

Dynamique et structure galactiques

Olivier Bienaymé

Observatoire de Strasbourg

Abstract. Most of the galactic stellar mass is in the galactic disc and IR observations allow one to observe through nearly the entire disc, giving access in detail to its morphology, from the inner bar-bulge, the arms and inner ring, the outer limit of the exponential discs to the dependence of the scale lengths with stellar populations, while the brightest halo giants completely probe the stellar halo morphology and structure.

Kinematic observations can be performed to complete IR multicolour star counts. Such complementary data strongly constrain the morphology of the stellar components and give clues to the scenario of galactic formation and evolution. Some of the expected results concerning the internal dynamics of our Galaxy are constraints on the galactic potential in the halo, a direct measure of the rotation of the inner bar, kinematic gradients in the stellar discs and dependence with age.

The local stellar Luminosity Function can be much better determined using proper-motions, separating discs and halo Luminosity Functions. It will also be the only means to accurately identify existing intermediate populations like the thick disc, as well as other hypothetical populations (extended bulge or accreted satellites).

1. Introduction

La structure de notre Galaxie peut être décrite par les propriétés et le rôle de chacune de ses composantes stellaires et gazeuses, chaque composante stellaire se définissant par une population d'étoiles homogène en âge, cinématique et composition chimique et appartenant à une même composante morphologique. Comprendre ce que sont ces composantes et comment elles se sont formées constitue l'enjeu des prochaines décennies. L'étude détaillée et vue depuis "l'intérieur" de notre Galaxie est aussi un objectif majeur pour comprendre les mécanismes de formation et d'évolution des autres galaxies ainsi que l'évolution de l'Univers depuis

l'apparition des premières galaxies. Les grands relevés systématiques du ciel, en cours et à venir, permettront de répondre à ces questions.

Table 1.: *La Galaxie en bref : les principales composantes galactiques*

| | |
|---|---|
| Les disques minces et épais, rotation rapide et faible dispersion des vitesses | $\mathcal{M}_d \sim 4 \cdot 10^{10} \mathcal{M}_\odot$ $180\text{-}220 \text{ km s}^{-1}$ $\sigma_w \sim 5\text{-}20, 40 \text{ km s}^{-1}$ |
| Le bulbe, rotation rapide et forte dispersion des vitesses | $\mathcal{M}_b \sim 2 \cdot 10^{10} \mathcal{M}_\odot$ 100 km s^{-1} 100 km s^{-1} |
| Les étoiles du halo, (pauvres en métaux) rotation lente et forte dispersion des vitesses | $\mathcal{M}_h \sim 10^9 \mathcal{M}_\odot$ $\sim 0 \text{ km s}^{-1}$ 100 km s^{-1} |
| La matière noire | $\mathcal{M}_{d.m.}(\mathcal{R}) \sim \mathcal{R}_{kpc} \times 10^{10} \mathcal{M}_\odot$ si la courbe de rotation est plate et à $\mathcal{R} > \mathcal{R}_\odot$ |

Remarque : la contribution dynamique du halo stellaire, de même que celle du milieu interstellaire, est négligeable ; le halo stellaire est le traqueur le plus ancien, contemporain de la période initiale de la formation galactique.

Parmi les nombreuses questions soulevées par l'étude de notre Galaxie, notons celles-ci :

- Quelle est la distribution exacte de la masse à grand rayon galactique ?

- La matière noire est-elle distribuée dans un halo sphérique ou dans une forme plus aplatie (ou au contraire prolata pointant vers les pôles) ? A-t-elle une distribution triaxiale (ce qui aurait un impact sur le maintien des bras spiraux ou des gauchissements) ?

- Y a-t-il une composante stellaire ayant un moment angulaire intermédiaire (entre les disques et le halo) ? Y a-t-il des courants d'étoiles dans le halo stellaire ?

Derrière ces questions, la principale interrogation reste celle des conditions de la formation et de l'évolution de notre Galaxie. Des éléments de réponses sont partiellement apportés par les deux principaux modèles d'interprétation de la formation galactique :

- Le modèle ELS (Eggen, Lynden-Bell, Sandage, 1962), modèle monolithique où la galaxie se forme entièrement à partir d'un nuage protogalactique primordial sphérique en s'effondrant rapidement en forme de disque.

