



La Voie Lactée



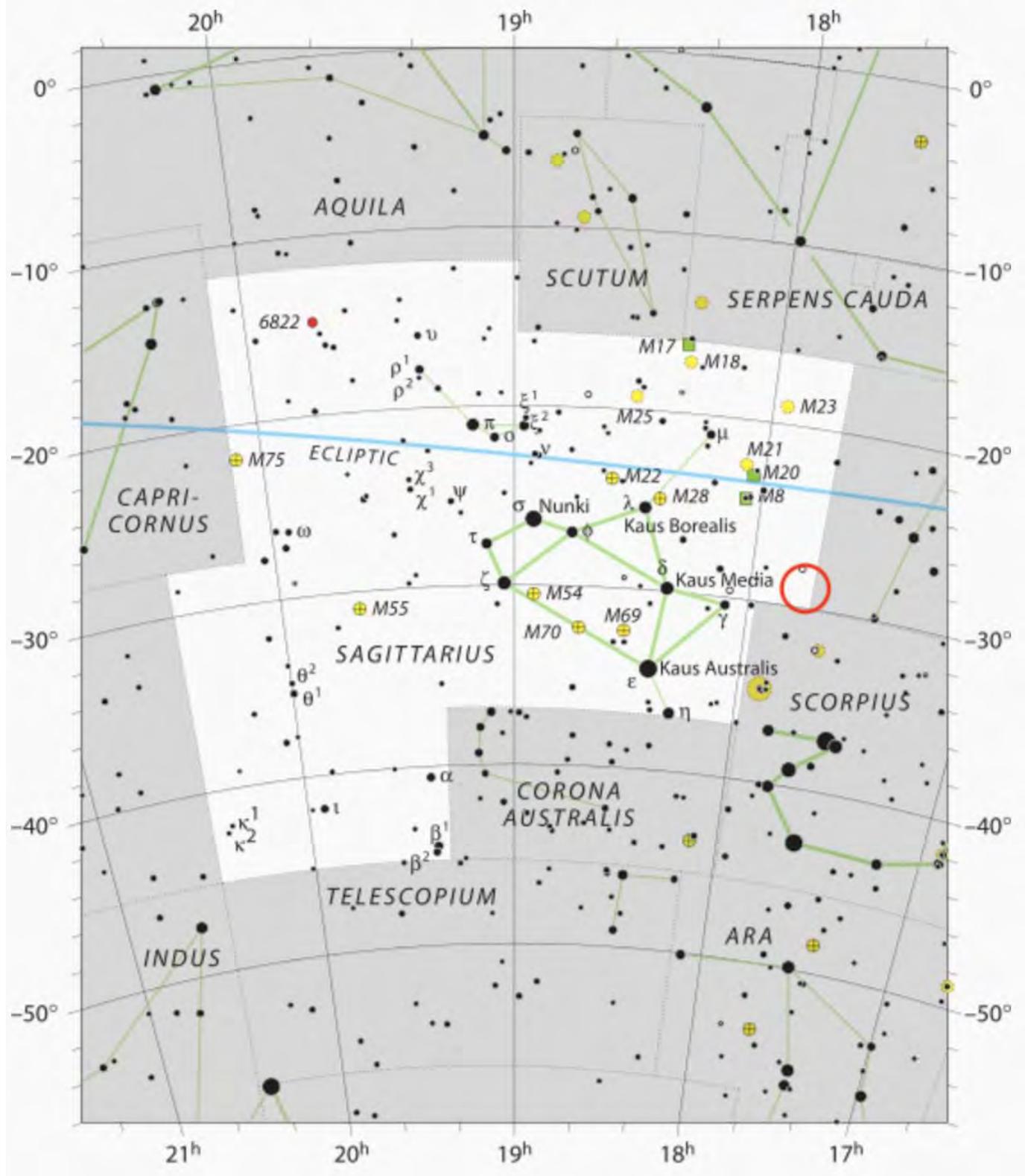
GAP 47 • Olivier Sabbagh • Mars 2019 - Révision Mars 2023

La Voie Lactée

La **Voie Lactée**, aussi nommée la **Galaxie** (avec une majuscule), est la galaxie dans laquelle se trouve le Système solaire. C'est une galaxie spirale barrée qui comprend de 200 à 400 milliards d'étoiles et au minimum 100 milliards de planètes. Son diamètre est estimé à environ 100 000 à 120 000 années-lumière, voire de 150 000 à 200 000 années-lumière bien que le nombre d'étoiles au-delà de 120 000 années-lumière soit très faible. Elle, et son cortège de galaxies satellites, font partie du Groupe local, lui-même rattaché au superamas de la Vierge, appartenant lui-même à Laniakea. Le Système solaire se situe à environ 27 000 années-lumière du centre de la Voie Lactée, lequel est constitué d'un trou noir supermassif, appelé Sagittarius A*.

Découverte	
Découvreur	Harlow Shapley, Jan Oort et Bertil Lindblad
Date de découverte	1918-1928
Données d'observation	
Ascension droite	17h 45m 39,9
Déclinaison	-29° 00' 28"
Coordonnées galactiques	$l = 0,00 \cdot b = 0,00$
Constellation	Sagittaire
Autres caractéristiques	
Vitesse radiale	+16 km/s
Absorption d'avant-plan (<i>V</i>)	30 environ
Type	S(B) bc I-II
Magnitude absolue (<i>V</i>)	-20,5
Distance	$8 \pm 0,5$ (~)
Distance au centre de masse du Groupe local	environ 460 kpc (~1,5 millions d'a.l.)
Masse	$\sim 1,5 \times 10^{12} M_{\odot}$
Masse d'hydrogène atomique (HI)	$4 \times 10^9 M_{\odot}$
Masse d'hydrogène ionisé (HII)	$8,4 \times 10^7 M_{\odot}$
Masse d'hydrogène moléculaire (H2)	$3 \times 10^8 M_{\odot}$
Masse du noyau	$3,5 \times 10^6 M_{\odot}$
Nombre d'amas globulaires	160 ± 20
Nombre de nébuleuses planétaires	~ 3 000
Taux de novæ (par an)	20
Abondance d'oxygène ($12 + \log(\text{O}/\text{H})$)	8,7 (voisinage solaire)

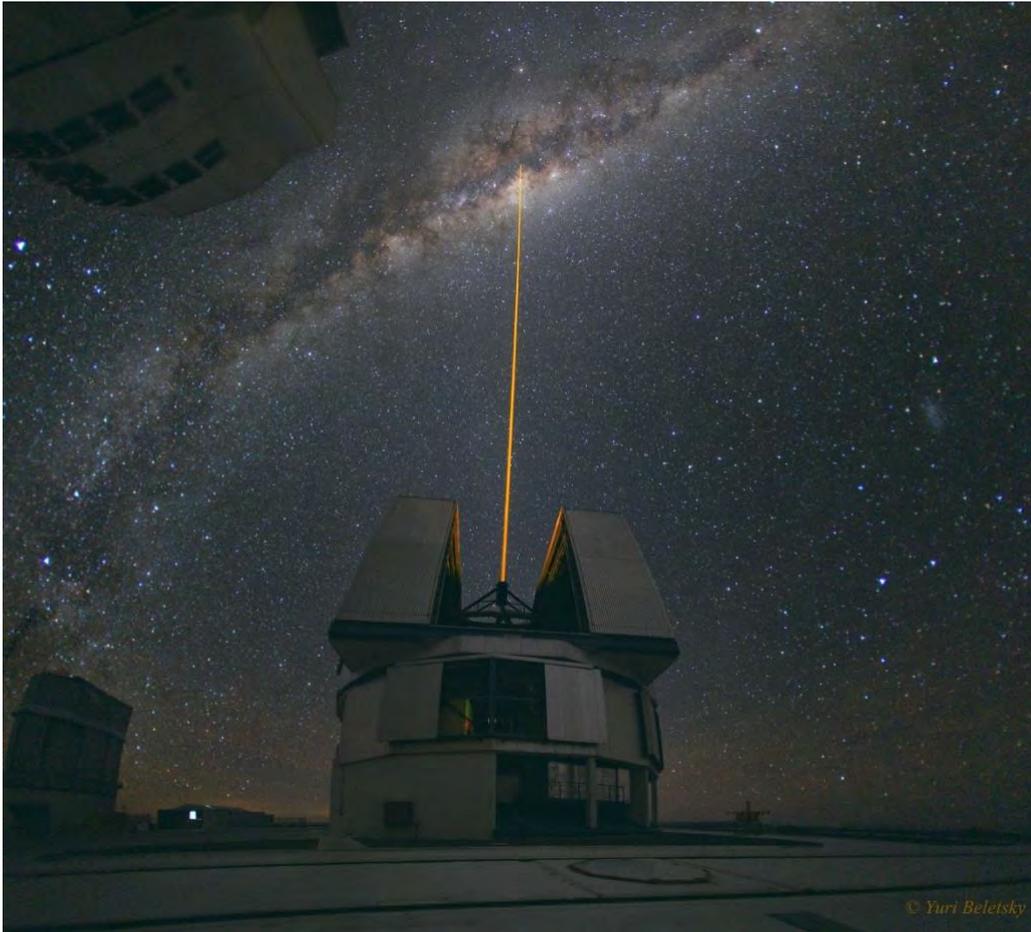
Localisation dans la constellation : Sagittaire



Le centre de la Voie Lactée, vu depuis la Terre, se situe dans la constellation du Sagittaire (cercle rouge)

Observée de la Terre, la Galaxie ressemble à une bande blanchâtre. Bande parce que le Système solaire est situé sur le bord de sa structure en forme de disque. Blanchâtre en raison de l'accumulation d'une multitude d'étoiles que l'on ne peut distinguer à l'œil nu, comme l'avaient déjà avancé Démocrite et Anaxagore. C'est grâce à sa lunette astronomique que Galilée démontre le premier, en 1610, que cette bande est due à la présence de nombreuses étoiles. L'astronome Thomas Wright élabore, en 1750, un modèle de la Galaxie, qui sera repris par le philosophe Emmanuel Kant, qui avance que les nébuleuses observées dans le ciel sont

des « univers-îles ». Dans les années 1920, l'astronome Edwin Hubble prouve qu'elle n'est qu'une galaxie parmi plusieurs et clôt ainsi le Grand Débat qui porte notamment sur la nature des nébuleuses. C'est à partir des années 1930 que le modèle actuel de galaxie spirale avec un bulbe central s'impose pour la Voie Lactée.



Le centre de la Voie lactée apparaît au-dessus de l'Observatoire du Cerro Paranal (Télescope Yepun). L'ESO utilise pour son VLT un faisceau laser qui traverse le ciel et crée une étoile artificielle, à une altitude de 90 km, dans la mésosphère de la Terre. Il est utilisé, entre autres, comme référence pour corriger l'effet de flou que crée l'atmosphère sur les images.

Les plus anciennes étoiles de la Galaxie sont apparues après les âges sombres du Big Bang; elles sont donc presque aussi âgées que l'Univers même. Par exemple, l'âge de HE 1523-0901, la plus vieille étoile de la Voie Lactée, est de 13,2 milliards d'années. Selon des référentiels cosmologiques, l'ensemble de la Galaxie se déplace à une vitesse d'environ 600 km/s. Les étoiles et les gaz qui se trouvent à une grande distance de son centre galactique se déplacent à environ 220 km/s par rapport à ce centre. Les lois de Kepler ne pouvant expliquer cette vitesse constante, il est apparu nécessaire d'envisager que la majorité de la masse de la Voie Lactée n'émet ni n'absorbe de rayonnement électromagnétique et est donc constituée d'une substance hypothétique, la matière noire.

Etymologie et histoire du nom

Le nom de « Voie Lactée » est emprunté, par l'intermédiaire du latin *via lactea*, au grec ancien γαλαξίας κύκλος / *galaxías kýklos* signifiant littéralement « cercle galactique », « cercle lacté » ou « cercle laiteux ». *Galaxía* désignait une offrande de flan au lait selon Garnet et Boulanger. 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** (voir p. 23) passant par les deux pôles célestes.

Cette désignation trouve son origine dans la mythologie grecque : dans le récit le plus courant, Zeus, désirent rendre Héraclès immortel, lui fait téter le sein d'Héra alors endormie. Celle-ci essaye d'arracher Héraclès de son sein, et y parvient en laissant une giclée de lait s'épandre dans le ciel, formant la Voie Lactée. Selon une seconde version, peu de temps après la naissance d'Héraclès, Hermès enlève l'enfant et

le place dans le lit d'Héra endormie : aucun des fils de Zeus ne peut devenir immortel s'il n'a tété au sein de la déesse. Affamé, le bébé s'approche de celle-ci et commence à téter. Se réveillant, Héra aperçoit l'enfant et, indignée, le repousse ; le lait divin se répand dans le ciel en une traînée blanchâtre, la Voie Lactée. Dans une troisième version, Alcène abandonne son enfant par crainte de la vengeance d'Héra. Athéna convainc cette dernière d'allaiter le bébé, mais Héraclès tète trop goulûment et Athéna doit le rendre à sa mère. 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.

Le mot en grec ancien γαλαξίας, formé de la racine γαλακτ-, dérivée du mot γάλα (« lait »), et du suffixe adjectival -ίας, est aussi la racine étymologique de *galaxias*, traduit en français par « galaxie », nom de notre galaxie (la Galaxie, avec majuscule) puis, plus tard, de tous les ensembles d'étoiles.

Observations et découvertes

Dans 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. 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 un météore atmosphérique placé dans la moyenne région sublunaire. 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. Mais Démocrite et Anaxagore, bien plus anciens, jugent que cette blancheur céleste doit être produite par une multitude d'étoiles, trop petites pour les distinguer à l'œil nu. Cette conception stellaire de la Voie Lactée apparaît d'abord en Inde.

Claude Ptolémée synthétise 500 ans d'observations dans son *Almageste* rédigé au II^e siècle. 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.

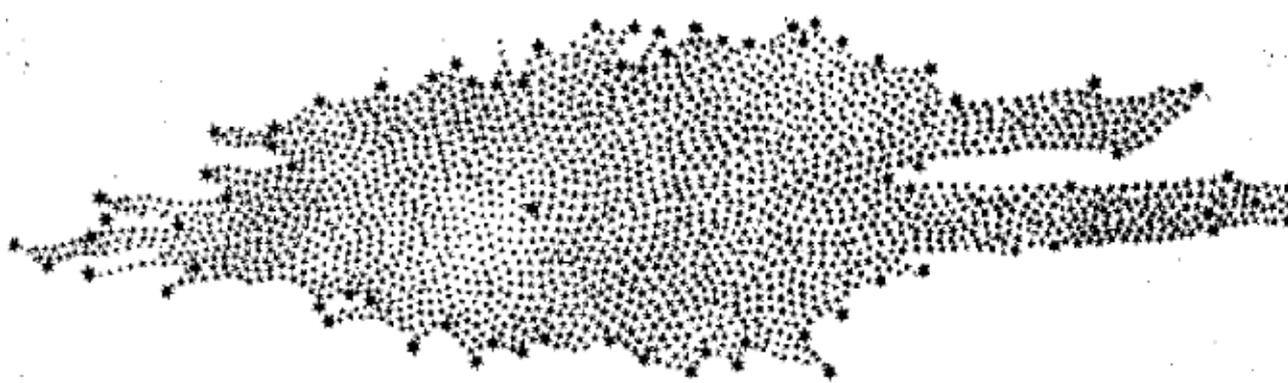
Tandis que plusieurs astronomes arabes et perses du Moyen Âge penchent pour son origine stellaire, Al-Biruni, astronome perse du début du XI^e siècle, décrit la Galaxie comme un rassemblement de nombreuses étoiles nébuleuses. Alhazen réfute la théorie d'Aristote en opérant une tentative d'observation et de mesure de la parallaxe et ainsi « détermina que parce que la Voie Lactée n'a pas de parallaxe, elle est très éloignée de la Terre et n'appartient pas à son atmosphère ». Au début du XII^e siècle, l'astronome andalou Avempace 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 élançée 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, spécule 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 moins 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 conjecture aussi que des nébuleuses, visibles dans le ciel nocturne, seraient des « galaxies » semblables à la nôtre. Il qualifie la Voie Lactée et les « nébuleuses extragalactiques » d'« **univers-îles** ».

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 selon les données actuelles). Ne connaissant pas la distance des étoiles, il suppose pour élaborer son modèle quantitatif cinq hypothèses de base dont plusieurs se révéleront fausses : toutes les étoiles ont une même luminosité intrinsèque, leur distance décroît en proportion de leur magnitude apparente et absence d'extinction interstellaire.



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

En 1845, William Parsons construit un télescope plus puissant qui permet 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.



Photographie (1899) de la « Grande nébuleuse d'Andromède » par Isaac Roberts, plus tard appelée la galaxie d'Andromède.

