

Nébuleuses et galaxies

NATURE DES NEBULEUSES

Sous ce terme sont désignés tous les objets qui apparaissent flous et diffus à l'observation astronomique. Cette dénomination recouvre donc des réalités diverses. Les nébuleuses furent observées en grand nombre et regroupées sans critère de classement particulier, dès le ^{xviii} siècle, dans des catalogues comme celui de Messier. La plus visible est la Voie Lactée, qui est un ensemble de plus de 100 milliards d'étoiles auquel appartient notre soleil. Kant déjà avait émis l'hypothèse que la Voie Lactée constituait un « univers-île » rassemblant un nombre d'étoiles considérable, et qu'il devait exister une multitude d'autres univers-îles semblables : les galaxies. Les nébuleuses se classent donc en deux catégories :

- les galaxies, immenses regroupements d'étoiles tels que la Voie Lactée elle-même, et les autres galaxies, situés à des distances beaucoup plus grandes du système solaire.
- les nébuleuses intra-galactiques, qui sont en fait soit des nuages de gaz ou de poussières, soit des amas d'étoiles situés à l'intérieur de notre Galaxie ou dans d'autres galaxies.

LA VOIE LACTÉE

LES NEBULEUSES INTRA-GALACTIQUES
Notre système solaire se trouve au sein d'une galaxie spirale : la **Voie Lactée** ou **La Galaxie**. Elle tient son



nom de l'aspect laiteux sous lequel apparaît le disque galactique sur le ciel, très visible à l'œil nu. Elle ne s'est avérée être constituée par des étoiles qu'à partir du ^{xviii} siècle avec l'apparition de lunettes et de télescopes de plus en plus puissants. La position du système solaire à l'intérieur d'une galaxie nous permet d'observer de relativement près de nombreux objets qui s'y trouvent, qu'ils soient nets et brillants comme les étoiles ou diffus comme les différents types d'objets nébuleux - amas d'étoiles, nuages de gaz et de poussières. Ces nébuleuses intragalactiques jouent un rôle considérable : ce sont les lieux où les étoiles naissent. Elles sont aussi les traces de leur trépas.

Nébuleuses en émission

Les étoiles sont des boules de gaz portées à haute température, où prennent place des réactions de

fusion nucléaire fournissant une énergie en partie dissipée par rayonnement. Elles se forment à la suite de la contraction de nuages de poussières et de gaz. Lors de cette contraction, le nuage prend l'apparence d'une nébuleuse. La lumière bleue des étoiles jeunes et massives qui viennent de se former ionise l'hydrogène composant les



nuages. C'est le cas par exemple dans la grande **nébuleuse d'Orion**. En se recombinant, les atomes d'hydrogène émettent à leur tour dans le visible et l'infrarouge. On appelle « régions HII » ces zones de l'espace où la formation d'étoiles est la plus active.

Nébuleuses à réflexion

Lorsqu'un nuage se trouve à proximité d'étoiles brillantes, il peut diffuser leur lumière et renvoyer vers nous une lumière bleue, tout comme le ciel de la Terre nous apparaît bleu en diffusant la lumière du soleil. **L'amas des Pléiades**



éclaire ainsi une nébuleuse résiduelle d'où sont issues les étoiles qui

Nébuleuses obscures

Certaines nébuleuses, relativement denses, interceptent au contraire la lumière des étoiles et nous



apparaissent comme des taches sombres sur le ciel, comme la célèbre **Tête de Cheval**. Ce sont souvent des nuages

Nébuleuses planétaires

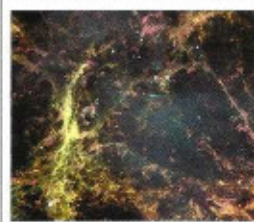
Vers la fin de leur vie, dont la durée dépend de leur masse initiale, beaucoup d'étoiles expulsent une partie considérable de leur masse sous forme d'un nuage sphérique qui s'étend progressivement autour de l'astre. Les anneaux brillants qui en résultent ont pu autrefois être



confondus avec des planètes par des instruments d'optique insuffisants. **L'Anneau de la Lyre** en est un exemple frappant.

