

La Voie Lactée

Par une nuit claire et sans lune, loin de la pollution lumineuse des grandes villes, on remarque que la voûte céleste est traversée par une bande peu lumineuse formée de milliers d'étoiles. Nos ancêtres grecs, admirant le ciel d'été, avaient associé cette bande de lumière, allant d'un horizon à l'autre, à une rivière de lait, la **Voie Lactée**. Il s'agit en fait de notre **galaxie** (le mot galaxie tire son origine du mot grec pour lait) que nous apercevons de l'intérieur. En effet, le Soleil (et son cortège de planètes) ainsi que toutes les étoiles visibles à l'oeil nu font partie d'une vaste structure que nous appelons la Galaxie. Cette structure contient plus de 100 milliards d'étoiles. La figure 23.1 a) illustre la position du soleil dans notre galaxie. Nous sommes donc situés dans le plan du disque, en périphérie. Comme le montre la figure 23.1 b) l'orientation de l'orbite terrestre et l'inclinaison de l'axe de rotation de notre planète font en sorte que nous pouvons apercevoir le centre de notre galaxie pendant les nuits d'été dans l'hémisphère nord. De nos régions, il est plus facile de voir la bande laiteuse pendant la période estivale.

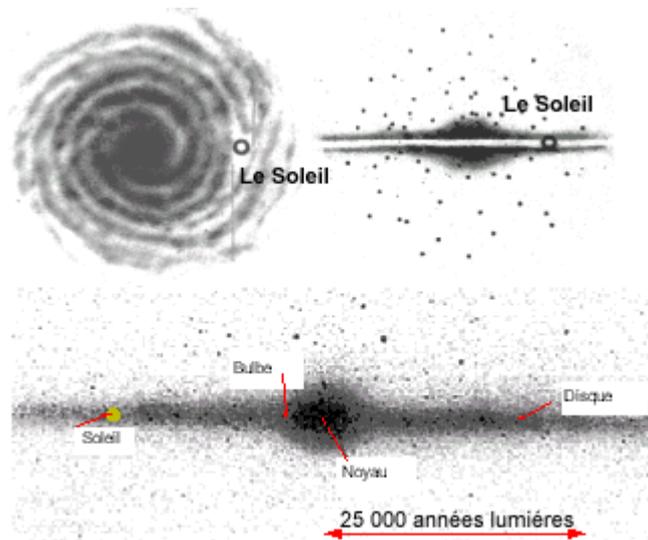


Figure 23.1 a) Position du système solaire dans la voie lactée

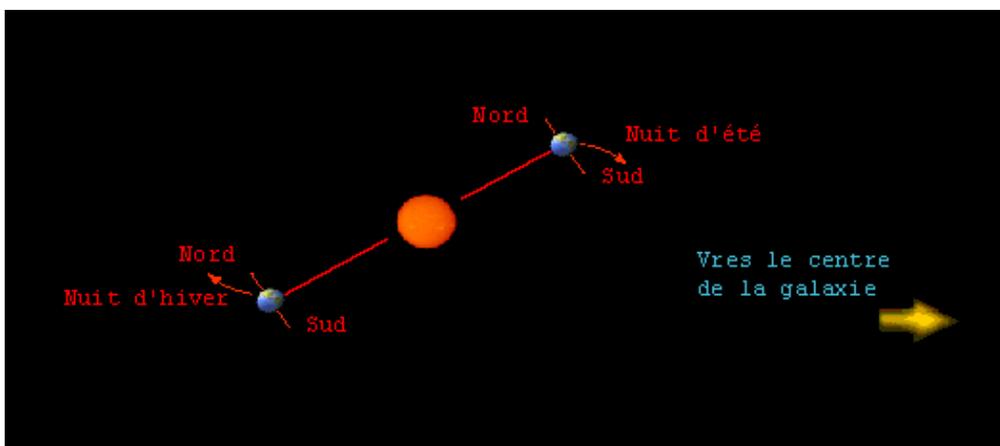


Figure 23.1 b) L'orbite de la Terre et la direction du centre de la Galaxie



[Continuer](#)

