

Notre galaxie, la Voie lactée

Misha Haywood

Au début du XX^e siècle, alors que notre galaxie était encore désignée comme un « univers-île », expression forgée par Alexander V. Humboldt, un astronome fameux – Heber D. Curtis – exprimait par boutade que l'œuf d'une poule devait être une structure plus complexe que la Voie lactée. Plus complexe qu'un œuf, moins isolée qu'une île, l'étude de la Voie lactée de ces quinze dernières années illustre spectaculairement ces deux aspects, par un changement de paradigme et l'apprentissage de la complexité. Le changement de paradigme, c'est la fin des univers-îles, et c'est l'importance prise par la question de l'environnement dans l'étude de la formation et de l'évolution de la Voie lactée. La cosmologie suggère que le halo de la Voie lactée se serait formé par la fusion d'une multitude de systèmes de petites tailles, et l'observation confirme que la galaxie continue d'évoluer par l'interaction avec son environnement.

L'apprentissage de la complexité, c'est la prise de conscience que la galaxie ne se déchiffre pas comme un ensemble de relations entre l'âge des étoiles et leur composition chimique ou leur cinématique. Il ne suffit pas de mesurer l'âge et la composition chimique des étoiles pour comprendre l'évolution chimique de la galaxie, parce que les processus dynamiques à l'œuvre dans la galaxie brouillent ces corrélations et compliquent la lecture. Il ne suffit pas non plus d'estimer l'âge des étoiles et les orbites sur lesquelles elles se déplacent pour connaître leur origine, mais les signatures laissées par l'évolution chimique, qui agissent comme des « marqueurs génétiques » de l'origine des étoiles, apportent une information complémentaire importante.

On donne dans ce chapitre un résumé de ces nouveaux résultats et changements de perspective, en évoquant l'environnement de

notre galaxie, les principales caractéristiques de ses populations, et les chemins évolutifs qui sont aujourd'hui explorés pour expliquer pourquoi la Voie lactée a l'apparence qu'on lui voit aujourd'hui.

L'environnement

LE GROUPE LOCAL

Dans la constellation de la Vierge, à une distance de 16 Mpc, se trouve l'amas de galaxies du même nom, qui contient environ 2 000 galaxies détectées. L'amas est structuré autour d'un ensemble de galaxies elliptiques géantes qui en occupent le centre (M87, M86, M60, M49). L'amas de la Vierge est le cœur d'une concentration plus grande qu'on appelle le super-amas de la Vierge, qui est une structure filamentaire qui s'étend sur environ 40 Mpc et qui contient d'autres amas de galaxies (Ursa Major, Fornax). Le Groupe Local auquel appartient notre galaxie est lui-même situé dans un filament reliant l'amas de Fornax à celui de la Vierge, dans une région relativement peu dense en galaxies.

Le Groupe Local est organisé autour de ses deux plus massives galaxies, M31 et la Voie lactée. Il contient au moins une cinquantaine de membres dans un rayon de 700 kpc autour du centre du groupe, que l'on peut situer à mi-distance entre M31 et la Voie lactée. La limite du Groupe Local, définie par la distance à partir du centre du Groupe Local où l'expansion de l'univers l'emporte sur les interactions entre galaxies est évaluée à 1 000 kpc. Les galaxies les plus nombreuses du Groupe Local sont des galaxies sphéroïdales naines, en général regroupées autour des deux galaxies spirales principales, la Voie lactée et M31. Ce sont des objets de petites tailles (entre quelques centaines de parsecs et 1 à 2 kpc), pauvres en gaz, peu évoluées, composées essentiellement d'étoiles vieilles. Le Groupe Local contient également des galaxies irrégulières, beaucoup moins nombreuses, dont les propriétés sont assez différentes de celles des naines sphéroïdales. À l'exception notable des Nuages de Magellan, qui sont proches de la Voie lactée, elles sont en général dispersées dans le Groupe Local, riches en gaz, avec une forte activité de formation d'étoiles, et plus massives. Le sous-groupe de M31 contient également la galaxie spirale de petite taille M33, et quelques galaxies elliptiques naines (M32, NGC 205, NGC 147, NGC 185), qu'on ne trouve pas autour de la Voie lactée (on

notera cependant que l'amas globulaire ω Cen est probablement le cœur d'une galaxie elliptique naine, mis à nu par les effets de marée). La figure 1 montre la répartition des principaux objets du Group Local sur la sphère céleste en projection galactique.

