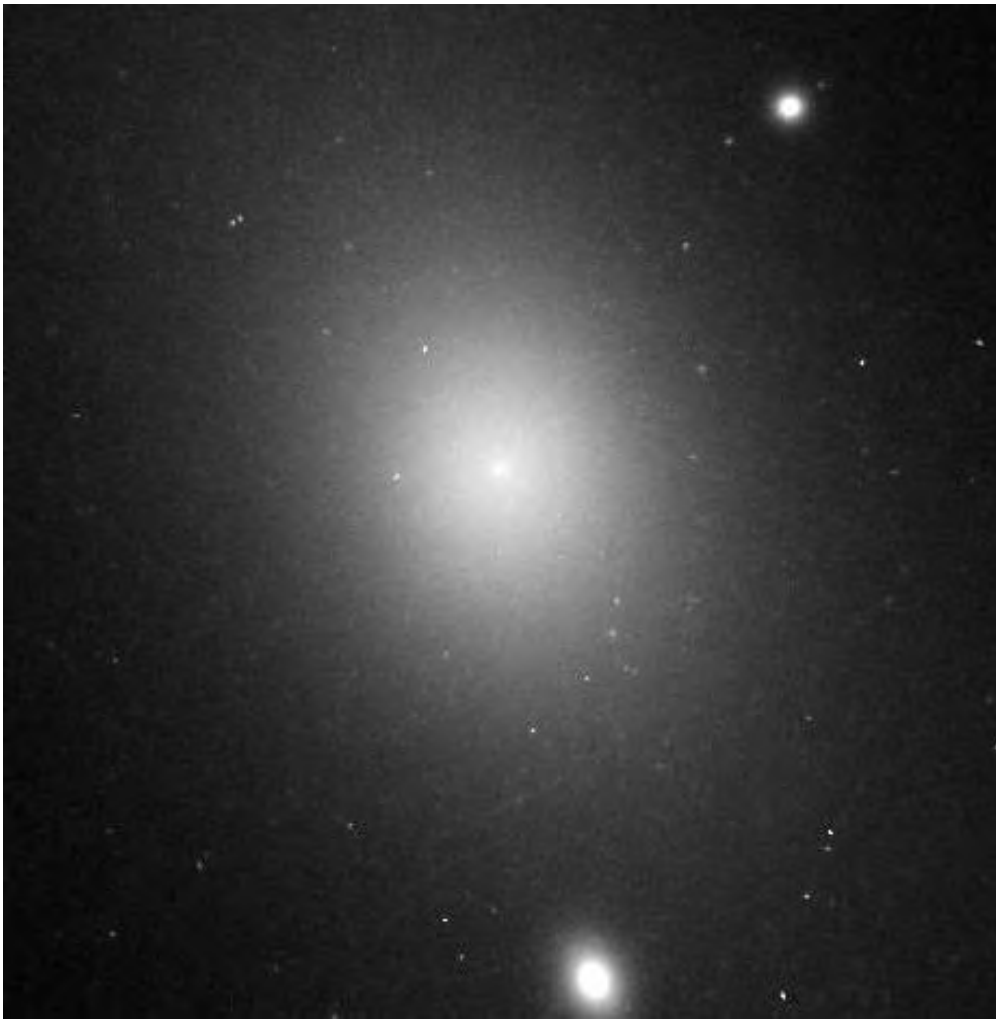
Même si ce n'est que partiellement vrai, on estime que celui qui a « inventé » la notion de galaxie est Edwin Hubble, vers 1926. Il a bien noté différents types de galaxies, en s'attachant simplement à leurs formes apparentes. Il a même créé en 1936 un schéma des différents types de galaxies alors observées.



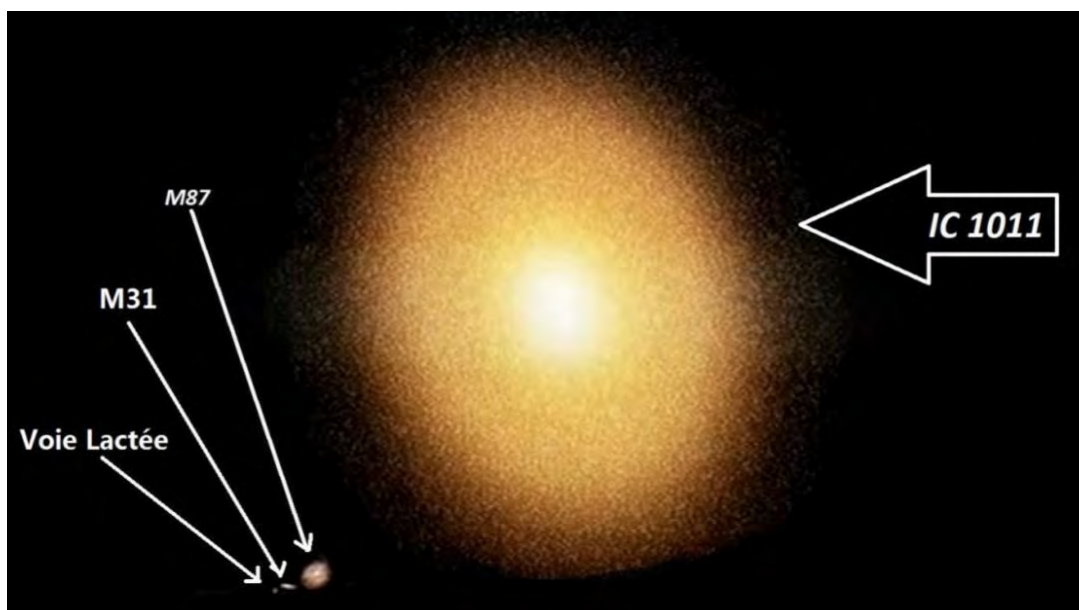
Dans ce schéma de Hubble on voit bien des galaxies elliptiques (à gauche) et des galaxies spirales dans les 2 branches de droite, distinguant ainsi les galaxies spirales « normales » (en haut) et les galaxies « spirales barrées » (en bas).

À gauche du schéma classique représentant la séquence de Hubble se trouvent les galaxies elliptiques. Ces galaxies présentent une distribution douce des sources lumineuses, régulière et dépourvue de motifs quelconques et ont, comme leur nom l'indique, la forme d'une ellipse. Elles sont notées de la lettre E, suivie d'un nombre n représentant leur degrés d'excentricité apparent. Conventionnellement, n vaut dix fois l'ellipticité de la galaxie, arrondie à l'unité ; l'ellipticité pouvant être définie comme $e = 1 - (a/b)$, où a et b sont respectivement la longueur du petit et du grand axe de l'ellipse considérée. Cependant, l'ellipticité observée d'une galaxie dépend de son orientation dans les trois dimensions. En effet, les galaxies elliptiques ont une structure ellipsoïdale. Conformément aux observations, les galaxies les plus excentriques tracent des ellipses dont $e = 0,7$ (notée E7).

Exemples de galaxies elliptiques : M49, M59, M60, M87, NGC 4125, IC 1101



La galaxie elliptique IC 1101, située à plus d'un milliard d'années-lumière du Soleil, vers la constellation du Serpent. C'est la plus grande galaxie actuellement connue dans l'Univers. Elle s'éloigne de nous à environ 23.300 km/s. Elle abrite plus de 100.000 milliards d'étoiles, son diamètre est de 6 millions d'années-lumière (60 fois celui de la Voie Lactée). Le trou noir supermassif en son centre a une masse comprise entre 40 et 100 milliards de masses solaires).



Comparaison de la taille de IC 1101 avec, en bas et en partant de la gauche : la Voie Lactée (un point), M31 la galaxie d'Andromède et M87 qui est une galaxie déjà énorme (6 à 8 fois la Voie Lactée).



Les deux galaxies naines irrégulières, nommées les Nuages de Magellan. À gauche le Petit Nuage de Magellan, à environ 197.000 années-lumière du Soleil, à droite le Grand Nuage de Magellan à environ 157.000 années-lumière du Soleil. On ne les voit très bien, à l'œil nu, que dans l'hémisphère sud.

Sur le schéma (page 15), à droite, la séquence de Hubble se divise en deux branches qui représentent les galaxies spirales. Une galaxie spirale consiste en un disque aplati constitué d'une structure en spirale avec des bras, où de nombreuses étoiles se forment, et d'un bulbe central. Environ une galaxie spirale sur deux possède aussi une barre centrale qui s'étend à partir du bulbe central, à partir de laquelle les bras commencent. De telles galaxies sont définies comme « spirales barrées ».

Dans le diagramme de Hubble, les galaxies spirales régulières occupent la branche supérieure et sont notées **S**, tandis que la branche inférieure est occupée par les galaxies spirales barrées, notées **SB**. Ces deux types sont ensuite subdivisés en fonction de l'apparence de leur structure en spirale. Ces subdivisions sont notées d'une lettre minuscule suivant la dénomination principale comme suit :

- Sa (SBa) : des bras diffus et très resserrés, un noyau étendu et lumineux ;
- Sb (SBb) : les bras sont moins enroulés que ceux des Sa, et le bulbe est relativement plus faible ;
- Sc (SBc) : les bras sont étendus et lâches, permettant de résoudre des amas stellaires et des nébuleuses en leur sein, le bulbe perd encore en importance par rapport à la catégorie précédente.

À ces trois classes élaborées par Edwin Hubble s'ajoute une quatrième établie par le schéma de classification étendu de Gérard de Vaucouleurs :

- Sd (SBd) : des bras très faiblement enroulés et fragmentaires, la majorité de la lumière provient des bras et non plus du bulbe.

Bien qu'il fasse exclusivement partie du système de classification de Vaucouleurs, la catégorie Sd est souvent incluse dans la séquence de Hubble. Ces classes fondamentales de spirales peuvent encore être étendues en fonction de paramètres encore plus fins. Par exemple, une galaxie spirale à l'apparence intermédiaire se situe entre deux catégories et recevra deux lettres minuscules au lieu d'une (par exemple, une galaxie Sbc se place entre une galaxie Sb et Sc). Notre galaxie est généralement classée dans la classe SBb, ce qui en fait une galaxie spirale barrée avec des bras bien définis. Cependant, cette classification est approximative, dans la mesure où nous ne pouvons pas observer notre galaxie depuis l'extérieur.

Exemples de galaxies spirales régulières : Galaxie d'Andromède (M31), M74, M81, Galaxie du Tourbillon (M51), NGC 300, NGC 772



La galaxie spirale M74, ou NGC 628 ou « galaxie fantôme » car elle est très peu lumineuse, à 32 millions d'années-lumière dans la constellation des Poissons

Exemples de galaxies spirales barrées : La Voie Lactée, M91, M95, NGC 1097, NGC 1300, NGC 1672, NGC 2536, NGC 2903



La galaxie spirale barrée NGC 1300, dans la constellation de l'Éridan

Au centre du diagramme de Hubble, entre les elliptiques et les spirales, se trouve une classe intermédiaire, **les galaxies lenticulaires**, qui sont notées **S0**. Ces galaxies se composent d'un bulbe central brillant, à la manière des galaxies spirales, et d'une structure étendue en forme de disque qui l'entoure. À la différence des galaxies spirales, le disque galactique des galaxies lenticulaires ne présente pas de bras spiraux et ne forme pas d'étoiles nouvelles en quantité significative. Le bulbe est souvent la principale source de lumière d'une telle galaxie. Les lenticulaires vues de face sont difficiles à distinguer des elliptiques de type E0, rendant la classification quelquefois incertaine. Lorsqu'elles sont vues de profil, des bandes de poussière sombre sont parfois visibles par absorption devant le disque.

Lors de la publication initiale du schéma de classification de Hubble, l'existence des galaxies lenticulaires était purement hypothétique. Hubble pensait qu'il devait y avoir une étape intermédiaire entre les elliptiques les plus aplaties et les spirales. Des observations postérieures (en partie par Hubble lui-même) ont démontré que l'idée de Hubble était correcte et la classe S0 fut incluse lors de la présentation définitive de la séquence de Hubble par Allan Sandage.

Exemples de galaxies lenticulaires : M85, M86, NGC 1316, NGC 2787, NGC 5866, Centaurus A.



M85 par le télescope spatial Hubble. Cette image atmosphérique montre la galaxie Messier 85, capturée dans toute sa splendeur délicate et brumeuse par le télescope spatial Hubble de la NASA/ESA. Messier 85 traverse la constellation de la Chevelure de Bérénice et se trouve à environ 50 millions d'années-lumière de la Terre.

Pour sa classification, Hubble se fonda sur des photographies des galaxies prises par les télescopes de son époque. **Initialement, il envisagea cette classification comme une séquence évolutive où les galaxies elliptiques étaient une forme primitive pouvant évoluer en galaxies spirales.** Notre compréhension actuelle suggère que la situation va plutôt dans le sens contraire. Cependant Hubble laissa son empreinte dans le jargon des astronomes, qui parlent toujours des galaxies de « premier type » ou de « type tardif » selon que le type d'une galaxie apparaît vers la gauche ou vers la droite du diagramme.

Des observations plus modernes des galaxies nous ont fourni les informations suivantes sur les différents types de galaxies :

- les galaxies elliptiques sont pauvres en gaz et en poussières et se composent la plupart du temps d'étoiles âgées ;
- les galaxies spirales sont généralement riches en gaz et en poussières et possèdent un mélange d'étoiles jeunes et plus âgées ;
- les galaxies irrégulières sont assez riches en gaz, poussière et en étoiles jeunes.

À partir de ces informations, les astronomes ont construit une théorie de l'évolution des galaxies qui suggère que les galaxies elliptiques sont, en fait, le résultat de collisions entre galaxies spirales et/ou irrégulières ; collisions qui dépouillent une grande partie du gaz et des poussières et distribuent de façon aléatoire les orbites des étoiles.

On considère généralement que les premières galaxies étaient (et sont) les galaxies spirales. Elles sont plutôt d'une épaisseur assez fine mais avec un bulbe central assez proéminent. Elles ont des bras, et tournent assez vite sur elles-mêmes, ce qui crée ces bras spiraux.

On ne va pas s'étendre sur ce qui s'est passé au moment du Big Bang et juste après. On avait des idées assez arrêtées sur l'arrivée de la lumière dans le fond diffus cosmologique, autour de 400.000 ans après le Big Bang. Ce ne serait seulement qu'après que les premières galaxies (spirales) seraient apparues.

Il semblerait que les galaxies spirales soient les génitrices et que, ultérieurement, les galaxies spirales deviennent des galaxies elliptiques ou lenticulaires pour plusieurs raisons :

La raison essentielle semble être les collisions et fusions de galaxies, qui interviennent notamment dans les amas de galaxies. Les galaxies spirales évoluent ensuite en elliptiques ou lenticulaires.

Une autre raison est que certaines galaxies commencent à ne plus produire d'étoiles jeunes et qu'elles dépérissent et perdent leurs bras, devenant à leur tour des galaxies elliptiques ou lenticulaires.

A) Les galaxies spirales

1) Les galaxies spirales simples

Les galaxies spirales forment la classe la plus emblématique des galaxies. Elles sont faites d'un disque en rotation et composé d'étoiles et de milieu interstellaire, avec un bulbe central d'étoiles généralement plus anciennes. De ce bulbe émergent des bras relativement brillants. Dans le schéma de classification de Hubble, les galaxies spirales correspondent au type *S*, suivi d'une lettre (*a*, *b*, ou *c*), qui indique le degré d'enroulement des bras spiraux ainsi que la taille du bulbe central. Une galaxie *Sa* est dotée de bras relativement mal définis et possède une région centrale relativement importante. En revanche, une galaxie *Sc* possède des bras très ouverts et bien tracés ainsi qu'un bulbe de petite taille.

Dans les galaxies spirales, les bras spiraux forment une spirale logarithmique approximative, un schéma qui peut être, en théorie, le résultat d'un dérangement dans la masse d'étoiles rotative uniforme. Les bras spiraux tournent autour du centre, au même titre que les étoiles, mais avec une vitesse angulaire constante. Cela veut dire que les étoiles entrent et sortent des bras spiraux ; les étoiles proches du centre galactique orbitent plus vite que les bras alors que les étoiles les plus externes se déplacent moins vite que les bras. On pense que les bras spiraux sont des zones où la densité de matière est plus haute, on peut donc les voir comme des « vagues de densité ». Lorsque les étoiles traversent un bras, la vitesse de chaque système stellaire est modifiée par les forces gravitationnelles supplémentaires exercées par une densité de matière plus élevée (cette vitesse retourne à la normale une fois que l'étoile ressort du bras). Cet effet est semblable à une « vague » de ralentissement sur une autoroute saturée en voitures.

Les bras sont visibles à cause de leur teneur en étoiles jeunes et brillantes, dues à la forte densité de matière qui facilite la formation d'étoiles. Or les étoiles les plus lumineuses sont aussi les plus massives, et ont une

durée de vie très brève (quelques millions d'années contre 10 milliards d'années pour le Soleil), aussi les zones les plus lumineuses sont-elles au voisinage des lieux de formation d'étoiles, les étoiles massives n'ayant pas le temps de s'en éloigner significativement lors de leur brève existence.

2) Les galaxies spirales barrées

Environ une moitié des galaxies spirales ont une bande d'étoiles linéaire en leur centre, à partir de laquelle émergent les bras spiraux. Dans la classification de Hubble, elles sont désignées d'un *SB*, suivi d'une lettre minuscule (*a*, *b*, ou *c*), indiquent encore une fois la forme et la disposition des bras spiraux (de la même manière que les galaxies spirales non-barrées). On pense que les barres sont des structures temporaires qui peuvent survenir à la suite d'un rayonnement de densité du cœur vers l'extérieur, ou à la suite d'une interaction avec une autre galaxie faisant intervenir les forces de marée. De nombreuses galaxies spirales barrées sont actives, cela est peut-être du gaz canalisé le long des bras.

Notre propre galaxie, la Voie Lactée, est une grande galaxie spirale barrée d'environ 30.000 parsecs de diamètre (= 100.000 années-lumière) et de 1.000 parsecs d'épaisseur (3.260 années-lumière). Elle contient approximativement 2×10^{11} étoiles (200 milliards d'étoiles) et a une masse totale d'environ 6×10^{11} masses solaires (600 milliards de masse solaire).

Une **galaxie spirale** est donc un type de galaxie contenant jusqu'à plusieurs centaines de milliards d'étoiles et qui adopte la forme aplatie d'un disque, avec un renflement central sphérique lumineux appelé le bulbe ou le cœur. Les galaxies spirales contiennent également, et de façon variable, des quantités importantes de gaz et de poussières. Autour du disque, il existe également un halo moins dense et plus discret (du moins en matière visible), avec des étoiles fréquemment regroupées en amas globulaires.

Le disque contient typiquement plusieurs bras lumineux, où se trouvent les étoiles les plus jeunes et les plus lumineuses. Ces bras s'enroulent autour du centre en formant une spirale, donnant leur nom aux galaxies. Les galaxies spirales sont considérées comme faisant partie des plus beaux objets du ciel. La galaxie M51, dite aussi « galaxie du Tourbillon » ou « galaxie des Chiens de Chasse » en constitue l'un des représentants parmi les plus emblématiques. Les galaxies spirales appartiennent aux trois classes principales de galaxies établies par Edwin Hubble dans son ouvrage de 1936, *Le royaume des nébuleuses*. En tant que telles, elles appartiennent à la séquence de Hubble.

Notre galaxie, la Voie Lactée, est une galaxie spirale, mais elle possède également une barre centrale, découverte dans les années 1990, ce qui en fait en réalité une galaxie spirale barrée, dont la structure détaillée n'est pas connue avec certitude aujourd'hui. Notre position sur le disque galactique rend évidemment très malaisée l'observation de cette partie de la Voie Lactée, puisque nous sommes à l'intérieur de cette galaxie. La preuve la plus convaincante de cette existence provient d'une étude des étoiles du centre galactique réalisée avec le télescope spatial Spitzer.

Les galaxies spirales sont des entités très dynamiques : elles sont notamment le lieu de formation des étoiles. Leur disque contient beaucoup de jeunes étoiles, les étoiles plus anciennes tendant à occuper plutôt leur renflement central, alors que le halo diffus est constitué des étoiles plus jeunes. Les étoiles se forment à partir de concentrations du milieu interstellaire qui ne s'opèrent que dans le disque galactique. Leur diamètre se situe généralement entre 20 et 60 kiloparsecs (soit entre $\sim 50\,000$ à $\sim 200\,000$ années-lumière), et leur masse se situe entre 10^{10} et 10^{11} masses solaires.



La galaxie spirale M64, dite « galaxie de l'œil noir », dans la constellation de la Chevelure de Bérénice

Il faut aussi considérer l'angle selon lequel on voit une galaxie. On ne les voit pas toutes **de face** avec leurs bras bien dessinés et un bulbe central net (voir plus haut les exemples de M101, M51 et M74). La façon dont on voit les galaxies ne s'applique pas qu'aux galaxies spirales, mais à toutes les galaxies. De temps en temps on en voit d'autres qui sont plus ou moins inclinées par rapport à la vue qu'on en a depuis la Terre. C'est par exemple le cas de la galaxie d'Andromède, inclinée à environ 45° . Dans des cas limites on peut voir une galaxie « par la tranche », quand son disque est aligné avec notre ligne de visée. Il y a de nombreux exemples de ce type. Dans certains cas on a même du mal à définir son type, car on ne voit pas nécessairement les bras qui s'enroulent autour du centre. Exemple ci-dessous :



La galaxie spirale NGC 4565, dans la constellation de la Chevelure de Bérénice, surnommée « galaxie de l'aiguille » à cause de sa forme. On ne voit pas les bras (mais on sait qu'ils existent), par contre on voit très bien le bulbe central et les nuages de gaz et de poussières à la périphérie du disque galactique.

Les télescopes modernes ont révélé que beaucoup de galaxies spirales hébergent des trous noirs supermassifs en leur centre, dont les masses peuvent excéder plusieurs centaines de millions de masses solaires. Les galaxies spirales et les galaxies elliptiques sont connues pour contenir toutes les deux ces objets exotiques. En fait, beaucoup d'astronomes croient maintenant que toutes les grandes galaxies contiennent un trou noir supermassif en leur noyau. Notre galaxie est connue pour héberger un trou noir dans son centre, Sagittarius A* (ou Sgr A*), d'une masse d'environ 4 millions de masses solaires. Avec les galaxies irrégulières, les galaxies spirales constituent 60 % de la population de l'Univers local. On les trouve principalement dans les régions de faible densité et rarement aux centres des amas de galaxies.