- Le modèle SZ (Searl et Zinn, 1978) où la galaxie est le résultat d'accrétion et de rencontres avec de petites galaxies proches.

La réalité est sûrement une combinaison de ces deux processus : la présence de la petite galaxie du Sagittaire autour de notre Galaxie, mais aussi d'un satellite en accrétion autour de M31 prouve que ces mécanismes d'interaction et d'accrétion sont encore actifs. D'autre part, la présence d'un disque galactique contenant une grande quantité de moment angulaire semble interdire que seule l'accrétion de satellites ait pu former notre Galaxie.

2. Le rôle des grands relevés infrarouges

L'essentiel de la masse stellaire galactique se situe dans les étoiles de faible masse du disque, qui sont relativement lumineuses dans le proche infrarouge. La lumière qui traverse le disque galactique est fortement obscurcie en visible, alors que l'absorption est moindre en IR (10 fois moindre en K qu'en V) . Les observations infrarouges permettent ainsi d'observer à peu près au travers de tout le disque, rendant visibles les détails de la morphologie, depuis la barre-bulbe interne, les bras spiraux, l'anneau interne jusqu'aux limites externes du disque exponentiel et du gauchissement du disque. D'autre part, les géantes brillantes du halo, facilement accessibles, révèlent entièrement la morphologie et la structure du halo stellaire.

Les observations cinématiques peuvent compléter les comptages stellaires multi-couleurs et apportent une contrainte sur la forme des composantes stellaires. Elles fournissent une information sur le potentiel gravitationnel du halo et elles peuvent aussi fournir une mesure directe de la rotation de la barre interne ou bien des gradients cinématiques des disques stellaires.

D'autre part, la fonction de luminosité locale peut être déterminée en utilisant les mouvements propres qui suffisent en principe aussi pour séparer les fonctions de luminosité de chacun des disques et du halo. L'acquisition de mouvements propres, en complément des comptages photométriques, permettra ainsi d'identifier les populations

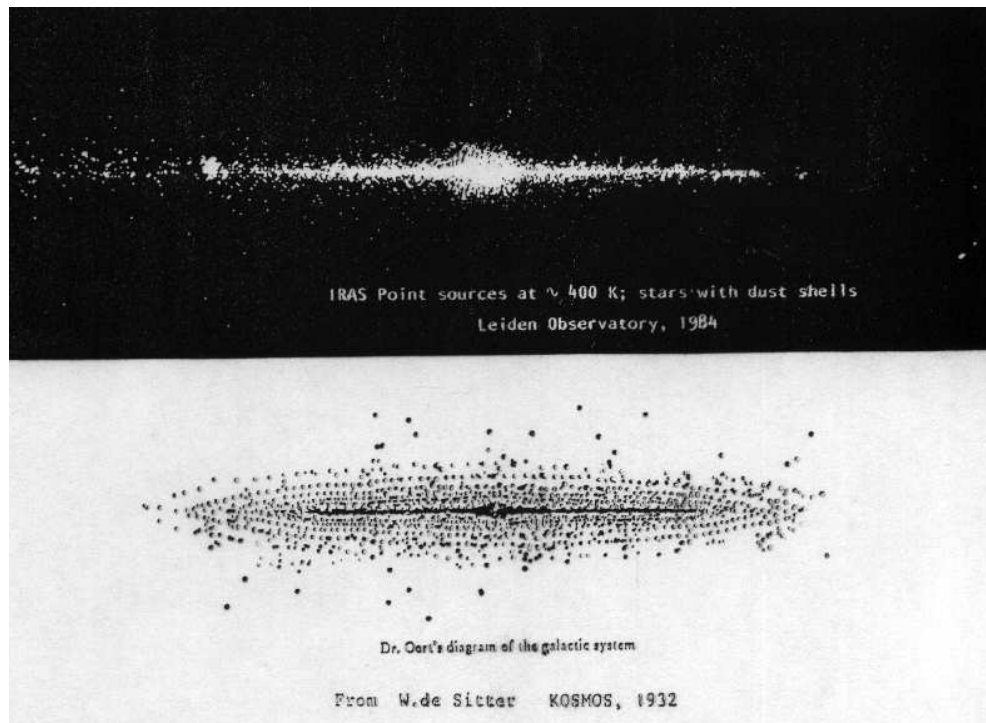


Figure 1.: *Modèle galactique selon J. H. Oort et distribution des étoiles vues par le satellite IRAS.*

intermédiaires comme celle du disque épais ou d'autres populations plus hypothétiques (bulbe étendu, satellites accrétés).