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 novæ, et calcule qu'elles sont, en moyenne, 10 fois moins lumineuses que celles de la Voie Lactée. Il établit la distance des novæ 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 1920, Harlow Shapley et Heber Curtis engagent le Grand Débat, qui concerne la nature de la Voie Lactée, les nébuleuses spirales et la taille de l'Univers. 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 et un décalage Doppler élevé.

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.



Coupe de la Voie Lactée, avec la position du Soleil

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.

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, en utilisant un raffinement de la méthode d'Herschel, 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 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.

Apparence depuis la Terre

Observée de la Terre, la Voie Lactée ressemble à une bande blanchâtre qui forme un arc d'environ 30° dans le ciel. Toutes les étoiles que l'on peut discerner à l'œil nu font partie de la Voie Lactée; les étoiles indiscernables à l'œil nu ainsi que d'autres objets célestes dans la direction du plan galactique sont à la source de la lumière diffuse de cette bande. Dans les régions sombres de la bande, telles que le Grand Rift et le Sac de charbon, la lumière des étoiles lointaines est absorbée par la poussière cosmique. La partie du ciel occultée par la Voie Lactée est appelée la zone d'évitement.



La Voie Lactée depuis la côte ouest de l'Estonie.

« Les plus lumineuses des galaxies connues sont environ cent fois plus brillantes que la Voie Lactée, qui brille elle-même comme dix milliards de soleils ». Pourtant, la brillance de surface de la Voie Lactée est relativement faible. Sa visibilité est significativement réduite en présence de pollution lumineuse ou lorsque la Lune éclaire le ciel. La luminosité du ciel doit être plus faible qu'environ 20,2 magnitudes par seconde d'arc au carré (mag/as^2) pour pouvoir observer la Galaxie. Elle est en général visible quand la magnitude limite visuelle est d'environ +5.1 ou mieux ; plusieurs détails sont visibles lorsqu'elle atteint +6.1. En conséquence, elle est difficile à observer depuis les milieux urbains éclairés de nuit, mais relativement facile à observer dans un milieu rural si la Lune se trouve sous l'horizon. Plus d'un tiers de la population humaine ne pourrait observer la Voie Lactée à cause de la pollution lumineuse.

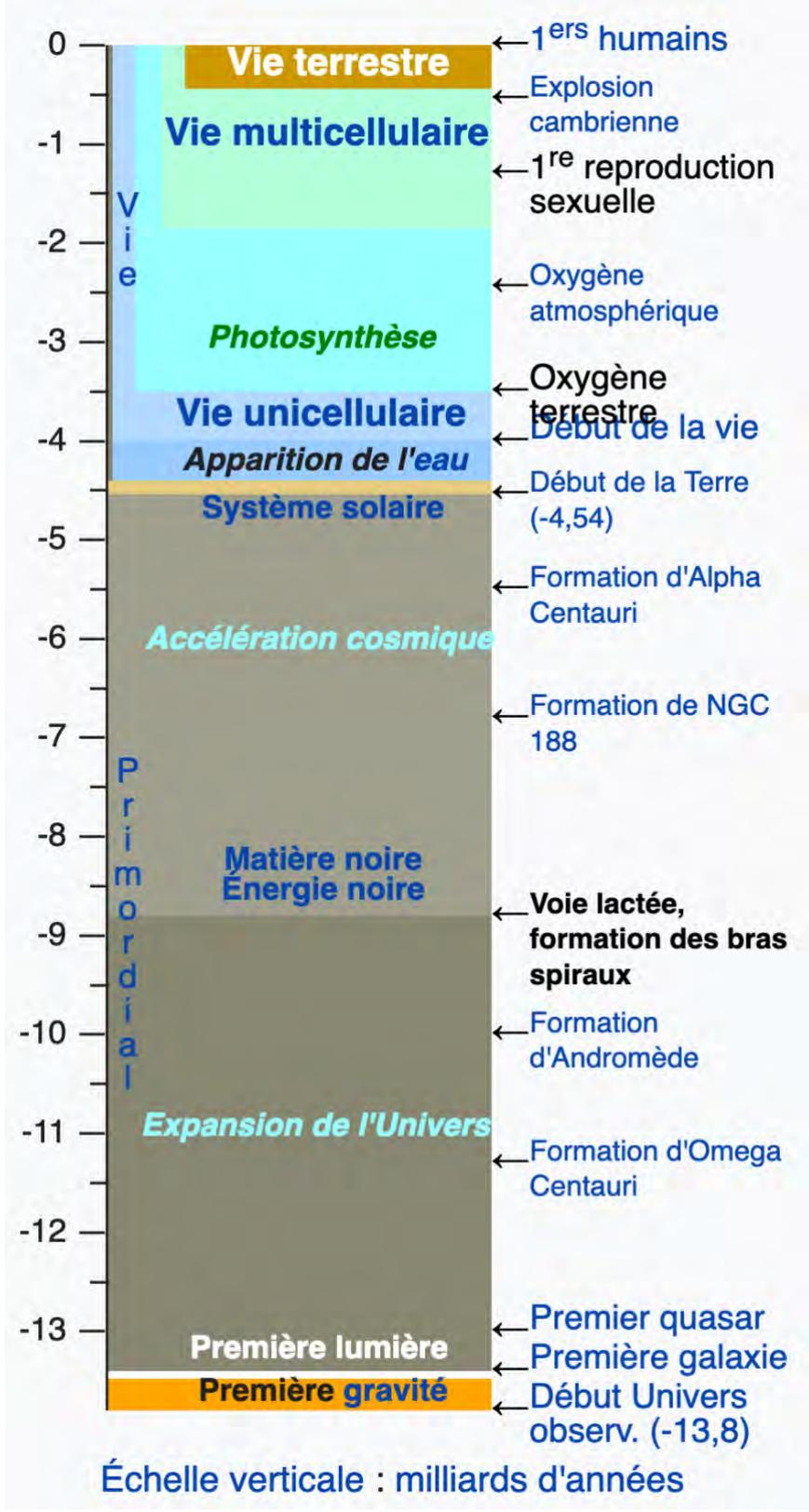


Vue à 360° de la Voie lactée. Ce photomontage comprend des photos prises dans l'hémisphère nord (à Fort Davis aux États-Unis) et d'autres, dans l'hémisphère sud (à Broken Hill en Australie).

Observée de la Terre, la région visible du plan galactique de la Voie Lactée comprend 30 constellations. Le plan galactique est incliné d'environ 60° par rapport à l'écliptique (le plan de l'orbite terrestre). Relativement à l'équateur céleste, il s'étend au nord jusqu'à la constellation de Cassiopée et au sud jusqu'à la constellation de la Croix du Sud, ce qui démontre, relativement au plan galactique, la grande inclinaison du plan équatorial de la Terre et du plan de l'écliptique. Le pôle Nord galactique est proche de β Comae Berenices, alors que le pôle Sud galactique est proche d' α Sculptoris. À cause de cette grande inclinaison, l'arc de la Voie Lactée peut apparaître très bas ou très haut dans le ciel nocturne selon le moment de l'année et de la nuit. Pour les observateurs à la surface de la Terre situés entre 65° nord et 65° sud, la Voie Lactée passe deux fois par jour au-dessus de leur tête.

Galactogenèse

L'existence de la Voie Lactée a débuté sous la forme d'une ou plusieurs petites masses de densité supérieure à la moyenne peu après le Big Bang. Quelques-unes de ces masses ont fait office de germes pour les amas globulaires où leurs plus vieilles étoiles restantes font maintenant partie du halo galactique de la Voie Lactée. Quelques milliards d'années après la naissance des premières étoiles, la masse de la Voie Lactée était suffisamment grande pour entretenir une vitesse tangentielle élevée. À cause de la conservation du moment cinétique, le milieu interstellaire gazeux s'est aplati, passant de la forme d'un sphéroïde à un disque. C'est dans ce disque que se sont formées ultérieurement les étoiles. La plupart des jeunes étoiles de la Voie Lactée, y compris le Soleil, se trouvent dans le disque galactique.



À la suite de la formation des premières étoiles, la Voie Lactée a grandi à la fois par fusion de galaxies (particulièrement dans ses premières années de croissance) et par accrétion du gaz présent dans le halo galactique. À l'heure actuelle, grâce au courant magellanique, elle attire des matériaux de deux galaxies satellites, les Petit et Grand nuages de Magellan. Des caractéristiques de la Galaxie, tels la masse stellaire, le moment cinétique et la métallicité des régions très éloignées, laissent penser qu'elle n'a fusionné avec aucune grande galaxie dans les derniers 10 milliards d'années. Cette absence de fusions récentes est inhabituelle parmi les galaxies spirales.

Toutefois la Voie Lactée a-t-elle fusionné avec une autre galaxie il y a, justement, 10 milliards d'années environ. Durant les 22 premiers mois d'observation du télescope spatial Gaia, l'étude de sept millions d'étoiles a permis de découvrir que 30 000 d'entre elles font partie d'un groupe d'étoiles vieilles se déplaçant toutes sur des trajectoires allongées dans la direction opposée à la majorité des autres étoiles de la galaxie, y compris le Soleil. Elles se distinguent également dans le diagramme H-R, ce qui indique qu'elles appartiennent à une population stellaire distincte. Leurs caractéristiques sont en accord avec les simulations informatiques de fusions de galaxies. Des centaines d'étoiles variables et 13 amas globulaires de la Voie Lactée suivent des trajectoires similaires, indiquant qu'elles faisaient aussi partie de la galaxie disparue, dénommée *Gaia Enceladus*. Les simulations indiquent qu'elle était dix fois plus petite que la Voie Lactée actuelle (donc de la taille d'un nuage de Magellan), mais il y a 10 milliards d'années la Voie Lactée était elle-même beaucoup plus petite qu'aujourd'hui (peut-être d'un facteur 40 %), ce qui fait de cette fusion un événement majeur de l'histoire de notre galaxie.

Selon des études récentes, la Voie Lactée et la galaxie d'Andromède se trouvent dans ce qui est surnommé la « vallée verte » du diagramme couleur-magnitude des galaxies, une région peuplée de galaxies faisant un transit du « nuage bleu » (des galaxies qui créent régulièrement des étoiles) à la « séquence rouge » (des galaxies qui ne créent aucune étoile). La naissance des étoiles dépend de la présence de gaz interstellaire susceptible de servir de matériau. Dans la vallée verte, ce gaz est de moins en moins présent. Selon des simulations de galaxies semblables à la nôtre, la formation cesse habituellement 5 milliards d'années après notre époque, même en tenant compte d'une croissance dans le rythme de création d'étoiles à la suite d'une collision avec la galaxie d'Andromède. L'observation de galaxies similaires à la Voie Lactée amène à conclure qu'elle est parmi les plus rouges et les plus brillantes de toutes les galaxies spirales qui continuent de créer des étoiles et qu'elle est légèrement plus bleue que les étoiles bleues dans la séquence rouge.

Âge et histoire cosmologique

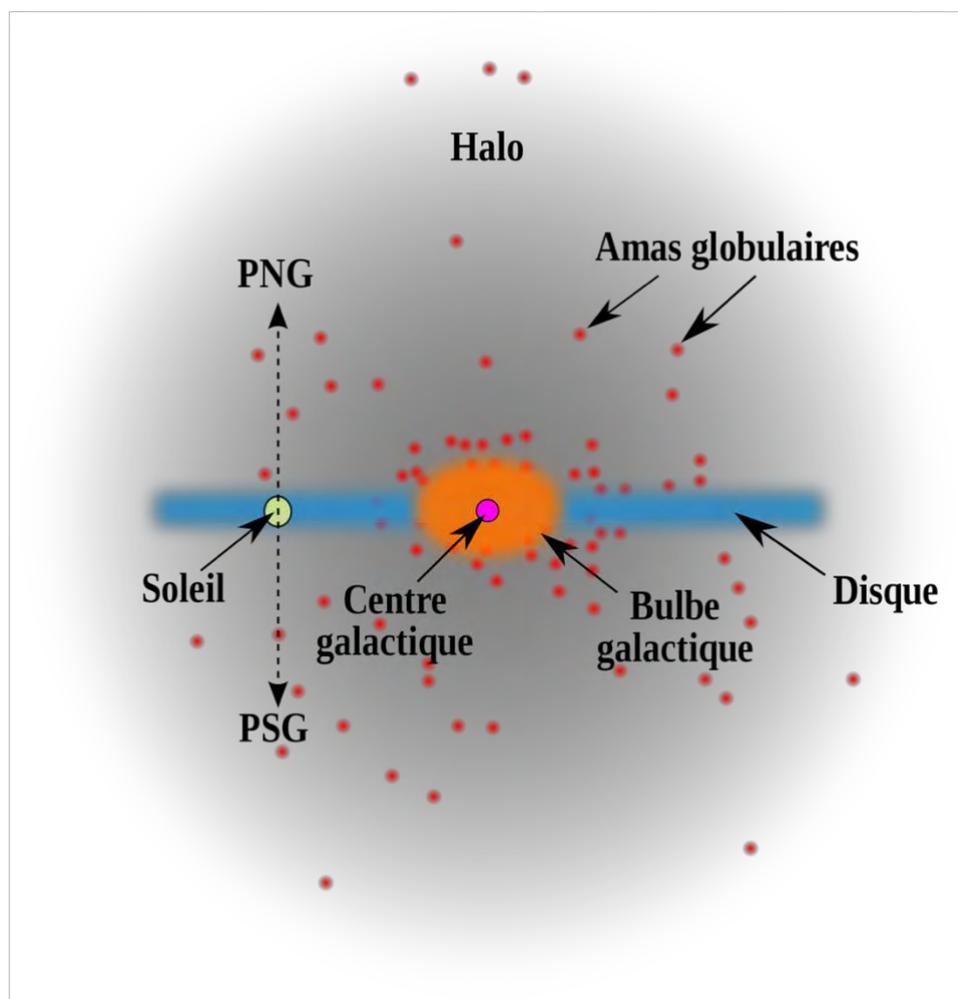
Les amas globulaires sont parmi les plus vieux objets de la Galaxie, ce qui permet de fixer une limite inférieure à l'âge de la Voie Lactée. L'âge des étoiles peut être déduit en mesurant l'abondance des radio-isotopes de longue demi-vie, tels le thorium 232 et l'uranium 238, puis comparer ces résultats à des estimations de leur abondance originelle. Selon cette technique, l'âge de BPS CS 31082 0001 serait $12,5 \pm 3$ Ga, alors qu'il serait de $13,8 \pm 4$ Ga pour BD +17° 3248. Une autre technique de calcul s'appuie sur l'étude des naines blanches. Lorsqu'elles se forment, elles se refroidissent par émissions de radiations et leur surface refroidit régulièrement. En comparant la température des naines blanches les plus froides aux températures théoriques initiales, il est possible d'estimer leur âge. Selon cette technique, l'âge de l'amas globulaire M4 a été estimé à $12,7 \pm 0,7$ Ga.

L'âge de plusieurs étoiles solitaires du halo galactique est près de l'âge de l'Univers, soit 13,8 Ga. Par exemple, HE 1523-0901 serait âgée de 13,2 Ga. C'est l'étoile la plus âgée de la Galaxie selon les observations de 2007 ; c'est donc l'âge maximal de la Galaxie. Une autre étoile, HD 140283, serait âgée de $14,46 \pm 0,8$ Ga ; elle est donc apparue au plus tôt voici 13,66 Ga (en raison de l'incertitude, l'âge de l'étoile n'est pas contradictoire avec l'âge de l'Univers). Le disque mince de la Voie Lactée se serait formé voici $8,8 \pm 1,7$ Ga. Les mesures effectuées laissent penser qu'il y aurait eu un hiatus de presque 5 Ga entre les créations du halo galactique et du disque mince. Des scientifiques, après avoir étudié la signature chimique de milliers d'étoiles, ont suggéré que la création stellaire a diminué d'un ordre de grandeur voici de 10 à 8 Ga. Cette diminution serait survenue au moment où le disque mince se formait, suggérant que le disque et la structure barrée ont brassé le gaz interstellaire au point de le rendre trop chaud pour soutenir le rythme de création des étoiles.

Le chercheur britannique Lynden-Bell démontre en 1976 que les galaxies satellites de la Voie Lactée ne sont pas distribuées aléatoirement ; leur répartition serait la conséquence du bris d'un système plus grand qui aurait produit une structure annulaire d'un diamètre de 500 000 a.l. et épaisses de 50 000 a.l. Les quasi-collisions entre galaxies, comme celle anticipée avec la galaxie d'Andromède dans 4 Ga, génèrent d'énormes masses de gaz interstellaire qui, sur une longue durée, se contractent de façon à former des galaxies naines perpendiculaires au disque principal. En 2005, des chercheurs, après avoir analysé la répartition des amas globulaires et les minces traces laissées à la suite de la désagrégation des galaxies naines, déterminent qu'ils participent aussi à la création de tels anneaux de matière. En 2013, un autre chercheur démontre qu'un tel anneau existe aussi autour de la galaxie d'Andromède, faisant partie d'une structure en rotation, ce qui suggère qu'elle a été précédemment en contact avec la Voie Lactée. Cependant, cette hypothèse est invalide même en tenant compte de l'existence d'un halo de matière noire. Si la théorie MOND était vraie, alors il serait plausible que les deux galaxies soient entrées en contact voici de 11 à 7 Ga. Un chercheur avance que si l'existence de la matière noire implique un condensat de Bose-Einstein superfluide, alors la théorie MOND serait vraie pour certains états de la matière. Par ailleurs, la Galaxie entrera en collision avec le Grand Nuage de Magellan dans environ un milliard d'années, bien avant la collision anticipée avec la galaxie d'Andromède.

