

L'UNIVERS EXTRAGALACTIQUE

CLASSIFICATION DES GALAXIES

DANS LA CLASSIFICATION morphologique dérivée de celle de E. Hubble (1926), on distingue 4 catégories de galaxies selon leur forme : les *spirales* (60 %), les *elliptiques* (15 %), les *lenticulaires* (20 %) et les *irrégulières* (3 %). Seulement 2 % de galaxies, dites « particulières », échappent à cette classification. Dans chaque catégorie, des subdivisions plus fines caractérisent le *type morphologique* des galaxies.

Les galaxies spirales, majoritaires, présentent un noyau sphérique au centre d'un disque peuplé d'étoiles et de matière interstellaire qui se concentrent le long de bras

spiraux. Elles se subdivisent en spirales normales (S) et spirales barrées (SB) selon que les bras partent directement du noyau ou des extrémités d'une barre diamétrale. Quatre classes, notées *a, b, c, d*, caractérisent l'importance relative du noyau et des bras ainsi que le degré d'enroulement des bras. Notre galaxie est une spirale normale de type *Sb*.

L'analyse du contenu des galaxies montre que la séquence des types morphologiques a une signification physique liée à la proportion d'étoiles jeunes et de gaz. Les galaxies elliptiques ne possèdent ni étoiles jeunes ni poussières et très peu de gaz. Les galaxies spirales *Sa* ont peu d'étoiles jeunes et de gaz, et cette proportion augmente régulièrement quand on parcourt la séquence vers les irrégulières. Ces dernières sont très riches en étoiles jeunes et en hydrogène interstellaire neutre ou ionisé.

GALAXIES ACTIVES ET QUASARS

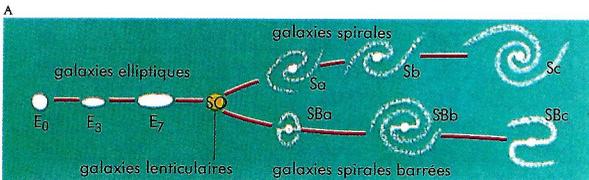
CERTAINES GALAXIES (moins de 5 % du total), à la différence des galaxies ordinaires, émettent une part importante de leur rayonnement dans les domaines autres que le visible. Ce rayonnement très intense, en particulier dans les domaines radio et X, met en jeu de très hautes énergies liées le plus souvent à des phénomènes violents localisés dans les noyaux de ces galaxies. Celles-ci sont appelées *galaxies actives* (ou à *noyau actif*). Ce sont notamment :

- les galaxies de Seyfert (découvertes en 1943 par l'Allemand C.K. Seyfert) : galaxies spirales à noyau très lumineux d'où s'échappent des nuages d'hydrogène à grande vitesse et constituant des sources intenses de rayonnement infrarouge ;

- les radiogalaxies : galaxies (elliptiques géantes le plus souvent) émettrices d'un rayonnement radioélectrique très intense (de l'ordre de un million de fois supérieur à celui d'une galaxie ordinaire).

À cette famille d'objets célestes se rattachent aussi les *quasars* (abréviation de *quasi stellar astronomical radiosources*), découverts en 1960 par l'Américain A. Sandage. Ce sont des astres qui, optiquement, ont l'apparence d'étoiles mais qui peuvent être des sources intenses de rayonnement radio et dont le spectre se caractérise par des raies d'émission toujours fortement décalées vers le rouge. Interprété comme un effet Doppler-Fizeau lié à l'expansion de l'Univers, ce grand décalage vers le rouge conduit à regarder les quasars comme des astres très lointains : le record est détenu, depuis 1989, par le quasar PC 1158 + 4635, dont le spectre, décalé de 473 % vers le rouge, indique une vitesse d'éloignement approchant 95 % de la vitesse de la lumière et permet d'estimer la distance entre 12 et 16 milliards d'années de lumière.

Les quasars représenteraient la partie visible, parce que très lumineuse, d'un noyau de galaxie active très lointaine. Le stade de galaxie active représenterait lui-même une étape primitive de l'évolution des galaxies. La présence de trous noirs « supermassifs » au cœur de ces astres est envisagée.



