

La structure de notre Galaxie

Delphine Russeil,

Maître de conférence Université de Provence, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.

Comment connaît-on la structure de notre Galaxie alors que nous sommes situés à l'intérieur ? Delphine Russeil, qui travaille sur le milieu interstellaire à Marseille, détaille ici une partie des méthodes utilisées.

Introduction

S'il n'y a plus de doute sur le fait que notre Galaxie, la Voie lactée, est une galaxie spirale, la structure de ses bras (nombre, ouverture, longueur...) est encore un sujet de débat important. Si les observations semblent montrer que notre Galaxie possède 4 bras, cela la rend particulière, mais pas unique, dans le sens que la majorité des galaxies spirales de l'univers local sont des galaxies avec 2 bras.

Pour mieux comprendre cette problématique nous présentons ici la méthodologie utilisée pour établir la structure spirale de notre Galaxie.

Caractéristiques des galaxies spirales

L'observation des galaxies spirales en général nous montre qu'elles peuvent être caractérisées par 4 principaux aspects.

- Une structure aplatie : les galaxies spirales sont des systèmes dits à disque. C'est à dire que les constituants (étoiles, gaz, poussières) de la galaxie (hors des parties centrales où se trouve le bulbe) se distribuent de manière privilégiée dans un disque dont l'épaisseur est très inférieure à son diamètre (figure 1).
- Une composition riche en gaz : contrairement aux galaxies elliptiques les galaxies spirales sont riches en gaz, poussières et étoiles jeunes.
- Des bras spiraux : les galaxies spirales présentent des zones de sur-densité du gaz où se forment en grande partie des étoiles de toutes masses (dont des étoiles massives et chaudes). Ces sur-densités tracent les bras spiraux.
- Un système en rotation : les galaxies spirales sont en rotation. Tous les objets du disque sont en rotation autour du centre de la galaxie. Cette rotation suit une loi de vitesse (courbe vitesse en

fonction de la distance au centre nommée courbe de rotation) de forme bien particulière correspondant à une rotation dite différentielle.



Fig.1. Image de la galaxie du Sombrero (VLT, ESO). Cette galaxie vue par la tranche permet de bien comparer l'épaisseur du disque par rapport à l'extension de la galaxie et au bulbe central.

Notre Galaxie est une galaxie spirale

Il est très facile de se rendre compte que notre Galaxie est une galaxie spirale. L'observation seule de la Voie lactée permet déjà de voir que celle-ci répond aux deux premiers critères caractérisant les galaxies spirales.

La Voie lactée est une bande lumineuse qui se détache sur le ciel. C'est en fait le disque de notre Galaxie vu depuis l'intérieur. Son épaisseur réduite par rapport à l'ensemble du ciel souligne bien "l'aspect disque" de notre Galaxie.

L'observation visuelle de la Voie lactée montre aussi qu'elle est parsemée de zones sombres plus ou moins étendues. Ces zones correspondent à de

la poussière (qui absorbe la lumière des étoiles qui sont situées derrière). De plus on y observe des nébuleuses brillantes comme la nébuleuse d'Orion qui sont constituées de gaz ionisé par des étoiles jeunes et massives (étoiles O, B). Cela montre que notre Galaxie contient énormément de gaz et de poussières. En plus des étoiles excitatrices des nébuleuses brillantes (dites régions HII), on y observe aussi de nombreux amas ouverts. Ces étoiles sont des étoiles jeunes.

La composition de notre Galaxie est donc caractéristique des galaxies spirales.

De même la courbe de rotation de notre Galaxie a la forme typique des courbes de rotation des galaxies spirales. Il n'y a donc plus aucun doute sur le fait que celle-ci soit une spirale. Le challenge réside maintenant dans la détermination de la structure des bras. Du fait de notre position à l'intérieur de la Voie lactée, il est très difficile de reconstruire la structure spirale car toutes les informations le long de la ligne de visée sont superposées. Par exemple, 2 objets vus proches dans une même direction ne sont, la plupart du temps, pas à la même distance. Tracer la structure des bras de notre Galaxie revient à essayer de tracer le plan d'une ville depuis une position fixe à l'intérieur.