Grandeur et masse

La Voie Lactée est la deuxième plus grande galaxie du Groupe local, derrière la galaxie d'Andromède. Le diamètre de son disque est le plus souvent estimé entre 100 000 et 120 000 années-lumière. Après avoir étudié les données spectroscopiques de LAMOST et de SDSS, des scientifiques indiquent que son diamètre peut atteindre 200 000 années-lumière, même si le nombre d'étoiles au-delà de 120 000 années-lumière est très faible. L'épaisseur de la Galaxie est en moyenne de 1 000 années-lumière (a.l.). À titre comparatif, si le Système solaire jusqu'à l'orbite de Neptune était de la taille d'une pièce de monnaie de 25 mm, la Voie Lactée aurait la taille des États-Unis. L'anneau de la Licorne, filament d'étoiles qui entoure la Voie Lactée en ondulant au-dessus et au-dessous du plan galactique, pourrait appartenir à la Galaxie. Si c'est le cas, le diamètre de la Voie Lactée serait plutôt de 150 000 à 180 000 a.l.



Profil schématique de la Voie Lactée

(PNG : Pôle Nord galactique.

PSG : Pôle Sud galactique).

L'estimation de la masse de la Voie Lactée varie selon la méthode et les données utilisées. La plus faible valeur est de $5,8 \times 10^{11} M_{\odot}$ (masses solaires), significativement moins que la galaxie d'Andromède. Les mesures prises par le *Very Long Baseline Array* en 2009 ont permis d'établir des vitesses aussi élevées que 254 km/s pour des étoiles se trouvant au bord de la Galaxie. Puisque ces vitesses orbitales dépendent de la masse contenue à l'intérieur du rayon orbital, il faut envisager que la masse de la partie s'étendant jusqu'à 160 000 a.l. du centre égale à peu près celle de la galaxie d'Andromède, soit $7 \times 10^{11} M_{\odot}$. En 2010, une mesure de la vitesse radiale des étoiles du halo galactique a déterminé que la masse à l'intérieur d'une sphère de 80 kpc égale $7 \times 10^{11} M_{\odot}$. Une autre étude, publiée en 2014, avance une masse de $8,5 \times 10^{11} M_{\odot}$ pour toute la Galaxie, ce qui représente environ la moitié de la masse totale de la galaxie d'Andromède. En 2019, une étude basée sur des observations de Gaia et Hubble a estimé la masse de la Voie Lactée dans un rayon de 129 000 a.l. autour du bulbe galactique à entre $1,10 \times 10^{12}$ et $2,29 \times 10^{12} M_{\odot}$, c'est-à-dire approximativement 1 500 milliards de masses solaires.

Selon le modèle Λ CDM, la majorité de la masse de Galaxie serait constituée de matière noire, une forme de matière hypothétique à la fois invisible et sensible à la gravitation. Le halo de matière noire s'étendrait uniformément jusqu'à une distance d'au moins 100 kpc du centre galactique. En tenant compte de cette hypothèse, les modèles mathématiques avancent une masse totale entre 1 et $1,5 \times 10^{12} M_{\odot}$. Une étude publiée en 2013 avance une masse aussi élevée que $4,5 \times 10^{12} M_{\odot}$, alors qu'une étude publiée en 2014 avance une masse moindre, $0,8 \times 10^{12} M_{\odot}$.

La masse de toutes les étoiles de la Voie Lactée est approximativement de $4,6 \times 10^{10} M_{\odot}$ ou de $6,43 \times 10^{10} M_{\odot}$. Les gaz interstellaires forment une partie non négligeable de la Galaxie ; ils sont composés à 90 % d'hydrogène et à 10 % d'hélium par la masse. La masse du gaz interstellaire représente entre 10 % et 15 % de la masse totale des étoiles de la Voie Lactée. La poussière interstellaire représente 1 % de la masse totale du gaz.

Malgré sa taille et sa masse, la Galaxie est microscopique à l'échelle de l'Univers. Des observations menées avec des instruments modernes ont permis d'estimer le nombre de galaxies de l'Univers observable à 200 milliards. Une étude publiée en 2016, s'appuyant sur les données recueillies par le télescope spatial *Hubble*, avance plutôt une quantité dix fois plus élevée, soit 2 000 milliards de galaxies.

Récapitulatif des différentes valeurs proposées pour la masse de la Voie Lactée :

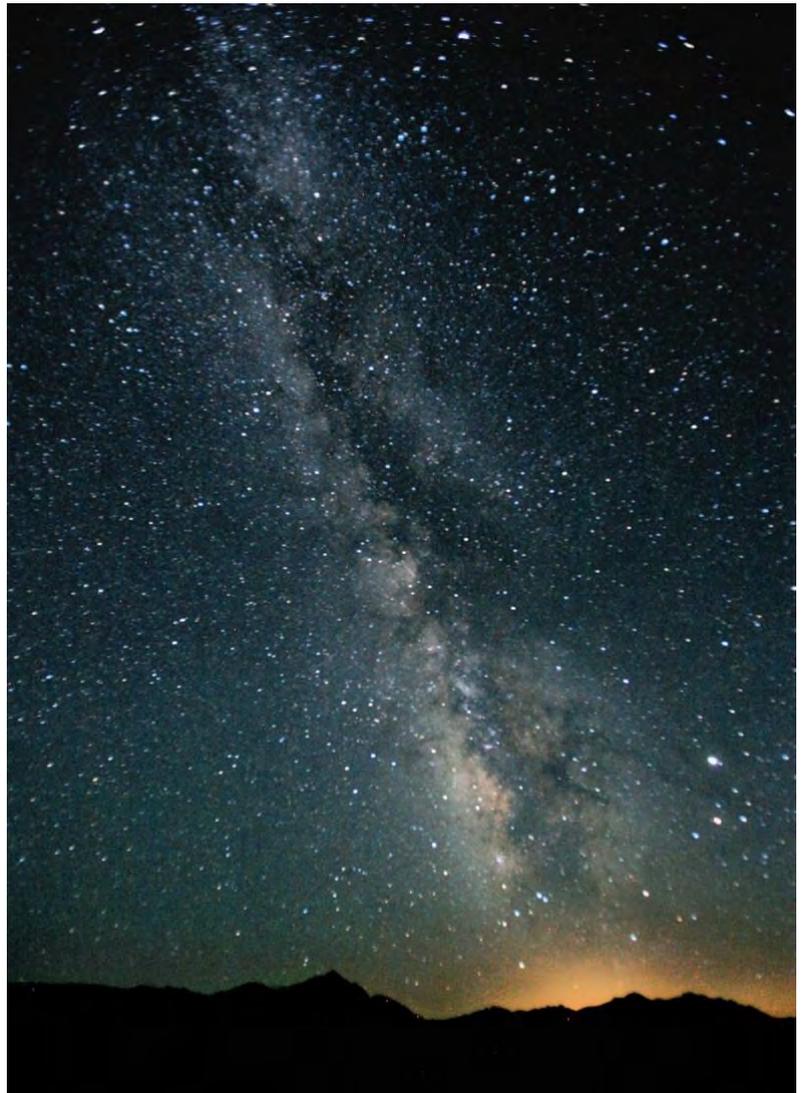
Année de l'étude	Origine de la mesure	Valeur proposée
2006		$0,58 \times 10^{12} M_{\odot}$
2009		$0,7 \times 10^{12} M_{\odot}$
2010		$0,57 \times 10^{12} M_{\odot}$ - $0,99 \times 10^{12} M_{\odot}$ dans un rayon de 80 kpc
2011		$(1,26 \pm 0,24) \times 10^{12} M_{\odot}$
2014		$0,5 \times 10^{12} M_{\odot}$ - $1,2 \times 10^{12} M_{\odot}$
2014		$0,64 \times 10^{12} M_{\odot}$ - $1,11 \times 10^{12} M_{\odot}$
2019	Gaia et Hubble	$1,10 \times 10^{12} M_{\odot}$ - $2,29 \times 10^{12} M_{\odot}$

En ce qui concerne la taille et la masse de la Voie Lactée, de toutes nouvelles évaluations très précises ont été publiées par l'ESA le 7 mars 2019, grâce aux télescopes spatiaux Hubble et Gaia. Voir Annexe I et I bis.

Composition

Les étoiles de la Voie Lactée sont plongées dans le milieu interstellaire, un mélange de gaz, de poussières et de rayons cosmiques. Ce milieu, en forme de disque, s'étend jusqu'à des centaines d'a.l. pour les gaz les plus froids, et jusqu'à des milliers d'a.l. pour les gaz les plus chauds. La concentration d'étoiles dans le disque diminue graduellement en s'éloignant du centre galactique. Au-delà d'un rayon d'environ 40 000 a.l. du centre galactique, pour des raisons inconnues, la densité des étoiles décroît plus rapidement

en s'éloignant du centre. Le centre du disque est entouré d'un halo galactique sphérique composé d'étoiles et d'amas globulaires dont la taille est limitée par deux satellites de la Voie Lactée, le Grand et le Petit nuage de Magellan, dont les apsides vis-à-vis du centre galactique sont distantes d'environ 180 000 a.l. À cette distance ou plus loin, l'orbite de la plupart des objets du halo serait sensiblement modifiée par les nuages de Magellan. Dès lors, ces objets échapperaient probablement à l'influence de la Voie Lactée.



La Voie lactée et le centre galactique (masse lumineuse proche de la crête des montagnes) lorsqu'observée en direction de la constellation du Sagittaire.

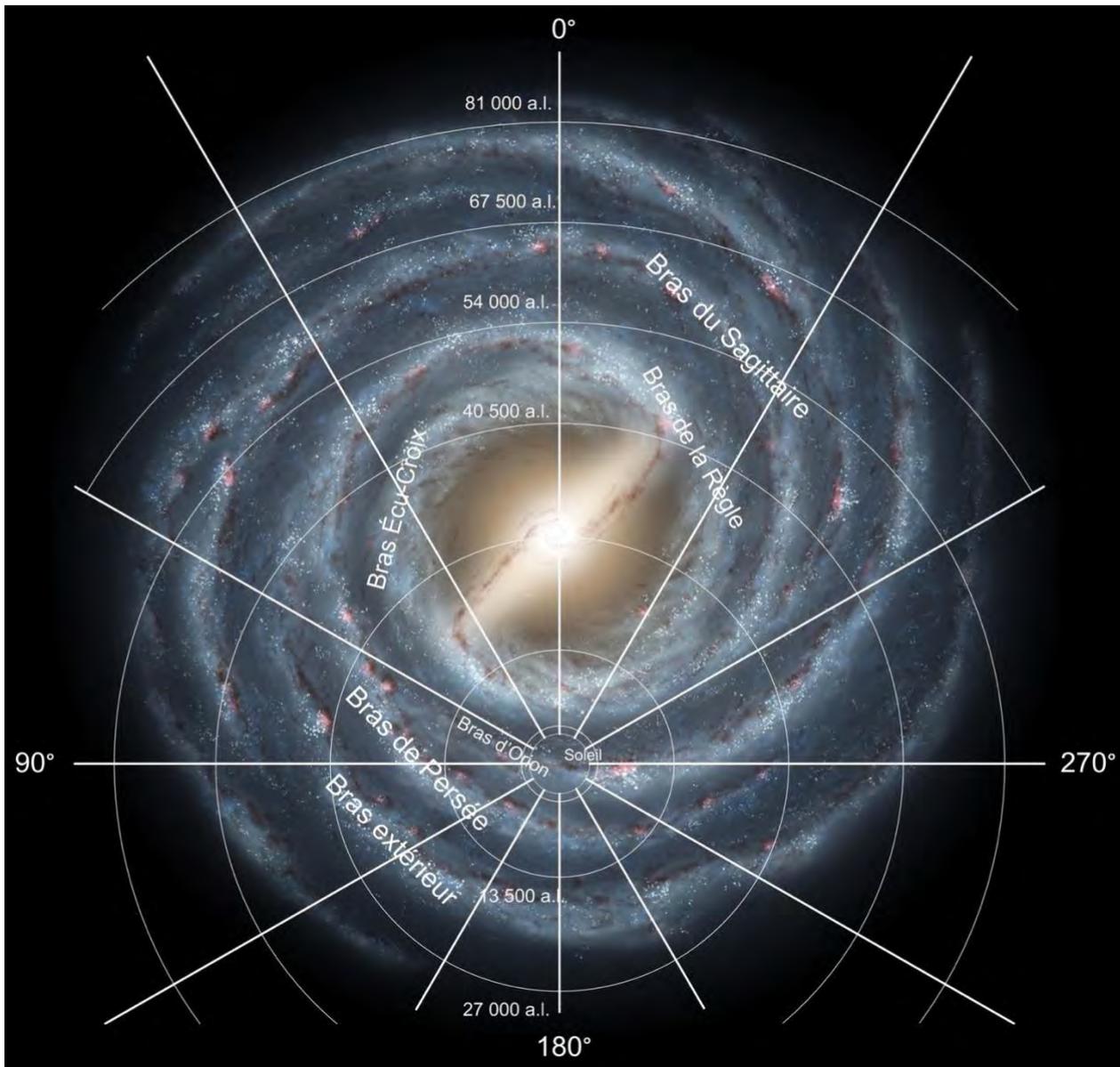
Photo prise dans le désert de Black Rock (Nevada - USA) par une nuit sombre.

La Galaxie comprend au moins 100 milliards de planètes et de 200 à 400 milliards d'étoiles (à titre comparatif, la galaxie d'Andromède comprend environ 1 000 milliards d'étoiles). Les quantités exactes dépendent du nombre d'étoiles de masses très faibles, qui sont difficiles à détecter — particulièrement à des distances supérieures à 300 a.l. du Soleil. L'observation de microlentilles gravitationnelles et de transit astronomiques laisse penser qu'il y aurait au moins autant de planètes liées à des étoiles qu'il y a d'étoiles dans la Voie Lactée; l'observation de microlentilles amène à conclure qu'il y a plus d'objets libres de masse planétaire qui ne font pas partie de systèmes planétaires qu'il n'y a d'étoiles. Selon une étude publiée en janvier 2013, qui se base sur des observations du télescope spatial *Kepler*, il y aurait au minimum une planète par étoile dans la Galaxie, ce qui permet de prédire de 100 à 400 milliards de planètes pour l'ensemble de la Voie Lactée. Le nombre de nébuleuses planétaires s'élève à environ 3 000.

Une autre analyse des données de *Kepler*, aussi publiée en janvier 2013, mentionne un minimum de 17 milliards d'exoplanètes de la taille de la Terre. En novembre 2013, des astronomes annoncent que, selon les données recueillies par *Kepler*, la Voie Lactée pourrait contenir plus de 40 milliards de planètes de la taille de la Terre qui orbiteraient dans la zone habitable de systèmes planétaires centrés sur un jumeau du Soleil ou une naine rouge. 11 milliards de ces planètes seraient en orbite autour d'un jumeau du Soleil. Des scientifiques avancent qu'une planète de ce type se trouverait à 12 a.l. de notre Système solaire. Des exocomètes (comètes hors du Système solaire) ont aussi été observées et pourraient même être courantes dans la Voie Lactée.

Structure

La Voie Lactée comprend une barre centrale entourée d'un disque composé de gaz, de poussières et d'étoiles. Ces trois types d'objets astronomiques forment des structures en forme de bras, chacun ressemblant grossièrement à une spirale logarithmique. La distribution de la masse est de type Sbc selon la séquence de Hubble et typique des galaxies spirales avec des bras courbes relativement lâches. C'est dans les années 1990 que les astronomes commencent à soupçonner que la Voie Lactée est une galaxie spirale barrée, plutôt qu'une galaxie spirale. Leurs soupçons ont été confirmés en 2005 grâce aux observations du télescope spatial *Spitzer* qui montrent que la barre centrale de la Galaxie est plus prononcée que ne le pensaient les spécialistes. Selon la classification de Vaucouleurs, il s'agit donc d'une galaxie SB(rs)bc II.



Vue d'artiste de la structure en spirale de la Voie lactée qui montre la barre au centre et deux bras spiraux majeurs, avec le système de coordonnées galactiques.