A **Diagramme de Hubble.**

Il illustre la classification des galaxies suivant une séquence ordonnée de types morphologiques : elliptiques, lenticulaires, spirales, et irrégulières.



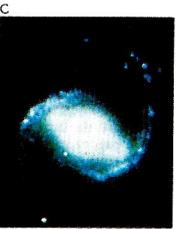
B **Type : E0.**

Galaxie elliptique géante M 87, dans la constellation de la Vierge. Distance : 50 millions d'années de lumière.



D **Type : Sc.**

Galaxie spirale M 83, dans la constellation de l'Hydre femelle. Diamètre : 30 000 al. Distance : 10⁷ al.



C **Type : SBb.**

Galaxie spirale barrée M 91, dans la constellation de la Chevelure de Bérénice. Distance : 250 millions d'années de lumière.



E **Type : Ir.**

Le Grand Nuage de Magellan, galaxie irrégulière, la plus proche de la nôtre. Distance : 170 000 al.



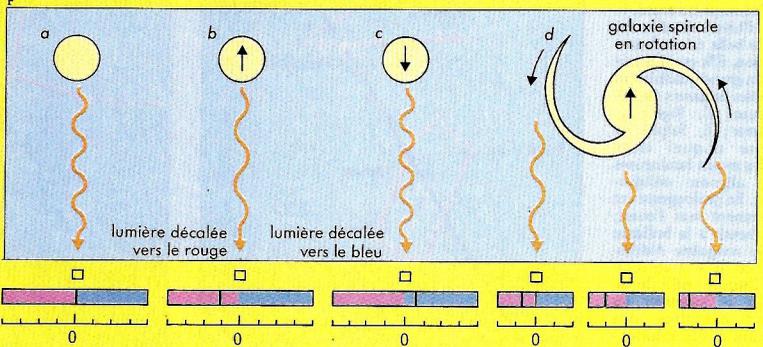
EFFET DOPPLER-FIZEAU

Lorsqu'une source de rayonnement (lumière visible, ondes radio, etc.) est en mouvement par rapport à un observateur, celui-ci perçoit le rayonnement de la source à une longueur d'onde (ou, ce qui revient au même, à une fréquence) différente de celle d'émission. Ce phénomène constitue l'effet Doppler-Fizeau. L'amplitude du décalage permet, en astrophysique, de déterminer la vitesse d'approche ou d'éloignement de l'astre observé (étoile, nébuleuse, galaxie...).

Les objets stellaires émettent de la lumière à des longueurs d'onde déterminées par leur composition (a). S'ils s'éloignent de la Terre (b), la longueur d'onde de la lumière observée est supérieure à celle de la lumière émise, et la lumière visible est décalée vers le rouge. S'ils s'approchent (c), la longueur d'onde observée est, au contraire, inférieure à celle émise et la

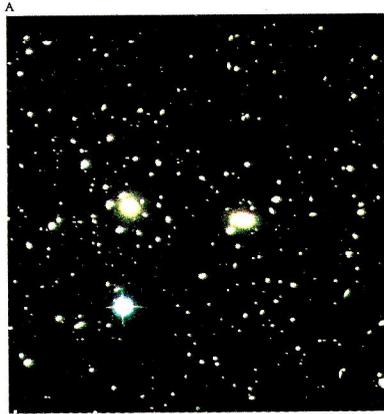
lumière visible est décalée vers le bleu. En raison de l'expansion de l'Univers, les galaxies s'éloignent globalement de la Terre et la lumière venant de leur centre nous apparaît décalée vers le rouge (d, au centre). Cependant, dans le cas des galaxies spirales, l'un des bras (d, à gauche) s'éloigne moins vite que le centre et sa lumière est donc moins fortement décalée

vers le rouge, tandis que l'autre (d, à droite) s'éloigne plus vite et apparaît donc avec une lumière plus fortement rouge. En comparant les décalages vers le rouge, on peut ainsi déterminer les vitesses de rotation de n'importe quelle région d'un bras de la galaxie et l'on en déduit la répartition de la masse dans la galaxie.