Tracer les bras spiraux de notre Galaxie

Pour déterminer la structure des bras de notre Galaxie, il est nécessaire de reconstruire leur tracé point par point à la façon d'un géographe de l'ancien temps qui dessinait les contours des côtes pour déterminer la morphologie des continents.

Choix du bon traceur

L'étude des galaxies nous montre que les bras spiraux sont le lieu de formation des étoiles (étoiles de toutes masses). Parmi toutes les étoiles formées se trouvent quelques étoiles massives (étoiles O et B). Ces étoiles sont très lumineuses et leur fort rayonnement UV ionise le gaz environnant formant des régions HII. Ce sont ces étoiles et leurs régions HII associées qui rendent les bras très brillants relativement au reste du disque. Il apparaît ainsi que les meilleurs traceurs des bras sont donc les objets jeunes : étoiles OB, régions HII (et nuages moléculaires associés), amas ouverts.

À l'inverse, les nébuleuses planétaires et les amas globulaires (étant des objets âgés) ne sont pas de bons traceurs et ne peuvent donc pas être utilisés pour l'étude des bras spiraux de notre Galaxie.

Méthode pour tracer les bras

La méthode pour reconstruire le tracé des bras est simple :

- on répertorie l'ensemble des objets jeunes
- on calcule leur distance héliocentrique
- on les porte sur un graphique pour visualiser le résultat.

On voit donc que tout repose sur la détermination des distances de ces objets. Il existe deux grandes méthodes pour calculer la distance des objets qui permettent de déterminer soit la distance dite stellaire soit la distance dite cinématique. Notons qu'il existe une troisième méthode pour déterminer la distance d'objet en astronomie : la mesure de la parallaxe (telles les parallaxes mesurées par le satellite Hipparcos). Ces distances parallactiques ne sont, jusqu'à présent déterminables que pour des objets très proches (moins de 1 kpc). Or nous voulons déterminer des distances à l'échelle de la Galaxie pour lesquelles les distances parallactiques ne sont donc pas déterminables.

La distance stellaire

La distance stellaire nécessite l'observation du spectre de l'étoile et de ses magnitudes dans 3 filtres différents (U, B, V). Le spectre permet de déterminer le type spectral de l'étoile (O5V par exemple) qui à partir de données de référence permet d'avoir sa magnitude absolue (M_V). Les magnitudes apparentes mesurées permettent de déterminer le coefficient d'extinction (extinction du milieu interstellaire présent sur la ligne de visée de l'étoile) A_V .

La distance d est alors déterminée par la relation:

$$m_V - M_V = -5 + 5 \log d + A_V$$

Le problème de la distance stellaire est qu'il faut pouvoir identifier et mesurer les étoiles ; or l'extinction interstellaire limite à 6 kpc en moyenne la portée de la détermination de la distance stellaire.

La distance cinématique

Quand on ne peut pas déterminer la distance stellaire, la seule alternative est de déterminer la distance cinématique, c'est à dire la distance déterminée à partir de la mesure de la vitesse radiale systémique de l'objet (vitesse générale dans le système de référence corrigé des mouvements internes). Cette méthode de calcul de la distance nécessite de connaître la courbe de rotation de notre Galaxie (figure 2) et de faire l'hypothèse que les objets sont en rotation

circulaire uniforme autour du centre de la Galaxie.

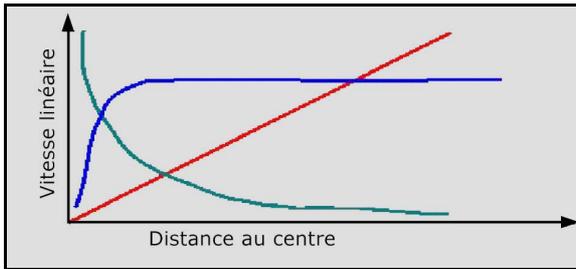


Fig.2 a. La courbe de rotation d'un corps décrit la variation de vitesse linéaire (ou angulaire) des points (ou constituants) de ce corps en fonction de la distance au centre (ou l'axe) de la rotation. Sur cette figure on montre la courbe de rotation de différents "corps".