Les galaxies sont classées selon un « diagramme en fourche de sélection » appelé séquence de Hubble. Le début de la fourche classifie les galaxies elliptiques selon une échelle, depuis les plus rondes, cotée E0, jusqu'aux plus aplaties, cotées E7. Sur les « branches » de la fourche figurent les deux types de galaxies spirales : les spirales « normales », au bulbe sensiblement régulier, et les spirales « barrées », dont le noyau s'étire plus ou moins, une ligne d'étoiles barrant le centre. Les galaxies spirales barrées constituent approximativement 50 % de la population totale des galaxies spirales.

La forme d'une galaxie spirale découle intuitivement de l'exercice des forces de gravitation (avec la forme familière d'un tourbillon autour d'un attracteur central). Pour autant celle des *spirales barrées* a longtemps intrigué les astronomes. Des simulations sur ordinateur suggèrent que la forme de *spirale barrée* apparaît assez facilement lors du croisement de deux galaxies (qui entraîne assez peu de collisions, la densité moyenne des galaxies étant plus faible que celle de la fumée de cigarette). Un croisement de ce type est prévu entre notre galaxie et celle d'Andromède dans un minimum de quatre milliards d'années, sans que l'on ne sache prédire aujourd'hui s'il donnera un résultat du même genre.

Les deux types de galaxies spirales se subdivisent selon la prééminence de leur « renflement » central, la brillance de leur surface et le resserrement de leurs bras spiraux. Toutes ces caractéristiques sont liées, de telle manière qu'une galaxie Sa possède un gros renflement central, une grande surface lumineuse et des bras enroulés en une spirale serrée. Une galaxie Sb montre un renflement plus petit, un disque plus pâle et des bras plus relâchés, et ainsi de suite pour les types Sc et Sd. Les galaxies barrées sont caractérisées selon le même schéma, respectivement en SBa, SBb, SBc et SBd.

Il existe encore une autre classe de galaxies désignée S0, de type morphologiquement transitoire entre les galaxies spirales et les galaxies elliptiques. Ses bras spiralés s'enroulent de façon tellement serrée qu'il n'est pas possible de les distinguer ; les galaxies S0 sont munies d'un disque à la luminosité uniforme. Elles sont également affectées d'un très important renflement.

Tout comme les étoiles peuvent être intrinsèquement brillantes ou intrinsèquement faibles, les galaxies spirales peuvent également présenter une gamme de luminosité. Pour cette raison, Sidney van den Bergh introduit un descripteur supplémentaire pour les galaxies spirales, soit une classe de luminosité de la galaxie.

Dans ce système, on attribue à chaque galaxie spirale une classe de luminosité allant de I pour les plus brillantes à V pour les plus faibles. Puisque la luminosité totale correspond en gros à la masse totale des étoiles visibles, les galaxies spirales de classe de luminosité I sont aussi les plus massives et elles possèdent les bras spiraux les plus imposants.

La classe de luminosité des galaxies est également bien corrélée avec la régularité de la structure en spirale, les galaxies les plus lumineuses, donc les plus massives, étant les plus ordonnées. Ceci est tout simplement expliqué par le modèle d'onde de densité de la formation des bras en spirales. Plus la galaxie est massive, plus les nuages de gaz se concentreront dans les régions de haute densité. Comme plus de gaz est disponible, plus de nouvelles étoiles bleues seront formées sur le site, ce qui rendra la structure en spirale mieux définie.

Cette caractéristique est maintenant aussi appliquée aux galaxies irrégulières comme on peut le constater sur la base de données NASA/IPAC.

B) Les galaxies lenticulaires

Les **galaxies lenticulaires** (**S0** ou **SB0**) sont des galaxies à disque sans bras spiraux bien définis. Elles représentent la transition entre une galaxie spirale et une galaxie elliptique dans la séquence de Hubble. Formellement, elles ressemblent à des galaxies spirales dénuées de bras spiraux bien qu'elles possèdent un bulbe galactique d'une taille beaucoup plus importante que celui d'une galaxie spirale standard. Les galaxies lenticulaires ont perdu ou transformé la majorité de leur matière interstellaire, si bien qu'on n'y observe que très peu de formation d'étoiles, alors même qu'elles peuvent contenir une grande quantité de poussière.

À bien des égards, la composition des galaxies lenticulaires se rapproche plus de celle des galaxies elliptiques que des galaxies spirales. Par exemple, elles sont constituées d'étoiles en majorité âgées de plus d'un milliard d'années. Elles contiennent également plus d'amas globulaires que les galaxies spirales de masse et luminosité comparables.

Tout comme les galaxies spirales et elliptiques, une galaxie lenticulaire peut comporter une bande d'étoiles traversant son centre. On parle dans ce cas d'une galaxie lenticulaire barrée. Cependant, les propriétés propres aux bandes étoilées dans les galaxies lenticulaires n'ont pas fait l'objet de beaucoup de recherches. La compréhension de ces propriétés ainsi que de leur mécanisme de formation aiderait à clarifier l'histoire de l'évolution des galaxies lenticulaires.

Il existe deux grandes hypothèses quant à la formation des galaxies lenticulaires :

- Dans un premier cas, leur forme en disque, l'absence de gaz, la présence de poussière, le manque de formation stellaire récente et la rotation de ces galaxies sont tous des attributs que l'on pourrait attendre d'une galaxie spirale qui aurait épuisé à peu près tout son gaz dans la formation d'étoiles. L'observation de galaxies anémiques renforce cette hypothèse. Si le motif en spirale continue à se dissiper dans ces dernières, la galaxie en résultant serait semblable à une galaxie lenticulaire.
- Cependant, la luminosité supérieure des galaxies lenticulaires par rapport aux galaxies spirales laisse plutôt croire qu'elles pourraient résulter d'une fusion galactique, laquelle augmente la masse totale stellaire et donne à la galaxie nouvellement formée sa forme discoïdale exempte de bras spiraux.

Liste de galaxies lenticulaires

- La Roue du Chariot (voir photo page 36), une galaxie lenticulaire située à 500 millions d'années-lumière dans la constellation du Sculpteur.
- NGC 2787, une galaxie lenticulaire barrée.
- NGC 5866 (La galaxie du Fuseau), une galaxie lenticulaire située dans la constellation du Dragon.
- NGC 5010, galaxie lenticulaire en transition située à 140 millions d'années-lumière dans la constellation de la Vierge.

C) Les galaxies elliptiques

Une **galaxie elliptique** est un type de galaxie qui regroupe des concentrations sphéroïdales de milliards d'étoiles qui ressemblent à des amas globulaires à grande échelle. Elles ont une très petite structure interne et la densité des étoiles diminue doucement du centre très lumineux vers des bords diffus. Elles sont classées dans la séquence de Hubble en tant que type E et se déclinent selon leur forme du type E0 (circulaire), au type E7 (fortement elliptique).

Bien qu'il puisse y avoir des exceptions, leurs caractéristiques générales sont :

- Le mouvement des étoiles est aléatoire contrairement aux galaxies spirales où l'ensemble des étoiles est en rotation.
- Elles contiennent une faible proportion de matière et de gaz interstellaire et par conséquent, peu de nouvelles étoiles peuvent s'y former.
- Elles sont constituées de vieilles étoiles (étoiles de population II)

Edwin Hubble rapporta les galaxies elliptiques comme des galaxies « précoces », car il pensait qu'elles évoluaient pour devenir des galaxies spirales (qu'il appelait « tardives »). Les astronomes pensent maintenant le contraire dans ce cas (c'est-à-dire que les galaxies spirales peuvent se transformer en galaxies elliptiques), mais les termes *précoces* et *tardives* de Hubble sont toujours utilisés. Supposées pendant un temps être d'un

type de galaxie simple, les elliptiques sont maintenant connues comme étant des objets complexes. Une partie de cette complexité est due à leur histoire étonnante : les elliptiques sont supposées être le produit final de la fusion de deux galaxies spirales.

Les galaxies elliptiques s'étalent sur une grande plage de taille et de luminosité, des géantes elliptiques, d'une taille de centaines de milliers d'années-lumière et presque un milliard de fois plus brillantes que le Soleil, aux naines elliptiques, juste un peu plus brillantes qu'un amas globulaire moyen.

Elles se divisent en plusieurs groupes morphologiques :

- Galaxies cD : Des objets immenses et brillants qui peuvent mesurer presque 1 Mégaparsec (3 millions d'années-lumière). Ce sont des galaxies elliptiques géantes. Ces titans ne se trouvent que près du centre de grands et denses amas de galaxies et sont vraisemblablement le résultat de la fusion de plusieurs galaxies.
- Galaxies elliptiques normales : Objet condensé avec une surface centrale relativement brillante. Elles incluent les elliptiques géantes (gE), celles de luminosité intermédiaire (E) et les compactes elliptiques.
- Galaxies elliptiques naines (*Dwarf elliptical galaxies* : *dE*) : Ce groupe de galaxies est très différent des elliptiques normales. Leur diamètre est d'un ordre de 1 à 10 kiloparsecs, avec une luminosité de surface qui est bien plus basse que les elliptiques normales, ce qui leur donne une apparence bien plus diffuse. Elles montrent les mêmes caractéristiques de déclin graduel de la densité des étoiles d'un centre relativement dense vers une périphérie diffuse.
- Galaxies naines sphéroïdales (*Dwarf spheroidal galaxies* : *dSph*) : Luminosité extrêmement basse en surface et observées seulement au voisinage de la Voie Lactée, et peut-être d'autres groupes de galaxies très voisins, comme le groupe du Lion. Leur magnitude absolue n'est que de 8 à 15. La galaxie sphéroïde naine du Dragon a une magnitude absolue de 8,6, ce qui la rend plus pâle qu'un amas globulaire moyen dans la Voie Lactée !
- Galaxies naines compactes bleues (*Blue compact dwarf galaxies* : *BCD*) : Les petites galaxies sont rarement bleues. Elles ont des couleurs photométriques typiques des étoiles (bleues) relativement jeunes de type spectral A. Ceci suggère que les BCD sont des zones actives de formation d'étoiles. Ces systèmes contiennent aussi un abondant gaz interstellaire (contrairement aux autres galaxies elliptiques).

D) La galaxie très particulière M104 ou « galaxie du sombrero »

M104 est l'une des plus célèbres galaxies de la voûte céleste. C'est l'une des principales vedettes du ciel de printemps en France. Elle est située dans la constellation de la Vierge à une distance de 28 millions d'années-lumière de la Terre. Son diamètre réel est d'environ 50.000 années-lumière, soit environ la moitié de celui de notre Voie Lactée. Elle est presque vue de profil et possède une large bande de poussière visible dans son plan. Sa forme rappelle celle d'un chapeau mexicain d'où son nom de "Sombrero".

De très différentes dimensions, nature et distance !!!

	Wikipedia	NASA	Dinastro	Futura	Techno-Science
Type	Spirale Sa-sb	Spirale	Elliptique	Lenticulaire	Spirale Sa-Sb
Diamètre	95.000 al	50.000 al	50.000 al	50.000 al	82 à 100.000 al
Distance	65,8 M al	28 à 36 M al	28 M al	28 M al	28 M al

Wikipedia

M104 (NGC 4594, aussi appelé la **galaxie du Sombrero**) est une galaxie spirale vue par la tranche située dans la constellation de la Vierge. Sa vitesse par rapport au fond diffus cosmologique est de 1.368 ± 25 km/s, ce qui correspond à une distance de Hubble de $20,17 \pm 1,46$ Mpc ($\sim 65,8$ millions d'a.l.). M104 a été utilisée par Gérard de Vaucouleurs comme une galaxie de type morphologique SAa sp dans son atlas des galaxies. La classe de luminosité de M104 est I et elle présente une large raie HI. C'est aussi une galaxie LINER, c'est-à-dire une galaxie dont le noyau présente un spectre d'émission caractérisé par de larges raies d'atomes faiblement ionisés. De plus, c'est une galaxie active de type Seyfert 2 (1.9). Avec une brillance de surface égale à 11,89 mag/am², on peut qualifier M104 de galaxie présentant une brillance de surface élevée.

Histoire

Certaines sources indiquent que Charles Messier a découvert M104. En fait, elle ne figurait pas dans la première édition de son catalogue et il l'ajouta manuellement à celui-ci dans sa copie personnelle le 11 mai 1781. C'est Pierre Méchain, un collègue de Charles Messier, qui a découvert M104 et il en a informé Jean Bernouilli dans une lettre datant du 6 mai 1783. Camille Flammarion remarqua la similitude de la position indiquée par Méchain et l'objet (HI.43, la galaxie du Sombrero) observé par John Herschel le 9 mars 1828 et il l'ajouta à la liste de Messier en 1921. En 1912, Vesto Slipher de l'Observatoire Lowell a été le premier à observer le décalage des raies spectrales des galaxies. M104 a été la première galaxie pour laquelle il a obtenu un fort décalage vers le rouge. Le décalage obtenu correspondait à une vitesse d'environ 1 000 km/s. On considérait auparavant M104 comme une nébuleuse de notre galaxie, mais cette vitesse était beaucoup trop grande pour que ce soit le cas. Slipher a aussi détecté le mouvement de rotation de la M104. Slipher a ainsi découvert les premières évidences de l'existence de systèmes d'étoiles autres que ceux de notre galaxie.

Observation

L'observation de M104 est assez difficile d'autant qu'elle s'éloigne rarement de l'horizon aux latitudes moyennes de l'hémisphère nord. Pour la repérer, partez de l'étoile Algorab : au nord de cette étoile, vous trouverez un Y à l'envers ; M104 est à 1° NE de l'étoile qui constitue la base du Y. M104 est visible dans une lunette astronomique mais ne présente alors pas grand intérêt. En revanche, un télescope de 200 mm permet de déceler la barre sombre de poussières en contraste devant le noyau brillant.

Distance

Le site NASA/IPAC rapporte plus d'une trentaine de mesures non basées sur le décalage vers le rouge (*redshift*). Le résultat de ces mesures donne une distance de $11,219 \pm 3,592$ Mpc ($\sim 36,6$ millions d'a.l.). La distance de Hubble pour M104 est de $20,17 \pm 1,46$ Mpc ($\sim 65,8$ millions d'a.l.). Des études plus récentes basées sur l'observation des étoiles géantes rouges de la galaxie ont produit des résultats beaucoup plus précis que ceux obtenus auparavant. Les auteurs d'un article publié en 2016 rapportent une distance de $9,55 \pm 0,13$ Mpc. Cette galaxie, comme plusieurs de l'amas de la Vierge, est relativement rapprochée du Groupe local et on obtient souvent une distance de Hubble très différente en raison de leur mouvement propre dans le groupe où dans l'amas où elles sont situées. La distance de 9,55 Mpc est sans doute plus près de la réalité. Puisque cette valeur est le loin inférieure à la distance de Hubble, NGC 4594 se dirige vers le centre de l'amas en direction

opposée à la Voie lactée. Notons que c'est avec la valeur moyenne des mesures indépendantes, lorsqu'elles existent, que la base de données NASA/IPAC calcule le diamètre d'une galaxie, donc ici avec 11,219 Mpc.

Anneau de poussière

La caractéristique la plus remarquable de M104, qui lui vaut son nom populaire de galaxie du Sombrero, est la ligne de poussière en face de son bulbe. Cette bande de poussière est en fait un disque symétrique qui entoure le bulbe de la galaxie. La plus grande partie de l'hydrogène neutre et de la poussière sont dans ce disque. Le disque pourrait aussi contenir la majeure partie du gaz moléculaire de la galaxie, mais cette déduction est basée des observations en ondes radio à faible résolution et à des détections de faible intensité. Davantage d'observations seraient nécessaires pour confirmer que le gaz moléculaire est enfermé dans l'anneau de M104. La spectroscopie infrarouge révèle que l'anneau de poussière est le principal site de formation d'étoiles de la galaxie.

Noyau - LINER

Comme mentionné dans l'introduction, M104 est une galaxie LINER. Cela signifie que les atomes sont faiblement ionisés ou, en d'autres termes, qu'ils ont perdu relativement peu d'électrons. La source d'énergie des galaxies LINER est l'objet de débats. L'énergie de certaines galaxies LINER pourraient provenir des gaz chauds que l'on trouve dans des régions de formation d'étoiles alors que pour d'autres elle proviendrait d'un noyau actif où se trouve un trou noir supermassif. Des observations en infrarouge ont montré que la formation d'étoiles est probablement absente dans le noyau de M104. Cependant, il y a un trou noir supermassif dans le noyau de la galaxie qui est probablement la source de l'activité LINER.

Trou noir supermassif

La présence d'un trou noir supermassif a été signalé au milieu des années 1990 par un groupe d'astronomes travaillant avec le télescope spatial Hubble. D'après la vitesse des étoiles observées, ils ont déduit que la masse du trou noir de M104 était de l'ordre d'un milliard de masses solaires. Selon étude publiée en 2006 basée sur les mesures de luminosité de la bande K de l'infrarouge proche du bulbe de M104 (NGC 4594 dans l'article), on obtient une valeur de 794 millions de masses solaires pour le trou noir supermassif qui s'y trouve. Selon une troisième étude publiée en 2009 basée sur la vitesse interne de la galaxie mesurée par le télescope spatial Hubble, la masse du trou noir supermassif au centre de M104 serait comprise entre 240 millions et 860 millions de masses solaires.

Rayonnement synchrotron

Le noyau de M104 est une forte source de rayonnement synchrotron dans les domaines des rayons X et des ondes radio. Le rayonnement synchrotron est émis par des électrons se déplaçant à très grande vitesse en s'enroulant autour des lignes d'un puissant champ magnétique. Ce genre d'émission est assez courant dans les noyaux actifs des galaxies.

Rayonnement térahertz

En 2006, deux groupes ont publié des mesures du rayonnement térahertz en provenance du noyau de M104 à une longueur d'onde de 850 μm . La source de ce rayonnement reste non identifiée. Il ne vient pas de l'émission thermique de la poussière qui habituellement émet des ondes dans le domaine des ondes radio. Il ne provient pas non plus du rayonnement continu de freinage (rayonnement bremsstrahlung) des gaz chaud rarement émis à des longueurs d'onde millimétriques ou d'un gaz moléculaire qui produit généralement des raies spectrales dans le domaine des microondes.

Amas globulaires

M104 a un nombre relativement élevé d'amas globulaires. Selon des études, il y a entre 1200 et 2000 amas dans le halo de la galaxie. Le rapport du nombre d'amas globulaires sur la luminosité de M104 est élevé comparé à celui de la Voie lactée, mais il est semblable à celui d'autres galaxies ayant un large bulbe. Ce rapport est souvent cité afin de démontrer que le nombre d'amas globulaires pourrait être relié à la taille du bulbe d'une galaxie.

Groupe de galaxies ?

M104 se trouve dans un complexe filamentaire de galaxies qui s'allonge au sud de l'amas de la Vierge. Cependant, il semble que M104 ne fasse pas partie d'un groupe de galaxies. Il existe deux méthodes

d'identification d'un groupe de galaxie. La méthode hiérarchique considère les galaxies une à une pour déterminer si elles font partie d'un plus grand agrégat de galaxies. Cette méthode produit généralement des résultats montrant que M104 fait partie d'un groupe qui comprend NGC 4487, NGC 4504, NGC 4802 et UGCA 289 et possiblement quelques autres galaxies. Note : NGC 4487, NGC 4504 et UGCA 289 font partie d'un groupe de galaxies émettant des rayons X, le groupe de NGC 4487. La deuxième méthode est basée sur la théorie de la percolation. Elle considère les galaxies par paire pour déterminer l'appartenance à un groupe. Cette méthode indique que M104 n'est pas dans un groupe ou qu'elle forme une paire avec UGCA 287. M104 est cependant accompagné d'une galaxie naine ultracompacte découverte en 2009. La magnitude absolue de cette galaxie est égale à -12,3 et son rayon effectif est de seulement 47,9 années-lumière. Sa masse est égale $3,3 \times 10^7$ millions de masses solaires.



1) Le Sombrero, une galaxie historique

– 19^{ème} siècle : *Messier ou pas Messier ?*

La galaxie du Sombrero a été découverte par Charles Messier en 1781, qui l'avait ajoutée à la main, dans l'exemplaire personnel de son propre catalogue. Elle fut ensuite redécouverte indépendamment par Pierre Méchain en 1783, puis par William Herschel en 1784 qui fut le premier à mentionner la présence de sa bande sombre caractéristique. C'est Camille Flammarion qui remarqua la similitude de position entre la description de Messier et la découverte de Herschel. Il l'ajouta officiellement au catalogue en 1921 sous le numéro M104, soit 140 ans après sa découverte par Messier !

– 20^{ème} siècle : *Découverte du redshift des galaxies*

En 1912, alors que le Sombrero ne possédait pas encore le numéro 104 du catalogue Messier, cette galaxie fut l'une des premières, dont le décalage spectral fut mesuré par l'astronome américain, Vesto Slipher. Il découvrit que son spectre était décalé vers le rouge (redshift) et que la galaxie, que l'on considérait alors comme une nébuleuse, s'éloignait de nous à une vitesse de 1000 km/s. Cette vitesse étant trop importante pour qu'elle appartienne à la Voie lactée, ce fut la première preuve scientifique en faveur de l'existence de systèmes d'étoiles autres que ceux de notre galaxie.

Plus tard, en 1929, cette mesure du redshift de M104, ainsi que celles d'un certain nombre d'autres galaxies, permit à Edwin Hubble d'établir la célèbre loi qui porte son nom, et de découvrir l'expansion de l'univers. Cette première étape, allait mener ensuite à la théorie du Big Bang.

– 21^{ème} siècle : Spirale ou elliptique ?

En 2003, la galaxie du Sombrero a été immortalisée par le télescope spatial Hubble. Les deux clichés de Hubble dans les pages précédentes ont permis de résoudre individuellement, environ 2000 amas globulaires orbitant autour du halo de la galaxie. Ce nombre important d'amas globulaires (10 fois plus, que dans notre Voie Lactée) a constitué une énigme, car il était difficilement explicable pour une simple galaxie spirale. En 2012, cette énigme a été résolue par un cliché du télescope spatial infrarouge Spitzer (ci-dessous). Cette observation a remis en cause la classification de M104, et a montré que cette galaxie était en fait, une elliptique géante. Pour une telle galaxie, un nombre de 2000 amas globulaires est tout à fait normal.



M104 en infrarouge par le télescope Spitzer

Spitzer a permis de découvrir que M104 est la superposition de deux galaxies réunies en une seule. C'est donc une galaxie elliptique géante englobant un anneau de poussières, ce qui en fait un cas unique ! Cet anneau est parfaitement circulaire. Il n'y a pas de bras spiraux. Il est toutefois légèrement déformé, ce qui suppose une probable fusion passée, entre plusieurs galaxies.