La Voie lactée a longtemps été vue comme un analogue de M31. De façon plus générale, on aimerait savoir si on doit considérer la Voie lactée comme une galaxie typique de sa classe, ou si elle possède des populations stellaires ou une évolution particulière. Cet aspect n'est pas tranché, en partie parce que notre position dans la galaxie ne nous permet pas d'avoir une vue globale, et en partie parce que nous ne possédons pas le même niveau d'information sur les autres galaxies. Dans le cas particulier de M31, un certain nombre de différences ont pu être observées. M31, à 780 kpc de la Voie lactée, est environ 2 fois plus grande que la Voie lactée, avec un disque galactique de 25 kpc de rayon, et 2 fois plus d'amas globulaires. Des observations récentes montrent que le disque de M31 a connu des interactions rapprochées avec d'autres galaxies et que son halo est peuplé d'un grand nombre de courants, de filaments, de concentrations d'étoiles qui s'étendent à plus de 100 kpc du centre de M31. L'importance et l'étendue des courants stellaires dans M31 sont très supérieures à ce qui est observé dans la Voie lactée.

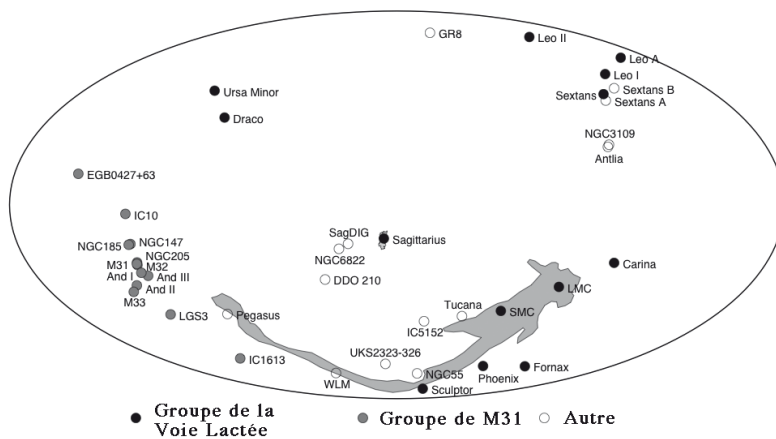


Figure 1. Répartition schématique sur la sphère céleste de la position des principaux objets du Groupe Local. La zone grisée représente le courant magellanique (voir ci-après dans le texte). La direction du centre galactique est au centre de l'image. On voit le regroupement des galaxies autour de M31.

LE GROUPE DE LA VOIE LACTÉE

Les seuls satellites de la Voie lactée visibles à l'œil nu sont les Nuages de Magellan. Situées à environ 50 et 70 kpc du Soleil, ce sont deux galaxies irrégulières dans le halo de la Voie lactée. À ce titre, ils constituent deux exceptions notables à la règle suivie par

les autres naines irrégulières du Groupe Local qui sont éloignées de M31 et de la Voie lactée. Les orbites de ces deux galaxies sont encore incertaines, mais, alors qu'on pensait que les deux Nuages cohabitaient depuis déjà plusieurs milliards d'années avec la Voie lactée, un résultat récent suggère au contraire qu'ils pourraient être à leur premier passage rapproché avec la galaxie.

Les autres satellites de la Voie lactée sont des galaxies sphéroïdales naines, qui couvrent une très grande gamme de luminosité intrinsèque. Bien qu'elles aient des masses stellaires comparables aux amas globulaires, elles sont significativement plus étendues (10 à 100 fois), et leur masse totale est vraisemblablement dominée par la matière noire. Contrairement aux amas globulaires, elles couvrent une gamme étendue de métallicité et d'âges. La galaxie du Sagittaire possède ainsi des étoiles de même métallicité que le Soleil et jusqu'à cent fois moins enrichies. Pour des systèmes stellaires aussi peu massifs, tout cela démontre une grande complexité, probablement liée à leur voisinage avec la Voie lactée. Fornax et Sculptor ont été découvertes en 1938 par H. Shapley. Sagittarius, de taille comparable à Fornax, a été découverte en 1994. Des études plus récentes sur certaines galaxies (Carina, Sculptor) ont mis en évidence que les populations sont différenciées spatialement, les étoiles les plus riches en métaux se trouvant sensiblement plus concentrées vers le cœur de la galaxie. Les naines sphéroïdales étaient perçues comme des systèmes stellaires exclusivement anciens et peu évolués. Leurs diagrammes HR montrent qu'elles possèdent des étoiles très vieilles (Ursa Minor), mais également des populations d'âges intermédiaires (5-10 milliards d'années, Leo I, Leo II, Carina), ou même jeunes (Leo I, Carina).