Restes de supernovae

Les étoiles massives explosent en fin de vie, laissant un résidu sous forme d'une étoile à neutron ou d'un trou noir, et rejetant dans la Galaxie la plus grande partie de leur masse. Ce phénomène laisse apparaître un nuage de gaz très chaud et en expansion rapide. Le plus connu est la **Nébuleuse du Crabe (M1)**, reste



de la supernova de 1054 qui fut observée et décrite en détail par les Chinois. Ces explosions génèrent en outre dans le disque galactique des ondes de chocs, qui à leur tour peuvent déclencher l'effondrement de nuages et de la formation de nouvelles étoiles. Les nébuleuses planétaires, comme les supernovae, renvoient dans la Galaxie du gaz qui a été enrichi en éléments chimiques lourds par les réactions nucléaires se déroulant dans les étoiles. Ces éléments lourds se retrouvent dans les étoiles des générations suivantes, leur présence est révélée par l'étude de leur rayonnement (spectre), qui montre des raies caractéristiques de ces éléments. C'est ainsi que l'on discrimine deux catégories d'étoiles : les étoiles de population II, « âgées » et pauvres en éléments lourds et celles de population I produites à partir de restes d'étoiles antérieures et riches en éléments lourds.

LES AMAS D'ÉTOILES

Amas ouverts
Ils sont constitués d'étoiles récemment formées dans le disque galactique. Certains, assez lointains,



apparaissent sous la forme de nébuleuses, d'autres comme les **Pléiades (M45)**, sont assez proches pour que leurs étoiles les plus brillantes soient visibles à l'œil nu, mais une simple paire de jumelles en révèle beaucoup plus !

Amas globulaires

Taches floues à faible grossissement, ils sont en réalité des amas



sphériques pouvant contenir un million d'étoiles. Ces amas - comme celui d'**Hercule (M13)** visible aux jumelles - sont aussi anciens

que la Galaxie soit environ 15 milliards d'années et font partie du halo. Toutes les étoiles s'y sont formées simultanément ; grâce aux théories sur l'évolution stellaire et à leur composition révélée par leur spectre, il est possible de déduire leur âge, et de là des indications sur l'âge de la Galaxie et de l'univers.

LE CATALOGUE DE MESSIER

Charles Messier (1730 - 1786) a consacré sa vie à l'étude des comètes. Pour faciliter ses recherches, il a répertorié tous les objets nébuleux du ciel pouvant être confondus avec les comètes et dont la nature demeurerait un mystère : c'est le catalogue de Messier qui comporte 103 objets en 1781. Chaque objet du catalogue porte un numéro précédé de la lettre M (comme par exemple M31, la nébuleuse d'Andromède). C'est seulement avec l'amélioration des moyens d'observation que la vraie nature des nébuleuses de Messier a pu être déterminée. Ces objets sont devenus parmi les plus importants pour l'astronomie moderne. Aujourd'hui, on connaît des milliers d'objets nébuleux, principalement des galaxies, regroupés dans le fameux catalogue NGC (New General Catalog).

LES GALAXIES

Hubble a établi dans les années 20 une classification des galaxies qui est toujours utilisée à ce jour : 4 classes de galaxies, elles-mêmes subdivisées en sous-classes. Depuis on a mis en évidence une nouvelle catégorie extrêmement particulière : les « galaxies à noyau actif » parmi les plus lointaines de l'univers observable. Elles jouent un rôle important pour comprendre l'origine et l'évolution des galaxies.