En rouge est représentée la courbe de rotation d'un corps solide (type DVD en rotation dans le lecteur). La courbe est une droite traduisant une croissance de la vitesse des points avec la distance au centre.

En bleu vert est représentée la courbe de rotation du système solaire. On voit une décroissance de la vitesse des planètes quand on s'éloigne du Soleil (centre de rotation du système). Ce type de courbe de rotation est dite "décroissance keplérienne" (car elle provient directement de la 3^e loi de Kepler).

Enfin, on trouve la courbe de rotation en bleu foncé des galaxies spirales. Elle se caractérise par une croissance rapide près du centre de la galaxie (de type corps solide) et un long plateau. Ce type de courbe est dite "courbe de rotation différentielle".

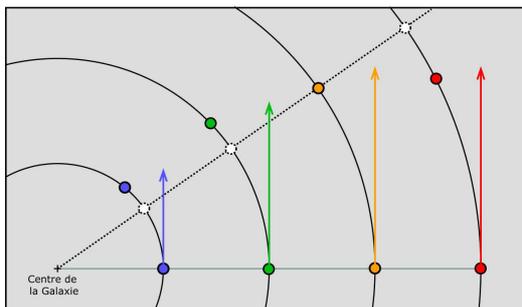


Fig.2 b. Cette figure illustre la rotation différentielle. Les objets supposés initialement alignés, sont après un temps donné décalés, alors que si la rotation était solide ils seraient alignés (ronds blancs).

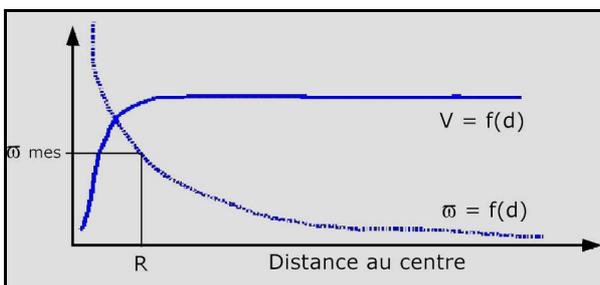


Fig.2 c. Cette figure montre la forme typique de la courbe de rotation des galaxies spirales, soit exprimée en vitesse linéaire, soit exprimée en vitesse angulaire (noter la différence d'aspect de la courbe) en fonction de la distance au centre de la Galaxie. La formule (a) permet de calculer la vitesse angulaire ω à partir de la vitesse radiale mesurée V_{mes} . Puis, avec la courbe de rotation, on détermine la distance galactocentrique R_1 qui lui correspond.

À partir de la vitesse radiale mesurée V_{mes} par effet Doppler, on calcule la vitesse angulaire ω par la relation (établie dans l'encadré en fin d'article) :

$$\omega = \omega_0 + V_{mes} / R_0 \sin l \quad (a)$$

où R_0 et ω_0 sont la distance du Soleil au centre galactique et la vitesse angulaire du Soleil (grandeurs connues) et où l est la longitude galactique (voir figure 3).

Par la courbe de rotation on détermine la distance galactocentrique R_1 puis la distance héliocentrique d en résolvant l'équation suivante (elle aussi démontrée en fin d'article) :

$$d^2 - 2 R_0 d \cos l + (R_0^2 - R_1^2) = 0 \quad (b)$$

qui donne deux solutions possibles pour les objets situés à l'intérieur de l'orbite solaire, les points O_1 et O_2 de la figure 3. Pour les objets extérieurs, on n'obtient qu'une solution car l'autre est négative. Cette ambiguïté de la distance héliocentrique doit ensuite être résolue par des considérations astrophysiques additionnelles. On utilise en général pour cela les raies en absorption dues au milieu interstellaire présent sur la ligne de visée : si un objet est loin, ces raies en absorption correspondent à des vitesses plus grandes (en valeur absolue) que si l'objet est proche.