Depuis 2005, plusieurs autres systèmes stellaires, beaucoup plus faibles et primitifs, ont été découverts dans les données du *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). On en dénombre aujourd'hui une petite dizaine, mais les prochaines années seront certainement marquées par d'autres découvertes. En tenant compte des parties de la sphère céleste qui n'ont pas encore été observées avec la même profondeur que dans le SDSS, le nombre de galaxies naines à proximité de la Voie lactée (à moins de 300 kpc) est évalué à 45-60 objets. Nous reviendrons plus loin sur l'importance de l'étude de ces naines sphéroïdales pour la genèse de la galaxie. Regardons maintenant d'un peu plus près deux naines sphéroïdales, Sagittarius et Carina.



Figure 2. La galaxie sphéroïdale Fornax se distingue comme une légère concentration d'étoiles en arrière-plan des étoiles de la galaxie. À la distance de 140 kpc, c'est, avec la galaxie du Sagittaire, la plus brillante des galaxies naines satellites de la Voie lactée. Comme la galaxie du Sagittaire, elle possède des amas globulaires (cinq) et une métallicité très étalée (entre $[Fe/H] = -2$ et -0.4). Elle a formé l'essentiel de ses étoiles à une époque intermédiaire (4-10 milliards d'années), mais possède également des traces de populations jeunes (quelques centaines de millions d'années) et très anciennes (12-13 milliards d'années).

La galaxie du Sagittaire

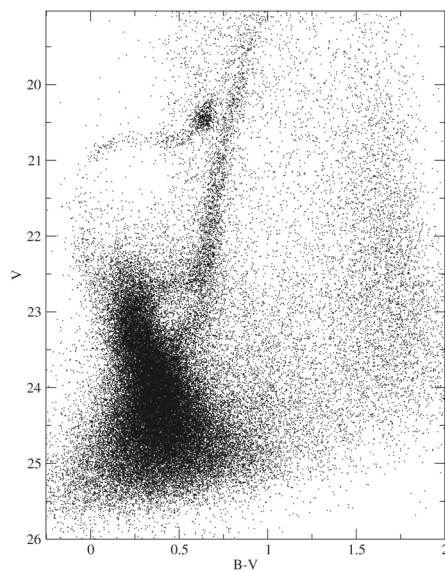
En 1994, une nouvelle galaxie de type sphéroïdale de taille similaire à Fornax a été découverte dans la constellation du Sagittaire. La galaxie du Sagittaire, ou *Sagittarius*, se trouve sur le bord opposé du disque galactique de la Voie lactée, à environ 25 kpc du Soleil. Le centre de Sagittarius se situe à environ 15° du bulbe galactique, dans une zone très encombrée, ce qui explique sa découverte tardive. Son mouvement indique qu'elle 'tombe' sur le disque de la Voie lactée, suivant une orbite polaire (perpendiculaire au plan galactique). La galaxie du Sagittaire est dominée par une population d'âge intermédiaire (5-10 milliards d'années), et de métallicité $[Fe/H] = -0.7$ dex. Elle possède également une population vieille (âge > 10 milliards d'années) et plus pauvre en métaux ($[Fe/H] = -2.0$ dex). Comme Fornax, elle possède des amas globulaires, dont 4 sont directement associés à Sagittarius, et au moins 2 dont les caractéristiques laissent à penser qu'ils ont sans doute été arrachés à la galaxie par effet de marée.

La galaxie de la Carène

La galaxie sphéroïdale de la Carène montre une complexité unique. À une distance d'environ 100 kpc du Soleil, elle se trouve sans doute proche de l'apocentre (le point le plus éloigné) de son orbite autour de la Voie lactée. C'est la seule naine sphéroïdale satellite de la Voie lactée qui montre distinctement des épisodes de formation d'étoiles. Le diagramme HR de la figure 3 montre distinctement 3 séquences différentes correspondant à (au moins) trois de ces épisodes. Les estimations des âges de ces épisodes sont