LES GALAXIES NORMALES

Galaxies elliptiques



Ces galaxies se présentent comme un ellipsoïde (à peu près la forme d'un ballon de rugby). Elles vont d'une forme presque sphérique (les trois axes de même longueur) jusqu'à celle d'un ellipsoïde allongé. On les classe en catégories, de E0 jusqu'à E7, suivant le rapport entre le plus petit et le plus grand des axes. On ne distingue aucune structure particulière à l'intérieur même d'une galaxie elliptique. La densité d'étoiles augmente progressivement jusqu'au centre où elle peut être très élevée. Les étoiles de ces galaxies sont très vieilles (d'un âge comparable à celui de la galaxie elle-même), et de couleur plutôt rouge. Elles ne contiennent pas, ou peu, de gaz visible. Il y a donc actuellement peu de formation d'étoiles nouvelles dans ces galaxies (bien qu'on y ait parfois observé des sursauts ou « bursts » de formation stellaire). Le moment cinétique est relativement faible : les étoiles tournent sous l'influence du champ de gravité global de la galaxie, mais les orbites ont des orientations aléatoires, et il n'y a donc guère de sens de rotation d'ensemble privilégié. Parmi elles se trouvent les plus grandes galaxies existantes : les elliptiques géantes qui se trouvent toujours dans des amas de galaxies (par exemple NGC 4486 dans l'amas de La Vierge), et contenant des centaines de milliards d'étoiles. Il existe aussi beaucoup de galaxies elliptiques naines, parmi les plus petites de l'univers. Contenant

100 000 années lumière

5 à 10 %

20 à 25 %

Galaxies irrégulières

Galaxies elliptiques

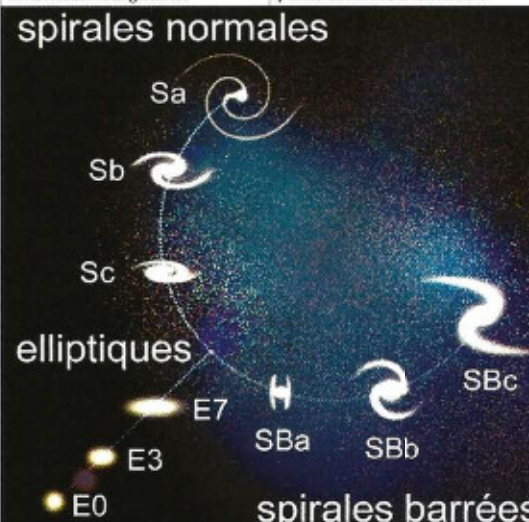
70 %

Galaxies spirales

Quelques chiffres

Constitution de l'univers

L'univers est peuplé d'environ 100 milliards d'étoiles



Quelques chiffres

Constitution de l'univers

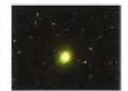
L'univers est peuplé d'environ 100 milliards d'étoiles

Galaxies spirales



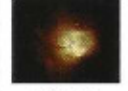
70 %

Galaxies elliptiques



20 à 25 %

Galaxies irrégulières



5 à 10 %

Diamètre de la Voie Lactée



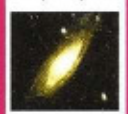
100 000 années lumière

Quasar PC 1158 + 4635

Entre

12 et 16 milliards d'années-lumière

Galaxie Andromède (M31)



2,2 millions d'années-lumière

Objet le plus lointain

Le plus lointain visible à l'œil nu

parfois « seulement » quelques millions d'étoiles, ce sont probablement aussi les galaxies les plus nombreuses.

Galaxies spirales



Elles se caractérisent par une structure beaucoup plus complexe et spectaculaire, comme la **nébuleuse des chiens de chasse (M51)**.

On y trouve trois zones bien distinctes :
- **Le bulbe** : c'est la partie centrale de la galaxie. Sa forme est ellipsoïdale, et la densité d'étoiles y est très élevée. Ces étoiles sont des étoiles âgées, contenant peu d'éléments chimiques lourds.