L'anneau de poussières encercle un disque d'étoiles parfaitement uniforme. En lumière visible on ne voit pratiquement que ce disque et on sous-estime la taille de la galaxie. En lumière infrarouge, l'image de Spitzer a permis de mieux voir les étoiles du halo, qui sont des étoiles vieilles dont la lumière est plus rouge. Ce halo de forme elliptique, est donc beaucoup plus massif que ce que l'on pensait auparavant.

La masse de M104 est estimée à 800 milliards de masses solaires, ce qui est gigantesque. C'est plus de six fois la masse de la Voie Lactée. Les scientifiques ont également découvert que M104 contenait en son cœur, un trou noir supermassif de un milliard de masses solaires. Ce trou noir est le plus imposant jamais observé, dans un rayon de 40 millions d'années-lumière autour de notre galaxie.

– M104 est donc la galaxie la plus massive qui soit aussi proche de la Voie Lactée. Elle est située sur les marches sud de l'amas de la Vierge, dont elle fait partie. Il n'y a pas de galaxie plus massive qui soit plus près de nous. En cela, M104 a un statut très spécial.

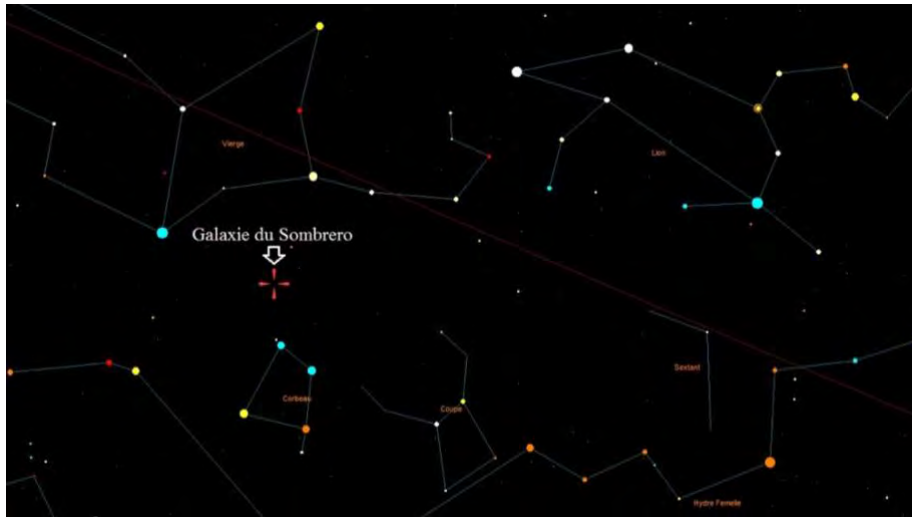
2) Repérage du Sombrero dans le ciel

AD : 12h 39m 59s Déc : -11° 37' 23" Magnitude : 8 Taille apparente : 9'x4'

La galaxie du Sombrero est observable en France les soirs de printemps, entre les constellations de la Vierge et du Corbeau.

3) Observation visuelle par Yves Argentin

Voici un dessin réalisé, suite à l'observation de cette galaxie dans la nuit du 16 au 17 avril 2018, en duo avec Léopold Le Roux :



M104 en ultraviolet (GALEX).

E) Les galaxies irrégulières

Une **galaxie irrégulière** est une galaxie qui ne montre aucune structure régulière ou discernable et qui pour cette raison est classée à part dans la classification de Hubble des galaxies.

La plupart des galaxies irrégulières sont des galaxies naines (elles contiennent de 10 millions à un milliard d'étoiles). Leur luminosité n'est pas affectée par leur forme irrégulière car elles sont souvent riches en jeunes étoiles brillantes ainsi qu'en gaz et poussières interstellaires, mais leur petite taille les rend difficile à détecter, c'est pourquoi on ne détecte que celles plutôt proches de nous.

Elles orbitent souvent autour de galaxies plus grosses (galaxies spirales) qui créent des ondes de compression (dus à la gravitation) qui traversent les nébuleuses et y déclenchent des formations d'étoiles très rapides. Elles auraient été très nombreuses jadis dans l'univers, mais leur nombre aurait décliné suite aux collisions (elles constitueraient quand même 10 % des galaxies).

Certaines galaxies ont été classifiées en tant que galaxies irrégulières, mais ont été depuis reclassées en tant que « SBm » (certaines Galaxie spirale barrées). C'est le type des galaxies magellaniques, c'est-à-dire qui ressemblent aux Nuages de Magellan.

Causes de l'irrégularité

- L'irrégularité peut résulter de plusieurs phénomènes, parmi lesquels la fusion de galaxies de tailles semblables, et la déformation sous l'effet de l'influence gravitationnelle d'une voisine plus massive (cas des Nuages de Magellan)
- Lorsqu'une galaxie a une masse trop faible, la spirale se défait jusqu'à former une galaxie irrégulière.
- Leur formation peut être due à une collision entre deux galaxies massives. La collision éjecte des étoiles hors de la galaxie. À la fin, il reste la galaxie irrégulière et une longue queue due à la collision.
- Une forte activité interne (noyau)

Classement

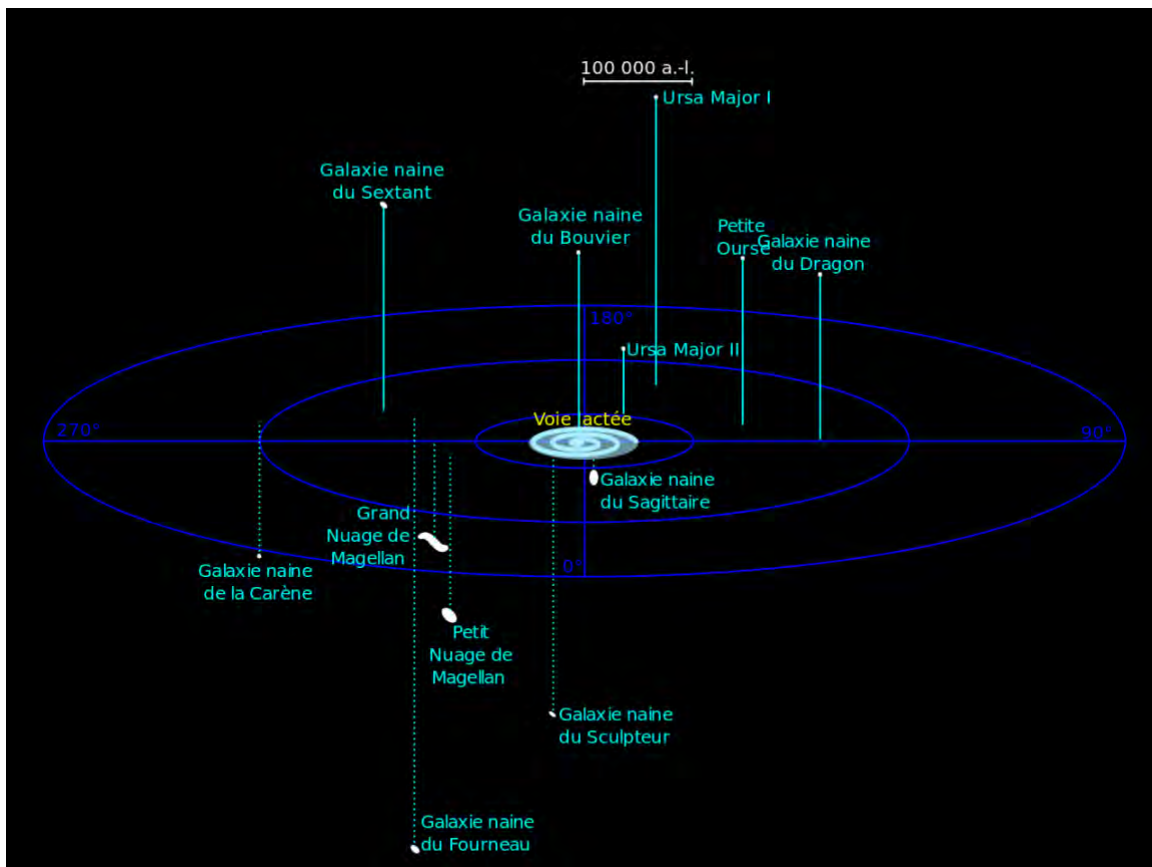
La classification de Hubble reconnaît deux types de galaxies irrégulières : *Irr I* et *Irr II*.

- Les galaxies *Irr I* possèdent quelques structures mais pas assez pour les classer clairement parmi les autres classes. Elles ont un aspect irrégulier mais la répartition des gaz est régulière à l'intérieur. Elles sont considérées comme des galaxies spirales n'ayant pas réussi à finir leur formation (exemple : grand nuage de Magellan). Certaines sont classées Im, c'est-à-dire de type magellanique. Elles présentent un début de bras.
- Les galaxies *Irr II* ne présentent aucune structure permettant de les classer. Leur irrégularité se fait à tous les niveaux : visuel et répartition de matière. Ces irrégularités peuvent venir d'une collision entre galaxies ou d'une forte activité interne.

F) Les galaxies naines

Une **galaxie naine** est une petite galaxie composée de 100 millions à quelques milliards d'étoiles, un nombre relativement faible par rapport aux 200 à 400 milliards d'étoiles estimés de la Voie Lactée. Ces galaxies gravitent souvent autour de galaxies plus importantes comme la Voie Lactée, la galaxie d'Andromède ou la galaxie du Triangle.

La Voie Lactée possède plus d'une trentaine de galaxies naines connues qui gravitent autour d'elle. La plus grande d'entre elles est le Grand Nuage de Magellan, d'un diamètre d'environ 15.000 années-lumière. Les deux plus petites, la galaxie naine de la Carène et la galaxie du Lion II ont un diamètre d'environ 1600 années-lumière seulement.



La Voie Lactée est entourée d'un certain nombre de galaxies naines

La galaxie d'Andromède possède aussi ses galaxies naines satellites. Ces deux *grandes* galaxies et leur galaxies naines satellites forment le Groupe local.

Les galaxies naines présentent plusieurs morphologies différentes :

- galaxie naine elliptique et le sous-type galaxie naine sphéroïdale
- galaxie naine irrégulière
- galaxie naine spirale

Le Grand Nuage de Magellan, qui orbite autour et près de la Voie Lactée et contient plus de 30 milliards d'étoiles est parfois classifiée comme une galaxie naine. D'autres la considèrent comme une galaxie à part entière. On pense que la formation et l'activité des galaxies naines sont fortement influencées par des interactions avec de grandes galaxies. Les astronomes identifient de nombreux types de galaxies naines, en se basant sur leurs formes et leur composition.

Formation

Une théorie dit que la plupart des galaxies, dont les galaxies naines, se forment en association avec de la matière noire, ou avec des gaz qui contiennent des métaux. Toutefois, la sonde spatiale Galaxy Evolution Explorer de la NASA, explore des nouvelles galaxies naines qui se forment à partir de gaz dotés de faible métallicité. Ces galaxies étaient situées dans le cercle du Lion, un nuage d'hydrogène et d'hélium autour de deux galaxies massives de la constellation du Lion. En raison de leur petite taille, les galaxies naines ont été observées alors qu'elles étaient tiraillées et déchirées par des galaxies spirales environnantes, qui se finissait en une fusion de galaxies.

Les galaxies naines locales

Il y a beaucoup de galaxies naines dans le Groupe Local. Ces petites galaxies sont fréquemment en orbite autour de grandes galaxies, telles que la Voie Lactée, la galaxie d'Andromède et la galaxie du Triangle. Un article de 2007 avait suggéré que de nombreuses galaxies naines avaient été créées par des marées galactiques lors de l'évolution primitive de la Voie Lactée et d'Andromède. Les galaxies naines générées par ces marées sont produites quand des galaxies entrent en collision et que leurs masses gravitationnelles interagissent. Des courants de matière galactique sont arrachés de leurs galaxies parentes, ainsi que les halos de matière noire qui les entourent. Une étude de 2018 suggère que quelques galaxies naines locales se sont formées extrêmement tôt, pendant les premiers temps de l'Univers, vers le premier milliard d'années après le Big Bang.

Plus de 20 galaxies naines connues sont en orbite autour de la Voie Lactée, et des observations récentes amènent les astronomes à croire que le plus grand amas globulaire de la Voie Lactée, Omega Centauri, est en fait le cœur d'une galaxie naine, dotée d'un trou noir en son centre et qui a été, à un certain moment, absorbée par la Voie Lactée.

Types communs de galaxies naines

- Galaxies elliptiques : Galaxies naines elliptiques (dE)
- Galaxies naines sphéroïdales (dSph) : C'était avant un sous-type de galaxies naines elliptiques, mais on pense maintenant que c'est un type distinct.
- Galaxies Irrégulières : Galaxies naines Irrégulières (dIrr)
- Galaxies spirales : Galaxies naines (dS)
- Naines de type Magellanique
- Galaxies naines compactes bleues
- Galaxies naines ultra-compactes

Galaxies naines compactes bleues

En astronomie, une galaxies naines compacte bleue (galaxie **BCD**) est une petite galaxie qui contient de grands amas d'étoiles massives jeunes et chaudes. Ces étoiles, dont les plus brillantes sont bleues, provoquent la couleur bleue de la galaxie elle-même. Beaucoup de galaxies BCD sont aussi cataloguées comme des galaxies naines irrégulières ou des galaxies naines lenticulaires. En raison de leur composition en amas d'étoiles, les galaxies BCD n'ont pas de forme unique. Elles consomment leur gaz intensément, ce qui fait que leurs étoiles sont extrêmement violentes quand elles se forment. Les galaxies BCD se refroidissent dans les processus de formation de nouvelles étoiles. Les étoiles de ces galaxies sont toutes formées à des périodes différentes, donc

les galaxies ont le temps de se refroidir et d'accumuler de la matière pour former de nouvelles étoiles. Au fur et à mesure du temps qui passe, cette formation d'étoiles change la forme de ces galaxies.

- NGC 1705, NGC 2915, NGC 3353 et UGCA 281 en sont des exemples proches.

Galaxies naines ultra-compactes

Les Galaxies naines ultra-compactes (UCD) sont une classe de galaxies très compactes avec de très fortes densités stellaires, qu'on a découverte dans les années 2000. On pense qu'elles ont un diamètre de l'ordre de 200 années-lumière, et qu'elles contiennent environ 100 millions d'étoiles. Une théorie dit qu'elles seraient des cœurs (ou noyaux) de galaxies naines elliptiques qui auraient perdu leur gaz et leurs étoiles périphériques en raison d'interactions de marée, et voyageant au travers des cœurs de riches amas d'étoiles. Les galaxies UCD ont été trouvées, entre autres, dans l'amas de la Vierge, l'amas du Fourneau, Abell 1689, et l'amas de la Chevelure de Bérénice. En particulier, un échantillon d'une taille sans précédent d'environ une centaine d'UCD a été trouvé dans la région centrale de l'amas de la Vierge par l'équipe qui étudie cet amas, le « Next Generation Virgo Cluster Survey team ». La première étude relativement solide des propriétés globales des UCD de l'amas de la Vierge suggère que les UCD ont des propriétés dynamiques et structurelles distinctes venant des amas globulaires normaux. Un exemple extrême d'UCD est M60-UCD1, à environ 54 millions d'années-lumière de nous, qui contient environ 200 millions de masses solaires dans un rayon de 160 années-lumière. Sa région centrale est un entassement d'étoiles 25 fois plus proches les unes des autres que les étoiles dans notre région de la Voie Lactée. M59-UCD3 est à peu près de la même taille que M60-UCD1 avec un rayon à moitié éclairé d'environ 20 parsecs (65 années-lumière) mais qui est 40% plus lumineux avec une magnitude visuelle absolue de -14.6 . Ceci fait de M59-UCD3 la galaxie la plus dense connue ! En se basant sur les vitesses orbitales stellaires, deux des galaxies UCD de l'amas de la Vierge sont probablement dotées de trous noirs supermassifs d'une masse comprise entre 13% et 18% de celle de leurs propres galaxies.

G) Autres galaxies

Les galaxies qui figurent dans cette partie peuvent être spirales (barrées ou non), elliptiques, lenticulaires ou irrégulières, mais elles sont aussi caractérisées par d'autres aspects.

1) Les galaxies en interaction

La distance moyenne séparant les galaxies dans un amas est relativement petite. Par conséquent, les interactions entre galaxies sont assez fréquentes, et jouent un rôle important dans leur évolution. Ces interactions durent généralement des millions d'années, voire plus. Lorsque deux galaxies se manquent de peu, elles subissent néanmoins des déformations dues à la force de marée, et peuvent échanger une certaine quantité de gaz et de poussière.

Les collisions se produisent lorsque deux galaxies passent directement l'une à travers l'autre et ont un moment angulaire relatif suffisant pour ne pas fusionner. Les étoiles de ces galaxies en interactions subiront la traversée sans entrer en collision les unes avec les autres. Cependant, le gaz et la poussière présents dans les deux galaxies interagissent. Cela peut déclencher un sursaut de formation d'étoiles car le milieu interstellaire a été dérangé et comprimé. Une collision peut sévèrement distordre les deux galaxies, formant des structures s'apparentant à des barres, des anneaux, ou des longues queues.

L'interaction la plus violente est la fusion galactique. Dans ce cas, le moment relatif des deux galaxies est insuffisant pour leur permettre de se libérer de l'emprise de l'autre et de poursuivre leurs routes. Au lieu de ça, elles fusionneront graduellement pour former une galaxie unique, plus grande. Les fusions apportent d'énormes changements à la morphologie des deux galaxies de départ. Cependant, dans le cas où l'une des deux galaxies est beaucoup plus massive que l'autre, on assiste à un phénomène de cannibalisme. Dans ce cas, la galaxie la plus grande restera relativement inchangée tandis que la plus petite sera déchirée à l'intérieur de l'autre. La Voie Lactée est actuellement en train d'absorber de la sorte la Galaxie Elliptique Naine du Sagittaire et la Galaxie Naine du Grand Chien.

2) Les galaxies Starburst

Une **galaxie à sursaut de formation d'étoiles** ou **galaxie à flambée (de formation) d'étoiles** ou (*starburst galaxy* en anglais) est une galaxie présentant un taux exceptionnel de formation d'étoiles par rapport aux taux observés dans la plupart des galaxies. Ce phénomène est limité dans le temps et constitue une étape dans la vie d'une galaxie. On déduit des observations que les sursauts de formation d'étoiles dans une galaxie résultent principalement d'une collision, ou d'une interaction avec une ou plusieurs galaxies proches. Le taux de formation d'étoiles dans une galaxie subissant un *starburst* est si grand que, si le taux était maintenu, les réservoirs de gaz à l'origine des étoiles se consumeraient sur des périodes beaucoup plus courtes que la durée de vie dynamique de la galaxie. Pour cette raison, on présume que ces sursauts sont temporaires. Parmi les galaxies *starburst* bien connues, on compte M82, les galaxies des Antennes et IC 10.

Définitions d'un starburst

Plusieurs définitions existent quant à ces galaxies, bien qu'il n'y en ait pas une officiellement reconnue par tous les astronomes. La majorité s'accordent cependant à penser que cette définition se fonde généralement sur ces trois facteurs :

- le rythme auquel la galaxie convertit le gaz en étoiles, autrement dit, le **taux de formation d'étoiles** ;
- la quantité de gaz disponible à partir duquel des étoiles peuvent se former ;
- la comparaison entre la période de formation d'une étoile avec l'âge ou la période de rotation de la galaxie.

Les définitions les plus communes prennent en compte les facteurs suivants :

- une formation d'étoiles continue avec le taux de formation actuel épuiserait les réserves de gaz en beaucoup moins de temps qu'un temps de Hubble (9 à 14 milliards d'années) l'âge dynamique de la galaxie, cela est souvent le cas d'un « vrai » starburst ;
- le taux de formation d'étoiles, normalisé grâce au taux moyen de la galaxie avant le starburst dépasse de loin l'unité. Ce rapport est appelé le **paramètre du taux de naissance**.

Mécanismes de déclenchement d'un starburst

Pour enclencher un starburst, il est essentiellement nécessaire de concentrer une grande quantité de gaz moléculaire dans un petit volume. De telles concentrations et perturbations sont très probablement la cause d'un phénomène de starburst global dans la majorité des cas de fusion de galaxies, bien que le mécanisme exact ne soit pas encore bien déterminé.

Des données observationnelles ont démontré depuis longtemps qu'il existe souvent un sursaut du disque de formation d'étoiles dans les paires de galaxies en train de fusionner. On croit également que les interactions entre galaxies qui ne fusionnent pas forcément peuvent déclencher des modes de rotation instables qui entraînent le gaz vers le noyau galactique, provoquant des sursauts de formation d'étoiles dans cette zone.

Types de starbursts

Classifier la catégorie des starbursts en différentes sous-catégories n'est pas facile parce que les galaxies à starburst ne présentent pas de spécificités communes. Les sursauts d'étoiles peuvent se produire dans le disque galactique, alors que les galaxies irrégulières montrent souvent des « nœuds » de starbursts, répandus çà et là dans la galaxie. Cependant certains sous-types de starbursts sont actuellement discutés par les astronomes :

- Les **galaxies compactes bleues**. Ces galaxies sont souvent de faible masse et de faible métallicité. En outre, elles sont dépourvues de poussière et contiennent un grand nombre de jeunes étoiles chaudes. Cela implique qu'elles sont lumineuses dans le bleu et l'ultraviolet. On pensait initialement que ce type de galaxies étaient en fait de jeunes galaxies en train de former leur première génération d'étoiles, ce qui expliquerait la faible quantité de métal qu'elles contenaient. Cependant, de vieilles populations stellaires ont été trouvées dans la plupart des galaxies compactes bleues, et on pense que ce mélange peut expliquer ce manque apparent de poussières et de métal. Par ailleurs, la majorité de ces galaxies montrent des traces d'interaction récente. Parmi les galaxies compactes bleues les plus étudiées, on comptera I Zwicky 18 (la galaxie la plus pauvre en métaux jamais découverte), ESO338-IG04, et Haro11.
- Les **galaxies ultra-lumineuses en infrarouge**. Ces objets sont extrêmement poussiéreux. Les radiations ultraviolettes émises par les étoiles naissantes sont absorbées par la poussière et ré-émises sous forme d'infrarouges (longueur d'onde de 100 microns). Cela explique entre autres la couleur rouge de ce type de galaxies. Par contre, il n'est pas certain que ces UV soient uniquement émis par la formation d'étoiles et certains

astronomes pensent que ces galaxies sont alimentées (en partie, du moins) par un noyau galactique actif. Des observations en rayons X de nombreuses galaxies lumineuses en infrarouge suggèrent que beaucoup de starburst sont des systèmes à double noyau, appuyant l'hypothèse que ces galaxies sont alimentées par une formation d'étoiles déclenchées par une fusion majeure. Parmi ces galaxies, nous citerons Arp 220.