Centre galactique

La distance séparant le Soleil du centre galactique se situe dans une fourchette allant de 26 000 à 28 000 a.l. Elle est établie en ayant recours à des méthodes géométriques ou en s'appuyant sur la luminosité des chandelles standards, les résultats variant selon la méthode retenue. Le bulbe galactique, assimilé à une sphère d'environ 10 000 a.l. centrée sur le centre galactique, comprend une concentration particulièrement élevée de vieilles étoiles. Quelques scientifiques pensent que la Voie Lactée ne possède pas de bulbe galactique, mais plutôt des pseudo-bulbes galactiques qui auraient été formées à la suite de fusions galactiques, ce qui expliquerait la présence de la barre centrale.

Plusieurs études ont démontré que les galaxies dites normales sont centrées sur un trou noir supermassif. Le centre galactique comprend une radiosource intense appelée Sagittaire A* (prononcé « Sagittaire A-étoile »), découverte en 1974 dont le diamètre est de 45 millions de kilomètres. En octobre 2018, l'Observatoire européen austral (ESO) annonce que la radiosource comprend un trou noir supermassif. Il pèserait entre 4,1 et 4,5 millions de fois la masse solaire. En janvier 2015, la NASA rapporte avoir observé un jet de rayons X 400 fois plus brillant que la normale (un record) dont la source est Sagittaire A*. Ce jet aurait pu être causé par la désintégration d'un astéroïde tombant dans un trou noir ou par le confinement des lignes magnétiques des gaz circulant dans Sagittaire A*.

La nature de la barre de la Galaxie est sujette à débat, l'estimation de sa demi-longueur allant de 3 000 à 16 000 a.l., alors que son inclinaison, relativement à la ligne de vue reliant la Terre au centre galactique, va de 10 à 50°. Des scientifiques avancent que la Galaxie comprend deux barres, l'une nichée dans l'autre. Cependant, les étoiles variables de type RR Lyrae ne forment pas avec certitude une barre galactique. La barre pourrait être entourée de ce qui est appelé l'« anneau de 5 kpc » (16 000 a.l.) qui contient une grande partie de l'hydrogène moléculaire présent dans la Voie Lactée ; elle est aussi le siège de la majorité des phénomènes menant à la naissance des étoiles. Si la Voie Lactée était observée de la galaxie d'Andromède, la barre en serait la région la plus lumineuse. Les émissions de rayons X en provenance de son cœur sont alignées sur les étoiles qui entourent la barre centrale et la crête galactique.

En 2010, le *Fermi Gamma-ray Space Telescope* a permis de découvrir deux gigantesques bulles, sièges de puissantes émissions électromagnétiques, au nord et au sud du cœur galactique. Le diamètre de chaque « bulle de Fermi » est d'environ 25 000 a.l. ; dans le ciel de l'hémisphère sud de la Terre, elles couvrent plus de la moitié du ciel visible, s'étendant de la constellation de la Vierge jusqu'à celle de la Grue. Par la suite, les observations du radiotélescope de Parkes ont permis d'identifier des émissions polarisées typiques des bulles de Fermi. Ce phénomène serait la conséquence d'un courant magnétique sortant consécutif à la formation d'étoiles à l'intérieur d'une sphère de 640 a.l. entourant le centre de la Voie Lactée.

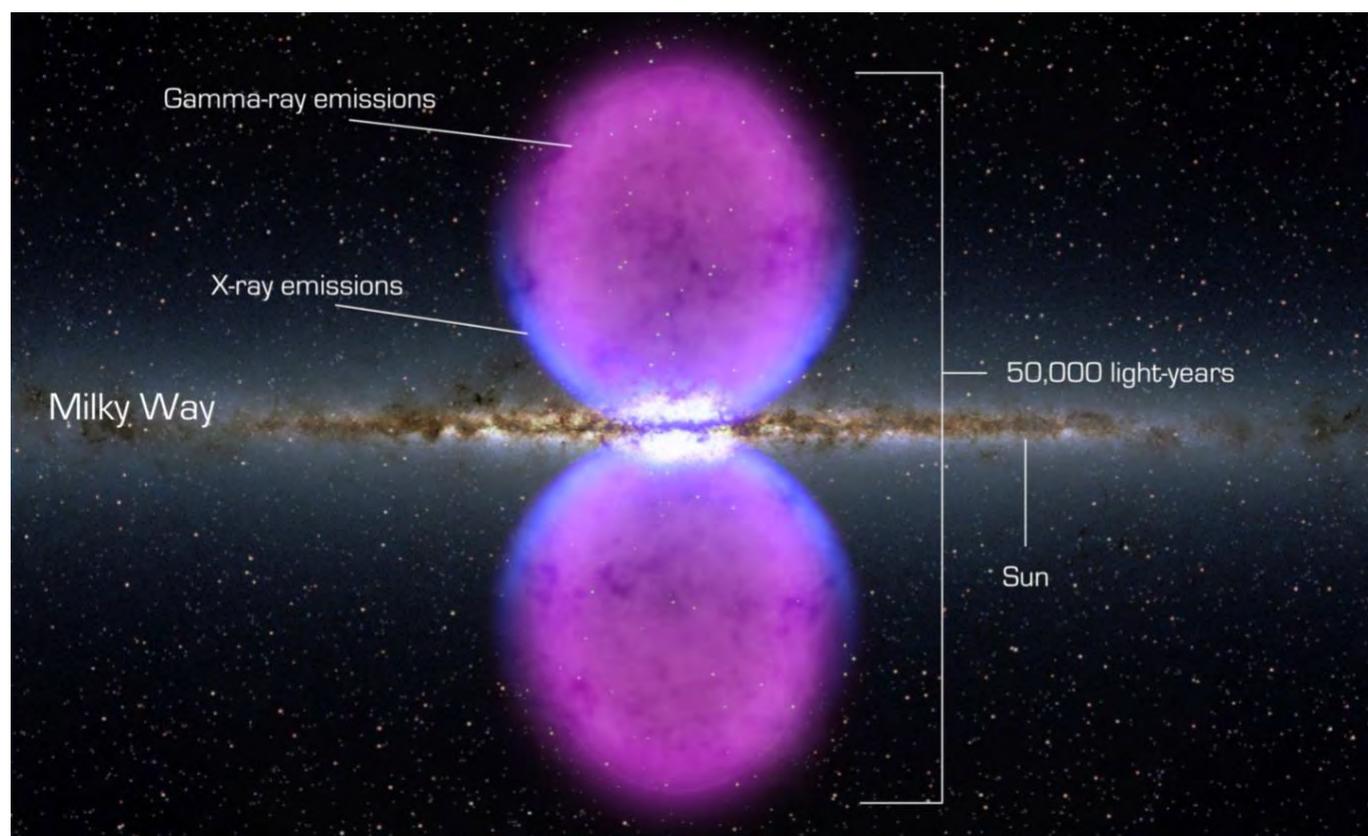


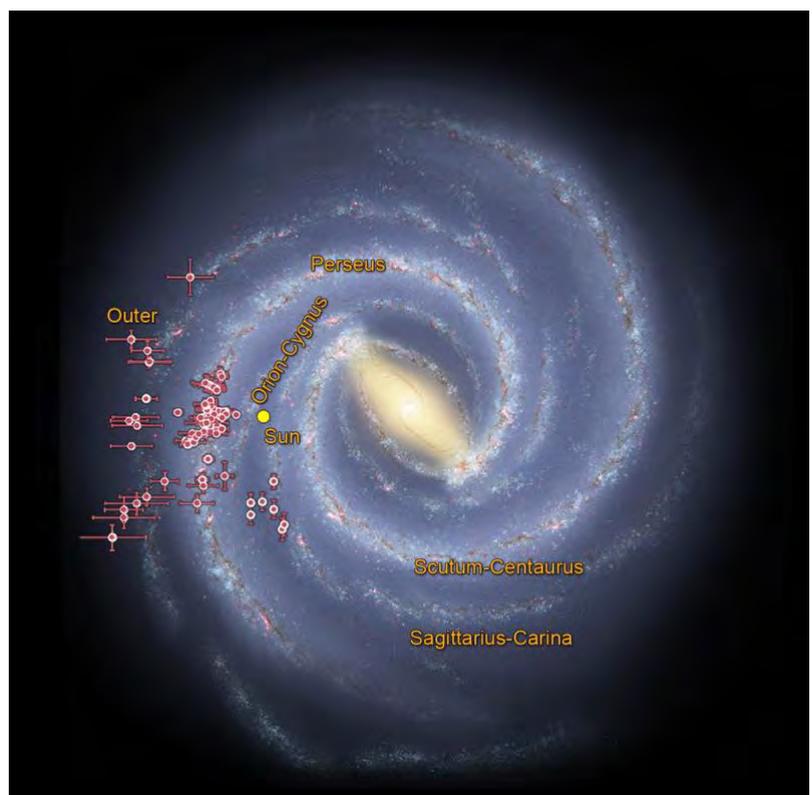
Illustration des deux gigantesques bulles de Fermi (en rose) de la Voie lactée (segment horizontal), sièges de puissantes émissions de rayons X (bleu-violet).

Couleur	Bras
Cyan	Bras de Persée et bras de 3 kpc
Mauve	Bras de la Règle et du Cygne (y compris une extension découverte en 2004 ¹⁸³)
Vert	Bras Écu-Croix
Rose	Bras Sagittaire-Carène
<i>Il existe au moins deux petits bras ou embranchements, dont :</i>	
Orange	Bras d'Orion (qui contient le Système solaire)

Les bras spiraux Écu-Croix et Sagittaire-Carène ont des points de tangence avec l'orbite du Soleil à l'intérieur de la Galaxie. Si ces bras contenaient une surdensité d'étoiles comparativement au disque galactique, les astronomes pourraient les compter près des points de tangence. Deux études dans l'infrarouge, sensible aux étoiles géantes rouges mais pas à l'extinction causée par la poussière, ont démontré la surdensité dans le bras Écu-Croix mais pas dans Sagittaire-Carène : le premier comprend environ 30 % plus de géantes rouges que ce qui est calculé lorsqu'un bras spiral est absent. En 2008, l'astrophysicien Robert Benjamin s'est appuyé sur cette étude pour suggérer que la Voie Lactée ne comprend que deux bras stellaires majeurs : de Persée et Écu-Croix. Les autres bras comprennent un excédent de gaz, mais pas de vieilles étoiles. En décembre 2013, des astronomes, après avoir établi la distribution des jeunes étoiles et des pouponnières d'étoiles, ont conclu que la Galaxie comprend quatre bras spiraux. Deux bras spiraux auraient donc été construits par de vieilles étoiles, et quatre bras par du gaz et de jeunes étoiles. Cette différence est encore inexplicée en 2013.

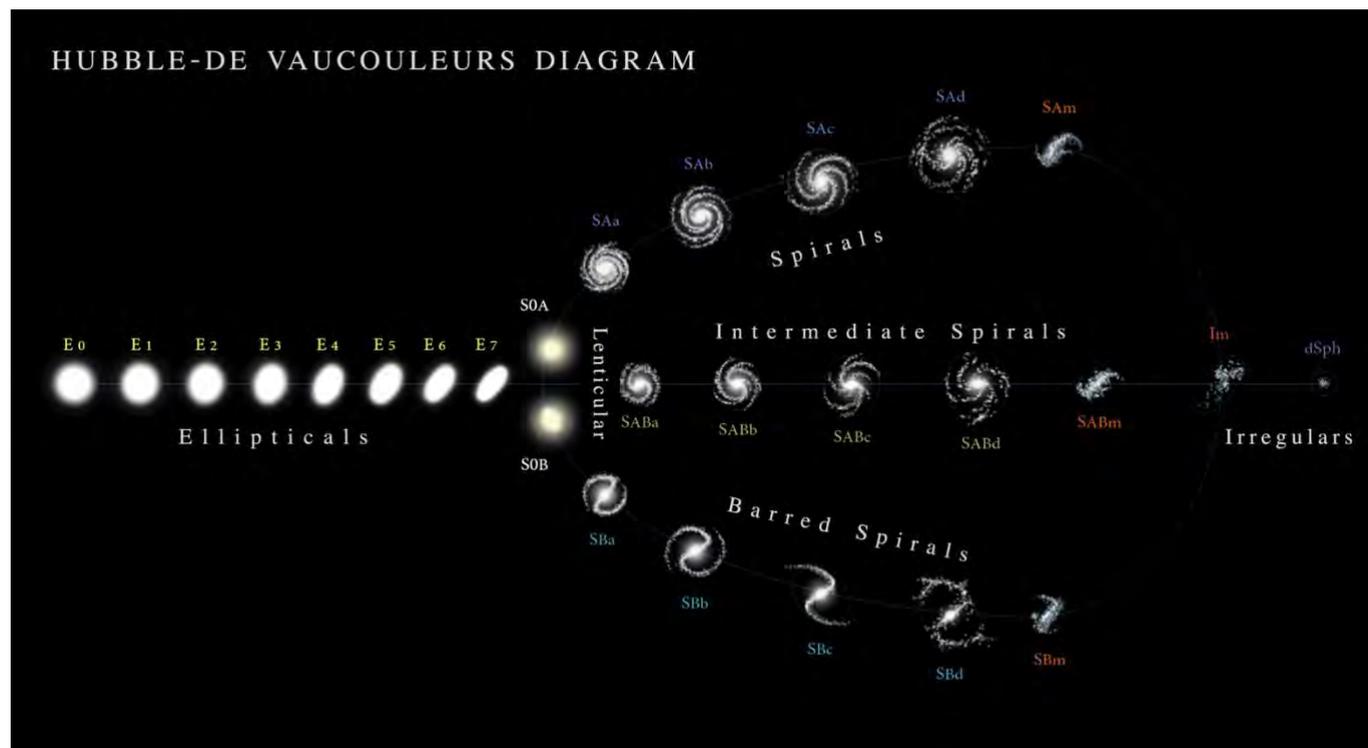
Bras spiraux observés (lignes pleines) et extrapolés (lignes en pointillés).

Des segments partent du Soleil (au centre en haut) en direction de constellations dont le nom est abrégé par trois lettres.



Le bras de 3 kpc proche a été découvert dans les années 1950 par l'astronome H. van Woerden et ses collaborateurs grâce à l'analyse de la raie à 21 centimètres de l'hydrogène atomique. Il s'éloigne du bulbe galactique à plus de 50 km/s. Il se trouve dans le 4^e quadrant galactique à une distance d'environ 5,2 kpc du Soleil et à 3,3 kpc du centre galactique. Le bras de 3 kpc lointain a été découvert en 2008 par l'astronome Tom Dame du CfA. Il est situé dans le 1^{er} quadrant galactique à une distance d'environ 3 kpc du centre galactique.

Les résultats d'une simulation publiés en 2011 laissent penser que les bras spiraux de la Voie Lactée sont le résultat de multiples collisions avec la galaxie naine du Sagittaire. À la suite d'une simulation numérique, des spécialistes ont suggéré que la Galaxie comprend deux motifs en spirale : une structure interne (composée du bras du Sagittaire) qui pivote rapidement (à l'échelle astronomique) et une structure externe (comprenant les bras de la Carène et de Persée) de vitesse angulaire moindre et dont les bras sont étroitement enroulés. Selon ce scénario, le motif externe mènerait à la création d'un pseudo-anneau selon la classification de **Vaucouleurs** et ces deux motifs seraient reliés par le bras du Cygne.



L'anneau de la Licorne (ou anneau extérieur) est formé de gaz et d'étoiles arrachés d'autres galaxies voici des milliards d'années. Cependant, des scientifiques avancent que ce n'est qu'une région plus dense produite par un évaseement et une torsion du disque épais de la Voie Lactée. Un scientifique avance plutôt que ce serait la composante d'un courant stellaire issu de la fusion d'une galaxie avec la Voie Lactée.

Halo

Le disque galactique est entouré d'un halo sphéroïdal composé de vieilles étoiles et d'amas globulaires, dont 90 % se trouvent à moins de 100 000 a.l. du centre galactique. Cependant, quelques amas globulaires ont été découverts à des distances plus grandes, tels que PAL 4 et AM1 à plus de 200 000 a.l. du centre galactique. Environ 40 % des amas de la Galaxie suivent une orbite rétrograde, et donc tournent en sens inverse de la Voie Lactée. Les amas globulaires peuvent suivre une rosette de Klemperer autour de la Voie Lactée (alors que les planètes suivent une orbite elliptique autour d'une étoile).

Même si le disque contient de la poussière qui absorbe certaines longueurs d'onde, ce qui masque des objets célestes, le halo est transparent. La création des étoiles se déroule dans le disque (plus particulièrement dans les bras spiraux, plus denses en jeunes étoiles), mais pas dans le halo parce qu'il comprend trop peu de gaz suffisamment froid, condition essentielle à la naissance des étoiles. Les amas ouverts sont surtout situés dans le disque.

Les découvertes au début du XXI^e siècle ont permis de mieux comprendre la structure de la Voie Lactée. Après avoir découvert que la galaxie d'Andromède est plus vaste que les études antérieures ne le laissent supposer, il est apparu raisonnable d'avancer que la Voie Lactée soit également plus vaste, hypothèse soutenue par la découverte d'une extension au bras de la Cygne et d'une extension au bras Écu-Croix.