- **Le disque** : plus ou moins étendu suivant les types de galaxies spirales, c'est lui qui leur donne leur aspect si caractéristique. Il s'étend bien au-delà du bulbe, et son épaisseur est très faible par rapport à son diamètre. C'est dans le disque que se forment les bras spiraux qui donnent leur nom à ces objets. Les galaxies spirales contiennent beaucoup de matière sous forme de gaz peu dense et c'est dans le disque que se concentre l'essentiel de ce gaz, parfois visible sous l'aspect de nébuleuses diffuses. L'ensemble du disque est en rotation autour du centre galactique. Les bras eux-mêmes sont en fait des « ondes de densité » qui se propagent en tournant dans le disque, mais à une vitesse différente de la vitesse de rotation du disque (qui dépend elle-même de la distance au centre). Ces bras sont un des lieux les plus actifs de formation d'étoiles, à cause de la surdensité du gaz et de l'apparition d'ondes de chocs qui favorisent l'effondrement des nuages gazeux. C'est pourquoi on y trouve les étoiles les plus jeunes de la galaxie, dites de population I (elles contiennent beaucoup d'éléments lourds).

- **Le halo** : c'est une zone entièrement sphérique très vaste et très tenue qui englobe toute la galaxie. On y trouve les étoiles les plus vieilles de la galaxie (population II), soit isolées, soit regroupées en amas globulaires. Leurs trajectoires sont quelconques et n'ont aucune orientation particulière par rapport au disque, ce qui démontre qu'elles se sont formées avant lui. Selon le rapport de masse et de

luminosité entre le bulbe et le disque, on classe les spirales en sous-catégories depuis Sa (bras peu marqués, bulbe dominant) jusqu'à Sd (bras bien développés et disque important). Notre Galaxie est probablement une spirale Sb typique.

Spirales barrées

Ces galaxies sont très semblables à des spirales ordinaires, mais présentent une caractéristique surprenante : un « barre » très brillante occupe le centre du disque et relie deux bras spiraux opposés. Cette barre, zone de grande concentration stellaire, montre que toute la partie centrale de la galaxie est en mouvement de rotation solide (tourne d'un seul bloc comme un solide). Cela, à son tour, indique une répartition bien particulière et unique de la densité en fonction du rayon, qui diminue moins vite que dans les spirales classiques. Elles se classent de type SBA jusqu'à SBC.

Galaxies lenticulaires

C'est en fait un type intermédiaire entre elliptiques et spirales, ce qui démontre qu'il n'y a pas en réalité deux catégories entièrement distinctes, mais un continuum qui fait passer de l'une à l'autre. Très semblables aux galaxies elliptiques, les lenticulaires sont essentiellement constituées d'un très gros bulbe et présentent un disque parfois plus petit que le bulbe lui-même. On n'y distingue pas de bras spiraux.

Galaxies irrégulières

Ces galaxies qui ne présentent pas de structure définie sont habituellement en interaction avec d'autres galaxies.

- soit il s'agit d'une galaxie « satellite » en interaction forte avec le champ de gravité d'une autre galaxie, qui l'a empêché d'acquiescer une structure et a ralenti son évolution. Riche en gaz et en étoiles jeunes, la galaxie irrégulière est le siège d'une formation stellaire continue.

C'est le cas par exemple des **Nuages de Magellan**, galaxie irrégulière visible à l'œil nu dans l'hémisphère sud, et proche de notre Galaxie.

- soit il s'agit d'une collision entre deux

galaxies (comme **Ngc 4038 et Ngc 4039**), l'interaction des deux champs



de gravité faisant perdre toute forme aux galaxies pendant la durée (qui peut être très longue) de la collision.

Pourquoi ces catégories ?

On croyait naguère que les classes de galaxies correspondaient à une séquence évolutive, des galaxies elliptiques E0 jusqu'aux spirales Sd. Cependant cette idée est entrée en contradiction avec la détermination de l'âge des étoiles et du contenu des galaxies : le fait que les spirales contiennent encore une quantité importante de gaz est incompatible avec l'idée qu'elles proviennent d'une elliptique. L'explication actuelle des différentes catégories est liée au moment cinétique : plus la galaxie tourne vite sur elle-même, plus la matière qu'elle contient aura tendance à s'effondrer sous la forme d'un disque dans le plan équatorial de la galaxie. Dans les elliptiques le moment cinétique est donc faible (vitesses comprises entre 50 et 100 km/s), et élevé dans les spirales (entre 200 et 300 km/s).