La photométrie de surface

Les relevés infrarouges en brillance de surface sur de grands champs ont été obtenus avec les expériences Pioneer et, plus récemment, COBE/DIRBE. Les cartes de luminosité (intégrées sur la ligne de visée) sont interprétées en ajustant les paramètres de modèles galactiques. Les champs à faible latitude galactique sont affectés sensiblement par l'absorption; différentes équipes ont proposé différents modèles mettant en évidence une asymétrie (barre ou spirale) au centre de la Galaxie. On peut cependant montrer que ces observations seules peuvent s'expliquer avec des modèles aux caractéristiques assez différentes (Zhao, 1997), problème qui peut être résolu en procédant à des comptages stellaires.

Les comptages infra-rouges

Les sources stellaires détectées par le satellite IRAS donnent une vue profonde et d'ensemble de la Galaxie (Fig. 1). Les sources IRAS sont dominées par les AGB, géantes de type tardif et par les étoiles à enveloppe de poussière ; elles constituent les deux disques (mince et épais) et le bulbe facilement reconnaissables. En utilisant les observations IRAS, Garwood et Jones (1987) ont montré que la densité du halo suit une loi en $\mathcal{R}^{1/4}$.

Les comptages en infrarouge proche provenant des surveys DENIS et 2MASS ont une meilleure résolution et fournissent une information quantitative bien plus fine.

Les comptages, par opposition à la brillance de surface, contiennent une information liée à la distance des étoiles le long de la ligne de visée. Ces distances peuvent être (dans un sens statistique) retrouvées, si l'on connaît la fonction de luminosité de ces étoiles (c'est-à-dire leur distribution en magnitude absolue). En pratique, cette information est habituellement exploitée au travers de modèles galactiques des populations stellaires qui reproduisent la distribution spatiale observée des étoiles pour des fonctions de luminosités données. Les comptages multi-couleurs sont nécessaires pour discriminer les effets de la métallicité et pour maîtriser les effets d'extinction (par exemple : en utilisant à la fois les bandes de couleur I, J, H et K).

Le relevé du programme TMGS (Hammersley et al., 1995) montre que le Soleil se situe à 15 ± 3 pc au dessus du plan galactique et le relevé DENIS montre que le disque galactique présente un gauchissement (Derrière, 2001). Staneck et al. (1997) utilisant les étoiles du "red clump" en direction du bulbe, déterminent l'orientation de la barre. Ruphy et al. (1996ab) obtiennent des résultats avec les observations DENIS concernant la morphologie des bras spiraux et de l'anneau interne et trouvent une échelle de longueur du disque de 2,3 kpc.

3. Les naines blanches du halo

La recherche de naines blanches du halo est un exemple d'exploitation de très grands relevés. Du fait que les naines blanches sont intrinsèquement peu lumineuses, si une naine blanche est visible, elle sera nécessairement proche et aura sans doute un grand mouvement propre. La recherche des naines blanches, celles du halo en particulier, est traditionnellement effectuée en recherchant les étoiles à grands mouvements propres par la comparaison de deux clichés pris à des époques distantes. Un des objectifs est la détermination de la fonction de luminosité des naines blanches du halo, qui présente une coupure aux grandes magni-