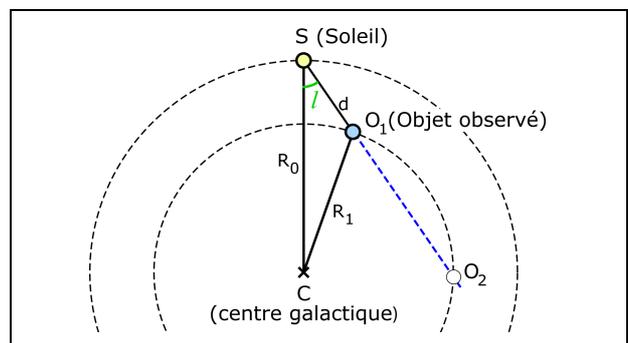


Fig.3. Rotation autour du centre galactique

Résultats

Certains travaux sur l'étude des bras de notre Galaxie sont basés uniquement sur les distances stellaires, d'autres uniquement sur les distances cinématiques et enfin d'autres sur un mélange des distances stellaires et cinématiques. Les distances stellaires ont permis de mettre en évidence la structure "locale" de notre Galaxie (de l'ordre de 5 kpc autour du Soleil). On voit apparaître (figure 4a) les deux bras les plus proches : bras du Sagittaire-Carène et de Persée et un éperon local désigné comme le bras d'Orion (attention le nom est confus car ce n'est pas un bras de la structure à grande échelle mais seulement une petite

"excroissance" d'un bras dit éperon). Le Soleil se trouve sur le bord de l'éperon d'Orion : il est donc situé entre deux bras.

Avec les distances cinématiques, on sonde la structure beaucoup plus loin et on peut ainsi suivre et tracer les bras à grande échelle.

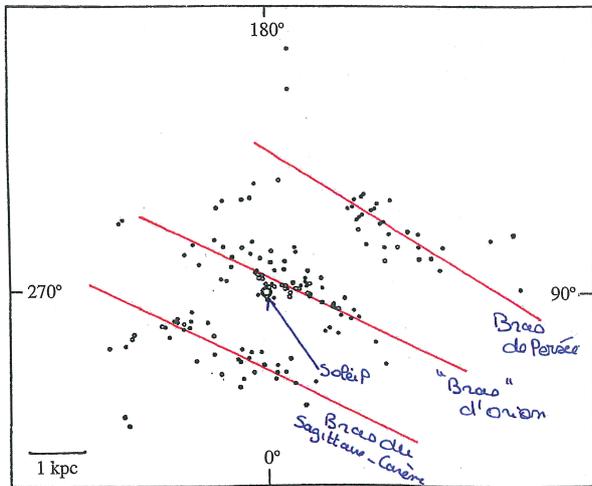


Fig.4a. Distribution spatiale des régions HII et amas jeunes positionnés grâce à leur distance stellaire (figure adaptée de Beker et Fenkart, "The Spiral Structure of Our Galaxy," Beker and Contopoulos, eds, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1970).

On converge actuellement, comme l'illustre la figure 4b vers une structure avec 4 bras spiraux.