AMAS DE GALAXIES

Les galaxies ne sont pas isolées, mais regroupées en vastes ensembles appelés amas, qui contiennent de quelques dizaines à quelques milliers d'objets. L'astronome Gérard de Vaucouleur a été l'un des pionniers de l'étude des amas. On appelle Amas Local celui dont fait partie notre Galaxie. Il contient deux grandes galaxies spirales (la nôtre et Andromède), les nuages de Magellan, plusieurs galaxies spirales plus petites et quelques galaxies elliptiques naines. Les galaxies d'un amas sont liées entre elles par la gravité. La taille d'un amas peut atteindre quelques dizaines de milliards d'années lumières. La distance entre les galaxies, à l'intérieur d'un amas, n'est pas très grande comparée à la dimension des galaxies. De ce fait, les collisions entre galaxies ont une très grande probabilité de se produire (contrairement aux collisions entre étoiles dans une galaxie). Les très grands amas contiennent en leur centre une ou plusieurs galaxies elliptiques géantes : on explique leur présence comme étant le résultat de la collision et de la fusion de plusieurs galaxies de plus petite taille. Les amas eux-mêmes semblent se regrouper en structures encore plus vastes appelées « super-amas », qui sont peut-être les structures les plus vastes contenues dans l'univers. L'Amas Local fait partie d'un super amas contenant un grand nombre d'amas dont celui de la Vierge.

MATIÈRE NOIRE

L'étude de la rotation des galaxies sur elles-mêmes montre que la masse « visible » est certainement très inférieure à la masse totale de la galaxie : on appelle matière noire ou

masse manquante cette partie invisible, qui s'étend sans doute au-delà de la partie brillante. De même, l'étude des mouvements des galaxies à l'intérieur d'un amas laisse apparaître que la gravité y est bien supérieure à celle produite par la matière visible : cela conduit à l'hypothèse d'une grande quantité de matière noire répartie dans les amas. La nature de cette matière invisible est encore loin d'être élucidée : astres peu brillants comme des naines brunes, étoiles à neutron, trous noirs, un gaz de neutrinos baignant tout l'amas ? Ou une forme de matière plus « exotique » encore ? En cosmologie, la présence de matière noire joue un rôle fondamental car elle conditionne les types de modèles d'univers applicables : ouvert et en expansion constante si la densité est faible, pouvant s'effondrer sur lui-même si elle est forte.

GALAXIES À NOYAU ACTIF

L'amélioration continue des moyens d'observation a permis de sonder dans la deuxième partie du 20^e siècle un univers plus lointain, et d'y découvrir des galaxies dont le noyau semble être la source d'une énergie considérable.

Radio-galaxies

Ces objets, détectés dès l'apparition des premiers radiotélescopes, émettent une énergie énorme sous forme d'ondes radios issues du centre de la galaxie et de deux « lobes » situés à une distance considérable de la galaxie visible : ils sont dus à des jets de particules de très haute énergie émis depuis le centre et

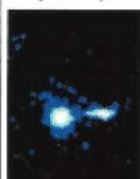


qui interagissent beaucoup plus loin avec le milieu intergalactique.

qui interagissent beaucoup plus loin avec le milieu intergalactique.

Galaxies de Seyfert et quasars

Les **quasars** présentent un noyau



extraordinairement brillant - parfois plus brillants que 100 000 galaxies réunies -, de très loin les plus énergétiques de l'Univers. Cette lumière est émise