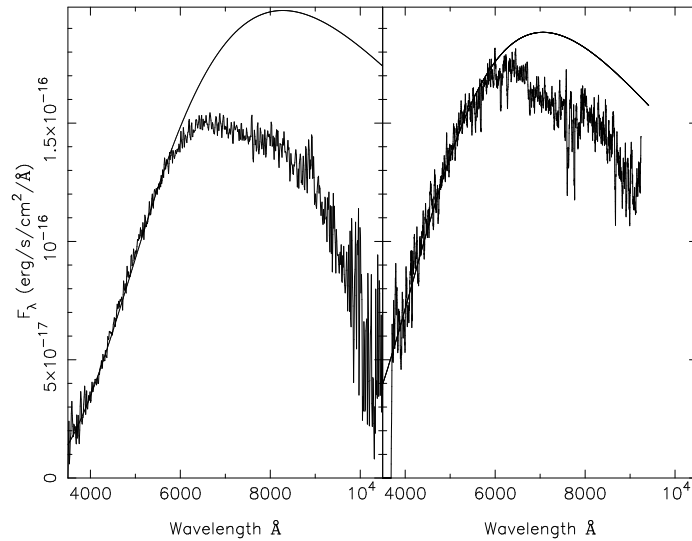


Figure 2.: *Spectres calibrés en flux de deux naines blanches à très grands mouvements propres : F351-50 (gauche) et F821-7 (droite). Les spectres de corps noirs ajustés donnent respectivement les températures de 3500 et 4100 K.*

tudes absolues. Cette coupure correspondrait aux naines blanches les plus froides et les plus vieilles. Les temps de refroidissement étant par ailleurs connus (ou supposés tels ..), on obtient ainsi une indication de l'âge de la formation du halo galactique.

Plusieurs évènements récents ont relancé ces études : 1) une meilleure analyse de l'opacité des couches extérieures des naines blanches les plus froides montrent "paradoxalement" que ces naines blanches cessent de rougir avec l'âge et qu'au contraire elles bleuissent, 2) la disponibilité des grands relevés dont l'APM ont permis de rechercher et de ré-analyser les très grands mouvements propres (les catalogues existants comme ceux de Luyten sont loin d'être complets aux magnitudes 17 et au-delà).

Des résultats récents (Ibata et al. 2000) ont montré qu'effectivement il existait des naines blanches "antiques" très froides et de couleur bleue. La distance connue de l'une d'entre elle (une étoile de Luyten, LHS 452) permet de connaître sa magnitude absolue, $M_V = 18$ mag. Les spectres de ces naines blanches froides ne montrent pas de raies d'absorption, et l'ajustement d'un spectre de corps noir indique des températures de trois à quatre mille degrés (Fig. 2). D'autre part, la partie infrarouge du spectre montre un effondrement en accord avec les prédictions des nouveaux modèles d'opacité.

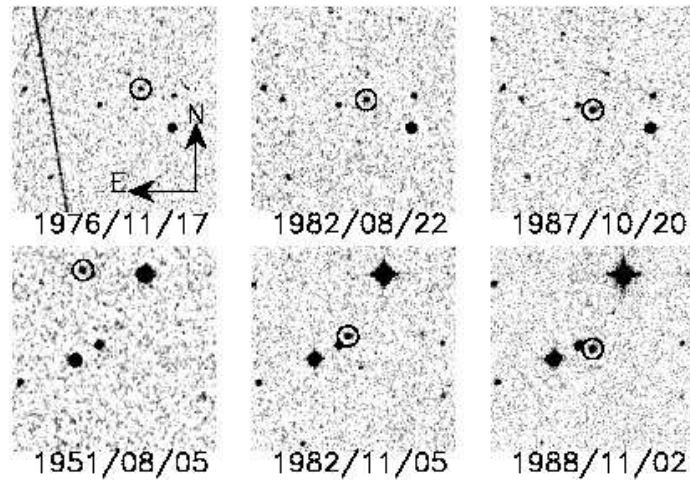


Figure 3.: De gauche à droite, les images de plaques photographiques de F351-50 (haut) proviennent des plaques l'ESO-B, UKST-BJ et UBST-R et celles de F821-07 (bas) du Palomar-O, UKST-BJ, UKST-R. Elles montrent le mouvement apparent de ces étoiles.

Ces étoiles ont une cinématique caractéristique du halo ou du disque épais (cela étant déduit des magnitudes absolues estimées et des mouvements propres (Fig. 3) - la vitesse tangentielle sur le ciel n'est réellement mesurée que pour une seule étoile dont la distance est connue). Les premiers décomptes basés sur de petits nombres montreraient que cette population d'étoiles représente 5 pour cent de la masse du halo noir et 100 fois plus que la densité du halo stellaire traditionnel. Ce résultat est en accord avec les recherches d'événements micro-lentilles en direction des nuages de Magellan (masse des micro-lentilles : 1/2 masse-solaire et 5% de la masse du halo sombre). Affaire à suivre...