En janvier 2006, l'astronome Mario Jurić et des collaborateurs annoncent que les observations du SDSS ont mis au jour une énorme structure diffuse — elle occupe une surface 5 000 fois plus grande que la pleine lune — que les modèles actuels ne peuvent expliquer. Cet ensemble d'étoiles s'élève presque perpendiculairement au plan des bras spiraux. Cette structure pourrait être la conséquence d'une fusion entre la Voie Lactée et une galaxie naine. Elle se situe dans la direction de la constellation de la Vierge à environ 30 000 a.l. de la Terre et a reçu temporairement le nom de courant stellaire de la Vierge.

Halo gazeux

Les observations du télescope spatial *Chandra*, de l'observatoire spatial XMM-Newton et du télescope spatial *Suzaku* laissent penser que la Voie Lactée est entourée d'un halo constitué d'une grande quantité de gaz chauds. Il s'étend sur des centaines de milliers d'années-lumière, notablement plus loin que le halo stellaire, jusqu'à proximité du Petit et du Grand nuages de Magellan. Ce halo gazeux pèse presque autant que la Voie Lactée. La température de son gaz se situe entre 1 million et 2,5 millions kelvin.

L'étude de galaxies lointaines permet de conclure que l'Univers contenait six fois moins de matière baryonique (ordinaire) que de matière noire quand il était âgé de quelques milliards d'années. Aujourd'hui, les observations des galaxies proches, telle la Voie Lactée, ne permettent que de décompter la moitié de ces baryons. Si l'hypothèse de l'égalité des masses du halo et de la Voie Lactée est confirmée, les baryons manquants seraient décomptés.

Position et voisinage du Soleil

Le Soleil se trouve dans le Nuage interstellaire local de la bulle locale, près du côté intérieur du bras spiral d'Orion et près de la ceinture de Gould, à $27\,200 \pm 1\,100$ a.l. du centre galactique. Il est à une distance de 16 à 98 al du plan principal du disque galactique. Le bras local et le bras le plus proche, celui de Persée, sont distants d'environ 6 500 a.l. Le Système solaire est situé à l'intérieur de la zone habitable galactique.

La magnitude absolue de la Voie Lactée est de -20,5. Environ 208 étoiles sont plus brillantes que 8,5 en magnitude absolue à l'intérieur d'une sphère d'un rayon de 49 a.l. centrée sur le Soleil, soit une étoile par $2\,360$ a.l.³. Par ailleurs, 64 étoiles de toute magnitude, mais en excluant 4 naines brunes, se trouvent dans un rayon de 16 al du Soleil, soit 1 étoile par 284 a.l.³. Ces deux calculs montrent qu'il y a notablement plus d'étoiles de faible luminosité que d'étoiles de grande luminosité. Dans tout le ciel terrestre, environ 500 étoiles ont une magnitude apparente supérieure ou égale à 4 alors que 15,5 millions d'étoiles ont une magnitude apparente d'au moins 14.

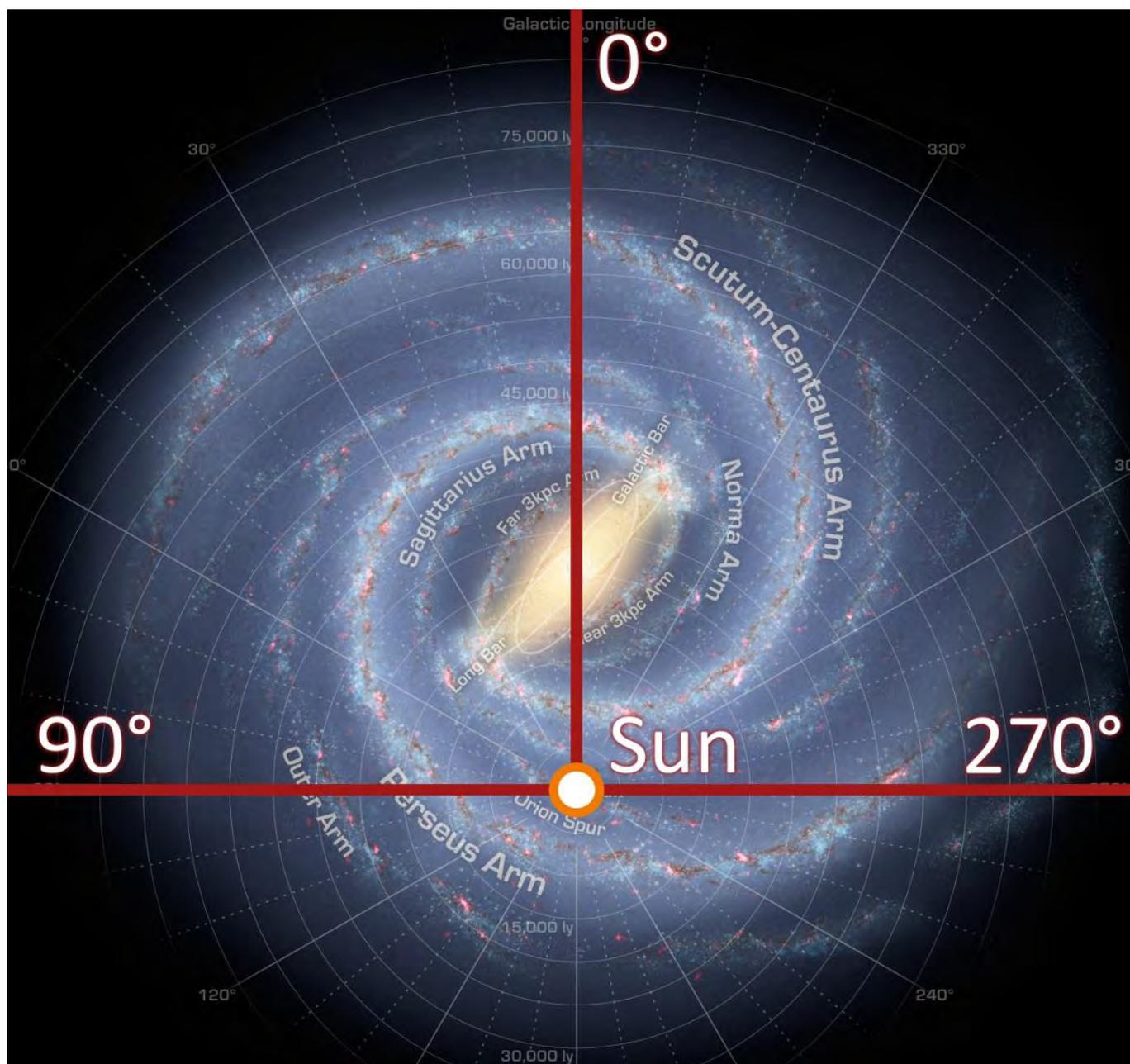
Le Soleil emprunterait une orbite elliptique qui est perturbée par les bras spiraux et la répartition inégale de la masse dans la Galaxie. De plus, relativement au plan galactique, la trajectoire du Soleil oscille environ 2,7 fois par orbite. Des scientifiques ont posé l'hypothèse que ces oscillations coïncidaient avec des extinctions massives du vivant, mais l'analyse du transit du Soleil dans les structures spirales n'a trouvé aucune corrélation.

Le Système solaire complète une orbite autour de la Voie Lactée en 240 millions d'années environ (soit une année galactique). Le Soleil aurait donc accompli de 18 à 20 orbites galactiques depuis sa naissance. La vitesse orbitale du Système solaire autour du centre galactique est d'environ 220 km/s. Le Soleil se déplace dans l'héliosphère à 84 000 km/h. À cette vitesse, il parcourt une année-lumière en 1 400 ans ou encore, il lui suffit de 8 jours pour parcourir une UA (unité astronomique). Le Système solaire se dirige vers la constellation du Scorpion, qui se trouve sur l'écliptique.

Rotation galactique

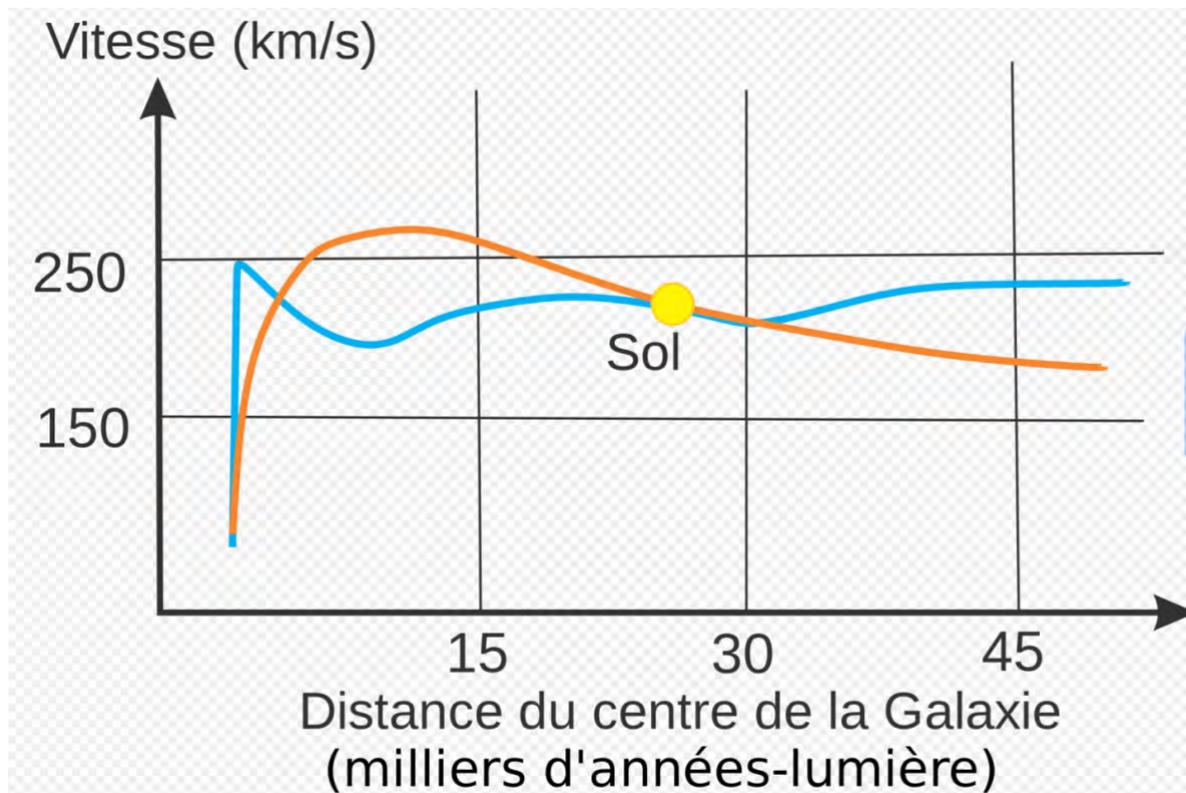
Les étoiles et le gaz de la Voie Lactée effectuent une rotation différentielle autour du centre galactique, ce qui signifie que la période de rotation varie selon la position. Comme dans les autres galaxies spirales, la vitesse orbitale de la plupart des étoiles de la Voie Lactée ne dépend pas fortement de la distance au centre. À une distance éloignée du bulbe galactique et du bord extérieur, la vitesse orbitale des étoiles se situe entre 210 et 240 km/s. Dans le Système solaire, l'attraction gravitationnelle entre deux corps célestes domine la

mécanique céleste : la vitesse d'un corps change selon l'orbite qu'il parcourt. La courbe de rotation galactique de la Voie Lactée permet d'observer que les vitesses orbitales près du centre sont trop faibles par rapport à la vitesse théorique, alors qu'à une distance supérieure à 7 kpc (environ 25 000 a.l.), les vitesses sont trop élevées. Ces différences ne peuvent être expliquées par la loi universelle de la gravitation.



*Position du Soleil dans la Voie lactée.
Les angles sont les longitudes dans le système de coordonnées galactiques.*

Selon les lois de Kepler, si un corps céleste orbite autour d'un corps plus massif, sa vitesse orbitale diminue lorsque la distance entre les deux corps augmente. Selon ces lois, la masse de la Voie Lactée, constituée d'étoiles, de gaz interstellaire et de matière ordinaire (baryonique), ne peut expliquer les vitesses orbitales des corps célestes lointains. Puisque la courbe des vitesses observées est relativement plate, il faut envisager la présence d'une masse supplémentaire qui n'émet ni n'absorbe d'ondes électromagnétiques : elle a été appelée « matière noire ». La courbe de rotation de la Voie Lactée obéit à la loi universelle de rotation des galaxies spirales, laquelle inclut l'influence de la matière noire. Cependant, quelques astronomes préfèrent appliquer la théorie MOND, qui modifie la loi de la gravitation universelle tout en rejetant l'existence de la matière noire parce qu'elle n'a pas encore été détectée avec certitude.



Courbe de rotation galactique de la Voie lactée. L'axe vertical indique la vitesse tangentielle autour du centre galactique, alors que l'axe horizontal indique la distance du centre galactique. Le Soleil se trouve au point circulaire jaune. Les vitesses observées sont en bleu, alors que les vitesses prédites se trouvent sur la courbe en orange.

Environnement

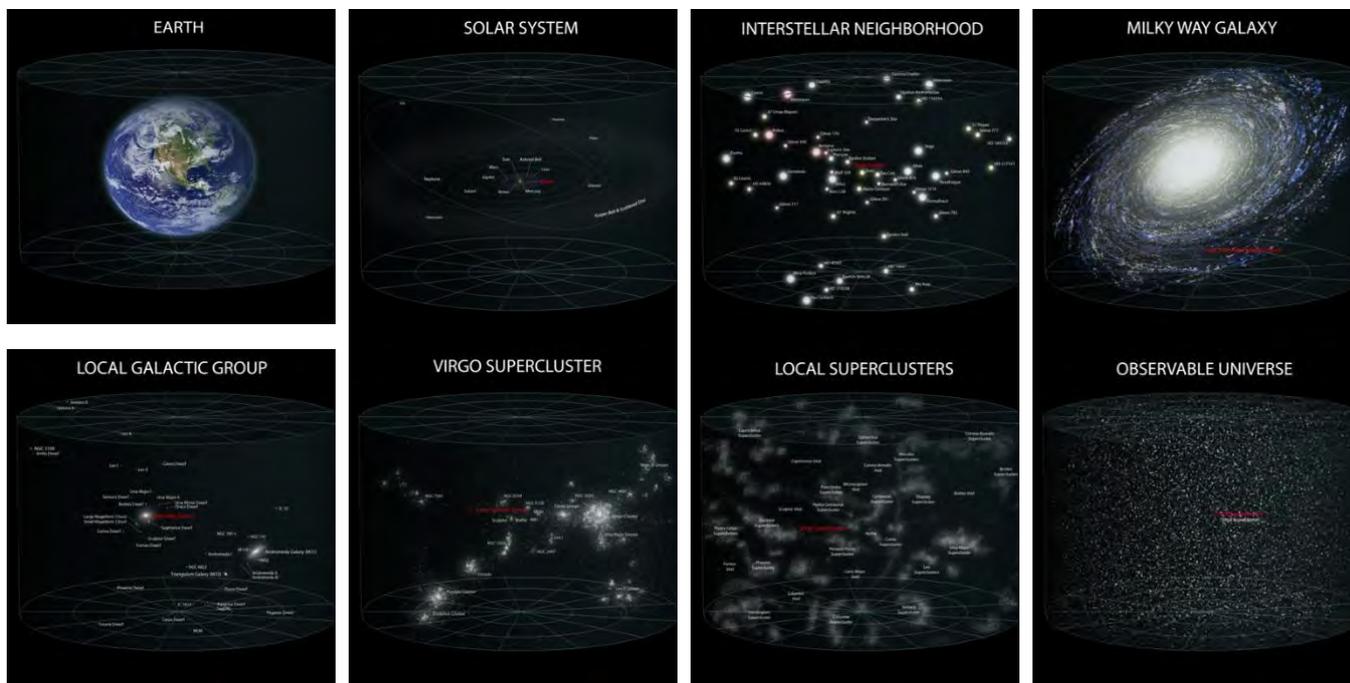
La Voie Lactée et la galaxie d'Andromède appartiennent à un ensemble de 50 galaxies rapprochées qui forment le Groupe local, lui-même partie du superamas de la Vierge. Ce dernier appartient à une structure plus grande, le superamas de Laniakea.