Objectifs du chapitre 23

- Décrire la Voie Lactée (sa structure, ses caractéristiques), et y situer le Soleil
- Décrire les différentes composantes de la Voie Lactée
- Situer les différentes populations stellaires faisant partie de la Voie Lactée
- Expliquer l'origine de la structure spirale de la Voie Lactée
- Décrire brièvement le modèle expliquant la formation de la Voie Lactée



Cliquez pour imprimer

Yannick Dupont
V2.0, été 2001

Découverte de la vraie nature de la Voie Lactée

Le philosophe grec Démocrite fut le premier à suggérer que cette bande de lumière pourrait consister d'un grand nombre d'étoiles non résolues. Cette hypothèse fut confirmée par Galilée en 1610, lorsqu'il pointa sa lunette dans cette direction. Malgré tout, à cette époque, ceci ne signifiait pas que le Soleil était semblable à une de ces étoiles ou encore faisait partie de cet ensemble d'étoiles.

Vers 1750, Thomas Wright (1711-1786) puis **Immanuel Kant** (1724-1804), suggèrent que la Voie Lactée pourrait être un disque aplati d'étoiles. En 1773, **Herschel** poursuit cette idée et, en se basant sur les résultats de ses observations où il avait compté le nombre d'étoiles dans plusieurs directions, propose un modèle *héliocentrique* de la Galaxie, constitué d'un disque d'étoiles de 10 kpc. (rappelons qu'un parsec (pc) correspond environ à 3.26 A.L., donc 10 Kpc valent un peu plus de 32 000 A.L. de diamètre), et ayant un rapport des axes d'environ 3 pour 1. Il est intéressant de noter qu'Herschel n'utilisait ni le parsec, ni l'année lumière comme unité de distance: il indiquait les distances en *siriuswerte*. Un *siriuswerte* correspondait à la distance (supposée) entre la terre et l'étoile Sirius. La **Figure 23.2** est une reproduction du dessin de la galaxie publié par Herschel en 1785 dans les *Philosophical Transactions* de la Société Royale de Londres.

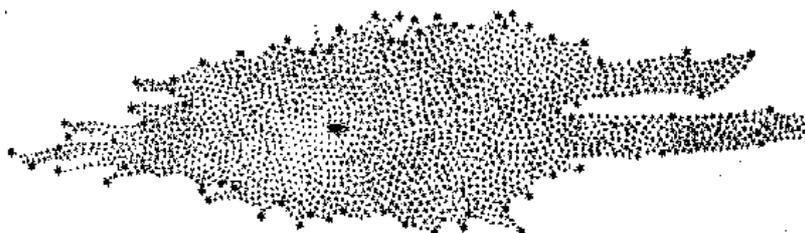


Figure 23.2: Représentation de la Voie Lactée selon Herschel.

La Galaxie de Kapteyn

En 1918, l'astronome hollandais **J.C. Kapteyn** (1851-1922) décide de quantifier les résultats plutôt qualitatifs d'Herschel en utilisant un échantillon de comptage d'étoiles beaucoup plus important.

Ceci l'amène à conclure que les étoiles ne sont pas distribuées uniformément mais que leur nombre diminue avec la distance r à partir du Soleil. Comme cette diminution se produit dans toutes les directions, Kapteyn déduit que *le Soleil doit être au centre de la distribution*. Son modèle est reproduit à la **Figure 23.3**. Dans ce modèle le rapport des axes est de $\sim 5:1$. Bien que la conclusion de Kapteyn était la seule conclusion logique avec les connaissances de l'époque, nous verrons bientôt que la véritable explication était plutôt que la lumière des étoiles lointaines est graduellement diffusée et absorbée par le gaz et la poussière interstellaire dans le disque de la Galaxie.