- Les **galaxies de Wolf-Rayet**. La majorité des étoiles brillantes de ces galaxies sont des **étoiles de Wolf-Rayet**. (Voir ce terme ci-après) :

Une étoile Wolf-Rayet (souvent abrégé en étoile WR) est une étoile chaude de plusieurs dizaines de masses solaires, qui durant une phase relativement brève (de l'ordre du million d'années) suivant sa séquence principale, se met à expulser la matière entourant son noyau sous forme de vents stellaires à haute vélocité, laissant celui-ci à nu, avant d'exploser en supernova. On pense aujourd'hui que les étoiles Wolf-Rayet sont les descendantes des étoiles de type spectral O ou B, c'est-à-dire les étoiles les plus massives des populations stellaires (qui ont une masse comprise entre 9 et 80 à 315 masses solaires). La combustion en leur cœur n'est plus celle de l'hydrogène, mais celle d'autres éléments, à savoir, par étapes, l'hélium, puis le carbone, l'oxygène, etc. On parle donc parfois du « stade (évolutif) Wolf-Rayet » ou d'une étoile montrant des caractéristiques Wolf-Rayet. Une autre caractéristique de ces étoiles est leur vent stellaire si important qu'il en devient optiquement épais, ne laissant plus percevoir le spectre de l'étoile elle-même. Les scientifiques estiment aujourd'hui qu'il en existerait environ 6 000 sur les 200 à 400 milliards d'étoiles que contient la Voie Lactée. La plus massive jamais observée, R136a1, atteint une masse de 315 M_☉ (millions de masses solaires) et se situe dans la constellation de la Dorade.

Les ingrédients d'un starburst

Tout d'abord, une starburst galaxie doit avoir une grande réserve de gaz afin de former des étoiles. Le sursaut en lui-même peut être déclenché par l'approche d'une autre galaxie (comme c'est le cas avec M81/M82), par la collision avec une autre galaxie (comme les Antennes), ou encore par un processus quelconque attirant de la matière vers le centre de la galaxie (comme une barre stellaire). À l'intérieur d'un starburst règne un environnement plutôt extrême. Les grandes quantités de gaz signifient que des étoiles très massives se forment. Ces jeunes étoiles chaudes ionisent le gaz (principalement de l'hydrogène) autour d'elles, créant ainsi des régions HII. Les groupes d'étoiles très chaudes sont des associations OB. Ces étoiles très lumineuses finiront probablement leur vie en tant que supernovae. Après l'explosion de la supernova, les matériaux éjectés prennent de l'expansion, devenant ainsi des rémanents de supernova. Ces rémanents interagissent avec le milieu interstellaire et peuvent ainsi générer des *masers* naturels. Le **maser astrophysique** existe dans l'univers sous la forme occasionnelle d'une source spontanée d'un rayonnement à émission stimulée, détectable dans le spectromètre par la présence d'une raie spectrale, la fréquence dans la plupart des cas se situant dans la région des micro-ondes du spectre électromagnétique.

L'étude des galaxies starburst proches peut nous aider à en savoir plus sur l'histoire de la formation et sur l'évolution de la galaxie. Un grand nombre de galaxies lointaines observées (dans le champ profond de Hubble, par exemple) sont du type starburst, mais sont trop distantes pour une étude approfondie. L'observation d'exemples proches et l'extrapolation de leurs caractéristiques peut donner une idée de ce qui se passait dans l'Univers lorsque celui-ci était plus jeune, comme la lumière qui nous parvient de ces galaxies est antérieure au moment présent (voir redshift ou décalage vers le rouge). Toutefois, les galaxies starburst semblent être rares dans l'univers local, et plus communes dans des zones plus lointaines — indiquant qu'il y en avait plusieurs, il y a 1 milliard d'années. Toutes les galaxies étaient en effet plus proches, et par conséquent, elles étaient plus sujettes à des interactions gravitationnelles.

Galaxies Starburst célèbres

M82 est l'archétype de ce genre de galaxies. Elle a un haut taux de formation d'étoiles à cause de sa proximité avec la galaxie spirale voisine, M81. Des cartes de la région réalisée avec des radiotélescopes montrent de grand faisceaux d'hydrogène neutre connectant les deux galaxies, ce qui est aussi une conséquence de leur rencontre. Des images radios des zones centrales de M82 montrent également un grand nombre de rémanents de supernovæ récents. Les galaxies des Antennes sont un autre exemple connu de système à sursaut d'étoiles, rendue célèbre par le cliché de Hubble, publié en 1997.

3) Les galaxies à noyau actif

En astronomie, une **galaxie active** est une galaxie abritant un **noyau actif** (plus précisément **noyau actif de galaxie**, en abrégé **NAG**, ou AGN d'après le vocable anglais Active Galactic Nucleus). Ce noyau est une région compacte localisée au centre de la galaxie et dont la luminosité est beaucoup plus intense que la normale dans au moins quelque domaine du spectre électromagnétique (ondes radio, infrarouge, lumière visible, ultraviolet, rayons X, et/ou rayons gamma), avec des caractéristiques qui montrent que cette forte luminosité n'est pas d'origine stellaire. Le rayonnement du NAG résulterait théoriquement de l'accrétion par un trou noir supermassif situé au centre de la galaxie-hôte. Les NAG sont les sources continues de rayonnement électromagnétique les plus lumineuses de l'univers, et comme telles permettent la détection d'objets distants; leur évolution en fonction du temps cosmique constitue aussi des contraintes aux modèles cosmologiques.

Modèles de NAG

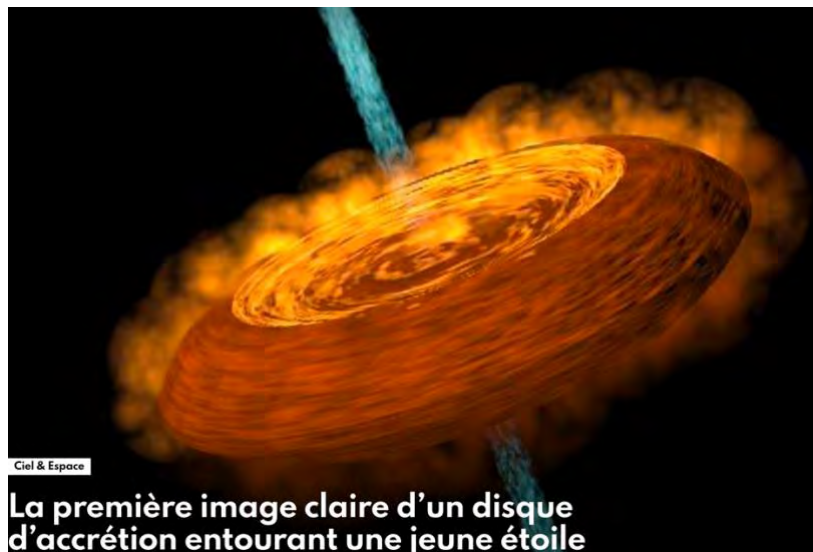
Longtemps, on avait avancé que les NAG devaient être alimentés par l'accrétion autour de trous noirs massifs (allant de 10^6 à 10^{10} masses solaires). Les NAG sont à la fois compacts et extrêmement lumineux sur de longues périodes : l'accrétion peut potentiellement provoquer une conversion efficace d'énergie potentielle et cinétique ; les trous noirs massifs ont une haute limite, ce qui peut expliquer le côté durable d'une telle luminosité du noyau. On pense que les trous noirs supermassifs n'existent pas systématiquement au centre d'une galaxie massive : la masse d'un trou noir est en corrélation étroite avec la dispersion des vitesses ou la luminosité du bulbe galactique. Ainsi, les caractéristiques des NAG sont observées chaque fois qu'une certaine quantité de matière approche la sphère d'influence du trou noir central.

Disque d'accrétion

Dans le modèle standard de NAG, des matériaux froids situés près du trou noir central forment un disque d'accrétion. Le spectre attendu pour le disque d'accrétion d'un trou noir supermassif présente un pic dans l'ultraviolet et la lumière visible ; en outre, une couronne de matériaux chauds se forme au-dessus du disque d'accrétion et peut provoquer une diffusion inverse, supérieure à l'énergie des rayons X. Les radiations provenant du disque d'accrétion excitent les matériaux atomiques froids proches du trou noir. Une grande partie de la production primaire d'un NAG peut être obscurcie par de la poussière ou du gaz proches du disque d'accrétion. Ceux-ci absorbent le rayonnement et le ré-émettent sous d'autres longueurs d'onde, le plus souvent sous forme d'infrarouge.

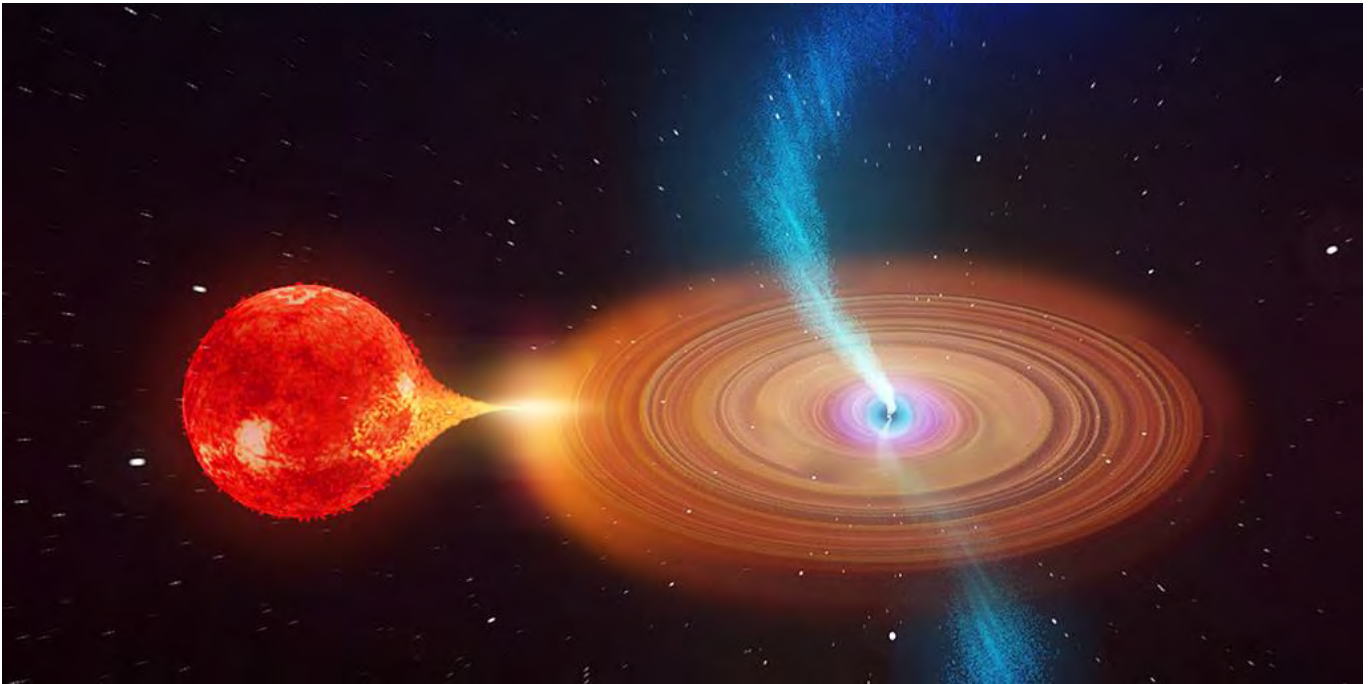
Qu'est-ce qu'un disque d'accrétion ?

• 1 - Un type de disque d'accrétion particulièrement important est celui qui se forme autour des protoétoiles et dans lequel naissent les embryons de planètes. On les appelle donc des disques protoplanétaires. Ces disques contiennent du gaz et des poussières. Au bout d'une dizaine de millions d'années, un tel disque a perdu une bonne partie de son gaz, et il devient un disque de débris dans lequel les jeunes planètes terminent leur formation.



La première image claire d'un disque d'accrétion entourant une jeune étoile

- 2 - Les disques d'accrétion sont constitués à chaque fois d'un disque de matière, à savoir du gaz et parfois aussi des poussières en orbite autour d'un objet céleste central. Ce sont des structures matérielles que l'on retrouve presque partout en astrophysique. On en observe autour des trous noirs stellaires et supermassifs, ainsi qu'autour des naines blanches et des étoiles à neutrons.



Exemple d'un système binaire où une naine blanche absorbe de la matière venant de sa voisine, une géante rouge. La matière tombe sur le disque d'accrétion, dont une partie tombe sur le trou noir, et est ensuite éjectée sous forme de jets opposés.

- 3 - Autour des astres compacts, les disques d'accrétions sont le siège de phénomènes plus énergétiques. La viscosité de la matière la conduit à dissiper l'énergie gravitationnelle sous forme d'ondes électromagnétiques à cause des frottements. Cette même dissipation d'énergie conduit la matière à chuter en spirale sur le corps central. Lorsqu'il s'agit d'un système binaire avec de la matière arrachée d'une étoile par les forces de marée gravitationnelle d'une naine blanche, cette dernière peut parfois se transformer en nova, ou même en supernova de type SN Ia.
- 4 - Lorsqu'il s'agit d'un trou noir ou d'une étoile à neutrons, la dissipation d'énergie dans le disque conduit à de fortes émissions dans le domaine des rayons X, et c'est bien souvent de cette façon que l'on détecte un trou noir, qu'il soit d'origine stellaire ou galactique. Les quasars, qui sont des trous noirs supermassifs, sont entourés d'un disque d'accrétion avec une dissipation d'énergie particulièrement importante sous forme d'ondes lumineuses et de jets.

Jets

Certains disques d'accrétion produisent des jets, un paire de « faisceaux » de matière extrêmement rapides qui émergent près du disque (la direction du jet peut être déterminée, soit grâce au moment angulaire de l'axe du disque, soit grâce à l'axe de rotation du trou noir). Les mécanismes de production d'un jet et sa composition sur de petites échelles sont encore mal connues, car les observations ne peuvent pas distinguer les variations entre les différents modèles théoriques. Ils sont visibles surtout dans le domaine des ondes radio ; l'interférométrie à très longue base peut donc être utilisée afin d'étudier les radiations qu'ils émettent sur des distances inférieures au parsec. Cependant, ils sont visibles sur toutes les longueurs d'onde, allant des ondes radio aux rayons gamma, notamment grâce à la diffusion inverse. Les NAG produisant des jets ont ainsi une seconde source (potentielle) d'émissions continues.

NAG radiativement inefficaces

Finalement, il est important de garder à l'esprit qu'il existe une catégorie « radiativement inefficace » de solutions aux équations concernant l'accrétion. La plus connue d'entre elles est l'accrétion dominée par un flux d'advection. Dans ce type d'accrétion, la matière subissant l'accrétion ne forme pas un disque fin et, par

conséquent, ne propulse pas au loin l'énergie qu'elle a acquise en se déplaçant près du trou noir. L'existence de ce type d'accrétion pourrait expliquer le manque de puissance des radiations émises par le trou noir supermassif situé au centre de certaines galaxies elliptiques. Sinon, on pourrait s'attendre à ce que les taux élevés d'accrétion correspondent à de fortes luminosités. Les NAG radiativement inefficaces pourraient aussi expliquer le manque de beaucoup d'autres caractéristiques sur certains NAG munis d'un disque d'accrétion.

Caractéristiques observationnelles

Il n'y a pas de signature observationnelle unique pour les NAG. La liste ci-dessous regroupe certains éléments importants qui ont permis l'identification de systèmes comme étant des NAG.

- Les **émissions nucléaires optiques continues** sont visibles chaque fois que nous avons une vue directe sur le disque d'accrétion. Les jets peuvent aussi contribuer à ce composant des émissions d'un NAG.
- Les **émissions nucléaires d'infrarouges** sont visibles chaque fois que le disque d'accrétion et la matière environnant sont obscurcies par du gaz et de la poussière qui ré-émettent le rayonnement du noyau sous forme d'infrarouge. Étant des émissions thermiques, elles peuvent être distinguées des jets.
- Les **raies d'émissions optiques larges** proviennent de matériaux froids proches du trou noir central. Ces raies sont larges parce que les matériaux qui les émettent se déplacent à grande vitesse.
- Les **raies d'émissions optiques étroites** proviennent aussi de matériaux froids, mais ceux-ci étant plus éloignés du noyau, ils émettent des raies plus fines.
- Les **émissions continues d'ondes radio** sont toujours dues à un jet. Elles montrent un spectre caractéristique des synchrotrons.
- Les **émissions continues de rayons X** peuvent provenir à la fois d'un jet et de la couronne chaude du disque d'accrétion via des processus de séparations : dans les deux cas, on peut observer un spectre de faible puissance. Dans certains NAG radio-silencieux (voir plus bas), il y a un petit sursaut de rayons X et plus de faibles émissions. L'origine de ces petits sursauts n'a pas encore été tout à fait résolue pour le moment.
- Les **raies d'émissions de rayons X** sont le résultat de l'illumination de matériaux lourds et froids par un flux de rayons X continu. La fluorescence donne lieu à des raies d'émission variées, la plus connue étant celle du fer. Ces raies peuvent être étroites ou larges.

Types de galaxies actives

Les noyaux actifs des galaxies sont généralement divisés en deux classes : radio-silencieux (radio-quiet en anglais) et radio-bruyants (radio-loud en anglais). Dans les objets de la deuxième catégorie, les jets et les lobes qu'ils gonflent contribuent en grande partie à la luminosité de la galaxie, au moins dans le domaine radio. Les objets radio-silencieux sont plus simples puisque les jets et les émissions sous-jacentes peuvent être négligées.

Noyaux actifs radio-silencieux

- Les **régions de raie spectrale nucléaire de faible ionisation** sont un type de noyau galactique qui est entièrement défini grâce à ses raies d'émissions. Comme leur nom l'indique, ces galaxies montrent uniquement des raies spectrales indiquant la présence d'éléments faiblement ionisés, et n'ont aucune autre caractéristique des NAG. On pourrait donc se demander si tous les systèmes de ce type sont de vrais NAG (alimentés par l'accrétion d'un trou noir supermassif). Si cela est bien le cas, ils constituent les objets les moins lumineux parmi les NAG radio-silencieux.
- Les **galaxies de Seyfert** ont été les premiers objets à être différenciés parmi les galaxies actives. Elles montrent des raies d'émissions continues, étroites et (quelquefois) larges. Elles émettent souvent beaucoup de rayons X et, plus rarement, des jets visibles dans le domaine radio. Elles sont subdivisées en deux groupes : Seyfert 1 et 2. Les galaxies Seyfert 1 présentent bien plus de raies d'émissions, généralement intenses et larges, par rapport aux galaxies Seyfert 2. D'autre part les 1 émettent plus souvent des rayons X de faible énergie. Les galaxies abritant de tels noyaux sont en règle générale spirales ou irrégulières.
- Les **quasars radio-silencieux** sont essentiellement des versions plus lumineuses des Seyfert 1. La distinction est arbitraire et s'exprime en termes de magnitude optique. Les quasars sont des objets « quasi stellaires » en lumière visible. Ils montrent toujours des raies d'émissions continues de forte intensité dans les domaines optique et X. Ces galaxies peuvent être spirales, irrégulières, ou elliptiques. On remarque également une corrélation entre la luminosité du noyau et la masse de sa galaxie.
- Les **quasars 2** sont, par analogie aux Seyfert 2, des objets lumineux comme un quasar classique, mais dépourvus de puissantes raies d'émissions dans le domaine optique, qu'elles soient continues ou larges. Ils sont assez difficiles à trouver, même si un certain nombre de candidats possibles ont été détectés.

Noyaux actifs radio-bruyants

- Les **quasars radio-bruyants** se comportent exactement comme des quasars radio-silencieux à la différence qu'ils émettent des jets.
- Les **blazars** se distinguent par des émissions rapidement variables, polarisées dans le domaine optique, ainsi que par une production accrue de rayons X et d'ondes radio. Ces objets n'ont pas de raies d'émissions optiques, leur redshift ne peut donc être déterminé qu'à partir des caractéristiques de la galaxie hôte. Les raies d'émissions peuvent être intrinsèquement absentes ou simplement submergées par la variable additionnelle : dans ce dernier cas, elles peuvent se dévoiler lorsque ladite variable est à un niveau bas. Les blazars ont un comportement assez proche de celui des quasars radio-bruyants si ce n'est qu'ils varient très rapidement. Dans les deux cas, on pense que l'émission variable provient de jets orientés vers la Terre. Cela a pour conséquence d'amplifier à la fois la luminosité du jet et l'amplitude de la variabilité.
- Les **radiogalaxies** sont un groupe hétérogène d'objets émettant une grande gamme d'ondes radio. En dehors de cela, leurs propriétés en tant que NAG sont diverses. Elles peuvent néanmoins être globalement classées selon leur excitation. Les radiogalaxies faiblement excitées ne présentent pas de raies d'émissions forte et étroites, d'autant plus que les lignes excitées proviennent probablement d'un mécanisme différent. Leurs émissions de lumière visible et de rayons X prennent uniquement leur source dans un jet. En revanche, les raies d'émissions des radiogalaxies fortement excitées ressemblent à celle des Seyfert 2. La majorité de ces galaxies sont elliptiques.
- Les **galaxies starburst** émettent un pourcentage élevé de leur lumière (parfois jusqu'à 99 %) en tant que lumière infrarouge. On suppose que ces galaxies sont dans une période intensive de formation d'étoiles, et que la grande quantité de rayonnement des jeunes étoiles est absorbée par les nuages moléculaires. Ces derniers réémettraient alors cette énergie dans le domaine infrarouge.

Unification

Les modèles unifiés des NAG regroupent deux classes d'objets ou plus, basés sur les classifications observationnelles traditionnelles, en proposant qu'il y a bien un type unique d'objet physique observé sous différentes conditions. Les modèles unifiés les plus favorisés à ce jour sont les « modèles basés sur l'orientation ». Ceux-ci proposent que les différences apparentes entre ces types d'objets soient simplement dues à des orientations différentes par rapport à la ligne de visée de l'observateur.