Deux petites galaxies et un certain nombre de galaxies naines du Groupe local orbitent autour de la Voie Lactée. Le diamètre de la plus grande, le Grand Nuage de Magellan, est de 14 000 années-lumière. Son proche compagnon est le Petit Nuage de Magellan, une galaxie irrégulière. Un pont de matière composé essentiellement de gaz d'hydrogène atomique neutre (non ionisé), le courant magellanique, s'étend sur environ 140 degrés de la sphère céleste et relie la Voie Lactée aux deux nuages de Magellan. Les forces de marée s'exerçant entre ces trois galaxies seraient la cause première de l'existence du pont. Des galaxies naines orbitent autour de la Voie Lactée, dont le Grand Chien, la galaxie naine du Sagittaire, la Petite Ourse, la galaxie naine du Sculpteur, la galaxie naine du Sextant, la galaxie naine du Fourneau et Lion I. Le diamètre des plus petites galaxies naines de la Voie Lactée, la galaxie naine de la Carène, la galaxie naine du Dragon et Lion II, atteignent 500 a.l. D'autres galaxies naines sont peut-être dynamiquement rattachées à la Galaxie, hypothèse soutenue par l'observation en 2015 de neuf satellites inconnus de la Voie Lactée. Elle a aussi absorbé des galaxies naines, telle Omega Centauri.

En 2006, des chercheurs rapportent avoir expliqué une déformation du disque de la Voie Lactée. Elle est causée par le déplacement des nuages de Magellan, lesquels provoquent des vibrations lorsqu'ils passent près des bords du disque. À cause de leur masse relativement faible, environ 2 % de la masse de la Voie Lactée, les scientifiques jugeaient leur influence insignifiante. Selon un modèle informatique, le mouvement de ces deux galaxies crée un sillage de matière noire qui amplifie leur influence sur la Voie Lactée.

En 2014, des scientifiques rapportent que la majorité des galaxies satellitaires de la Voie Lactée se trouvent à l'intérieur d'un énorme disque, la plupart se déplaçant dans la même direction. Cette découverte remet en question le modèle cosmologique standard qui avance qu'elles se forment dans les halos de matière noire, sont distribuées au hasard et se déplacent dans n'importe quelle direction.

La Galaxie se déplace en direction du Grand attracteur et d'autres amas de galaxies, dont le superamas de Shapley. Des observations complétées en 2014 laissent penser que la galaxie d'Andromède se rapproche de la Voie Lactée à une vitesse comprise entre 100 et 140 km/s. D'ici 3 à 4 milliards d'années, les deux pourraient entrer en collision, sauf si d'autres objets célestes ne viennent modifier leur course. Si elles entrent en collision, les probabilités de collisions stellaires sont extrêmement faibles. Il est plus probable que les deux galaxies fusionnent pour former une galaxie elliptique ou peut-être une immense galaxie à disque en l'espace d'environ un milliard d'années.



De la gauche à la droite et de haut en bas, les objets célestes s'emboîtent. Par exemple, la Terre à la gauche en haut fait partie du Système solaire à sa droite ; le texte en rouge montre où elle se trouve dans ce dernier. Dans l'ordre, les illustrations montrent :

La Terre - le Système solaire - le voisinage interstellaire - la Voie Lactée
le Groupe local - le superamas de la Vierge - les superamas de galaxies - l'Univers observable

Voir ces illustrations en grande taille dans l'annexe III

Vitesse

Même si la relativité restreinte et la relativité générale affirment qu'il ne faut préférer aucun référentiel inertiel, il est utile d'analyser le déplacement de la Voie Lactée relativement à un référentiel cosmologique.

Le flux de Hubble, c'est-à-dire le mouvement apparent des galaxies causé par l'expansion de l'Univers, constitue l'un de ces référentiels cosmologiques. Chaque galaxie, y compris la Voie Lactée, est animée d'une vitesse propre, qui diffère du flux de Hubble. Pour comparer la vitesse de la Voie Lactée au flux de Hubble, il faut observer un volume suffisamment grand pour que l'influence de l'expansion de l'Univers surpasse celle des déplacements aux échelles galactiques. À cette échelle, le déplacement moyen des galaxies dans ce volume égale le flux de Hubble. Après avoir soustrait le flux de Hubble, des astronomes ont estimé la vitesse de la Voie Lactée à 630 km/s. Comparativement au fond diffus cosmologique, un autre référentiel, la vitesse moyenne de la Voie Lactée est de 631 ± 20 km/s. Selon les observations des satellites *Cosmic Background Explorer* (COBE) et *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP), elle se déplace à la vitesse de 552 ± 6 km/s. L'effet conjugué de l'attracteur Shapley et du Répulseur du dipôle expliquerait la vitesse de la Galaxie.

Dans l'art

Une toile du Tintoret, *L'Origine de la Voie Lactée*, est dévoilée en 1570. *La Fuite en Égypte* (1609) du peintre allemand Adam Elsheimer est l'une des premières représentations réalistes et détaillées de la Voie Lactée. *L'Origine de la Voie Lactée* est un tableau de Pierre Paul Rubens, peint entre 1636 et 1638.

Abîme - *La Voie Lactée* est un poème de Victor Hugo publié dans le recueil *La Légende des siècles* (1855-1876). *La Voie Lactée* est un long poème de Théodore de Banville chantant la gloire des poètes (dans le recueil *Les Cariatides* publié en 1842). Dans sa *Chanson du mal-aimé* (parue dans le recueil *Alcools* en 1913), Guillaume Apollinaire évoque longuement la Voie Lactée.



L'origine de la Voie Lactée par le Tintoret (1570)



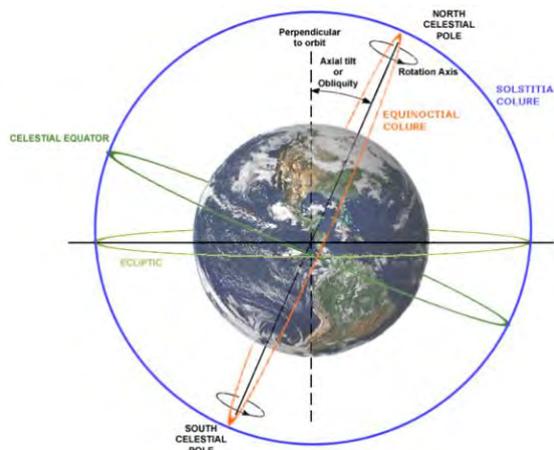
L'origine de la Voie Lactée par Rubens (1636-1638)

La Voie Lactée est le sujet de centaines, sinon de milliers, de photos publiées dans le Web. Des groupes de médias et des particuliers publient des photos de la Voie Lactée. Par exemple, le blogue du journal *Le Monde* publie des photos de la Galaxie, alors qu'un photographe amateur publie huit photos de la Voie Lactée et un autre se rend à la plaine saline d'Uyuni pour photographier la Galaxie. Par ailleurs, les magazines scientifiques, principalement d'astronomie, publient régulièrement des photos de la Voie Lactée. Par exemple, le magazine *National Geographic* publie des clichés longue exposition pris de nuit où la Voie Lactée forme des figures géométriques.

Des associations et des institutions publient des vidéos montrant la Voie Lactée. Par exemple, le Réseau canadien d'information sur le patrimoine publie une vidéo sur la Voie Lactée. Le magazine *National Geographic* publie la vidéo *Au cœur de la Voie Lactée*, un voyage imaginaire dans notre Galaxie. Le site YouTube publie des vidéos provenant de tout horizon.

Colures : Les colures sont les deux principaux méridiens de la sphère céleste. Il s'agit de deux grands cercles passant par les pôles célestes qui se coupent à angle droit et qui passent respectivement par les points solsticiaux (colure des solstices) et par les points équinoxiaux (colure des équinoxes) de l'écliptique. Les colures découpent donc le trajet apparent annuel du Soleil en quatre parties qui déterminent les saisons.

Orange : colure des équinoxes **Bleu** : colure des solstices



Annexe I : Des Nouvelles mesures (taille et masse) de la Voie Lactée

Hubble et Gaia pèsent précisément la Voie Lactée

ESA – 7 mars 2019

Dans un exemple frappant d'astronomie multi-missions, les mesures prises par le télescope spatial Hubble (NASA/ESA) et Gaia (ESA) ont été combinées pour améliorer l'estimation de la masse de notre galaxie, la Voie Lactée : 1,5 trillion de masses solaires, soit 1.500 milliards ou $1,5 \times 10^{12} M_{\odot}$.



Cette impression d'artiste montre un modèle de la Voie Lactée, généré par ordinateur, et les positions exactes des amas globulaires utilisés dans cette étude qui gravitent autour d'elle. Les scientifiques ont utilisé les vitesses de ces 44 amas globulaires pour déterminer la masse totale de la Voie Lactée, notre logis cosmique.

La masse de la Voie Lactée est l'une des mesures les plus fondamentales que les astronomes peuvent faire sur notre Galaxie. Toutefois, depuis des décades d'efforts intenses, même les meilleures estimations disponibles de la masse de la Voie Lactée étaient en désaccord les unes avec les autres. Maintenant, en combinant les observations de Gaia avec celles de Hubble, les astronomes ont déterminé que la Voie lactée avait une masse d'environ 1,5 trillion de masses solaires, soit $1,5 \times 10^{12} M_{\odot}$ dans un rayon de 129.000 années-lumière en partant du centre de notre galaxie.

Les précédentes estimations de la masse de la Voie Lactée allaient 500 milliards à 3 trillions de fois la masse du Soleil (500×10^9 à $3 \times 10^{12} M_{\odot}$) soit une grande incertitude dans une fourchette allant de 1 à 6. Cette énorme incertitude venait principalement des différentes méthodes utilisées pour mesurer la distribution de matière noire — qui représente environ 90% de la masse totale de notre galaxie.

"Nous ne pouvons pas détecter directement la matière noire" explique Laura Watkins (Observatoire de l'Europe du sud en Allemagne), qui dirigeait l'équipe qui a mené cette étude. "C'est ce qui avait amené cette incertitude sur la masse de la Voie Lactée, vous ne pouvez pas mesurer précisément ce que vous ne voyez pas !".

Étant donnée la nature insaisissable de la matière noire, l'équipe a dû utiliser des méthodes astucieuses pour "peser" la Voie Lactée, ce qui a reposé sur la mesure des vitesses des amas globulaires, des amas très denses d'étoiles qui orbitent autour du disque spiral de la galaxie à de grandes distances [1].

"Plus une galaxie est massive, plus vite gravitent ces amas sous l'attraction de la gravité" explique N. Wyn Evans (Université de Cambridge, UK). "Beaucoup de mesures précédentes avaient été faites pour trouver la vitesse à laquelle un amas se rapproche ou s'éloigne de la Terre, soit sa vitesse dans notre axe de visée. Toutefois nous avons été capables de mesurer également les mouvements latéraux des amas, et donc en conséquence, de pouvoir mesurer la masse galactique [2].

Le groupe a utilisé la seconde partie des données de Gaia comme base pour ses études. Gaia a été conçu pour créer une carte tri-dimensionnelle précise d'objets astronomiques partout dans la Voie Lactée et pour estimer leurs mouvements. Cette seconde partie des données comprend des mesures sur les amas globulaires jusqu'à 65.000 années-lumière de la Terre. *"Les amas globulaires s'étendent sur une grande distance, c'est pourquoi ils sont considérés comme les meilleurs "traceurs" utilisables par les astronomes pour mesurer la masse de notre galaxie" dit Tony Sohn (Institut des Sciences de l'Espaces et des Télescopes, USA), qui a dirigé les mesures de Hubble.*

L'équipe a combiné ces données grâce à la sensibilité incomparable d'Hubble et sa « bibliothèque » d'observations. Les observations de Hubble ont permis de voir de faibles et distants amas globulaires, jusqu'à 130.000 années-lumière de la Terre, qui furent ajoutés à l'étude. Comme Hubble avait étudié ces objets depuis des décades, il était aussi possible de mesurer la vitesse de ces amas également.

"Nous avons été chanceux d'avoir une telle combinaison de données" explique Roeland P. van der Marel (Institut des Sciences de l'Espaces et des Télescopes, USA). "En combinant les mesures de Gaia sur 34 amas globulaires avec les mesures de 12 amas distants par Hubble, nous avons pu mesurer la masse de la Voie Lactée d'une façon qui aurait été impossible de réaliser sans ces deux télescopes".

Jusqu'à aujourd'hui, ne pas connaître la masse exacte de la Voie Lactée présentait un problème pour tenter de répondre à un grand nombre de questions cosmologiques. Le contenu de matière noire d'une galaxie et sa distribution sont intrinsèquement liés à la formation et à la croissance des structures de l'Univers. Déterminer précisément la masse de la Voie Lactée nous donne une compréhension plus claire sur l'endroit où se situe notre galaxie dans un contexte cosmologique.

Notes :

[1] Les amas globulaires se sont formés avant la création du disque spiral de la Voie Lactée, où se sont formés plus tard notre Soleil et le système solaire. À cause des distances auxquelles ils se trouvent, les amas globulaires permettent aux astronomes d'estimer la masse de la vaste enveloppe de matière noire entourant notre galaxie, bien au-delà de son disque spiral.

[2] La Vitesse totale d'un objet résulte de 3 mouvements : un mouvement radial plus deux mouvements qui déterminent les mouvements latéraux. Toutefois, en astronomie, on ne peut généralement compter que sur la vitesse se situant dans la ligne de visée. Avec seulement un composant de la vitesse disponible, les masses estimées dépendent très fortement des suppositions des vitesses latérales. Donc, la capacité à mesurer les vitesses latérales réduisent de manière significative les barres d'erreur en ce qui concerne la masse.

NDT : Le texte original en anglais mentionne « 1,5 trillion de masses solaires ». En France, depuis 1948, un trillion est un milliard de milliards soit 10^{18} ($10^9 \times 10^9$) dans ce qu'on appelle une « échelle longue ». Auparavant, en France, avant 1948, cela valait mille milliards, soit 10^{12} .

Aux USA, et c'est une loi (!), un trillion c'est mille milliards, soit 10^{12} , comme jadis en France, dans ce qu'on appelle « l'échelle courte ». Dans le 3^{ème} paragraphe du texte il est dit que l'incertitude de la masse de la Voie Lactée allait de 500 milliards (billions en anglais) jusqu'à 3 trillions. C'est donc la version américaine qui est utilisée dans ce texte, comme dans la majeure partie des publications scientifiques, généralement écrites en anglais.

Pour simplifier encore, le trillion américain en échelle courte, s'appelle un billion en France dans l'échelle longue !!! Youpi, vite, un cachet d'aspirine...

Annexe I bis :

Les différences que l'on peut trouver dans les dimensions et la masse de la Voie Lactée sont probablement dues au fait que l'on tient compte, ou pas, du « halo » qui entoure notre galaxie ainsi que les autres galaxies spirales. On pense que ce halo, s'il contient peu de matière baryonique (visible), doit contenir de grandes quantités de matière noire, ce qui a un impact évident sur la masse totale de la galaxie. De surcroît ce halo contient aussi des amas globulaires, des gaz et des galaxies naines en orbite circumgalactique.

Halo galactique

Le **halo galactique** est une région de l'espace entourant les galaxies spirales, et notamment notre galaxie, la Voie lactée. On pense que le halo galactique est principalement constitué d'étoiles, de gaz et de matière noire. Dans une galaxie elliptique, il n'y a pas de transition nette entre le corps de la galaxie et le halo.

Étoiles du halo

La majorité des étoiles d'une galaxie spirale est située soit près d'un plan unique (le plan galactique) sur une orbite plus ou moins circulaire autour du centre de la galaxie (le noyau galactique), soit dans un bulbe sphéroïdal autour de ce noyau. Cependant, certaines étoiles habitent un halo sphéroïdal entourant la galaxie. Le comportement orbital de ces étoiles est encore discuté mais elles peuvent décrire des orbites rétrogrades et/ou fortement inclinées, ou ne pas du tout se déplacer sur des orbites régulières. Les étoiles d'un halo peuvent provenir de petites galaxies capturées puis ingérées par la galaxie spirale — par exemple, la galaxie du Sagittaire est en cours de fusion avec la Voie lactée ; des observations ont montré que notre galaxie a déjà assimilé certaines étoiles.

Contrairement au disque galactique, le halo ne semble pas contenir de poussière interstellaire et, de plus, les étoiles du halo galactique sont de Population II, beaucoup plus anciennes et d'une métallicité bien inférieure à celle de leurs cousines de Population I du disque galactique (mais semblable à celles du bulbe galactique). Le halo galactique contient également de nombreux amas globulaires.

Le mouvement des étoiles du halo les amène parfois à passer au travers du disque galactique, et certaines naines rouges proches du Soleil sont suspectées d'appartenir au halo galactique, comme l'étoile de Kapteyn et Groombridge 1830. À cause de leur mouvement irrégulier autour du centre de la galaxie — si tel est le cas — ces étoiles ont souvent un important mouvement propre.

Matière noire du halo

Au-delà de la partie visible, la zone interne du halo galactique, il existe une région bien plus étendue, connue sous le nom de "halo sombre", "halo étendu" ou de couronne galactique, qui contient de grandes quantités de matière noire.