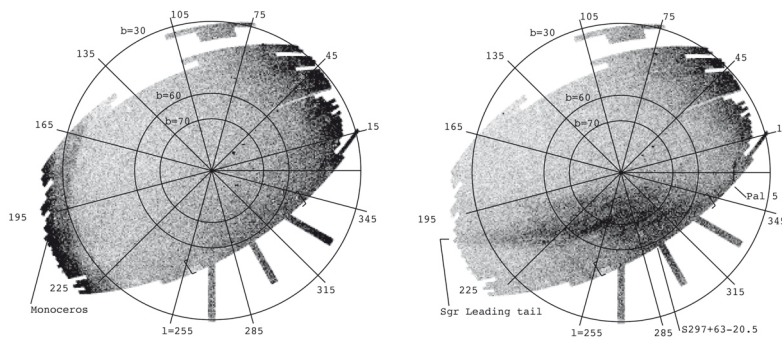
de 1-3, 5-7 et 8-13 milliards d'années. Il se peut que les épisodes de formation stellaire soient provoqués par le passage rapproché de Carina et de la Voie lactée, mais aucune corrélation directe n'a été établie avec la période de l'orbite (estimée à 1,4 milliard d'années). Sa métallicité moyenne est de l'ordre de $[Fe/H] = -1.7$ dex, mais l'intervalle de métallicité sur l'ensemble de la galaxie est très large, et va de -3.0 à 0.0 dex. La structuration des populations stellaires au sein de cette galaxie montre des caractéristiques similaires à celle de Sculptor : les étoiles les plus enrichies en métaux sont plus proches du centre de la galaxie.

Figure 3. Le diagramme HR de la galaxie naine sphéroïdale de la Carène est une curiosité. On distingue au moins 3 séquences différentes bien distinctes les unes des autres, et qui montrent que Carina a eu des poussées de formation d'étoiles vers 1-3, 5-7 et 8-12 milliards d'années.



STRUCTURES

Les corps qui circulent dans le champ gravitationnel de la Voie lactée sont soumis à des effets de marée qui les érodent progressivement, leur arrachant des étoiles ou du gaz qui se dispersent le long de l'orbite de la galaxie satellite, formant ainsi des « courants » de matière (étoiles, gaz). Depuis une dizaine d'années, un certain nombre de « courants » stellaires, c'est-à-dire d'étoiles qui suivent une trajectoire commune ont ainsi été découverts dans le disque et le halo galactique, venant s'ajouter au courant de gaz en provenance des Nuages de Magellan, connu depuis les années 70. Les caractéristiques de ces débris sont liées aux propriétés de la galaxie satellite et à son orbite. Leur forme générale reflète cette orbite et leur largeur est liée à la masse de la galaxie satellite. On donne ci-dessous quelques exemples de ces structures les plus spectaculaires.



Le courant du Sagittaire

Les débris laissés par la galaxie du Sagittaire le long de son orbite constituent le témoignage le plus remarquable de ces processus d'accrétion. Des courants d'étoiles attribuables à Sagittaire sont retrouvés à des dizaines de kpc du corps principal de la galaxie, et jusque vers l'anticentre galactique (la direction opposée à Sagittarius). La figure 4 montre la détection de ces courants au pôle nord galactique (c'est-à-dire à la verticale du Soleil, perpendiculairement au plan galactique), et sur la figure 5, leur continuation depuis des latitudes galactiques intermédiaires ($b = 60^\circ$) jusque vers le plan galactique. La découverte de plusieurs de ces débris a permis de reconstituer l'orbite de Sagittarius, qui dessine une rosette dans un plan perpendiculaire au plan galactique. La distance d'approche minimum de la galaxie au centre galactique est de 15 kpc, le maximum de 60 kpc. On voit sur la figure 5 la bifurcation du courant qui est interprété comme la superposition sur la sphère céleste de deux segments d'orbites qui se trouvent à des distances différentes, correspondant à deux passages successifs de la galaxie.