Unification des objets radio-silencieux

À de faibles luminosités, les objets devant être unifiés sont les galaxies de Seyfert. Les modèles unifiés proposent que les Seyfert 1 sont observées avec une vue directe sur le noyau actif ; alors que nous voyons le noyau des Seyfert 2 à travers des structures obscurcissantes, ce qui modifie les raies d'émissions que nous observons sur Terre. L'idée de base des modèles d'accrétion dépendant de l'orientation est que deux objets, appartenant apparemment à des catégories distinctes, peuvent appartenir à la même s'ils sont observés selon des lignes de mire différentes. L'image standard consiste en un tore de matière opaque encerclant le disque d'accrétion. Il doit être suffisamment épais pour cacher les raies larges, mais suffisamment fin pour laisser passer les raies étroites, qui sont observées dans les deux classes d'objets. Un tel tore a été observé pour la première fois autour du noyau actif de la galaxie Cygnus A ; son diamètre serait de 528 pc et sa hauteur de 286 pc. Les Seyfert 2 sont vues à travers ce tore. À l'extérieur de ce tore se trouvent des matériaux capables de dévier une partie des émissions nucléaires vers notre ligne de mire, ce qui nous permet d'observer certaines émissions de rayons X et de lumière visible, et dans certains cas, des raies d'émissions larges, celles-ci sont alors fortement polarisées, montrant qu'elles ont été déviées et prouvant que certaines Seyfert 2 « contiennent » réellement une Seyfert 1 cachée. Des observations en infrarouge appuient cette théorie. À de plus fortes luminosités, les quasars prennent la place des Seyfert 1, mais les « quasars 2 » correspondant sont hypothétiques à ce jour. S'ils n'ont pas le composant déviant des Seyfert 2, ils seront difficiles à détecter, mis à part leur raies fines et leur puissant rayonnement X.

Unification des objets radio-bruyants

Historiquement, le travail sur l'unification des objets radio-bruyants s'est concentré sur les quasars radio-bruyants très lumineux. Ceux-ci peuvent être mis en commun de par leurs raies d'émissions étroites d'une manière analogue à l'unification des Seyfert 1 et 2 (mais sans la complication du composant réflecteur : les radiogalaxies émettant des raies étroites ne montrent pas d'émissions nucléaires continues ou un quelconque flux de rayon X réfléchi, bien qu'elles émettent occasionnellement des raies larges polarisées). Les structures

radio à grande échelle de ces objets ont apporté la preuve que les modèles d'unifications basés sur l'orientation sont bien vrais. Lorsqu'elles sont disponibles, les preuves fournies par les observations en rayons X soutiennent la thèse d'unification : les radio galaxies montrent des preuves d'obscurité par un tore de matière alors que les quasars n'en montrent pas. Cependant, il faut prêter attention au fait que les objets radio-bruyants ont également un composant relatif aux petits jets, il est par conséquent nécessaire de recourir à la haute résolution afin de séparer les émissions thermiques des gaz chauds à grande échelle. À de petits angles de la ligne de visée, les jets dominent l'image et nous pouvons voir certaines variétés de blazar.

Cependant, la majorité des radiogalaxies sont des objets peu lumineux et peu excités. Ceux-ci ne présentent pas de fortes raies d'émissions optiques d'origine nucléaire, qu'elles soient étroites ou larges, et ont une raie continue dans l'optique, qui se trouve être entièrement relative au jet, et leurs émissions en rayons X proviennent également du jet seul. Ces objets ne peuvent être unifiés avec les quasars, bien qu'ils comprennent des objets très lumineux dans le domaine radio, puisque le tore ne pourra jamais masquer la région de raies étroites à la mesure requise et aussi parce que les études en infrarouge démontrent qu'ils n'ont pas de composant nucléaire caché. En fait, il n'y a absolument aucune preuve de l'existence d'un tore dans ces objets. Ils forment donc très probablement une classe à part dans laquelle seules les émissions relatives aux jets comptent. À de petits angles de la ligne de mire, ils apparaîtront comme des objets BL Lac.

Utilisations en cosmologie et évolution

Durant longtemps, les galaxies actives détenaient le record du plus grand décalage vers le rouge, du fait de leur forte luminosité (aussi bien en optique qu'en ondes radio) : elles ont toujours un rôle à jouer dans l'étude des débuts de l'univers. Néanmoins, on sait à présent que les NAG donnent, par nature, une image très biaisée de la galaxie à haut décalage vers le rouge « typique ».

L'étude de l'évolution des populations de NAG est plus intéressante. La plupart des classes de NAG lumineux (radio-silencieux et radio-bruyants) semblent avoir été beaucoup plus nombreux dans l'univers jeune. Cela suggère que les trous noirs massifs se sont formés relativement tôt et que les conditions pour la formation de NAG lumineux étaient plus facilement disponibles aux débuts de l'univers. Par exemple, il y avait beaucoup plus de gaz froid au centre des galaxies qu'il n'y en a maintenant. Cela implique aussi qu'un grand nombre d'objets qui ont été des quasars lumineux le sont beaucoup moins, voire même quasi sombres. L'évolution des populations de NAG peu lumineuse est bien moins limitée à cause de la difficulté de détecter et d'observer ces objets à de hauts décalage vers le rouge.

4) Les galaxies à anneaux ou annulaires

Elles ne rentrent dans aucune catégorie spécifique de galaxies, elles sont souvent le fruit de collisions ou de fusions de galaxies. Il y en a quelques exemples visuellement très parlants...



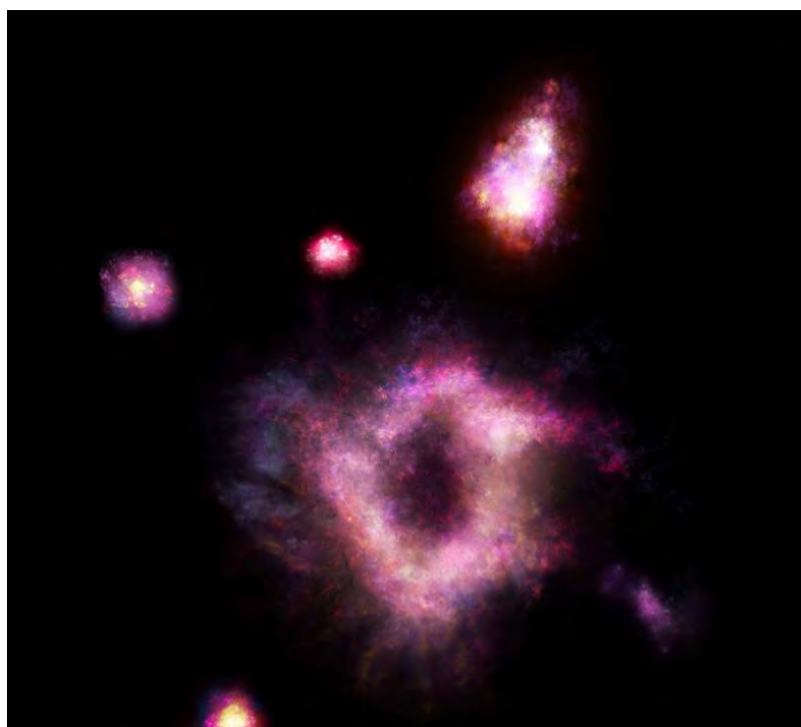
Arp 148, également appelée objet de Mayall, est une galaxie particulière située à environ 500 millions d'années-lumière (152 Mpc) du Soleil, dans la constellation de la Grande Ourse. Plus précisément, il s'agirait d'un objet résultant de la collision de deux galaxies et donnant naissance à une galaxie à anneau avec un fragment de galaxie irrégulier qui en émerge.



L'objet de Hoag est une galaxie atypique qui prend la forme d'une galaxie à anneau. L'objet de Hoag prend la forme d'un anneau presque parfait d'étoiles bleues entourant un noyau plus ancien d'étoiles jaunes. La galaxie est située dans la constellation du Serpent, à environ 600 millions d'années-lumière. Son diamètre externe est légèrement plus grand que la Voie Lactée. L'environnement séparant les deux populations stellaires pourrait contenir des amas stellaires trop peu lumineux pour être observés.



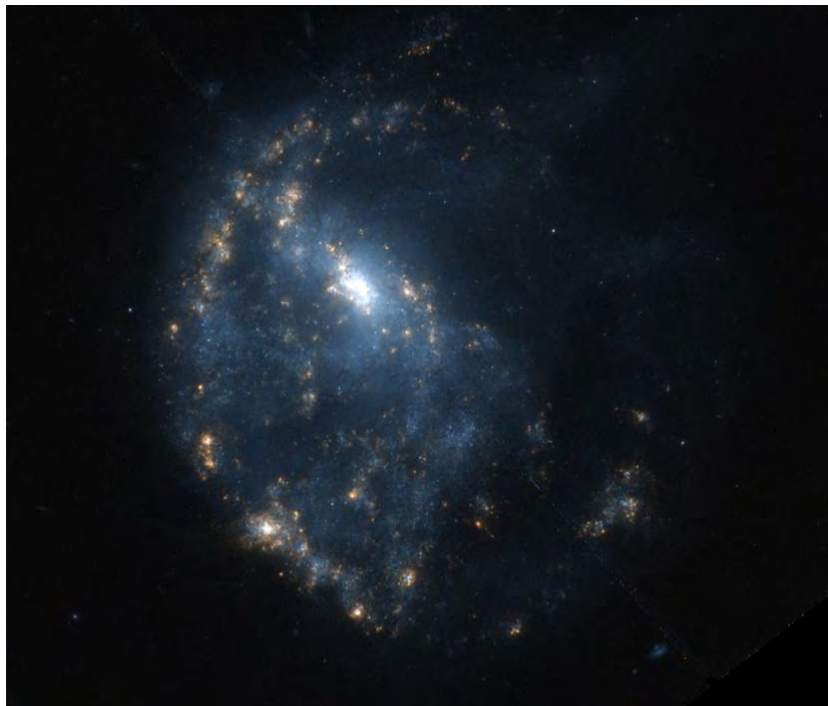
*La galaxie de la Roue de chariot (aussi appelée **ESO 350-40**) est une galaxie lenticulaire à anneau située à environ 500 millions d'années-lumière du Soleil dans la constellation du Sculpteur. Elle a un diamètre d'environ 150 000 années-lumière, légèrement plus grande que la Voie Lactée. Elle possède une masse d'environ 2,9 à 4,8 milliards de masses solaires et une vitesse de rotation d'environ 217 km/s*



La galaxie à anneau R5519, capturée à 11 milliards d'années-lumière du système solaire, nous en apprend plus sur l'apparition des galaxies spirales durant la jeunesse de l'Univers.



↑ **AM 0644-741**, également connu sous le nom d'**Anneau de Lindsay-Shapley**, est une galaxie lenticulaire non barrée et une galaxie en anneau, située à 300 millions d'années-lumière dans la constellation du Poisson volant, visible dans l'hémisphère sud. Le noyau jaunâtre était autrefois le centre d'une galaxie spirale normale, et l'anneau qui entoure actuellement le centre a un diamètre de 150 000 années-lumière. Il est théorisé que l'anneau se serait formé par une collision avec une autre galaxie, ce qui a déclenché un effet gravitationnel provoquant la condensation du gaz et de la poussière dans la galaxie et la formation d'étoiles, ce qui l'a forcée à s'étendre loin de la galaxie et à créer un anneau. L'anneau est une région de formation d'étoiles rampante dominée par de jeunes étoiles massives, bleues et chaudes. Les régions roses le long de l'anneau sont des nuages raréfiés d'hydrogène gazeux rougeoyant qui fluorescent alors qu'elles sont bombardées par une forte lumière ultraviolette émise par les étoiles bleues. Il est probable que l'anneau d'AM 0644-741 continuera à s'étendre pendant encore 300 millions d'années, après quoi il commencera à se désagréger.



↑ **NGC 922** est une galaxie spirale barrée située dans la constellation du Fourneau à environ 138 millions d'années-lumière de la Voie Lactée. Elle a été découverte par l'astronome germano-britannique William Herschel en 1784. La classe de luminosité de NGC 922 est III_IV et elle présente une large raie H α . Elle renferme également des régions d'hydrogène ionisé. Sa forme particulière résulterait d'une collision entre une petite et une grande galaxie il y a environ 300 millions d'années.



← *NGC 4650A* est une galaxie à anneau polaire située dans la constellation du Centaure à environ 115 millions d'années-lumière de la Voie Lactée. C'est l'une des plus emblématiques galaxies ayant cette structure atypique, dont on dénombre une centaine d'occurrences. L'origine de cette morphologie particulière n'est d'ailleurs pas pleinement comprise. Elle pourrait être le fruit d'une collision de galaxies intervenue dans un passé suffisamment lointain, sans doute plus d'un milliard d'années. Le disque jaunâtre est constitué d'une population uniforme de vieilles étoiles rouges d'au moins 3 à 5 milliards d'années peut-être issues de l'une de ces galaxies en interaction, tandis que l'anneau bleuâtre est constitué d'étoiles plus jeunes de type OB formées il y a moins d'un milliard d'années. L'anneau polaire ne montre aucune structure spirale identifiable et ne s'inscrit visiblement pas dans un plan, puisque des étoiles se forment au-dessus du plan médian d'un côté et en dessous de ce plan de l'autre côté. Il contient beaucoup de gaz froid, contrairement au disque principal qui en est quasiment dépourvu.

Chapitre IV – La vie des galaxies

1) Création, formation et évolution des galaxies

Comme toute chose dans notre Univers, les galaxies naissent, vivent et meurent. On a abordé au début la naissance des galaxies dans un contexte post-Big Bang. On ne sait pas très bien comment, mais c'est très probablement dans les premières centaines de milliers d'années qui ont suivi le Big Bang, quand l'Univers a commencé à être transparent, des nuages de gaz ont commencé à s'agglutiner et à tourner, ce qui a donné naissance à des étoiles qui, elles-mêmes, se sont regroupées par attraction gravitationnelle pour former des ensembles, des galaxies.

La vie des galaxies peut suivre de nombreux parcours, en fonction de différents paramètres plus ou moins complexes. La galaxie la plus « vieille » qu'on a pu déceler (GN-z11) est à environ 13,4 milliards d'années-lumière. Elle est donc née au maximum 400.000 d'années après le Big Bang. Attention, on ne la voit pas telle qu'elle est en ce moment où nous parlons, on la voit comme elle était il y a 13,4 milliards d'années, puisque sa lumière a mis tout ce temps pour nous parvenir.

Donc les premières galaxies sont nées peu de temps après le Big Bang.

N'oublions pas ce principe essentiel et évident :

En astronomie, quand on regarde le ciel, on regarde le passé !

Cela vaut pour tous les objets de l'Univers. Quand la lumière du Soleil, pourtant proche de nous à l'échelle cosmique, arrive dans notre œil, on le voit tel qu'il était il y a environ 8 minutes et 30 secondes, le temps pour sa lumière de nous parvenir à près de 300.000 km par seconde. Quand on regarde Saturne, l'image partie de cette planète a mis 80 minutes pour arriver jusqu'à nos yeux, etc. La lumière de **Sirius** qui est l'étoile la plus lumineuse vue de la Terre (et l'une des plus proches), nous arrive plus de 8 ans après qu'elle ait été émise...

L'étude de la **formation et de l'évolution des galaxies** s'intéresse aux processus ayant abouti à la formation d'un univers hétérogène à partir d'une prémisses homogène, à la formation des premières galaxies (processus appelé **galactogénèse**), à la façon dont les galaxies changent avec le temps, et aux processus qui ont conduit à la grande variété des structures observées parmi les galaxies proches. C'est l'un des domaines de recherche les plus actifs en astrophysique.

Selon les théories de la formation des structures, on présume que la formation des galaxies résulte de légères fluctuations quantiques dans le cadre du Big Bang. Selon une opinion majoritaire l'évolution des galaxies se serait produite en conformité avec le modèle cosmologique **Lambda-CDM**. C'est-à-dire que le regroupement et la fusion des galaxies constituent leur moyen d'augmenter leur masse, et peut aussi déterminer leur forme et leur structure.

En cosmologie, le *modèle Λ CDM* (se prononce « Lambda CDM », qui signifie en anglais *Lambda - Cold Dark Matter*, c'est-à-dire le modèle « lambda - matière noire froide ») ou **modèle de concordance** est un modèle cosmologique du Big Bang paramétré par une constante cosmologique notée par la lettre grecque Λ et associée à l'énergie sombre. Il est souvent appelé modèle standard du Big Bang, car c'est le modèle le plus simple qui rend compte des propriétés de l'Univers observable :

- l'existence et la structure du fond diffus cosmologique ;
- la structure à grande échelle de la distribution des galaxies ;
- l'abondance des nucléons et celle des éléments légers (hydrogène, hélium et lithium) ;
- l'expansion de l'Univers et l'accélération de son expansion.

Ce modèle suppose que la théorie de la relativité générale décrit correctement la gravité à l'échelle cosmologique. Il est apparu à la fin des années 1990, après une période où plusieurs propriétés observées de l'Univers semblaient mutuellement incompatibles, et où aucun consensus n'existait sur la composition des densités d'énergie de l'Univers.

Description

Le modèle Λ CDM se fonde sur trois hypothèses :

- le principe cosmologique, en vertu duquel l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle ;
- le principe d'universalité, en vertu duquel la gravitation est décrite par la relativité générale à toutes les échelles ;
- le contenu en matière de l'Univers, donné par la matière noire froide (CDM), les baryons et le rayonnement.

L'Univers contient, de plus, de l'énergie sombre. La lettre grecque Λ est usuellement le symbole de la constante cosmologique, qui est la forme la plus simple d'énergie sombre. Un tel modèle est aujourd'hui considéré comme le modèle cosmologique le plus simple pouvant décrire l'univers observable. Il est à la base du modèle standard de la cosmologie. Il a supplanté le modèle SCDM, identique si ce n'est qu'il ne possède pas d'énergie sombre, dans le courant des années 1990.

La motivation de ce type de modèle provient de la combinaison de plusieurs observations qui contraignent certains paramètres cosmologiques :

- la détection indirecte de matière noire, par son influence gravitationnelle au sein des galaxies et des amas de galaxies ;
- l'estimation de la densité de cette matière noire, qui est inférieure à la densité critique de l'Univers ;
- les contraintes sur la courbure spatiale de l'Univers, qui indiquent que sa densité totale est très proche de la densité critique ;
- l'observation de l'accélération de l'expansion de l'Univers par l'étude de la distance de luminosité des supernovas de type Ia, qui implique l'existence d'énergie sombre.

La combinaison de ces contraintes rend nécessaire la présence de matière sombre, ainsi que l'adjonction d'une autre forme de matière, l'énergie sombre, ayant un effet répulsif sur l'expansion de l'Univers.

Formation des premières galaxies

Pendant une certaine durée après le Big Bang, l'Univers s'est trouvé dans un remarquable état d'homogénéité, comme le montre l'observation du fond diffus cosmologique, ou CMB (pour l'anglais *Cosmic Microwave Background*). Ses fluctuations varient en effet de moins d'une partie pour cent mille. Il n'y avait pas ou peu de structures dans l'Univers, et donc pas de galaxies. On doit alors se demander comment l'univers uniformément réparti du CMB a pu devenir l'univers agglutiné que nous voyons aujourd'hui.

La théorie la mieux acceptée concernant la façon dont ces structures sont apparues veut que toutes les structures à grande échelle de l'Univers que nous observons aujourd'hui se soient formées consécutivement à l'accroissement de la fluctuation primordiale de densité. Il s'agit de changements locaux minimes de la densité de l'univers initial, alors confiné dans un volume réduit. Au fur et à mesure du refroidissement de l'Univers, des agrégats de matière noire ont commencé à se condenser, puis, à l'intérieur, du gaz a commencé sa condensation. Les fluctuations primordiales ont attiré par gravitation le gaz et la matière noire vers les zones les plus denses, ce qui a engendré les graines de ce qui allait plus tard devenir des galaxies. Ces structures ont constitué les premières galaxies. À ce stade, l'Univers était presque exclusivement constitué d'hydrogène, d'hélium et de matière noire. Peu après la formation des premières protogalaxies, l'hydrogène et l'hélium gazeux dont elles étaient constituées commença à se condenser pour constituer les premières étoiles. Ainsi se formèrent les premières galaxies. En 2007, avec le télescope de l'observatoire W. M. Keck, une équipe du California Institute of Technology découvrit 6 étoiles en formation dans une galaxie située à 13,2 milliards d'années-lumière (mesure des distances en cosmologie), et donc créées lorsque l'Univers n'était âgé que de 500 millions d'années.

Dans ses premiers âges, l'Univers était le siège de phénomènes extrêmement violents, et les galaxies crurent très rapidement, évoluant par accrétion de galaxies de masses inférieures. Le résultat de ce processus est l'empreinte laissée dans la distribution des galaxies de l'Univers proche (voir l'image du relevé 2dF Galaxy Redshift Survey). Les galaxies ne sont pas des objets isolés dans l'espace, mais se distribuent plutôt selon de grands réseaux cosmiques de filaments. Aux endroits où se rencontrent ces filaments, des amas de galaxies denses se constituent, qui ont commencé comme les petites fluctuations de densité. En conséquence, la distribution des galaxies est étroitement liée à la physique de l'Univers primordial. Malgré ses nombreuses réussites, cette image ne suffit pas à expliquer la variété des structures que nous observons parmi les galaxies. Celles-ci apparaissent avec une grande variété de formes, depuis les galaxies elliptiques arrondies et sans particularité, jusqu'aux galaxies spirales dont la forme aplatie rappelle celles de crêpes.

Propriétés couramment observées des galaxies

Parmi les caractéristiques des structures galactiques observées (y compris celles relatives à notre Voie lactée) que les astronomes aimeraient expliquer avec les théories de formation des galaxies, se trouvent les suivantes (liste non exhaustive) :

- Les galaxies spirales et les disques galactiques sont extrêmement fins, denses et en rotation rapide. La longueur du disque de la Voie lactée est 100 fois supérieure à son épaisseur.
- La majeure partie de la masse d'une galaxie est constituée de matière noire, une substance qui n'est pas directement observable, et qui n'interagit d'aucune façon, excepté par l'intermédiaire de la gravité.
- Les étoiles des halos sont typiquement beaucoup plus vieilles et ont des métallicités très inférieures (ce qui signifie qu'elles sont presque exclusivement composées d'hydrogène et d'hélium) que les étoiles des disques.
- La partie externe des disques de nombreuses galaxies à disque est boursouflée (et souvent dénommée le « disque épais ») et composée de vieilles étoiles.
- Les amas globulaires typiques sont également âgés et pauvres en métaux, mais il en existe quelques-uns qui ne sont loin d'être aussi pauvres en métaux, et/ou qui ont de beaucoup plus jeunes étoiles. Des étoiles des amas globulaires paraissent aussi vieilles que l'Univers lui-même (en employant des méthodes de mesure et d'analyse complètement différentes).
- Les nuages à haute vitesse d'hydrogène neutre aspergent les galaxies, et l'on présume que c'est le cas depuis l'origine (ils correspondraient à la nécessaire source d'un disque gazeux à partir duquel les étoiles se sont formées).
- Les galaxies affectent un grand nombre de formes et de dimensions (voir la séquence de Hubble depuis le nuage géant anodin, constitué de vieilles étoiles (appelé galaxie elliptique) jusqu'au fin disque de gaz et d'étoiles ordonné avec précision dans des galaxies spirales).
- Le centre de la majorité des galaxies géantes contient un trou noir supermassif, dont la masse s'étage de millions à milliards de fois celle du Soleil. L'existence d'un tel trou noir est liée aux capacités de la galaxie de l'héberger.
- Nombre des propriétés des galaxies (y compris celles du diagramme couleur-magnitude des galaxies) indiquent qu'elles se répartissent fondamentalement en deux types divisés ainsi :
 - galaxies bleues d'étoiles en formation qui sont plutôt de type spirale,
 - et galaxies rouges sans formation d'étoiles qui sont le plus souvent des galaxies elliptiques.