La présence de matière noire dans le halo est mise en évidence par son effet gravitationnel sur la courbe de rotation d'une galaxie spirale. Sans la masse importante du halo étendu, la vitesse de rotation de la galaxie devrait décroître à une grande distance du noyau galactique. Cependant, des observations de galaxies spirales, particulièrement des observations radio de la raie spectrale de l'hydrogène atomique neutre (connue sous le nom de HI dans le jargon astronomique), montrent que la courbe de rotation de la plupart des galaxies spirales reste plate bien au-delà de la matière visible. L'absence de matière visible implique donc la présence de matière non observée (et donc *sombre* ou *noire*). Supposer que cette matière noire n'existe pas reviendrait à dire que la théorie acceptée de la gravitation (Relativité générale) est fautive, ce qui pourrait être possible mais la plupart des scientifiques demanderaient bien plus de preuves avant de considérer cette éventualité.

La nature de la matière noire dans le halo galactique des galaxies spirales est encore indéterminée, mais les théories les plus en vogue prédisent que le halo sombre héberge un grand nombre de petits corps appelés MACHOs et/ou de particules massives interagissant faiblement, connues sous le nom de WIMPs. Des observations du halo de la Voie Lactée, dans le but de trouver des événements de lentille gravitationnelle, ont montré que le nombre de MACHOs n'est pas suffisant pour obtenir la masse requise.

Nous pensons qu'un diamètre de 100.000 AL est une estimation un peu dépassée (plutôt 125.000 AL à minima) mais, le chiffre annoncé par l'ESA comme étant le rayon de la Voie Lactée (129.00 AL), donc un diamètre de 258.000 AL, inclut aussi ce qu'on appelle le « halo » de la galaxie, sorte de zone où il y a de moins en moins de matière baryonique au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre. Est-ce que cette zone contiendrait aussi une quantité non négligeable de matière noire ? Nous pensons aussi que cela inclut aussi tout ce qui gravite autour du centre de la VL. Par exemple les amas globulaires et les galaxies naines : ils ne sont pas à proprement parler « dans » la VL mais ils sont sous l'influence de sa gravité, tout comme nous considérons que le système solaire est composé de tout ce qui tourne autour du Soleil, en incluant la ceinture de Kuiper et le nuage de Oort.

Une galaxie comme la Voie lactée se compose de plusieurs systèmes aux géométries, cinématiques, âge et populations stellaires différents, qui permettent de remonter à sa formation. Un exemple schématisé est représenté dans la figure ci-après ; de l'intérieur vers l'extérieur :

- un bulbe peu massif à géométrie sphéroïdale au centre ;
- un disque mince dont la masse stellaire domine ;
- un disque épais ;
- un halo stellaire sphéroïdal très étendu.

Dans la Voie lactée, le disque mince serait deux fois plus petit en rayon que le disque épais, mais presque aussi massif, selon les dernières estimations. En revanche, le bulbe serait presque négligeable en masse.

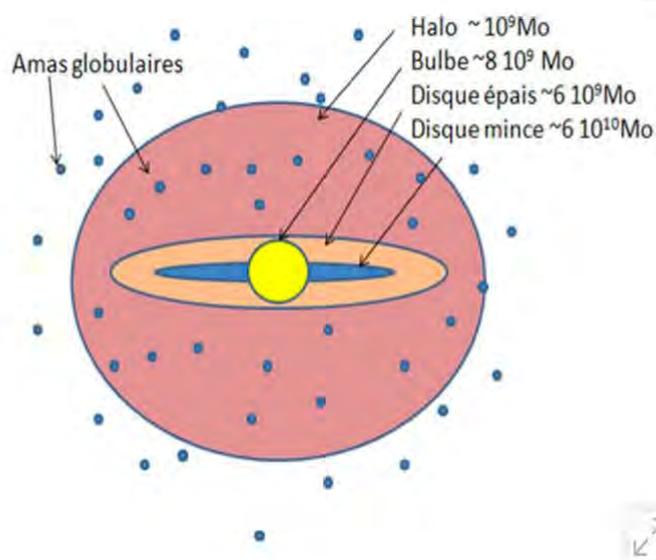
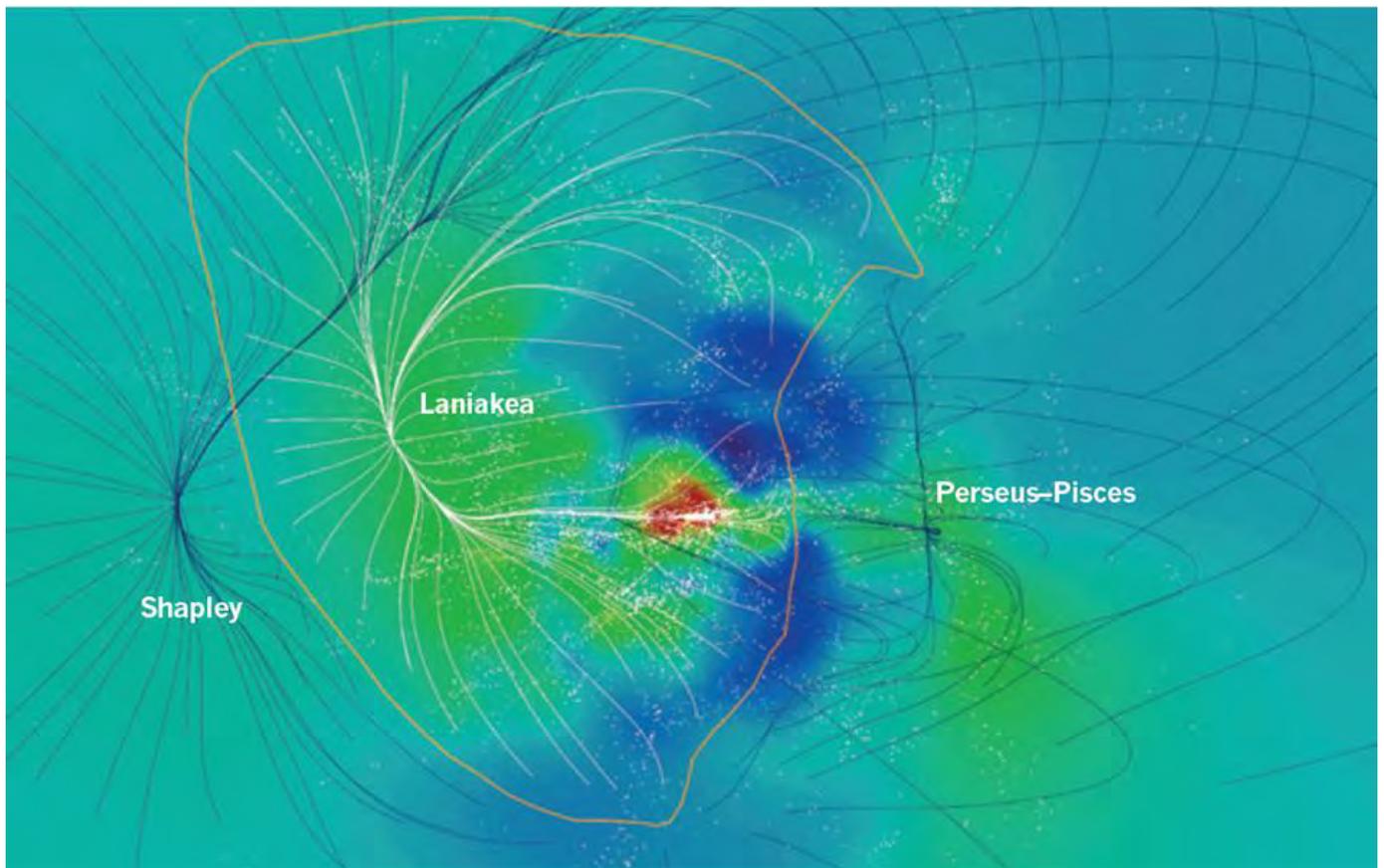


Schéma des divers composants stellaires d'une galaxie spirale typique. ©
Françoise Combes

Jusqu'à maintenant on pouvait relever plusieurs estimations de la taille et du nombre d'étoiles de la VL et les chiffres étaient très variables. Mini Maxi ça allait de 80 milliards à 350 milliards d'étoiles, le diamètre aussi avait des dimensions très variables suivant les sources, même l'épaisseur du bulbe central allait de 3 à 10-12 mille années-lumière, bref, un grand flou artistique !! L'ESA nous a désormais fourni des chiffres beaucoup plus précis et fiables. Il est toutefois difficile de mesurer une galaxie dans laquelle on se trouve !

Annexe II : Laniakea



Laniakea (« paradis incommensurable » ou « horizon céleste immense » en hawaïen) est le superamas de galaxies englobant le Superamas de la Vierge dont fait partie la Voie lactée, et donc par suite le Système solaire et en particulier la Terre.

Sa découverte par une équipe internationale d'astronomes composée de R. Brent Tully, de l'université d'Hawaï à Mānoa, d'Hélène Courtois, de l'université de Lyon I, de Yehuda Hoffman, de l'université hébraïque de Jérusalem, et de Daniel Pomarède, du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, résultant d'une nouvelle façon de définir les superamas selon les vitesses radiales des galaxies, a été annoncée en septembre 2014.

Laniakea peut être défini, en première approximation, comme un ensemble de trois superamas qui convergent, à une vitesse d'environ $6,30 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, vers le Grand attracteur. C'est l'un des six millions de superamas qui existent dans notre univers détectable. Laniakea a une taille approximative de 160 Mpc ou 520 millions d'années-lumière, ce qui en fait près de 4 % du diamètre de l'univers total observable.

Le **Grand Attracteur** est une anomalie gravitationnelle de l'espace intergalactique, se trouvant au centre du superamas Laniakea et dans le voisinage du superamas de l'Hydre-Centaure, qui dévoile l'existence d'une concentration locale de masses équivalente à des dizaines de milliers de fois la masse de la Voie lactée. Cette masse est observable indirectement par son effet sur le mouvement de galaxies et de leurs amas sur une région large de plusieurs centaines de millions d'années-lumière (jusqu'au superamas de la Vierge). Le Grand Attracteur se déplace en direction du superamas de Shapley.

Toutes ces galaxies possèdent un décalage vers le rouge, selon la loi de Hubble, ce qui nous indique qu'elles s'éloignent de nous et les unes des autres, mais des variations dans ces décalages permettent de déceler l'existence d'une anomalie. Ces variations sont comprises entre -700 km/s et $+700 \text{ km/s}$ selon leur direction par rapport au Grand Attracteur.

Laniakea contient les superamas suivants :

- Superamas de la Vierge, qui contient la Voie lactée et donc la Terre.
- Superamas de l'Hydre-Centaure où se trouve le Grand attracteur.
- Superamas du Paon-Indien

La méthode utilisée pour analyser les mouvements des galaxies afin de distinguer le mouvement particulier de l'expansion cosmique est le filtrage de Wiener, qui fonctionne pour des informations positionnelles bien définies, permettant une analyse à environ 300×10^6 ly (92 Mpc). Avec cette limitation, Laniakea se dirige vers le superamas de Shapley, donc il se peut que Shapley et Laniakea puissent faire partie d'un plus grand complexe.

L'astronome sud-africain Anthony Fairall a déclaré en 1988 que les redshifts suggéraient que les superamas de la Vierge et de l'Hydre-Centaure pouvaient être connectés.

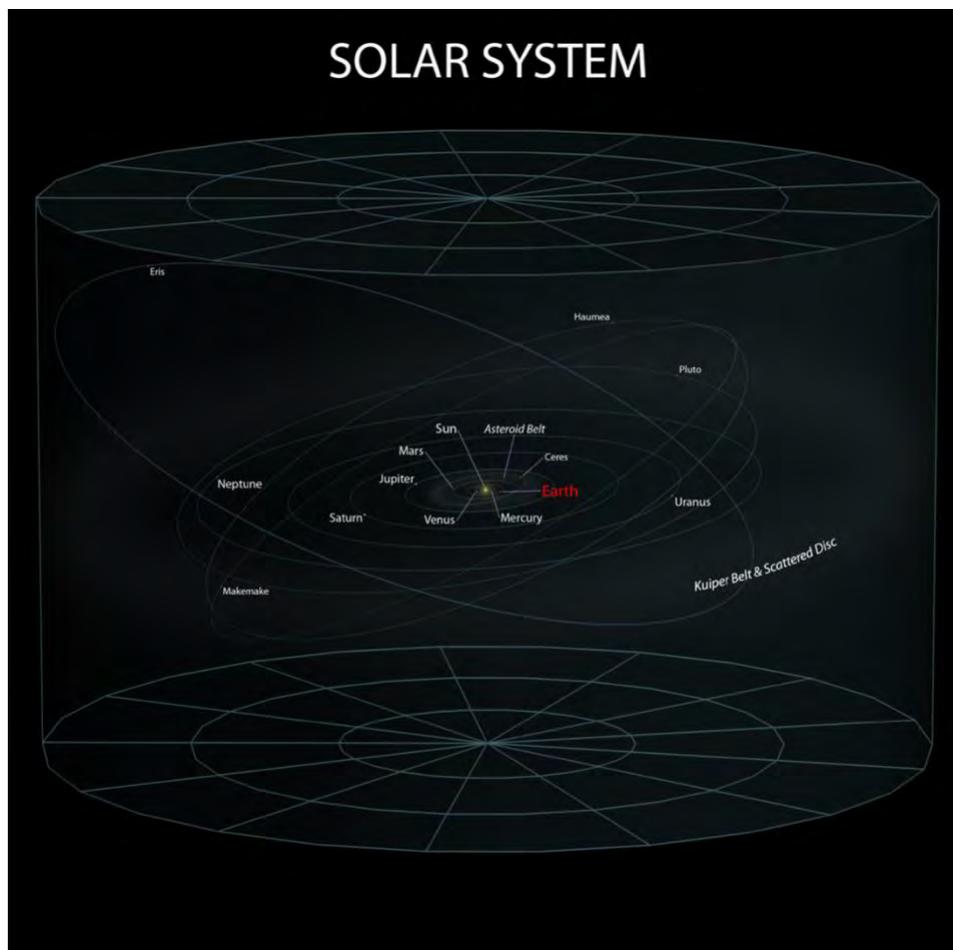
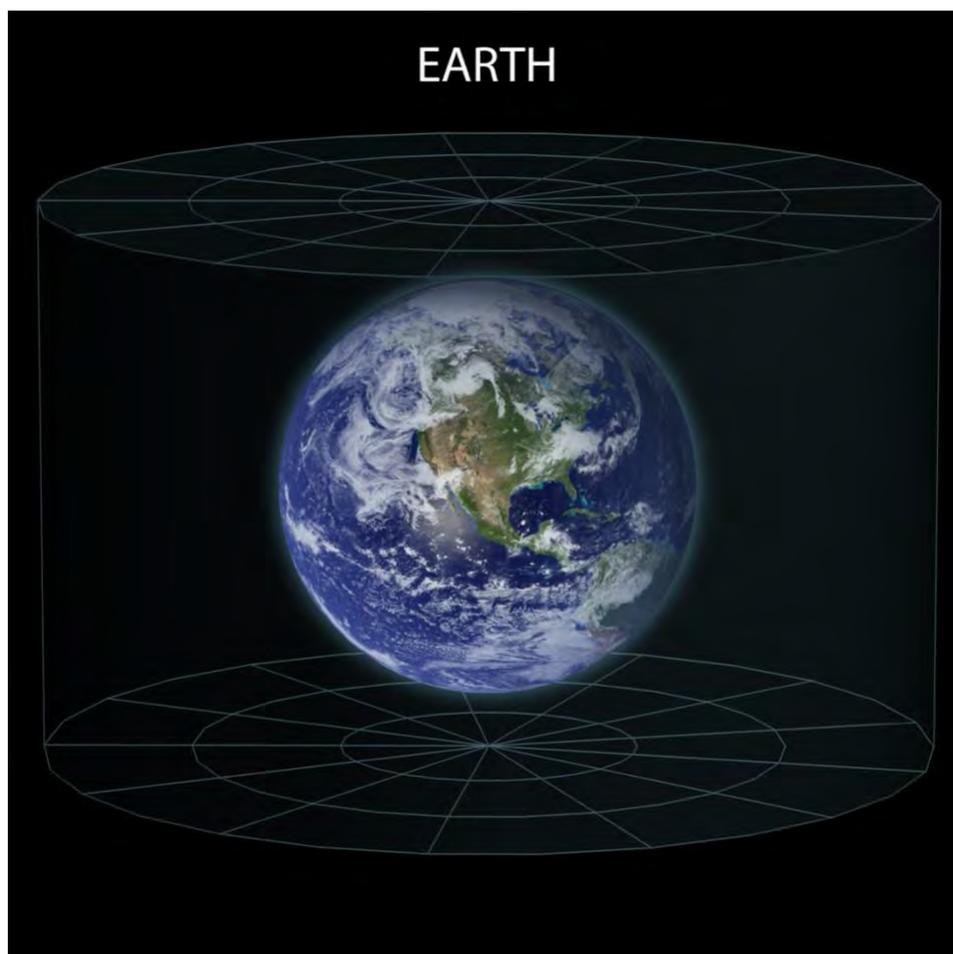
Les superamas voisins de Laniakea sont le superamas de Shapley, le superamas d'Hercule, le superamas de la Chevelure de Bérénice et le superamas de Persée-Poissons. Les bords des superamas et de Laniakea n'étaient pas clairement connus au moment de la définition de Laniakea.