D'autre part, les naines blanches sont encore brillantes en bande I et sont accessibles au relevé DENIS, qui peut donc être utilisé pour leur recherche systématique. Bien sûr, ces conclusions préliminaires demandent à être confirmées par un échantillon plus étendu. En particulier cette population pourrait bien appartenir à celle du disque épais et les conséquences en terme de formation stellaire galactique seraient alors de bien moindre ampleur.

4. Mouvement propre et photométrie

L'essentiel de notre compréhension de la structure globale de la Galaxie repose sur la comparaison des comptages en magnitude et en couleur dans différentes directions galactiques. Les comptages stellaires ne suffisent pas à eux seuls à résoudre le dilemme suivant : une étoile de magnitude apparente donnée est-elle intrinsèquement faible et proche ou bien, à l'inverse, brillante et lointaine ? Ce problème peut être résolu statistiquement en utilisant l'équation centenaire de la statistique stellaire (von Seeliger, 1898) :

$$A_\lambda(m, l, b) = \int_0^\infty \Phi_\lambda(M) \rho(r, l, b) r^2 dr$$

où $A_\lambda(m, l, b) dm dl d(\sin b)$ est le nombre d'étoiles qui ont une magnitude apparente dans l'intervalle $[m, m + dm]$, $\Phi_\lambda(M)$ est la fonction de luminosité qui dépend de la magnitude absolue M , et de la bande de couleur λ , tandis que $\rho(r, l, b)$ est la densité à la distance r le long de la ligne de visée dans la direction donnée par les longitudes et latitudes galactiques (l, b) (à l'intérieur de l'angle solide $dl \cos(b) db$).

Cette équation ne peut être résolue ou inversée (c'est-à-dire, résoudre à la fois la fonction de luminosité et la loi de densité) sauf pour quelques cas simplifiés. Par exemple, pour un échantillon stellaire "homogène" pour lequel la fonction de luminosité ou plus précisément la distribution de magnitude absolue des étoiles est connue, la loi de densité sur la ligne de visée est retrouvée à partir des comptages. Une méthode numérique classique (*cf.* Mihalas & Binney, 1981) a été proposée : le diagramme de Bok (1937) tandis qu'une méthode plus rigoureuse est requise pour des petits échantillons afin de stabiliser l'inversion et produire des solutions lisses et régulières.

Une approche largement développée dans les années 80 a consisté à intégrer l'équation de la statistique stellaire en introduisant des présupposés (*cf.* Prichet 1983, Bahcall et al 1983, Buser 1985, Robin & Crézé 1986). Une hypothèse fréquente, par exemple, est de supposer que les étoiles du halo stellaire ont la même fonction de luminosité qu'un amas globulaire donné. Une autre hypothèse consiste à construire les fonctions de luminosité à partir des tracés évolutifs et isochrones de différents âges. Cela a été utilisé pour poser des contraintes sur le taux de formation stellaire du disque galactique (Haywood et al, 1997ab). Des a priori plus forts peuvent être développés si l'on admet la cohérence dynamique puisque la cinématique verticale des étoiles est liée à l'aplatissement des disques stellaires ou des composantes sphéroïdales. Les comptages seuls, $A(m, l, b)$, ne sont pas suffisants pour contraindre de manière unique les modèles galactiques de populations stellaires. On peut cependant montrer que cette dégénérescence est levée si, en plus

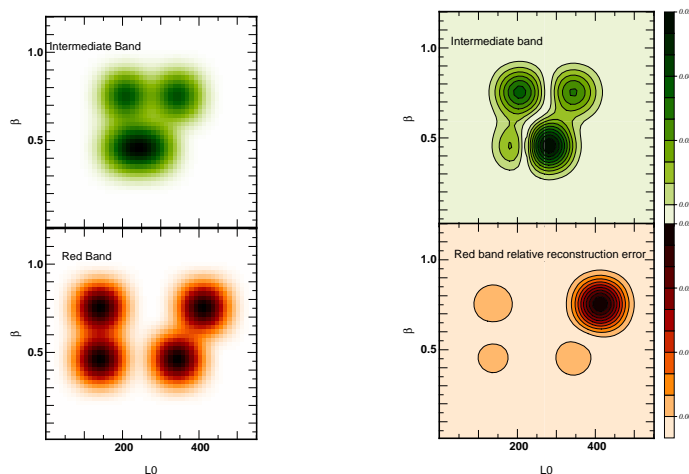


Figure 4.: *Fonctions de luminosité reconstruites (droite) dans le plan $[L_0, \beta]$ ($\beta = 1/\sigma^2$ et σ : dispersion de vitesse des populations) pour un diagramme HR fictif, ainsi que les erreurs de reconstruction (gauche).*