La formation des galaxies à disque

Les propriétés capitales des galaxies à disque, également couramment désignées galaxies spirales, consistent en leur extrême finesse, leur rotation rapide et leur fréquente structure spiralée. Un des principaux défis de la formation des galaxies est le grand nombre des disques fins dans l'univers local. Le problème de l'extrême fragilité des disques fait que la fusion fréquente entre les galaxies peut rapidement amener à la disparition des disques.

Olin Eggen, Donald Lynden-Bell, and Allan Sandage ont proposé en 1962 une théorie selon laquelle les galaxies à disques se forment par un effondrement monolithique de grands nuages de gaz. Lorsque le nuage s'effondre, le gaz s'établit sous la forme d'un disque en rotation rapide. Connue comme un scénario de formation vers le bas, cette théorie est assez simple, mais n'est plus aussi largement acceptée à cause des observations de l'Univers jeune qui suggèrent avec force que lors de leur formation, la croissance des objets se déroule vers le haut (i.e. de petits objets fusionnent pour en donner de plus gros). Ce sont Leonard Searle et Robert Zinn qui les premiers ont proposé l'idée que les galaxies se soient formées par la coalescence de géniteurs de tailles inférieures.

Des théories plus récentes incluent l'agglomération de halos de matière noire dans le processus ascendant. Essentiellement, dans les premiers âges de l'Univers, les galaxies étaient surtout composées de gaz et de matière noire, et il y avait ainsi très peu d'étoiles. Comme les galaxies ont gagné de la masse en accréant de plus petites galaxies, la matière noire est demeurée principalement dans leur partie externe. C'est parce que la matière noire ne peut interagir que gravitationnellement, et de ce fait ne se dissipe pas. Le gaz cependant peut se contracter rapidement, et de ce fait entrer en rotation accélérée, jusqu'au résultat final d'un disque très fin et en rotation très rapide.

Les astronomes ne connaissent pas actuellement la nature du processus qui arrête la contraction. En fait les théories de formation des galaxies à disque ne réussissent pas à reproduire la vitesse de rotation et la taille des disques de galaxies. On a suggéré que le rayonnement provenant d'étoiles brillantes de formation récente, ou bien d'un noyau actif de galaxie, pouvait ralentir la contraction d'un disque en formation. On a aussi suggéré que le halo de matière noire peut étirer la galaxie, arrêtant ainsi la contraction.

Récemment, un grand nombre d'initiatives ont convergé pour tenter de comprendre les événements de fusion dans l'évolution des galaxies. Notre propre galaxie, la Voie lactée a une faible galaxie satellite (la Galaxie naine elliptique du Sagittaire), actuellement en cours de dépeçage et d'absorption par la Voie lactée. On pense que ce genre d'évènement est relativement courant dans l'évolution des grandes galaxies. La Galaxie Naine du Sagittaire orbite autour de la nôtre pratiquement à angle droit par rapport au disque. Elle traverse actuellement ce disque ; des étoiles des deux galaxies sont en train d'en être arrachées à chaque passage, et elles rejoignent le halo de notre galaxie. Il existe d'autres exemples de ces événements mineurs d'accrétion, et c'est vraisemblablement un processus continu pour de nombreuses galaxies. Des preuves de ce processus sont souvent observés sous la forme de bandes ou de courants d'étoiles s'extrayant des galaxies.

Le modèle de formation de galaxies Lambda-CDM fournit des prédictions insuffisantes pour les disques fins de galaxies dans l'Univers. La raison en est que ces modèles de formations de galaxies prédisent un grand nombre de fusions. Si une galaxie à disque fusionne avec une galaxie de masse comparable (au moins 15 % de sa propre masse), la fusion va vraisemblablement détruire, ou au moins considérablement détériorer le disque, en sorte que la galaxie résultante aura peu de chance d'être munie d'un disque. Bien que ce point demeure un problème en souffrance pour les astronomes, il ne signifie pas nécessairement que ce modèle Λ CDM soit complètement erroné. Il nécessite plus probablement d'être encore affiné, permettant de reproduire avec précision la population des galaxies observées dans l'Univers.

Fusion de galaxies et formation de galaxies à disque

Les galaxies les plus massives sont les galaxies elliptiques géantes. Leurs étoiles sont sur des orbites orientées de façon aléatoire à l'intérieur de la galaxie, c'est-à-dire que leur rotation n'est pas combinée avec celle du disque de la galaxie. Elles se composent de vieilles étoiles et ne comportent pas ou très peu de poussière. Toutes les galaxies elliptiques trouvées à ce jour recèlent un trou noir supermassif central, dont la masse est en corrélation avec celle de leur galaxie hôte. Les galaxies elliptiques ne sont pas entourées d'un disque, bien que quelques bulbes de galaxies à disque paraissent les assimiler aux galaxies elliptiques. Il est plus vraisemblable de trouver des galaxies elliptiques dans les régions les plus peuplées de l'Univers, telles que les amas de galaxies.

Les astronomes voient maintenant les galaxies elliptiques comme les systèmes les plus évolués de l'Univers. Que le moteur principal de l'évolution des galaxies elliptiques soit la fusion avec des galaxies de tailles inférieures est une idée maintenant largement acceptée. Ces fusions peuvent être extrêmement violentes ; les galaxies se télescopent souvent à des vitesses de 500 km s^{-1} (soit de l'ordre de 2 millions de km h^{-1}).

Dans l'Univers, de nombreuses galaxies sont gravitationnellement liées à une autre, c'est-à-dire qu'elles n'échapperont jamais à leur attraction réciproque. Si les deux galaxies ont des tailles comparables, la galaxie résultante ne sera comparable à aucune des galaxies initiales. L'image ci-dessus à gauche représente la fusion de deux galaxies à disques d'égales dimensions. Durant la fusion, les étoiles et la matière noire de chacune des galaxies sont affectées par l'autre galaxie en approche. Vers les derniers stades de la fusion, le potentiel gravitationnel, la forme des galaxies, commence à changer si rapidement que les orbites des étoiles en sont profondément affectées et qu'elles perdent tout lien avec leurs orbites antérieures. Ce processus est dénommé *relaxation violente*. Ainsi, lorsque deux disques galactiques entrent en collision, leurs étoiles ont d'abord une rotation ordonnée dans le plan de leurs disques respectifs. Durant la fusion, ce mouvement ordonné est transformé en énergie chaotique : la galaxie résultante est dominée par des étoiles qui orbitent selon un réseau de trajectoires complexes et désordonnées. Et ce sont bien des étoiles sur des orbites chaotiques et désordonnées que l'on voit dans les galaxies elliptiques.

Les fusions sont aussi le lieu d'un nombre extrêmement important de formation d'étoiles. Pendant la durée d'une fusion, certaines galaxies peuvent créer chaque année l'équivalent de plusieurs centaines de masses solaires de nouvelles étoiles, ce qui est très grand en comparaison de notre galaxie qui produit de l'ordre de 10

étoiles chaque année. Bien que pendant une fusion, les étoiles ne se rapprochent presque jamais suffisamment pour entrer en collision, les nuages moléculaires géants tombent rapidement vers le centre de la galaxie où ils entrent en collision avec d'autres nuages moléculaires. Ces collisions induisent alors la condensation de ces nuages en nouvelles étoiles. On observe ce phénomène de fusion de galaxies dans l'Univers proche. Mais ce processus était plus prononcé pendant les fusions qui ont formé la plupart des galaxies elliptiques que nous observons aujourd'hui, ce qui s'est vraisemblablement produit il y a de 1 à 10 milliards d'années, lorsqu'il y avait beaucoup plus de gaz, et donc plus de nuages moléculaires contenus dans les galaxies. Également, à l'écart du centre de la galaxie, les nuages de gaz s'élancent l'un vers l'autre, produisant des chocs qui stimulent la formation de nouvelles étoiles dans les nuages de gaz. Le résultat de tous ces événements violents se traduit par la tendance des galaxies vers une moindre quantité de gaz disponible pour la formation d'étoiles après leur fusion. Ainsi, si une galaxie s'est impliquée dans une fusion importante, et passé quelques milliards d'années, il restera très peu d'étoiles jeunes (voir évolution stellaire) à la galaxie. C'est bien ce que nous voyons aujourd'hui dans les galaxies elliptiques actuelles : très peu de gaz moléculaire et très peu de jeunes étoiles. On pense que cela est dû au fait que les galaxies elliptiques représentent le produit final des fusions majeures ayant consommé la plus grande partie du gaz initial lors des fusions, en sorte que toute formation d'étoiles postérieure à la fusion est tarie.

Dans le Groupe Local, la Voie lactée et la Galaxie d'Andromède (M31) sont liées gravitationnellement. Elles s'approchent actuellement l'une de l'autre à grande vitesse. Si les deux galaxies se rencontrent effectivement, chacune passera à travers l'autre. La gravité leur apportera à toutes deux de sévères déformations et elles éjecteront du gaz, de la poussière et des étoiles dans l'espace intergalactique. Elles s'éloigneront alors l'une de l'autre, ralentiront et s'élançeront à nouveau l'une vers l'autre pour une nouvelle collision. Finalement, après répétition d'un nombre variable de ces épisodes, elles fusionneront complètement, à l'exception de quelques bandes de gaz et de poussières qui flotteront dans l'espace proche de la galaxie elliptique géante nouvellement formée. M31 est réellement très distordue : les bords sont gondolés. Cela est probablement dû aux interactions avec ses propres compagnons galactiques, ainsi qu'à des fusions possibles avec des galaxies naines de formes sphéroïdales dans un passé récent, dont les rémanents sont encore visibles dans le disque de la galaxie.

À notre époque, de grandes concentrations de galaxies (amas de galaxies et superamas) sont encore en cours d'assemblage. Bien que nous ayons appris énormément de choses sur notre galaxie et sur les autres, la question la plus fondamentale sur la formation et l'évolution des galaxies n'a encore reçu que des tentatives de réponses.

Modèle alternatif pour la formation des galaxies

Le modèle des protogalaxies est souvent admis comme le modèle classique de la formation des galaxies. Il stipule que, dans les débuts de l'univers, les gaz étaient répartis à peu près équitablement dans l'espace jusqu'à ce que ces gaz commencent à s'effondrer en étoiles qui atteignaient régulièrement les 200 masses solaires. Ces étoiles se sont ensuite rassemblées en petits groupes sous l'effet de leur propre gravité, puis en plus grands groupes, puis en groupes encore plus grands et ainsi de suite jusqu'à former des galaxies. Un modèle beaucoup plus récent, le modèle des courants froids, dit lui aussi que les gaz étaient répartis de manière uniforme, mais que la matière s'est rassemblée en courants froids convergeant vers des grumeaux plus denses. Certains de ces grumeaux se sont agglomérés, formant de gigantesques amas, d'où l'origine des galaxies elliptiques. D'autres sont encore en orbite autour de ces amas. Perdant leurs étoiles tout en se dirigeant vers ces agglomérations, ils ont formé des bras spiraux.

2) Vie et disparition des galaxies

Ici, de multiples éléments peuvent se produire. D'abord, les galaxies (essentiellement les galaxies spirales) grandissent en voyant naître en leur sein de plus en plus d'étoiles. Ces étoiles naissent quand des nuages de gaz, essentiellement de l'hydrogène (le gaz le plus simple et le plus abondant dans l'Univers), vont voir leurs atomes se rapprocher sous l'effet de la gravitation, se condenser de plus en plus. Quand on comprime un gaz, il chauffe... Ce gaz va tellement chauffer et tourner sur lui-même que quand il atteindra la température d'environ 15 millions de degrés, cela va provoquer le déclenchement d'une fusion nucléaire qui va entraîner la création d'une ou généralement plusieurs étoile(s). Le disque qui tourne aura en son cœur une température de 15 millions de degrés au minimum, et l'étoile va commencer à combiner des atomes d'hydrogène pour produire de l'hélium, qui est un autre gaz plus lourd. Quand le disque tourne, il arrive qu'il emporte avec lui des impuretés de toutes sortes qui pourront devenir des planètes qui resteront en orbite autour de leur étoile.

Petit rappel sur les étoiles qui peuplent les galaxies :

Au cours de leur vie, les étoiles vont fabriquer des éléments de plus en plus lourds, mais il faut distinguer les petites étoiles (de 0,5 à 5 ou 6 fois la masse de notre Soleil) des grosses étoiles (minimum de 6 à 8 fois jusqu'à des dizaines voire centaines de fois la masse solaire). Plus les étoiles sont petites, plus elles vont vivre très longtemps, plusieurs milliards d'années, voire des dizaines de milliards d'années. Ne pouvant pas, à cause d'une température intérieure insuffisante, transformer des gaz au-delà du carbone, ces petites étoiles vont expulser leurs gaz en se dilatant, devenir provisoirement des « géantes rouges », puis ces étoiles vont brusquement se contracter et se transformer en étoiles appelées « naines blanches », minuscules étoiles très chaudes et très denses (de la taille d'une planète) qui vont s'éteindre progressivement en quelques milliards d'années de plus. [\[Attention il existe aussi de « vraies » géantes rouges qui n'ont rien à voir avec les petites étoiles qui se dilatent, mais qui sont nativement d'énormes étoiles qui deviennent rouges en se refroidissant !\]](#)

Les étoiles plus massives, qui vivent beaucoup moins longtemps (en général quelques centaines de millions d'années), vont prolonger le processus de fusion des éléments au-delà de l'hélium et du cycle CNO (carbone, azote, oxygène), c'est ce que l'on appelle la nucléosynthèse stellaire, et continuer à transformer les éléments qui la composent. Mais ce processus ne sera possible pour les plus massives que jusqu'à la fusion du fer, voire du cobalt et du nickel. À chaque étape, le nouvel élément issu de la fusion viendra occuper le cœur de l'étoile qui présentera alors une structure en couches, dite « en pelure d'oignon » du plus lourd au plus léger. C'est donc le cœur de l'étoile qui en grossissant va bloquer le processus de fusion qui ne pourra plus avoir lieu que dans sa périphérie. Ce ralentissement du moteur thermonucléaire aura pour effet d'amoindrir la pression de radiation qui compense et stoppe l'effondrement gravitationnel de l'étoile lorsqu'elle atteint son équilibre hydrostatique.

La chaleur générée par l'effondrement déclenche à chaque étape la fusion du nouvel élément qui a son tour compense l'effondrement par la pression de radiation et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on appelle « le pic du fer » l'élément 26, le plus stable du tableau périodique dont la fusion consomme plus d'énergie qu'elle n'en produit, ce blocage provoquera la mort de l'étoile par l'effondrement du cœur créant une onde de choc qui soufflera les couches extérieures dans une explosion gigantesque en supernova. A ce moment précis elles vont rejeter dans l'espace sous forme de gaz, tous les composants de la table périodique des éléments qui auront été fabriqués au cours du processus, plus quelques éléments au-delà du nickel, créés par capture rapide de neutrons et protons. On nomme ceci « la nucléosynthèse explosive ».

Donc, l'expansion d'une galaxie est liée à sa production d'étoiles. Mais cette production est tributaire de la quantité de gaz présente dans la galaxie (hydrogène et hélium essentiellement). La production d'étoiles « consomme » donc de grandes quantités de gaz. Quand une galaxie commencera à voir ses quantités de gaz disponible décroître fortement, sa capacité à produire de nouvelles étoiles va décliner et à pratiquement s'arrêter. On approche alors de la fin (très lente) d'une galaxie, incapable de continuer à fabriquer des étoiles. Mais il arrive (assez souvent) qu'une galaxie rencontre l'une de ses voisines, qui peuvent être des galaxies naines ou irrégulières, mais qui peuvent aussi être de grosses galaxies. Ces fusions de galaxies et la combinaison des gaz qui les composent vont déclencher des réactions de réchauffement de gaz qui seront propices à de nombreuses créations de nouvelles étoiles. Par exemple, la Galaxie d'Andromède est pauvre en étoiles bleues (donc jeunes) et c'est une très grande galaxie vieillissante. Notre galaxie, la Voie Lactée a un meilleur taux de formation d'étoiles, elle est plus active. On soupçonne d'ailleurs fortement que la Voie Lactée a pu, dans un passé plus ou moins lointain, « absorber » plusieurs petites galaxies, ce qui a contribué à sa capacité à créer des étoiles. La collision (ou fusion) de la Voie Lactée avec la galaxie d'Andromède, prévue dans 4,5 à 5 milliards d'années va créer aussi de nouvelles conditions cosmiques. Les fusions des galaxies spirales (les grandes galaxies les plus courantes), vont souvent donner lieu à d'immenses galaxies qui seront généralement des galaxies lenticulaires ou elliptiques. Ces gigantesques monstres galactiques ont la particularité d'être assez pauvres en gaz et d'être souvent constituées de vieilles étoiles. Dans ce cas, on approche plus ou moins d'une **très lente** fin de vie pour ces objets. En revanche on ne connaît pas l'influence que peut avoir la matière noire dans ces galaxies.

Certains astronomes pensent que, pendant des milliards d'années à venir, l'Univers sera de plus en plus sombre en raison de l'appauvrissement des galaxies en étoiles jeunes.

Chapitre V – Les dernières découvertes du JWST

Sauf que de nombreuses hypothèses intéressantes commencent à remettre en cause notre vision de la création de l'Univers : Grâce au JWST, on a découvert 5 choses qui seraient à priori impossibles :

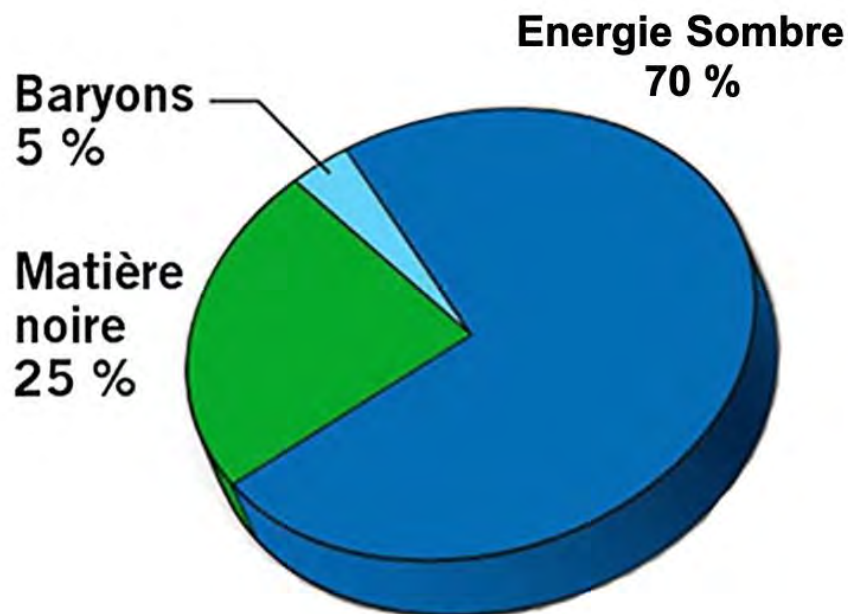
1) Des galaxies se seraient déjà formées trop tôt, notamment pendant l'âge sombre, et jusqu'à 100 millions d'années après le Big Bang, il y avait déjà trop de galaxies, et de surcroît trop massives.

2) On s'est rendu compte que les premières galaxies étaient trop petites et denses. Pensez à des galaxies qui auraient seulement une taille à peine plus grande qu'un amas globulaire...

3) On pensait également que les trous noirs se seraient formés tardivement par l'effondrement de la matière des galaxies et seraient devenus des trous noirs supermassifs. En fait il semblerait que les trous noirs auraient précédé la formation des galaxies et auraient été créés spontanément dans l'Univers, vers 300 millions d'années après le Big Bang !!!

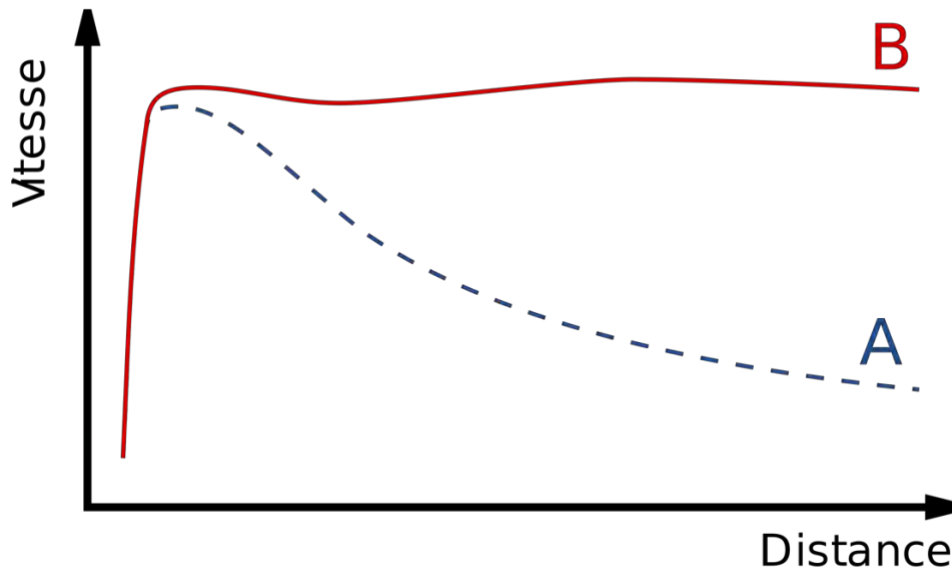
4) De nombreuses galaxies seraient mortes trop tôt, par le fait qu'elles arrêtaient de fabriquer de nouvelles étoiles. Webb a trouvé une galaxie morte seulement quelques centaines de millions d'années après le Big Bang. Déjà certaines galaxies sont nées très tôt, ont grossi très vite mais parfois elles sont mortes également très tôt, et pas à cause des trous noirs.