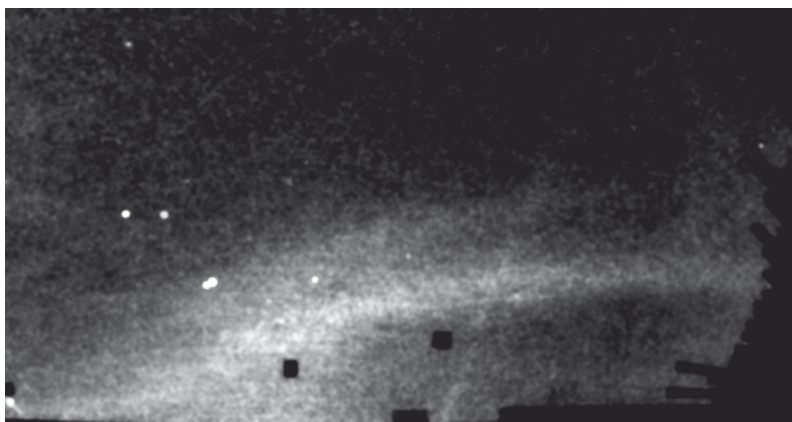


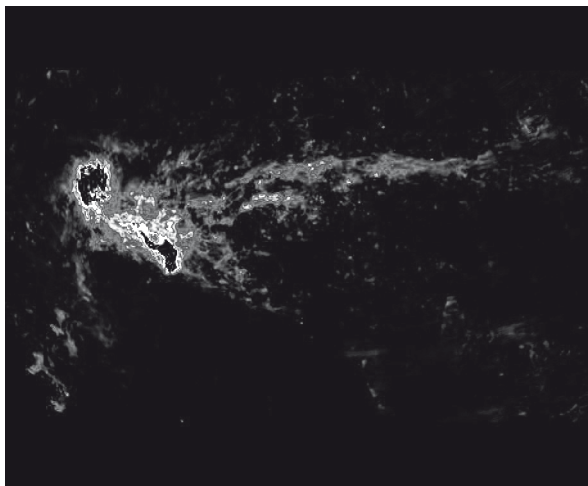
Figure 4. Densité stellaire en direction du pôle nord galactique ($b = 90^\circ$, au centre du système de coordonnées), à deux intervalles de distances du Soleil. La figure de gauche montre l'absence de structure au pôle entre approximativement 9 et 14 kpc du plan galactique. Le courant de Monoceros est visible entre les longitudes 165 et 225° à basse latitude ($b < 30^\circ$). La figure de droite est la carte de densité pour des étoiles entre 14 et 23 kpc. On voit très nettement le courant du Sagittaire. À noter, le petit filament à 0° de longitude laissé par l'amas globulaire Palomar 5, qui est montré sur la figure 9.

Figure 5. Carte de densité d'étoiles vers l'extérieur de la galaxie. Le milieu de l'image est proche de l'anticentre galactique, à environ 60° degré du plan galactique. Le plan galactique lui-même est sur la droite de l'image. L'image couvre une surface de 100° par 60° . Trois courants stellaires sont distinguables sur cette image. Le plus proéminent est le courant du Sagittaire, qui passe horizontalement sur l'image, montrant une bifurcation, qui est le résultat de la superposition sur la sphère céleste de deux segments d'orbite parsemés de débris du Sagittaire. La structure très fine et presque verticale sur l'image est l'« orphan stream », dont l'origine n'a pas encore été découverte. Son côté le plus proche, en haut sur l'image, est estimé à environ 20 kpc. Finalement, en bleu, proche du plan galactique, ce trouve le courant de Monoceros.

Le courant magellanique

Le courant magellanique est un courant de gaz d'hydrogène neutre découvert en 1972, qui relie le Petit, le Grand Nuage de Magellan et la Voie lactée. Il s'étend sur environ 100 degrés, sur une largeur d'environ 10°, depuis les Nuages de Magellan jusqu'à la direction de la rotation galactique vers $l = 90^\circ$, $b = -30^\circ$ en passant par le pôle sud galactique. L'origine du courant magellanique est probablement l'interaction des deux galaxies avec la Voie lactée. Deux hypothèses sont actuellement discutées. La première est que le gaz est arraché aux Nuages par la pression exercée par le halo sur les 2 galaxies. Dans la deuxième hypothèse, ce sont les effets de marée exercés par la galaxie sur les Nuages qui ont arraché le gaz des Nuages. Dans un premier temps, la première hypothèse parut être la bonne, en particulier parce qu'aucune contrepartie stellaire au courant magellanique n'a été trouvée. Les effets de marée affectent aussi les étoiles des Nuages, et on s'attendrait à en détecter, associées au courant de gaz neutre. Dans les deux cas cependant, la morphologie du courant magellanique est difficile à reproduire. La nature exacte de l'origine du courant magellanique est donc incertaine, d'autant que l'orbite exacte des Nuages de Magellan n'est pas connue.

Figure 6. Le courant magellanique. Carte de densité radio du gaz HI dans les Nuages de Magellan et le courant magellanique. Le courant part des Nuages (à gauche) et s'étend sur une centaine de degrés (horizontalement sur l'image).



Le courant « orphelin » (Orphan Stream)

Cette structure spectaculaire (cf. Fig. 5) a été découverte en 2006 dans les données du Sloan Digitized Sky Survey. Il couvre presque 50° sur le ciel, et sa distance est estimée entre 20 et 30 kpc du Soleil. Sa largeur sur le ciel est environ de 2°, ce qui correspond à plus