AMAS

LES GALAXIES apparaissent rarement isolées et leur distribution dans l'Univers n'est pas uniforme. La plupart sont associées en paires, triplets, groupes (jusqu'à quelques dizaines de membres) ou amas (jusqu'à plusieurs milliers de membres), dont la cohésion est assurée par la gravitation. On connaît aujourd'hui plusieurs dizaines de milliers d'amas de galaxies. Ceux-ci sont classés en deux types principaux : les *amas riches*, ou *réguliers*, à concentration centrale et



A - Amas de galaxies.

Cet amas riche, dans la constellation de la Chevelure de Bérénice, rassemble plus d'un millier de galaxies dans un volume de 20 millions d'an-

nées de lumière de diamètre. Il est situé à 250 millions d'années de lumière environ de distance.

symétrie sphérique, avec une prédominance de galaxies elliptiques ou lenticulaires, et les *amas pauvres*, ou *irréguliers*, sans concentration centrale ni symétrie sphérique, avec des galaxies de tous types en proportions variables. Les amas de galaxies eux-mêmes se concentrent souvent au sein d'immenses superamas pouvant s'étendre sur 100 millions d'années de lumière ou plus.

On observe ainsi une structure hiérarchisée de l'Univers en systèmes de plus en plus étendus, mais de densité de plus en plus faible, comme l'envisageait déjà au début du siècle le Suédois C.V.L. Charlier (1862-1934).

AMAS LOCAL

NOTRE GALAXIE appartient à un petit amas de galaxies d'une trentaine de membres, le *Groupe local* (ou *Amas local*), contenu dans un volume ellipsoïdal d'environ 7 millions d'années de lumière d'extension maximale et dont la masse totale est estimée à 650 milliards de fois celle du Soleil. Ce groupe renferme notamment deux petites galaxies irrégulières satellites de la nôtre, le Grand Nuage de Magellan (distant de 170 000 al) et le Petit Nuage de Magellan (distant de 200 000 al), visible dans l'hémisphère Sud, ainsi que la galaxie M 31 d'Andromède, grande galaxie analogue à la nôtre, située à 2 200 000 al (c'est l'objet céleste le plus lointain visible à l'œil nu).

La plupart des galaxies de l'Amas local sont des galaxies naines. Notre galaxie, d'une part, la galaxie M 31 d'Andromède et la galaxie M 33 du Triangle, d'autre part, constituent les deux pôles autour desquels se concentrent les autres galaxies de l'amas.

SUPERAMAS ET VIDES

EN 1953, l'astronome franco-américain G. de Vaucouleurs a établi que le Groupe local et l'ensemble des groupes proches de galaxies font partie d'un système aplati plus vaste, d'environ 50 millions d'années de lumière de rayon, le *Superamas local*, centré sur l'amas de la Vierge. Des observations plus récentes ont conduit à la mise en évidence d'autres superamas, séparés par de grands vides. La plus grande structure connue dans l'Univers est un superamas s'étendant dans les constellations de Persée et de Pégase en un filament de plus d'un milliard d'années de lumière de long. Constitué de 16 amas riches disposés en chapelet, il est entouré de trois grands vides d'environ 300 millions d'années de lumière de diamètre. La distribution à grande échelle des galaxies semble indiquer qu'elles se concentrent le long de grandes structures filamenteuses. L'Univers pourrait ainsi avoir une structure cellulaire, les galaxies se disposant préférentiellement sur les arêtes de gigantesques alvéoles polyédriques. L'origine de cette étonnante structure remonterait aux premiers instants ayant suivi le big bang.

LA MASSE « CACHÉE »

La masse d'un amas de galaxies peut être déterminée de deux manières. La première consiste à mesurer la dispersion des vitesses des galaxies de l'amas : plus le degré d'agitation des galaxies, mesuré par la dispersion des vitesses, est grand, plus élevée est la masse de l'amas qui maintient, grâce aux forces de gravitation, la cohésion du système. La seconde méthode consiste à déterminer la masse de l'amas en additionnant la masse de toutes les galaxies qui le composent. La masse individuelle des galaxies est elle-même évaluée d'après la luminosité de ces galaxies ou d'après l'étude des vitesses de rotation autour de leur centre des étoiles qu'elles renferment, supposées en équilibre sous l'effet de la gravitation. Or, la masse globale des amas obtenue à partir de la dispersion des vitesses se révèle toujours environ 10 fois supérieure à celle que l'on obtient en additionnant la masse de chacune des galaxies.