Vitesses

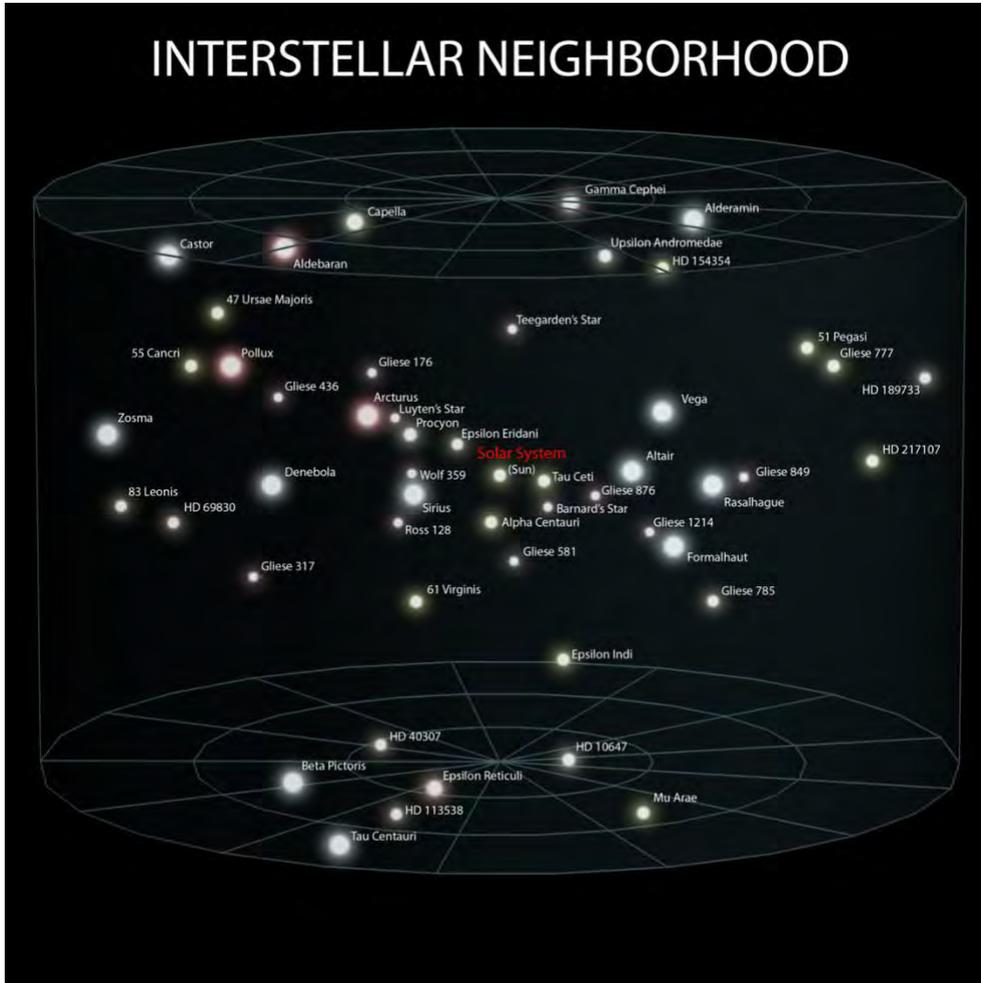
- La Terre autour du Soleil : 30 km/s,
- Le Soleil autour du centre de la Voie Lactée : 200 km/s,
- Le Groupe Local, incluant la Voie Lactée, se précipite vers une concentration de masse dans la direction de la Constellation du Centaure : 600 km/s.

La galaxie d'Andromède qui se trouve à 2,5 millions d'années-lumière vient à la rencontre de la Voie Lactée à une vitesse propre de 110 km/s. Rencontre prévue dans 4,5 milliards d'années environ (nouvelle estimation de l'ESA) pour former une galaxie elliptique.

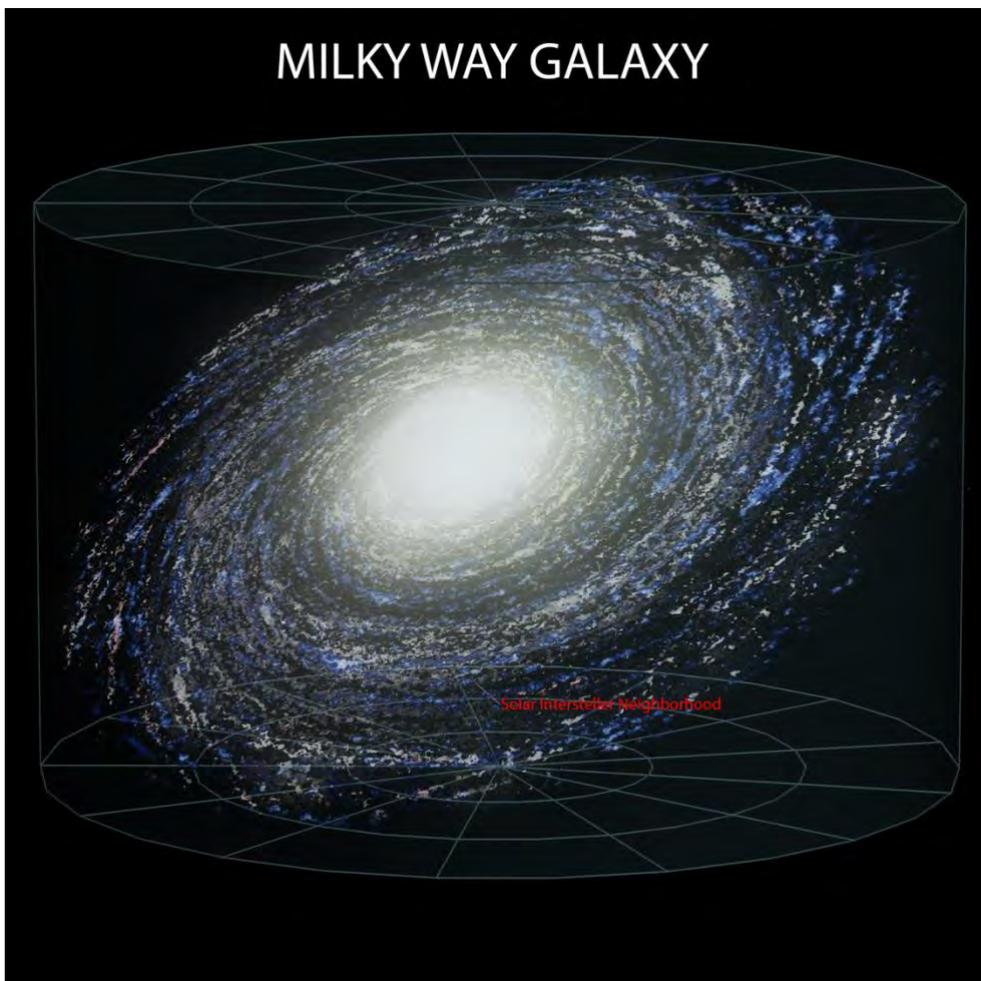
Annexe III : De la Terre à l'Univers observable



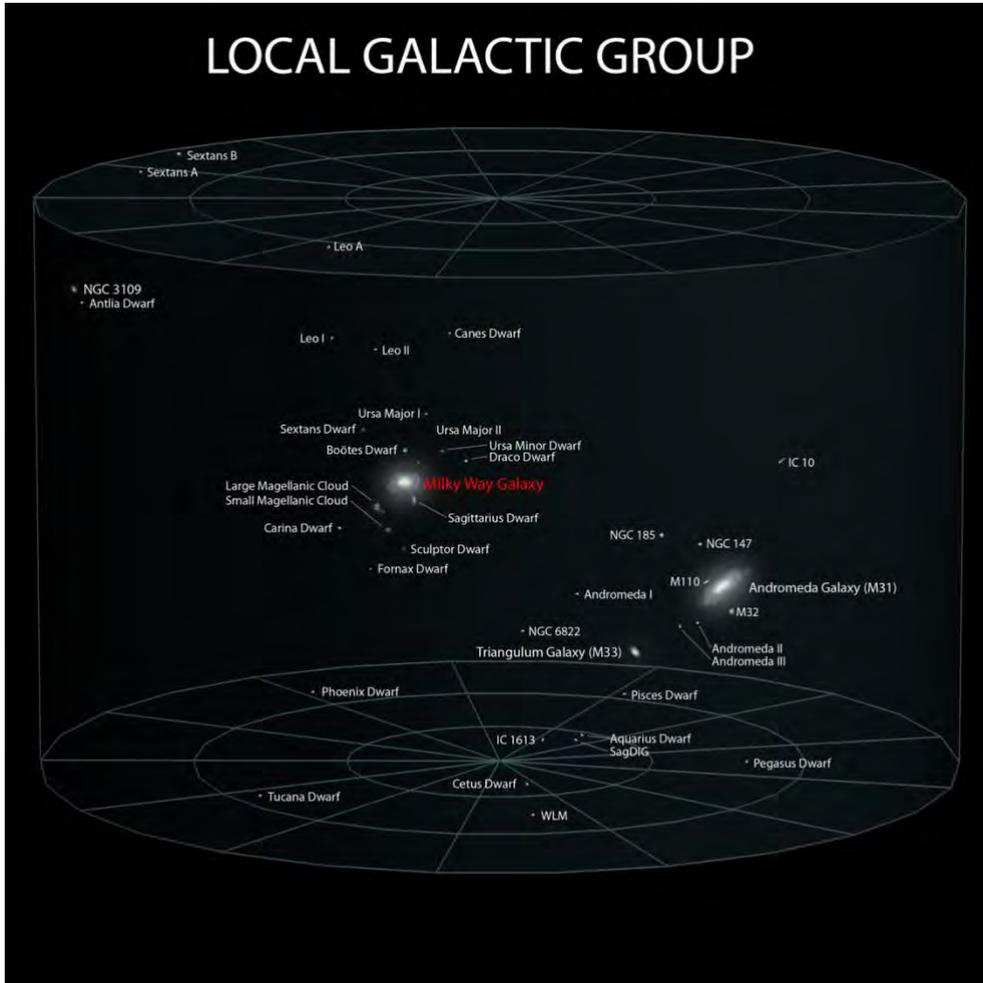
INTERSTELLAR NEIGHBORHOOD



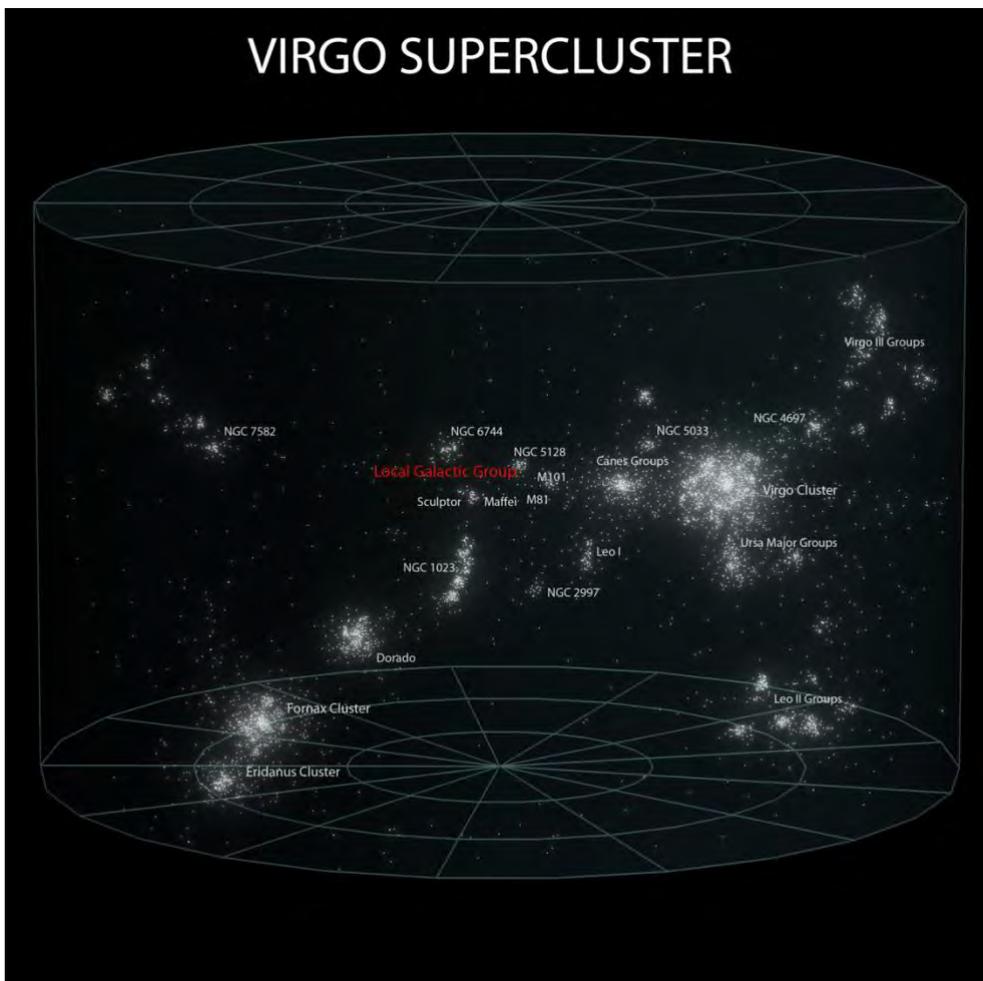
MILKY WAY GALAXY



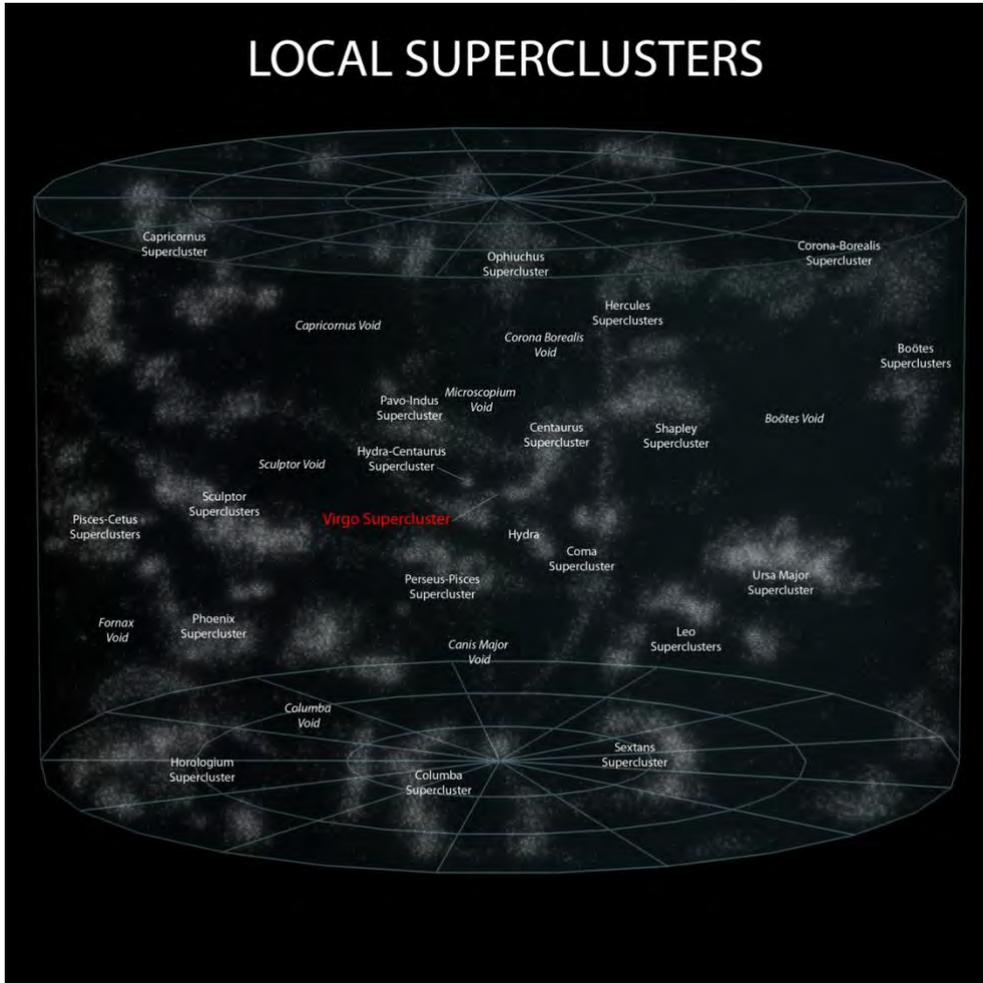
LOCAL GALACTIC GROUP



VIRGO SUPERCLUSTER



LOCAL SUPERCLUSTERS



OBSERVABLE UNIVERSE