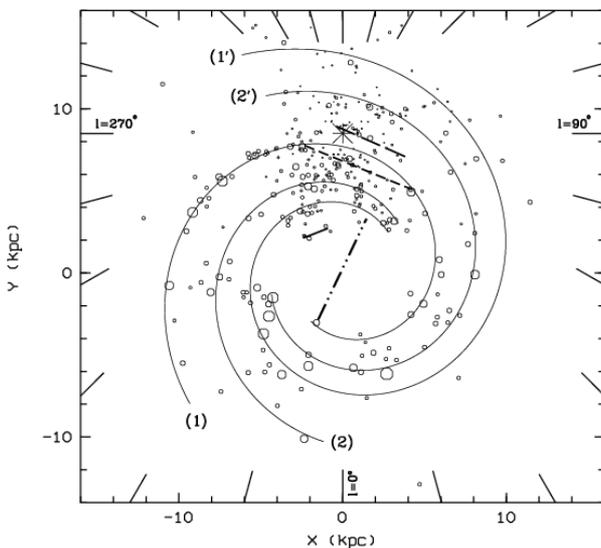


Fig.4b. Structure spirale de notre Galaxie (Russeil, 2003, A&A 397, p 133) tracée à partir de la distribution des complexes de formation stellaire et l'utilisation mixte des distances stellaires et cinématiques. Les bras sont : (1) bras de la Sagittaire-Carène, (2) bras Ecu-Croix, (1') bras Norma-Cygne et (2') bras de Persée. Le Soleil est représenté par la grosse croix à la position $x = 0, y = 8.5$. On voit que l'éperon d'Orion (trait le plus proche du Soleil) est une structure locale. Le trait au centre représente la barre centrale avec son orientation.

De notre Galaxie, on ne peut avoir que des représentations ou des vues d'artiste ; pour avoir

une meilleure idée de son aspect, on peut regarder la galaxie NGC 1232 (figure 5) qui est considérée comme la sœur jumelle de notre Voie lactée.



Fig.5. NGC 1232, la galaxie jumelle de la nôtre (image VLT, ESO)

Les autres structures remarquables de notre Galaxie

La détermination de la distance des objets jeunes montre que, en plus de la structure spirale, notre Galaxie est gauchie : le disque est tordu vers le haut dans la partie nord en particulier entre 50° et 180° de longitude et vers le bas dans la partie sud entre 280° et 340° . Le gauchissement des galaxies est relativement commun. Pour notre Galaxie, l'axe du gauchissement est aligné avec la direction des Nuages de Magellan qui sont les deux galaxies les plus proches de la nôtre. On pense donc que ce sont les effets de marée gravitationnelle dus aux Nuages de Magellan qui impliquent ce gauchissement.

Un autre aspect de notre Galaxie, provenant d'observation infrarouge de ses parties centrales est qu'elle présente une barre centrale. Notre Galaxie est donc une galaxie spirale barrée.

Conclusions

Nous pouvons maintenant établir la carte d'identité de notre Galaxie :

- galaxie spirale barrée à 4 bras de type SBbc
- courbe de rotation avec plateau à 220 km/s
- diamètre optique de l'ordre de 30 kpc
- gauchissement dû probablement aux Nuages de Magellan.

Établissement des formules

Pour retrouver les formules (a) et (b) on suppose les orbites circulaires parcourues à vitesse constante. Les grandeurs qui sont supposées connues ou mesurées sont la distance galactique R_0 du Soleil, la vitesse du Soleil V_0 , les coordonnées galactiques (l, b) de l'objet observé (noté O_1) et sa vitesse radiale mesurée par effet Doppler V_{mes} .

La figure 6 présente un zoom sur la figure 3 avec tous les angles utiles reportés. On suppose que l'objet est dans le plan de la Galaxie et donc que la latitude galactique b est nulle.

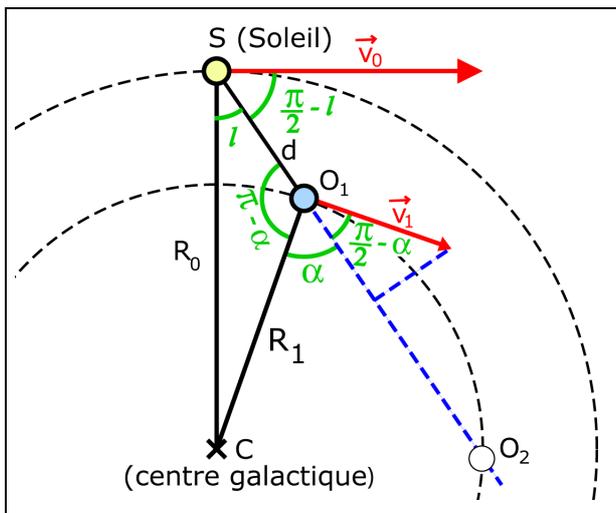


Fig. 6. Représentation des orbites circulaires. L'objet étudié est noté O_1 .