Par ailleurs, lorsqu'on trace la courbe de variation de la vitesse de rotation de notre galaxie en fonction de la distance au centre, on constate, à de grandes distances du centre, que la vitesse augmente, ce qui implique la présence d'importantes quantités de matière invisible au-delà du bord visible de la Galaxie. Le même phénomène est observé sur de nombreuses autres galaxies. Finalement, il se pourrait que les neuf dixièmes de la masse de l'Univers échappent aujourd'hui à l'observation. Cette matière invisible pourrait être constituée de naines brunes, de trous noirs, de neutrinos ou de particules hypothétiques interagissant faiblement avec la matière ordinaire.

Les principales galaxies du groupe local

objet (constellation)	type*	distance (al)	vitesse** radiale par rapport au Soleil (km/s)	diamètre (al)	masse (M _☉)	magnitude apparente visuelle	magnitude absolue
Notre Galaxie	Sb		0	100 000	1,5-10 ¹¹		-20,2
Grand Nuage de Magellan (Dorade)	I	170 000	+ 270	23 000	10 ¹⁰	0,1	-18,7
Petit nuage de Magellan (Toucan)	I	205 000	+ 168	10 000	2-10 ⁹	2,4	-16,7
Draco (Dragon)	E0	220 000		1 000	10 ⁵	10,6	- 8,5
Ursa Minor (Petite Ourse)	E	220 000		1 000	10 ⁵	10	- 9
Sculptor (Sculpteur)	E3	280 000		2 300	3,2-10 ⁶	7	-12,6
Ursa Major (Grande Ourse)	E	390 000					
Sextans C (Sextant)	E0	460 000					
Fornax (Fourneau)	E0	550 000	+ 40	5 400	2-10 ⁷	7	-13
Leo I (Lion)	E3	750 000		2 000	4-10 ⁶	10,8	-11
Leo II (Lion)	E0	750 000		1 000	10 ⁶	12,3	- 9,5
NGC 6822 (Sagittaire)	I	1 600 000	- 40	7 500	3,2-10 ⁸	8,6	-15,6
Wolf-Lundmark (Baleine)	E5	1 600 000	- 80	5 000		11,1	-13,3
NGC 205 (Andromède)	E5	2 100 000	-240	7 800	7,9-10 ⁹	8,2	-16,3
NGC 221 = M 32 (Andromède)	E2	2 150 000	-210	2 300	3,2-10 ⁹	8,2	-16,3
NGC 147 (Cassiopee)	E5	2 150 000	-250	4 600	10 ⁹	9,6	-14,8
NGC 185 (Cassiopee)	E3	2 150 000	-300	3 250	10 ⁹	9,4	-15,2
NGC 224 = M 31 (Andromède)	Sb	2 200 000	-275	160 000	3,2-10 ¹¹	3,5	-21,1
IC 1613 (Baleine)	I	2 400 000	-240	10 000	2,5-10 ⁸	9,6	-14,8
NGC 598 = M 33 (Triangle)	Sc	2 700 000	-280	46 000	7,9-10 ⁹	5,7	-18,8
LGS 3 (Poissons)	I	2 700 000	-280	1 600	15-10 ⁶	21	- 9,0
Sextans A (Sextant)	I	3 300 000		5 000			
Leo A (Lion)	I	3 600 000					
IC 10 (Cassiopee)	I	4 100 000		4 200			

* S = spirale ordinaire ; SB = spirale barrée ; E = elliptique ; I = irrégulière.