des comptages en magnitude, on prend aussi en considération les comptages en mouvements propres μ_l , μ_b (Pichon, Siebert, Bienaymé, 2002). Pour un modèle dynamique cohérent relativement général (stationnaire, axisymétrique et de gradient cinématique fixé), l'équation de la statistique peut être formellement inversée, déterminant à la fois la loi de densité verticale de chaque population stellaire et leur fonction de luminosité (Fig. 4). Le potentiel gravitationnel vertical doit par ailleurs être connu (en fait la dégénérescence demeure dans le seul cas où le potentiel vertical est strictement quadratique). Pour des comptages idéaux (infinitement profonds et pour un nombre infini d'étoiles), l'inversion donne exactement la proportion d'étoiles de chaque composante cinématique, fournissant un diagnostic direct pour séparer les disques minces, le disque épais et le halo stellaire, la fonction de luminosité de chaque population étant alors déterminée. Ceci est une conséquence directe de la contrainte supplémentaire introduite par la cohérence dynamique.

5. Conclusion

Le projet de satellite astrométrique GAIA fournira les mesures directes de positions, de vitesses 3D et des indicateurs de métallicité et d'âge pour des millions d'étoiles de notre Galaxie ; de nombreuses questions de la structure galactique pourront être examinées de façon "directe" à l'aide des observations GAIA. En attendant cette échéance encore lointaine, les grands relevés en cours et à venir, comme les satellites astrométriques FAME ou DIVA et aussi des projets de relevés spectroscopiques

piques, vont fournir des bribes d'informations essentielles mais partielles, ou indirectement reliées aux quantités physiques intrinsèques des étoiles ou de la structure galactique. Le développement de méthodes numériques d'inversion pour analyser ces données doit être préparé : par exemple, les satellites FAME et DIVA fourniront les distances et mouvements propres de quelques millions d'étoile ; il faudra exploiter au mieux cette information, sachant que les vitesses radiales ne seront pas disponibles pour l'immense majorité d'entre elles (un problème similaire s'est posé pour la centaine de milliers d'étoiles observées par Hipparcos).

Références

- [1] Bahcall, J.N., Soneira, R.M., Schmidt, M., 1983, ApJ 265, 730
- [2] Bok, B.J., 1937, *The distribution of stars in Space*, University of Chicago Press
- [3] Buser, R., Kaeser, U., 1985, A&A 145, 1
- [4] Derrière, S., 2001, *Thèse*, Université de Strasbourg
- [5] Eggen, O.J., Lynden-Bell, D., Sandage, A., 1962, ApJ 136, 748
- [6] Garwood, R., Jones, T.J., 1987, PASP 99, 45
- [7] Hammersley, P.L., Garzon, F., Mahoney, T., Calbet, X., 1995, MNRAS 269, 753
- [8] Haywood, M., Robin, A.C., Crézé, M., 1997a, A&A 320, 428
- [9] Haywood, M., Robin, A.C., Crézé, M., 1997b, A&A 320, 444
- [10] Ibata, R., Irwin, M., Bienaymé, O., Scholz, R., Guibert, J., 2000, ApJ 532, L41
- [11] Mihalas, D., Binney, J., 1981, *Galactic Astronomy : Structure & Kinematics* W H Freeman & Company.
- [12] Pichon, C., Siebert, A., Bienaymé, O., 2002, MNRAS, 329, 181
- [13] Pritchett, C., 1983, AJ 88, 1476
- [14] Robin, A., Creze, M., A&A 64, 53
- [15] Ruphy, S., 1996a, *Thesis*, Université de Paris VI
- [16] Ruphy, S. *et al.*, 1996b, A&A 313, L21
- [17] Searle, L., Zinn, 1978, ApJ 225, 357
- [18] von Seeliger, 1898, Abh. K. Bayer Akad Wiss Ser II K1 19, 564.
- [19] Stanek *et al.*, 1997, ApJ 477, 163
- [20] Zhao, H.S., 1997, *astroph9705046*