depuis un volume très petit au centre de la galaxie. Ils sont toujours extrêmement lointains - plusieurs milliards d'années lumières - ce qui les fait apparaître sous la forme quasi-stellaire qui leur donne leur nom. Les galaxies de Seyfert en sont des exemples moins extrêmes. Les astronomes attribuent cette immense débauche d'énergie à la présence d'un trou noir géant qui s'est formé en même temps que la galaxie : l'énergie provient de la matière qui tombe encore dans ce trou noir. Seules les galaxies lointaines présentent ces phénomènes : à cause du temps que met la lumière à nous arriver, elles nous apparaissent comme elles étaient il y a plusieurs milliards d'années, c'est-à-dire peu après leur formation. Avec le temps cette activité du noyau diminue et elles deviennent des galaxies normales comme la nôtre : mais, bien sûr, le trou noir central subsiste. Il contient une part appréciable de la masse totale de l'objet et joue un rôle important dans sa dynamique. On soupçonne donc toutes les galaxies suffisamment grandes de posséder un trou noir central hyper massif. Dans notre Galaxie, il est encore détectable par des émissions d'ondes radio et de rayons X.

EDWIN HUBBLE (1889 - 1953)



Esprit très curieux, Hubble fait des études d'astrophysique et de droit. Après une tentative malheureuse dans la carrière d'avocat, il devient

astronome à l'Observatoire de Yerkes en 1914. Il consacra le reste de sa carrière à élucider les problèmes posés par les « nébuleuses », étant convaincu dès le départ que nombre d'entre elles sont en fait des galaxies comme la nôtre.

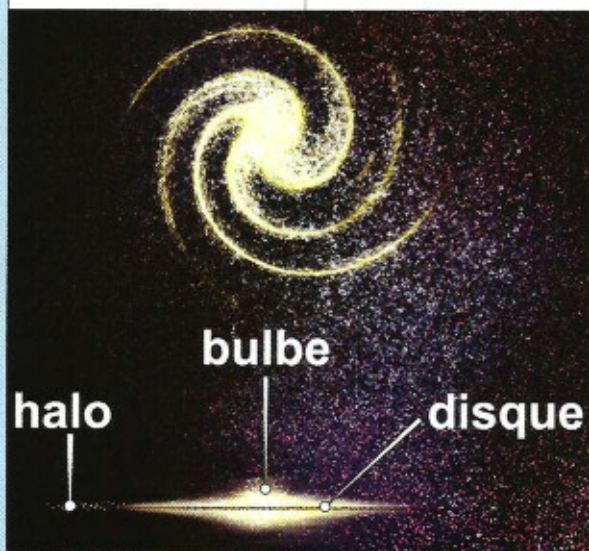
Il part pour la guerre en 1918, et à son retour obtient un poste à l'Observatoire du mont Wilson en Californie : cet observatoire, où il passera le reste de sa vie, est alors équipé du plus grand télescope au monde, de 2,5 m de diamètre. Par l'observation d'étoiles variables Céphéides dans la **Nébuleuse d'Andromède (M31)**, il démontre

que celle-ci se trouve à l'extérieur de notre Galaxie : c'est la première preuve directe qu'il existe d'autres

galaxies comparables à la nôtre, et d'un seul coup les frontières de notre univers se trouvent multipliées par un immense facteur ! Il démontre que ces galaxies extérieures contiennent une

multitude d'objets semblables à ceux que l'on trouve dans notre Galaxie : amas d'étoiles, nébuleuses gazeuses, novae. A partir de 1925, Hubble établit une classification des galaxies, qui est encore utilisée aujourd'hui. Il fait ensuite une autre des découvertes les plus importantes de l'astronomie moderne. En notant le décalage vers le rouge de la lumière, attribué à l'effet Doppler, il déduit que les galaxies s'éloignent de nous, avec une vitesse proportionnelle à leur distance : c'est ce qu'on appelle l'expansion de l'univers, qui joue un rôle central dans la cosmologie moderne, et a donné naissance à la théorie de Big Bang. La vitesse d'expansion est donnée par la « constante de Hubble » estimée à 80 km/s par mégaparsec - où un parsec représente 3,6 années lumières (36 mille milliards de

kilomètres). Le nom de Hubble a été donné au **premier Télescope Spatial** lancé en 1990, qui reste à ce jour le plus grand télescope en orbite, et qui fournit toujours les images les plus spectaculaires des galaxies. Comme Hubble lui-même, ce télescope a fait faire un bond gigantesque dans la connaissance de l'univers lointain.



halo

bulbe

disque