** Une vitesse positive indique une galaxie qui se rapproche ; une vitesse négative une galaxie qui s'éloigne.

L'UNIVERS EXTRAGALACTIQUE

FAITS D'OBSERVATION

LA COSMOLOGIE moderne se fonde sur trois faits d'observation essentiels :

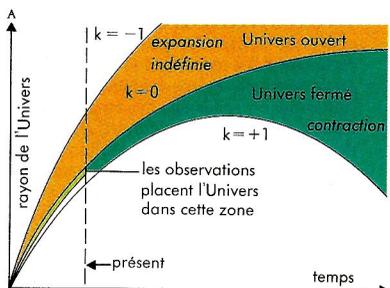
l'expansion de l'Univers dans son ensemble, mise en évidence avec la découverte, par l'Américain Edwin Hubble, dans les années 1920, du décalage spectral vers le rouge systématique des galaxies (excepté les plus proches) et d'une relation de proportionnalité entre ce décalage et la distance des galaxies considérées ;

le rayonnement radioélectrique isotrope correspondant à celui d'un corps noir à 3 K découvert en 1965 par les Américains Arno Penzias et Robert Wilson et regardé comme un vestige de l'Univers primordial très chaud ; les abondances relatives des éléments les plus légers (deutérium, hélium 3 et 4, lithium 7) dans la matière observable, qui impliquent que l'Univers a connu une phase très chaude (températures supérieures à 1 000 milliards de degrés) et très dense (masses volumiques supérieures à 100 kg/cm³).

On suppose que l'Univers est homogène et isotrope, à l'exception d'irrégularités locales.

MODÈLES COSMOLOGIQUES

LES MODÈLES développés dans le cadre de la théorie de la relativité générale prévoient soit une expansion permanente de l'Univers (Univers ouvert, à courbure négative), soit le ralentissement de son expansion suivi d'une phase de contraction (Univers fermé, à courbure positive), selon la valeur d'un paramètre k lié à la densité de matière qu'il renferme. Les observations actuelles plaident en faveur d'une expansion permanente mais conduisent à une valeur de k très proche de la valeur limite $k = 0$ (Univers plat, en expansion indéfiniment ralentie).



A. L'Univers est-il ouvert ou fermé ?

Les observations actuelles suggèrent qu'il est ouvert, mais restent sujettes à caution.

BIG BANG

ON ADMET GÉNÉRALEMENT aujourd'hui l'hypothèse selon laquelle l'Univers, primitivement très chaud et très condensé, serait brutalement entré en expansion (*big bang*) il y a 15 à 20 milliards d'années, ne cessant depuis lors de se dilater et de se refroidir. Son évolution dans les premiers instants qui suivirent le big bang est retracée sur la base des plus récents acquis de la physique des particules : 10⁻⁴³ s après le big bang, il était encore colossalement

chaud (10³² K) et dense, avec un diamètre un million de milliards de fois plus petit que celui d'un atome d'hydrogène.