La loi de composition des vitesses s'écrit pour les vitesses radiales :

$$V_{mes} = V_{rad}(\text{objet}) - V_{rad}(\text{Soleil})$$

On développe cette relation (voir fig.6) :

$$\begin{aligned} V_{mes} &= V_1 \cos(\pi/2 - \alpha) - V_0 \cos(\pi/2 - l) \\ &= V_1 \sin \alpha - V_0 \sin l \end{aligned}$$

où V est la vitesse linéaire de rotation de l'objet.

Or, la relation des sinus dans le triangle CSO_1 nous donne :

$$R_0 / \sin(\pi - \alpha) = R_1 / \sin l \text{ ou } R_0 / \sin \alpha = R_1 / \sin l$$

qui se développe en $\sin \alpha = R_0 \sin l / R_1$ et que l'on injecte dans la relation ci-dessus.

On obtient :

$$V_{mes} = V_1 \times R_0 \sin l / R_1 - V_0 \sin l$$

$$V_{mes} = \sin l \times (V_1 R_0 / R_1 - V_0)$$

Avec $\omega_1 = V_1 / R_1$ et $\omega_0 = V_0 / R_0$ (vitesses angulaires de O_1 et du Soleil), on obtient :

$$V_{mes} = \sin l \times (R_0 \times \omega_1 - R_0 \times \omega_0)$$

$$= R_0 \times \sin l \times (\omega_1 - \omega_0)$$

$$\text{d'où } \omega_1 = \omega_0 + V_{mes} / (R_0 \sin l) \quad (a)$$

Pour établir la relation (b), on se place dans le triangle CSO_1 . On se rappellera la relation vectorielle suivante :

$$\vec{CO}_1 = \vec{SO}_1 - \vec{SC}$$

$$\text{d'où } CO_1^2 = SO_1^2 + SC^2 - 2 \times SO_1 \times SC \times \cos l$$

$$\text{ce qui devient } R_1^2 = d^2 + R_0^2 - 2 \times d \times R_0 \times \cos l$$

Cette équation se met sous la forme d'une équation du second degré en d :

$$d^2 - 2 R_0 \cos l \times d + (R_0^2 - R_1^2) = 0 \quad (b)$$

Cette équation a deux solutions (calcul du discriminant). Les deux solutions correspondent aux points O_1 et O_2 de la figure 6. Pour des objets situés au-delà de l'orbite solaire, on n'a qu'une solution car la deuxième est négative.

Réponses aux questions de la page 22

Des photos de la Terre et de la Lune.

1.a. On ne voit pas si le nord est en haut ou en bas et on ne sait pas non plus si la Lune est en premier plan ou en arrière plan. Si elle est en arrière plan, on observera depuis la Terre un croissant (premier ou dernier suivant que le nord est en haut ou en bas). Si la Lune est en premier plan, on verra depuis la Terre une Lune gibbeuse (croissante ou décroissante). Les éphémérides indiquent que le 18 septembre 1977, on voyait un premier croissant.

1.b. En retournant la photo, on met le nord en haut. L'indication de mouvement indique que la Lune est en arrière plan. Depuis la Terre, on voit donc un dernier quartier.

1.c. Là encore, suivant que la Lune est en avant ou en arrière plan, on verra une Lune gibbeuse ou un croissant.

2. La distance de la sonde à la Lune est supérieure à la distance Terre Lune. Ce type de phénomène peut s'appeler éclipse annulaire de Soleil ou passage de la Lune devant le Soleil.

En maths.

Horaires de l'éclipse :

OV = 6 400 km ; XV = 6 079 km ; à 3 500 km/h : 1 h 44 ; OW = 2 900 km ; XW = 2 100 km ; à 3 500 km/h : 36 min.

Passage en V : 9h18 - 1h44 = 7h34 ; W : 9h18 - 0h36 = 8h42 ; Y : 9h18 + 0h36 = 9h54 ; Z : 9h18 + 1h44 = 11h02.

Conditions : OL = 375 000 km.

L'éclipse du 4 janvier : Non car on calcule que la droite (SL) passe à 6 824 km au-dessus du centre de la Terre (de rayon 6 370 km).