5) Des galaxies spirales seraient nées trop tôt, trop rapidement, juste après les très petites galaxies. On pensait que les galaxies spirales nécessitaient des milliards d'années pour se former, à l'instar de la Voie Lactée par exemple. On sait que les galaxies auraient du disparaître il y a déjà des milliards d'années. Ce qu'on pense maintenant être la réalité de l'Univers est que l'énergie sombre qui représente près de 70 % de sa masse, compose un gigantesque réseau neuronal, interconnecté, entre les galaxies et qui véhicule de la matière entre les galaxies et notamment la quantité de matière qui est 90 % de la matière baryonique (en dehors celle qui reste sans bouger dans les galaxies). Ce serait cet apport quasi permanent d'énergie qui ferait que la plupart des galaxies existent encore. C'est aussi la présence de ces 70 % de l'énergie sombre et son approvisionnement qui rend possible les cinq choses ci-dessus qui nous paraissaient impossibles de prime bord, avant le James Webb.



Dans l'univers, la matière visible serait la matière baryonique, soit seulement 5 % seulement du total. Encore faut-il envisager que seulement 10 % de ces 5 % se trouvent dans les galaxies, soit 0,5 % du total. On verra ultérieurement où sont passés les 4,5 % restant de la matière baryonique...

On pense déjà depuis quelques dizaines d'années que la matière noire se situe essentiellement sur la partie extérieure des galaxies et non dans leur centre. C'est la présence de matière noire qui ferait que les étoiles situées en périphérie des galaxies n'obéiraient pas aux lois de la dynamique de Kepler.



Courbes de rotation d'une galaxie spirale typique : en A courbe prédite, en B courbe observée. La différence entre les deux courbes est attribuée à la matière noire.

La **courbe de rotation d'une galaxie** peut être représentée par un graphe qui pointe la vitesse orbitale des étoiles ou du gaz dans la galaxie sur l'axe des Y en fonction de leur distance depuis le centre de la galaxie sur l'axe des X .

Une règle (ou loi) générale de rotation des disques de particules en rotation peut s'énoncer ainsi : les galaxies dont la distribution des masses est uniforme ont des courbes de rotation croissante du centre vers les bords. Les galaxies ayant un noyau au centre du disque (ligne B de la figure) ont une courbe de rotation plate et horizontale du centre vers les bords, alors que les systèmes dont la majeure partie de la masse est concentrée au centre de leur disque de rotation (ligne pointillée A sur la Figure), telles que le système planétaire du Soleil ou le système des lunes de Jupiter, ont une courbe de rotation décroissante du centre vers les bords.

On observe que certaines étoiles tournent autour du centre de leur galaxie à une vitesse constante dans une large gamme de distance depuis le centre de la galaxie. On peut ainsi calculer qu'elles tournent autour d'un disque de matière avec un noyau central. La plupart des galaxies à faible brillance de surface (LSB, de l'anglais **Low Surface Brightness**) tournent selon une courbe de rotation croissante du centre vers les bords, ce qui indique qu'elles n'ont qu'un faible noyau central. Et les étoiles tournent beaucoup plus vite que si elles se trouvaient dans un potentiel newtonien libre.

Le **problème de la rotation des galaxies** est la différence entre l'interprétation du rapport luminosité/masse observé de la matière dans les portions de disque des galaxies spirales et le rapport luminosité/masse de la matière dans le cœur des galaxies. On pense actuellement que cette différence trahit la présence de matière noire qui pénètre la galaxie et s'étend dans son halo galactique (un halo de matière noire). Une explication alternative tient dans la modification des lois de la gravité, telle que proposée par la théorie MOND (de l'anglais **MO**dified **N**ewtonian **D**ynamics, en français : Dynamique Newtonienne Modifiée).

Histoire et description du problème

En 1959, Louise Volders démontra que la galaxie spirale M33 (la galaxie du Triangle) ne tourne pas comme on s'y attendait d'après la dynamique de Kepler, résultat qui s'étendit à de nombreuses autres galaxies spirales dans les années 1970. Sur la base de ce modèle, la matière (telle que les étoiles et le gaz) dans la portion de disque d'une galaxie spirale devraient orbiter autour du centre de la galaxie de la même façon que les planètes dans le Système solaire orbitent autour du Soleil, c'est-à-dire selon les lois de la mécanique newtonienne. Sur cette base, on s'attendrait à ce que la vitesse orbitale moyenne d'un objet situé à une distance spécifiée de la majorité des distributions de masses décroisse en raison inverse de la racine carrée du rayon de l'orbite (la ligne pointillée de la figure 1). Lors de la découverte des différences, on a pensé que la plus grosse partie de la masse de la galaxie devait se trouver dans le noyau galactique près du centre. La direction de la rotation découlait de la façon dont la galaxie s'est formée.

Cependant, les observations de la courbe de rotation des galaxies spirales ne le confirment pas. Au contraire, les courbes ne diminuent pas comme attendu en fonction de l'inverse du carré, mais sont "plates" ; à l'extérieur du noyau central, la vitesse est presque constante en fonction du rayon (en trait plein sur la Fig. 1). L'explication qui nécessite l'ajustement fin aux lois physiques de l'Univers est celle de l'existence d'une quantité substantielle de matière éloignée du centre des galaxies qui n'émet aucune lumière dans le rapport masse/lumière du noyau central. Les astronomes proposent l'idée que cette masse supplémentaire soit due à la matière noire dans le halo galactique, formant un halo de matière noire, dont l'existence fut initialement postulée par Fritz Zwicky quelque quarante années plus tôt dans son étude sur des masses des amas de galaxies. De nos jours, il existe un grand nombre d'éléments de preuves observationnelles qui mettent en évidence la présence de matière noire froide, et son existence est une composante majeure du modèle Λ CDM qui décrit la cosmologie de l'Univers.

Recherches avancées

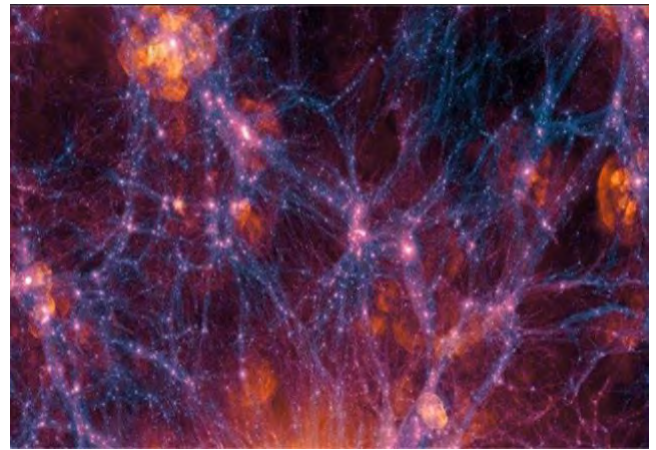
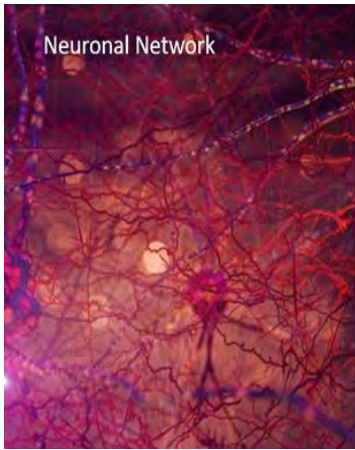
Des travaux récents sur les courbes de rotation des galaxies, dont le rôle dans la conviction de l'existence de la matière noire fut des plus déterminants, présentent certains de ses défis les plus importants. Dans les années 1990, des études détaillées des courbes de rotation des galaxies à faible brillance de surface (ou galaxies LSB, de l'anglais *low surface brightness galaxies*) et sur leur position sur la relation de Tully-Fisher montrèrent qu'elles ne se comportaient pas comme prévu. Ces galaxies devaient être dominées par la matière noire d'une façon surprenante. Cependant, de telles galaxies naines dominées par la matière noire pouvaient détenir la clé pour résoudre le problème des galaxies naines de la formation des structures.

D'autres défis à la théorie de la matière noire, ou au moins sa forme la plus populaire, la matière noire froide (CDM pour l'anglais *cold dark matter*) provinrent de l'analyse des centres des galaxies à faible brillance de surface. Des simulations numériques basées sur la CDM donnaient des prédictions des formes des courbes de rotation au centre des systèmes dominés par la matière sombre, comme ces galaxies. Des observations des courbes de rotation réelles ne montraient les formes prédites. Les cosmologistes théoriciens considèrent que ce problème appelé *Problème de concentration du halo* de matière noire froide comme une question soluble.

Que cette théorie de la matière noire continue d'être défendue comme une explication pour la courbe de rotation des galaxies s'explique par le fait que la preuve de la matière noire ne dérive pas seulement de ces courbes. Elle est seule à simuler avec succès la formation des structures à grande échelle que l'on peut voir dans la distribution des galaxies ainsi qu'à expliquer la dynamique des groupes et amas de galaxies (telle que Zwicky l'avait proposé initialement). La matière noire prédit également convenablement les résultats des observations des lentilles gravitationnelles.

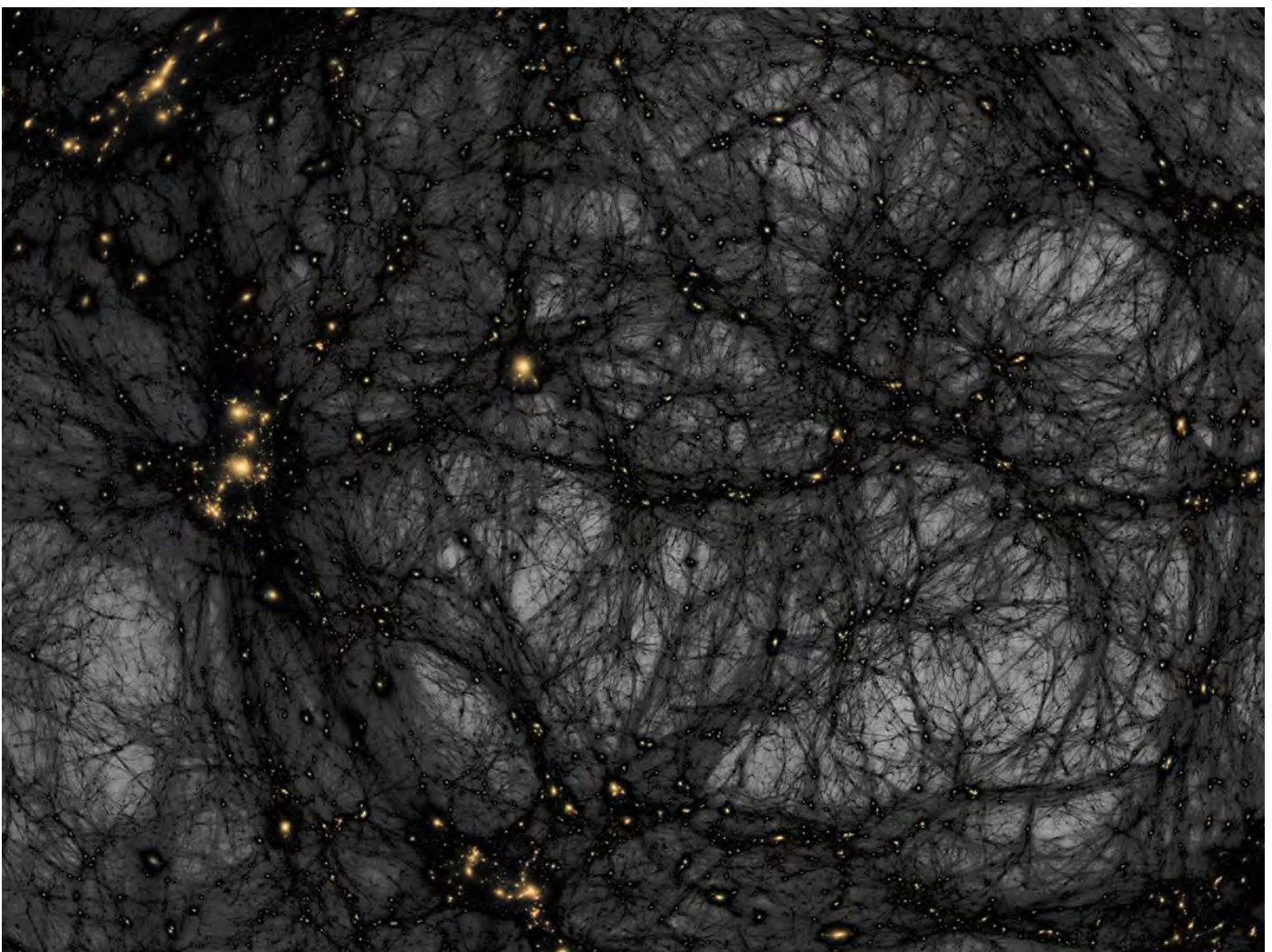
Alternatives à la matière noire

Il existe un nombre limité de tentatives de trouver des explications alternatives à la matière noire pour expliquer les courbes de rotation des galaxies. L'une des plus discutée est la théorie MOND (de l'anglais **M**odified **N**ewtonian **D**ynamics), proposée à l'origine comme une explication phénoménologique depuis 1983, mais dont on s'est aperçu qu'elle dispose d'un pouvoir prédictif pour les courbes de rotation des galaxies LSB. Ceci suppose que la physique de la gravité change aux grandes échelles mais, jusqu'à récemment, ce n'était pas une théorie relativiste. Cependant, ceci a changé avec le développement de la théorie de la gravité tenseur-vecteur-scalaire (TeVeS). Une alternative ayant obtenu plus de succès est la théorie de la gravité modifiée (en anglais **M**odified **G**ravity, **M**OG) de Moffat telle que la gravité scalaire-tenseur-vecteur (STVG). Brownstein et Moffat ont appliqué la théorie MOG à la question de la courbe de rotation des galaxies, et appliqué les adaptations à un large échantillon des plus de 100 galaxies LSB, ainsi que de galaxies HSB (pour High Surface Brightness, en français, haute brillance de surface) ou galaxies naines. Chaque courbe de rotation des galaxies fut adaptée sans matière noire, en utilisant seulement les données photométriques (matière stellaire et gaz visibles) et, en alternance, un modèle de distribution de masse à deux paramètres qui ne présumait d'aucun rapport masse/lumière. Les résultats furent comparés à ceux de MOND et furent presque indistinctement à la limite des données des courbes de rotation, alors que MOND prédisait une courbe de rotation éternellement plate, et alors que MOG prédit un retour final à la loi de la force gravitationnelle en carré inverse. D'autres alternatives sans hypothèses manifestes de matière noire sont basées sur des modèles de théorie du vide superfluide selon l'équation logarithmique de Schrödinger. Bien que ces alternatives ne soient pas encore considérées par la communauté des astronomes comme aussi convaincantes que le modèle de la matière noire, des études de lentilles gravitationnelles peuvent fournir les moyens de séparer les prédictions de théories alternatives de la gravitation des explications de la matière noire.



Ici à gauche des réseaux neuronaux dans un cerveau humain. À droite un réseau intergalactique tel que décrit supra

Ici aussi, un réseau neuronal intergalactique, constitué d'énergie sombre



Ici également, un réseau neuronal intergalactique, constitué d'énergie sombre

Chapitre VI – Les collisions et fusions galactiques

La règle générale veut que les galaxies s'éloignent les unes des autres et s'éloignent de plus en plus vite en fonction de l'expansion de l'Univers. On a remarqué que, plus ces galaxies s'éloignent de nous, plus elles vont vite. Ceci corrobore les découvertes d'Edwin Hubble dans les années 1920. En appliquant (ce qui avait été fait avant lui) l'effet Doppler-Fizeau.

Tout le monde a expérimenté le fait de croiser une voiture où l'on remarque que le son est plutôt aigu quand on se rapproche de l'autre voiture, mais que la hauteur du son descend une fois la voiture passée. C'est dû au mouvement relatif, à la vitesse de la voiture par rapport à la position de l'observateur. Le son entendu varie en fonction de la vitesse. La hauteur du son monte si l'objet se rapproche et il descend quand on l'a dépassé et qu'il s'éloigne. Le même phénomène se produit (en dehors du son) avec toutes les ondes électromagnétiques : la lumière, et toutes les autres fréquences même invisibles à nos yeux. C'est cet effet Doppler-Fizeau qui est également utilisé dans les radars, parmi d'autres applications.

En astronomie, on l'utilise pour calculer la vitesse et l'axe de déplacement d'objets célestes, notamment les galaxies. Quand une galaxie s'éloigne de nous, très rapidement, on constate ce qu'on appelle un décalage vers le rouge des couleurs de la galaxie (redshift en anglais). Si elle s'approche de nous on aura un décalage vers le bleu (blueshift en anglais). Plus le décalage est important par rapport à la couleur « normale » de la galaxie, plus elle s'éloigne vite, et inversement pour le bleu.

C'est pour cela qu'on sait que la galaxie d'Andromède se rapproche de nous, mais que la plupart des autres galaxies, généralement plus éloignées, s'éloignent de nous. Edwin Hubble a mesuré ce décalage vers le rouge, il a donc estimé la vitesse de fuite de nombreuses galaxies, évalué leurs distances et il en a déduit une constante H_0 (appelée « constante de Hubble ») : plus une galaxie est lointaine, plus sa vitesse de fuite est importante. Depuis la publication de cette constante, et aujourd'hui encore, de très nombreuses observations ont été faites pour la valider ou l'infirmer. On obtient une valeur allant de 63 à 77 mais ces chiffres et leur approximation ne sont pas satisfaisants. Cette constante de Hubble devrait d'ailleurs plutôt s'appeler constante de Lemaître, car c'est Georges Lemaître qui a créé cette loi en dérivant les équations de la relativité générale d'Einstein.

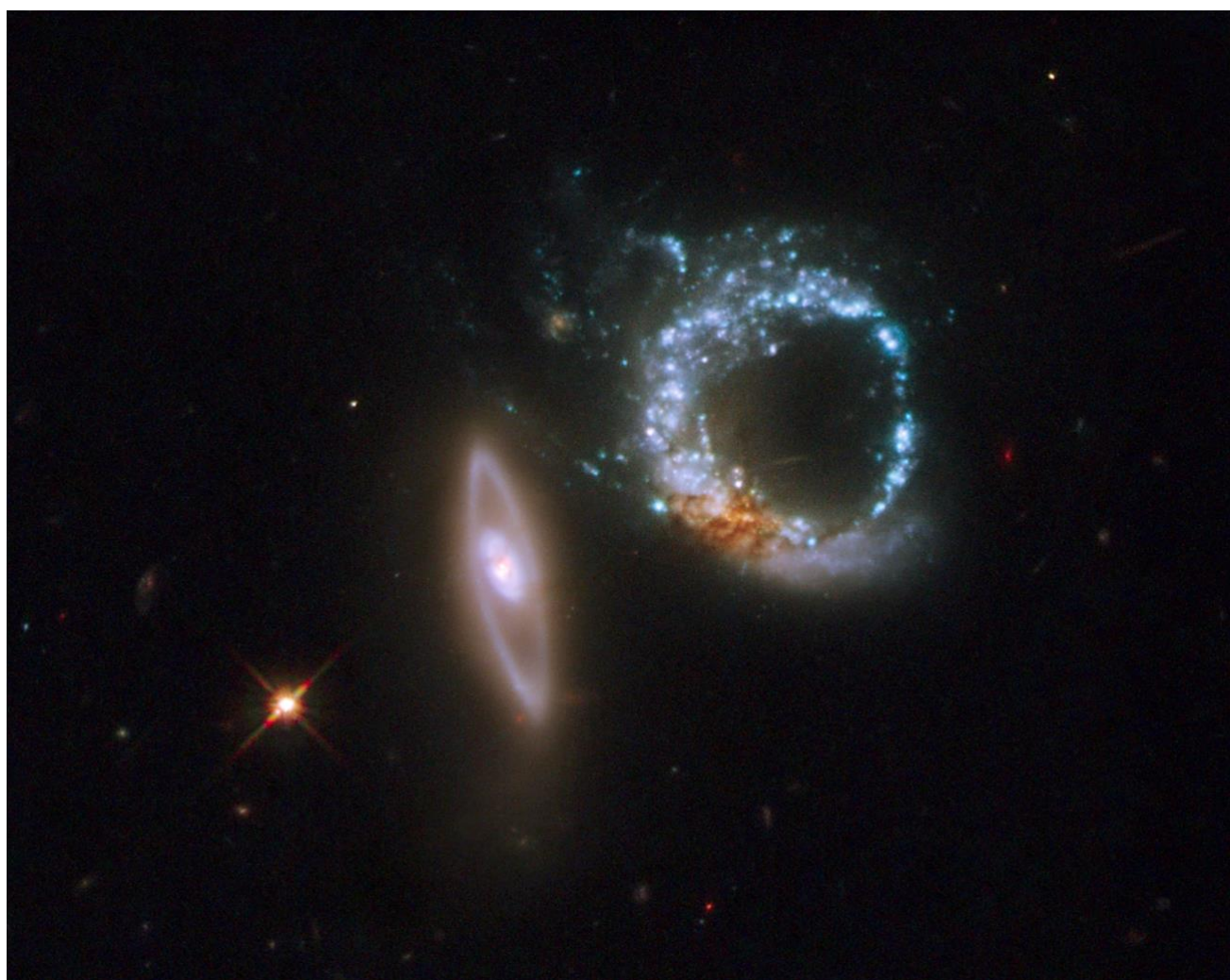
Retenons que le mouvement général des galaxies est une fuite qui les éloigne les unes des autres et également de nous. Cette fuite est le fruit de la vitesse propre de la galaxie, mais surtout de l'expansion de l'Univers où elle se trouve. **Prenons l'image d'un ballon peu gonflé (l'Univers) où l'on a dessiné de nombreux points (les galaxies). On gonfle le ballon plus fort : son diamètre va augmenter et les points vont devenir de plus en plus éloignés les uns des autres. Pour l'Univers c'est pareil, il est en expansion.** Par contre, ce phénomène d'expansion de l'Univers peut être contrecarré localement par la gravitation. Quand des galaxies sont plus ou moins proches les unes des autres, la force de gravité qui les attire peut alors être plus importante que la force qui les feraient s'éloigner. Ce cas est assez fréquent et contribue à créer des « amas de galaxies », où certaines d'entre-elles vont vivre ensemble et généralement se rapprocher en fonction de leur puissance d'attraction (donc de leurs masses). Ces rapprochements vont parfois aboutir à des « frôlements », voire à des fusions. Le terme de collision n'est pas très exact dans la mesure où, quand deux galaxies se rencontrent, les étoiles, les nuages de gaz et la matière noire dont elles sont faites vont se mélanger, s'additionner. Dans ces événements cataclysmiques il y a tellement de vide entre les étoiles de deux galaxies qui fusionnent, que les collisions étoile-étoile sont rarissimes. On pense que la densité moyenne d'une galaxie est comparable à de la fumée de cigarette... Par contre les formes des galaxies vont être fortement bouleversées. Ces phénomènes vont prendre des centaines de millions d'années, voire des milliards d'années pour arriver à leur terme.