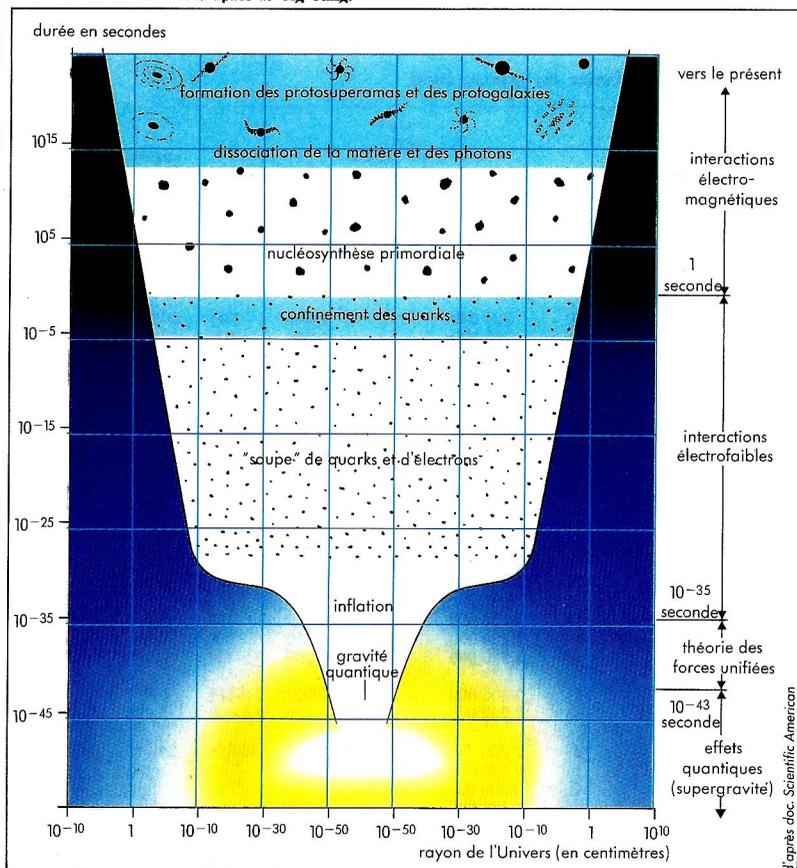
À partir de 10⁻³⁵ s se formèrent des quarks, des leptons (électrons, neutrinos) et leurs antiparticules (*ère hadronique*). Cette « soupe » de particules resta présente jusqu'à 10⁻⁶ s. La plupart des protons et des neutrons (formés à partir des quarks) s'annihilèrent ensuite avec leurs antiparticules, et l'Univers se peupla de baryons, de leptons et de photons (*ère leptonique*). La période comprise entre 10⁻³⁵ et 10⁻³² s après le big bang a peut-être coïncidé avec une phase d'expansion très rapide (*inflation*) durant laquelle le volume de l'Univers se serait multiplié par 10⁵⁰ environ. Une seconde après le big bang, la température s'était déjà abaissée à 6 milliards de degrés environ. Les leptons cessèrent d'être en équilibre entre eux. La physique de l'Univers commença à être gouvernée par les photons (*ère radiative*). Ensuite, en quelques centaines de secondes, apparurent les premiers noyaux d'atome (*nucléosynthèse primordiale*) : hydrogène, hélium, deutérium, lithium. Quinze minutes après l'explosion primordiale, la température atteignait encore 1 million de degrés, mais la synthèse des noyaux d'atomes d'hydrogène et d'hélium était déjà terminée. Quelques centaines de milliers d'années plus tard, l'Univers s'était assez refroidi pour permettre aux électrons de se combiner aux noyaux pour former des atomes d'hydrogène et d'hélium et, ce faisant, émettre le rayonnement cosmique que nous observons à présent refroidi à 3 K. Les électrons, liés aux noyaux, n'empêchant plus les photons de se propager, la lumière se découpla alors de la matière et l'Univers devint transparent (*ère stellaire*).

ÉVOLUTION FUTURE

SON EXPANSION actuelle se poursuit indéfiniment, l'Univers, à force de se dilater, deviendra progressivement de plus en plus vide, car toutes les galaxies continueront sans trêve à s'éloigner les unes des autres. Simultanément, l'espace deviendra de plus en plus froid. Avec le temps, les étoiles finiront par s'éteindre et leurs cadavres s'accumuleront dans le cosmos. L'Univers peu à peu s'enfoncera dans une profonde léthargie... Mais il existe une autre possibilité : celle que l'Univers cesse un jour de se dilater et se contracte. En s'effondrant peu à peu sur lui-même, il atteindra alors des températures colossales qui détruiront tout, jusqu'aux noyaux des atomes eux-mêmes (*big crunch*). De toute façon, la catastrophe n'est pas pour demain : au pis, peut-être, dans 100 milliards d'années...

Ce destin est scellé par la quantité de matière présente dans l'Univers. Einstein, dans sa théorie de la relativité généralisée, a établi que les astres, par leur masse, courbent l'Univers. Plus la quantité de matière par unité de volume est forte, plus la courbure est prononcée. Si cette densité reste inférieure à une certaine valeur, l'Univers continuera de se dilater indéfiniment : il est ouvert. Son expansion sera ralentie par la gravitation, mais jamais stoppée. Au contraire, si la densité atteint ou dépasse la valeur critique, alors viendra une époque où la gravitation l'emportera : l'Univers est fermé et il est appelé à retrouver son état extrêmement condensé primitif.

B. Évolution de l'Univers après le big bang.



d'après doc. Scientific American