Il y a de nombreux exemples dans l'Univers de telles fusions et rencontres galactiques, que l'on peut voir à des stades différents : l'approche, les premiers contacts, les structures bouleversées, jusqu'à la production d'une « super-galaxie finale » qui aura rassemblé les deux protagonistes en une unique galaxie, généralement elliptique. C'est comme cela qu'on sait que la galaxie d'Andromède (M31) et notre galaxie, la Voie Lactée sont sur une course de rencontre et de fusion. Rassurez-vous, cela devrait se produire dans environ 5 milliards d'années, mais ça paraît inéluctable. D'ailleurs, l'étude poussée de la Voie Lactée conduit les astronomes à dire que, dans son passé lointain, la Voie Lactée a déjà absorbé quelques petites galaxies et qu'elle va continuer à le faire avec quelques proches galaxies naines ou irrégulières.

Nous allons terminer ce document avec le magnifique spectacle que nous proposent les fusions de galaxies.



Les galaxies de Arp 87 (un duo NGC 3808A et 3808B dans la constellation du Lion). Visiblement en interaction, elles se situent à 300 millions d'A.L.



Les galaxies de Arp 147 sont deux galaxies annulaires assez étranges. L'une bleutée et l'autre rose avec un noyau. Visiblement en interaction elles sont dans la constellation de la Baleine, à 400 millions d'A.L.



*Les galaxies de Arp 271 : NGC 5426 et NGC 5427 (dans la constellation de la Vierge).
Diamètre total de l'ensemble : 130 000 A.L. Situées à 127 millions d'A.L.*



*Arp 81, constitué des 2 galaxies NGC 6622 et 6621 (dans la constellation du Dragon).
Elles sont en forte interaction. Elles sont à 300 millions d'A.L.*



L'une des plus belles choses du ciel ! *Arp 273* appelée la « **rose galactique** », 2 galaxies en interaction : *UGC 1810* et la petite *UGC 1813* (dans la constellation d'Andromède). À 300 millions d'A.L.



M 81 et M 82 (dans la constellation de la Grande Ourse). *M 81* est une « petite » galaxie spirale [60.000 A.L. de Ø] et se déplace avec *M 82*. Elles font partie du groupe G2, lui-même appartenant à l'Amas de la Vierge. À 11,8 millions d'A.L. *M 82* est complètement perturbée par *M 81*.



Rendez-vous entre les galaxies NGC 2207 et IC2163 dans la constellation du Grand Chien. Cette étreinte a commencé il y a 40 millions d'années et se terminera avec la fusion en une seule grande galaxie. Elles sont à 140 millions d'A.L.



La célèbrissime galaxie spirale M51 ou NGC 5194 (dite « Whirlpool galaxy » ou « galaxie du tourbillon », dans la constellation des Chiens de Chasse) et sa petite sœur la galaxie irrégulière NGC 5195. À 27,4 millions d'A.L. La petite, au bout de l'un des bras de la grande, sera absorbée.



NGC 6872, la plus grande galaxie spirale connue de l'Univers (522.000 AL de diamètre) est dans la constellation australe du Paon, à 212 millions d'A.L. La taille et l'apparence inhabituelle de la galaxie sont dues à l'interaction qu'elle entretient avec une galaxie beaucoup plus petite appelée IC 4970 (située juste au-dessus du centre de la grande galaxie NGC 6872 dans l'image.



NGC 4038 et 4039, les galaxies des « antennes » sont deux galaxies en interaction dans la constellation du Corbeau, à 45 millions d'A.L. Leur groupe contient 5 autres galaxies et leur nom résulte de leurs deux queues. Leurs noyaux fusionnent et cela devrait devenir une unique super-galaxie elliptique dans 400 Ma. Elles ont commencé à s'approcher il y a 900 Ma, se sont traversées il y a 600 Ma. Depuis 300 Ma, de la matière a été éjectée pour former les antennes.



*L'ensemble NGC 4676 A et B, les galaxies des « souris » sont deux galaxies spirales dans la constellation de la Chevelure de Bérénice, à 290 millions d'A.L.
Elles sont en phase d'interaction. Leur nom vient des 2 longues queues formées par les forces de marée.
Elles sont déjà entrées en collision et cela recommencera jusqu'à leur fusion définitive*



*NGC 3256 est une galaxie irrégulière, fruit d'une ancienne collision entre 2 galaxies.
Elle a d'ailleurs 2 noyaux. Dans la constellation des Voiles. Elle est à 100 M d'A.L.*



Arp 188 ou UGC 10214 (ou la galaxie du « Tétard » est une galaxie spirale barrée (comme la nôtre) dans la constellation du Dragon, située à 400 millions d'A.L.

Elle est remarquable par sa « queue de marée » longue de plus de 280.000 A.L. (2,8 fois le diamètre de la Voie Lactée !) qui contient de nombreux amas stellaires riches en jeune étoiles bleues. C'est une galaxie en interaction résultant du passage d'une plus petite galaxie visible à travers les bras opposés à la queue, celle-ci étant probablement un bras de la spirale qui s'est « déroulé » par les forces de marée résultant du petit compagnon impacteur. Elle est 3 fois plus grande que notre Voie Lactée et contiendrait plus de 300 à 400 milliards d'étoiles



NGC 474 (dans la constellation des Poissons) est une galaxie elliptique géante [250.000 AL d'envergure] et se déplace avec NGC 470. À 98 millions d'A.L.



La chaîne de « Makarian » regroupe un grand nombre de galaxies dans le même secteur du ciel (dans la constellation de la Vierge). À 70 millions d'A.L. La chaîne comprend huit galaxies : M84 (NGC 4374), M86 (NGC 4406), NGC 4477, NGC 4473, NGC 4461, NGC 4458, NGC 4438 et NGC 4435. D'autres galaxies sont visibles dans le champ visuel mais ne font pas partie de cette association.



Les « yeux » de Makarian (détail du centre de la précédente)



NGC 6027, le Sextette de Seyfert est un groupe de galaxies dans la constellation du Serpent à environ 200 millions d'A.L. En apparence constitué de 6 galaxies (d'où son nom), il n'en contient en fait que 5, dont seulement 4 sont en interaction qui fusionneront en une unique galaxie elliptique géante.



Le « Quintette de Stéphan » regroupe les galaxies NGC 7317, 7318a, 7318b, 7319 et 7320. Les 4 premières sont en interaction à 340 millions d'A.L. La 5^e est beaucoup plus proche, à 35 millions d'A.L., dans la constellation de Pégase



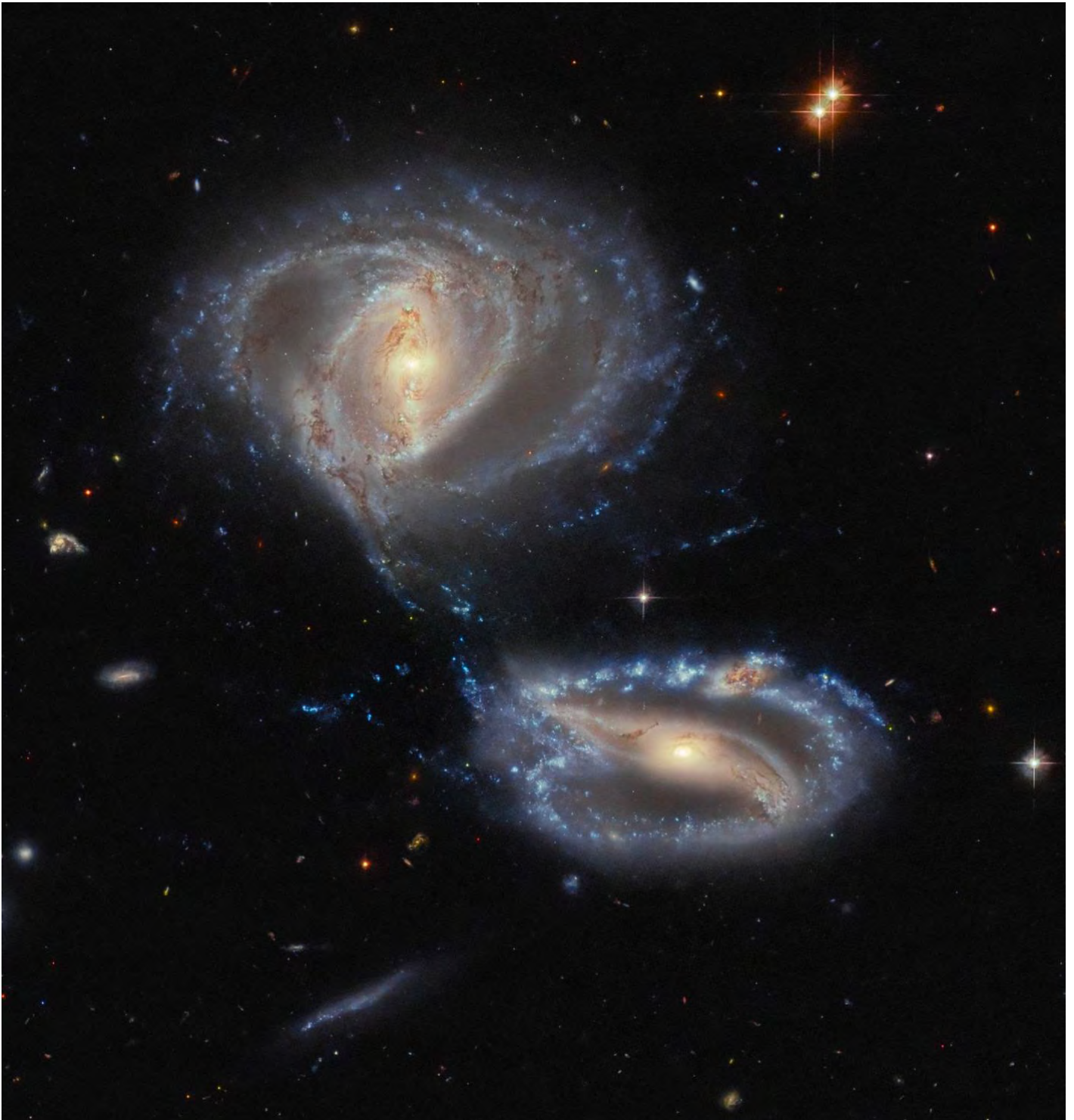
La galaxie NGC 3718 (dans la constellation de la Grande Ourse) et une voisine (NGC 3729) à qui elle doit probablement ses distorsions. À 52 millions d'A.L.



*NGC 6745 (A et B) est le résultat de la collision de la petite qui est passée à travers la grande (laquelle devait être spirale) il y a quelques centaines de millions d'années.
Dans la constellation de la Lyre. Elle est à 207 M d'A.L.*



*Les galaxies de Arp 272, NGC 6050A et 6050B ou IC 1179 (dans la constellation d'Hercule).
La petite galaxie entre les deux, en haut, est probablement en interaction avec les deux grosses.
À 450 millions d'A.L*



Les galaxies de Arp-Madore 2339-661 forment les deux galaxies NGC 7733 (en bas à droite) et NGC 7734 (en haut) qui sont deux galaxies spirales barrées. Chacune brille vivement au centre, où une barre s'étend d'un côté à l'autre. Celle du haut est plus ronde et ses bras forment deux fins anneaux. La galaxie inférieure est plus plate et ses bras forment un anneau extérieur. La gravité rassemble le gaz et la poussière là où les galaxies se rapprochent. Un certain nombre de petites galaxies les entoure sur fond noir. En fait il y a 3 galaxies en interaction. La 3^e est la petite NGC 7733N, qui est visible sur le haut du bras de NGC 7733 et qui brille dans des couleurs rouge-orange. NGC 7733N a un redshift très différent de sa voisine. Elle ne fait donc pas partie de NGC 7733.

Les trois galaxies sont assez proches les unes des autres, à environ 500 millions d'années-lumière de la Terre, dans la constellation du Toucan, et, comme le montre cette image, elles interagissent gravitationnellement les unes avec les autres. En fait, certains ouvrages scientifiques les qualifient de « groupe en fusion », ce qui signifie qu'ils sont en passe de devenir, à terme, une seule entité.

ANNEXE 1

Edwin Powell Hubble (20/11/1889 – 28/09/1953)

Edwin Powell Hubble (20 novembre 1889 - 28 septembre 1953) est un astronome américain. Il a permis d'améliorer la compréhension de la nature de l'Univers en démontrant l'existence d'autres galaxies en dehors de notre Voie Lactée. En observant un décalage vers le rouge du spectre de plusieurs galaxies, il a montré que celles-ci s'éloignaient les unes des autres à une vitesse proportionnelle à leur distance. Cette relation, connue sous le nom de « loi de Hubble », avait néanmoins été prédite précédemment par Georges Lemaître, un prêtre et astronome belge qui avait publié son travail dans un journal bien moins visible. Cette situation a entraîné une controverse sur la paternité de la loi. Les conditions de la parution en anglais de la version des travaux de Lemaître de 1927 ont été depuis clarifiées. En 2018, l'UAI (Union astronomique internationale) soumet au vote la proposition de changement de nom pour « loi de Hubble-Lemaître ». La loi de Hubble-Lemaître est une des observations clé de l'expansion de l'Univers.

Biographie

Hubble naît à Marshfield dans le Missouri le 20 novembre 1889. Il étudie les mathématiques et l'astronomie à l'université de Chicago où il obtient son diplôme en 1910. Titulaire d'une bourse d'étude, il passe ensuite trois ans au Queen's College d'Oxford où il obtient un *Master of Arts* en droit. Il revient rapidement à l'astronomie à l'observatoire Yerkes, où il obtient son diplôme de *doctorat* en 1917.

George Ellery Hale, le fondateur et directeur de l'observatoire du Mont Wilson, près de Pasadena en Californie, lui propose un poste de chercheur en 1917. Edwin accepte, mais il est envoyé au front en France, car les États-Unis viennent d'entrer dans le premier conflit mondial, à la suite de la guerre sous-marine à outrance et du télégramme Zimmermann. À son retour, en 1919, l'offre de George Ellery Hale tient toujours : il s'installe à Pasadena et y poursuit ses travaux jusqu'à la fin de sa vie.

Peu de temps avant sa mort, il utilisa le premier le télescope Hale composé d'un réflecteur de 200 pouces (5,08 m de diamètre) qui venait d'être achevé. Le 28 septembre 1953, il meurt d'un accident vasculaire cérébral.



Existence des galaxies

Son arrivée au mont Wilson coïncide plus ou moins avec l'achèvement du télescope « Hooker » de 250 cm, le plus puissant télescope à l'époque. Les observations faites avec ce télescope par Hubble en 1923–1924 permettent d'établir que les « nébuleuses » observées précédemment avec des télescopes moins puissants ne font pas partie de notre Galaxie, mais constituent d'autres galaxies éloignées. Il annonce sa découverte le 30 décembre 1924, basée sur le repérage et l'observation d'étoiles variables de type céphéides auxquelles il applique la relation période-luminosité découverte en 1908 par Henrietta Swan Leavitt. La première nébuleuse identifiée comme une galaxie n'est pas M31 (la Galaxie d'Andromède), mais la petite galaxie NGC 6822 située dans la constellation du Sagittaire (1925). Suivront ensuite M33 (la Galaxie du Triangle) en 1926 et M31 en 1929. Il a également classifié les galaxies en les regroupant sur des critères morphologiques (séquence de Hubble)

Décalage vers le rouge

Les travaux sur la spectroscopie astronomique étaient menés avant 1918 par James Edward Keeler (observatoire Lick), Vesto Melvin Slipher (observatoire Lowell) et William Wallace Campbell (Lick). Combinant leurs propres mesures de distance des galaxies avec les mesures de Vesto Slipher relatives à leur décalage vers le rouge, Hubble en collaboration avec Milton Humason établit en 1929, grâce à la spectroscopie, la relation entre la distance des galaxies et leur vitesse d'éloignement. Cette relation est désormais connue sous le nom de loi de Hubble-Lemaître, à l'origine du concept d'expansion de l'Univers.

Cette découverte basée sur l'observation et la mesure permet de soutenir la thèse de la théorie du Big Bang initialement proposée en 1927 par le chanoine catholique belge Georges Lemaître.

Système de classement morphologique

Edwin Hubble a établi un système permettant de classer les galaxies : la séquence de Hubble. Ce système est toujours utilisé aujourd'hui.

Autres travaux et découvertes

Il est lauréat de la Médaille Franklin en 1939 pour ses travaux sur les nébuleuses. Il reçoit la médaille d'or de la Royal Astronomical Society en 1940.

Il a découvert l'astéroïde (1373) Cincinnati le 30 août 1935.

ANNEXE 2

Georges Lemaître (17/07/1894 – 20/06/1966)

Georges Lemaître est un chanoine catholique, astronome et physicien belge, professeur à l'université catholique de Louvain. Son « hypothèse de l'atome primitif », visant à expliquer l'origine de l'univers, constitue le fondement de sa théorie du Big Bang.

Biographie

Il est l'aîné d'une famille de quatre enfants. En 1904, il entre au collège des jésuites de Charleroi (collège du Sacré-Cœur). Après une année préparatoire en mathématiques au Collège Saint-Michel d'Etterbeek, il est admis à l'école des mines de l'université catholique de Louvain en 1911. Il y rencontre Charles Manneback, un collègue qui devient son ami. Il suit les cours d'analyse de Charles de La Vallée Poussin et de mécanique d'Ernest Pasquier, qui l'initie aux problèmes de cosmologie.

Après la Première Guerre Mondiale, il reprend ses cours de mathématiques et de sciences physiques à l'université catholique de Louvain en 1919. Cette même année, il obtient son baccalauréat en philosophie thomiste et entame son doctorat avec La Vallée Poussin. Il commence une première thèse sur la fonction zêta de Riemann, qu'il ne parvient pas à conclure. Il change alors de sujet et soutient sa thèse en 1920.

Afin d'obtenir une bourse de voyage, il rédige en 1922 un mémoire sur *La Physique d'Einstein*. Il est admis cette même année à l'université de Cambridge (Harvard) comme étudiant-chercheur. Il passe ensuite au Massachusetts Institute of Technology et travaille sur plusieurs sujets : la relativité générale, l'étude des étoiles variables et une théorie d'Eddington tentant de relier l'électromagnétisme à la gravitation. Il rencontre alors Edwin Hubble et s'entretient avec Robert Millikan. En 1926, il soutient sa thèse sur le calcul du champ gravitationnel d'une sphère fluide de densité homogène. Il rencontrera plusieurs fois Albert Einstein à Pasadena.

Il est nommé chanoine en 1935.

Il rentre en Belgique en 1940. En 1960, il est nommé *prélat domestique* par Jean XXIII ainsi que président de l'Académie pontificale des sciences. En 1964, Lemaître subit un infarctus du myocarde. Il développe une leucémie à partir de 1966 et meurt dans la nuit du 19 au 20 juin de cette année.

Statue de Georges Lemaître à Louvain-la-Neuve (Belgique) →



Travaux

Expansion de l'Univers

Selon Jean-Pierre Luminet, dès 1922, Alexandre Friedmann de Leningrad a le premier publié une théorie de l'expansion de l'Univers dans la prestigieuse revue de physique, la *Zeitschrift für Physik*. Einstein envoya une première note pour déclarer faux les calculs de Friedman, puis une seconde pour reconnaître l'exactitude de ces calculs qui fournissaient une évaluation de l'âge de l'Univers. En 1927, indépendamment des travaux d'Alexander Friedmann, Georges Lemaître rédige un article dans les *Annales de la Société scientifique de Bruxelles* intitulé *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant* établissant que l'Univers est en expansion. De plus, en se fondant sur les mesures de vitesses d'éloignement des galaxies de Vesto Slipher et de leurs distances établies par Edwin Hubble, Georges Lemaître est le premier à établir le rapport constant entre distance et vitesse d'éloignement. Il fournit une évaluation de cette constante, que l'on appelle communément la constante de Hubble. Cette estimation est fournie dans l'article de 1927, mais celui-ci est rédigé en français. Arthur Eddington traduira celui-ci en anglais en 1931, mais en omettant, à la demande même de Lemaître, les paragraphes relatifs à la constance du rapport distance/vitesse. La communauté scientifique retiendra donc l'estimation plus précise publiée par Hubble en 1929.

À l'origine du Big Bang

Lemaître émet ensuite une « hypothèse de l'atome primitif », début temporel de l'univers. Cette théorie fut appelée ironiquement *Big Bang* par Fred Hoyle en 1949, au cours d'une émission de radio, nom qui resta. Il soupçonne également le rayonnement cosmique de porter la trace des événements initiaux. Il travaille à partir de 1933 sur un modèle d'Univers non homogène nommé, *a posteriori*, *modèle de Lemaître-Tolman* (Richard Tolman a travaillé avec lui à Pasadena), expliquant les condensations et la formation des galaxies. Il étudie à nouveau le rayonnement cosmique, notamment avec Carl Størmer, ce qui l'oblige à recourir aux machines à calcul qu'il va très vite maîtriser. Après la Libération, il reprend son travail et s'intéresse à la formation des nébuleuses. Pour cela, il devient l'un des pionniers belges des machines à calculer et s'intéresse à leur programmation en langage machine, puis en assembleur avant d'étudier d'autres langages comme l'Algol. En 1965, Odon Godart annonça à son ancien collègue et mentor alors très malade, la découverte du fond diffus cosmologique par Arno Penzias et Robert Wilson. Cet « écho disparu de la formation des mondes », comme Lemaître l'avait poétiquement appelé, confirmait le scénario cosmologique dont Lemaître avait été l'un des premiers artisans.

TABLE DES MATIERES

I Introduction	1
Chapitre I – Les origines des galaxies	6
A) La rotation des galaxies et des étoiles dans les galaxies	12
B) La totalité des composants dans l’Univers	14
Chapitre II – qu’est-ce qu’une galaxie, quel est leur nombre	15
Chapitre III – Quels types de galaxies, leur morphologie	16
A) Les galaxies spirales	21
B) Les galaxies lenticulaires.....	25
C) Les galaxies elliptiques.....	25
D) La galaxie très particulière M104 ou « galaxie du sombrero »	27
E) Les galaxies irrégulières.....	31
F) Les galaxies naines.....	32
G) Autres galaxies.....	34
1) Les galaxies en interaction.....	34
2) Les galaxies Starburst	35
3) Les galaxies à noyau actif.....	37
4) Les galaxies à anneaux ou annulaires.....	41
Chapitre IV - La vie des galaxies	46
A) Création des galaxies.....	46
B) Vie et disparition des galaxies.....	50
Chapitre V - Les dernières découvertes du JWST	52
Chapitre VI - Les collisions et fusions galactiques	56
Annexe 1 - Edwin Powell Hubble	69
Annexe 2 – Georges Lemaître	71
Table des matières	73