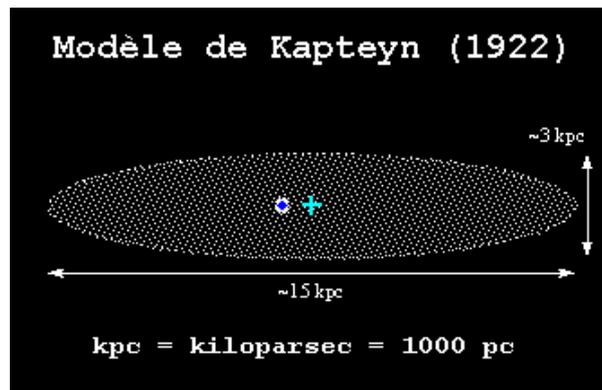


Figure 23.3: Modèle et échelle de l'Univers selon Kapteyn

La Galaxie de Shapley

L'honneur de découvrir la vraie nature de la Galaxie revient à l'astronome américain **Harlow Shapley** (1885-1972) en 1918. Il s'intéresse à la distribution spatiale des amas globulaires dans notre galaxie. Les **amas globulaires** sont des regroupements compacts formés de plusieurs milliers d'étoiles (10 000 à 1 millions d'étoiles) qui entourent notre galaxie. Grâce à la relation Période-Luminosité des étoiles Céphéïdes, découverte par **Henrietta Leavitt** quelques années auparavant, il mesure la distance de ces amas et étudie leur distribution. Il trouve que:

- Les amas ne sont pas distribués uniformément en longitude (voir appendice D) mais montre une forte concentration dans la direction de la constellation du Sagittaire.
- Les amas sont distribués uniformément en latitude (voir appendice D), c'est-à-dire de chaque côté du plan de la Galaxie.

Les **Figures 23.4** et **23.5** illustrent les résultats originaux de Shapley, tirés de son article de 1918 paru dans la revue *Astrophysical Journal*.

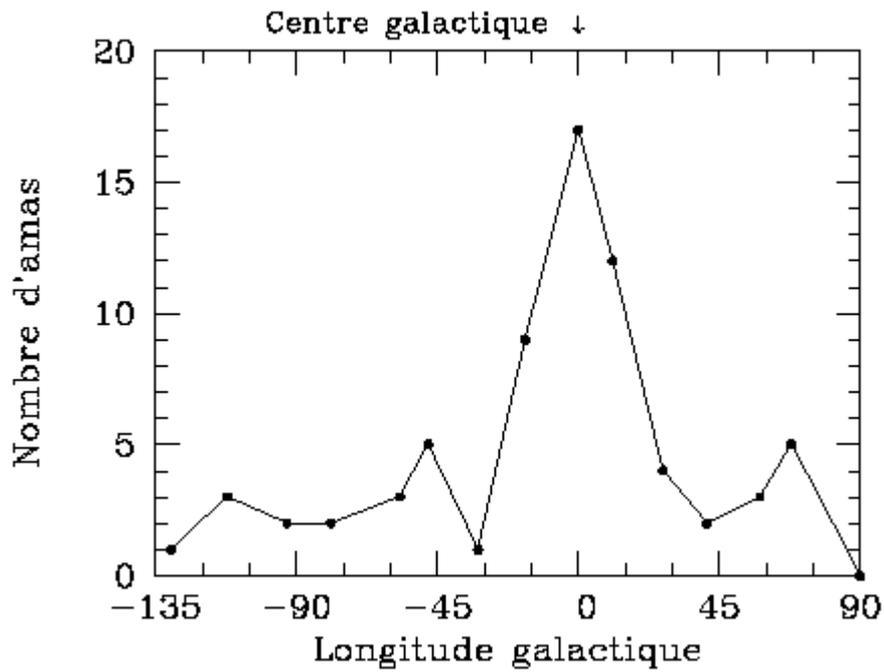


Figure 23.4: Distribution du nombre d'amas globulaires en fonction de la longitude (de l'époque); il y a une concentration d'amas vers le centre.

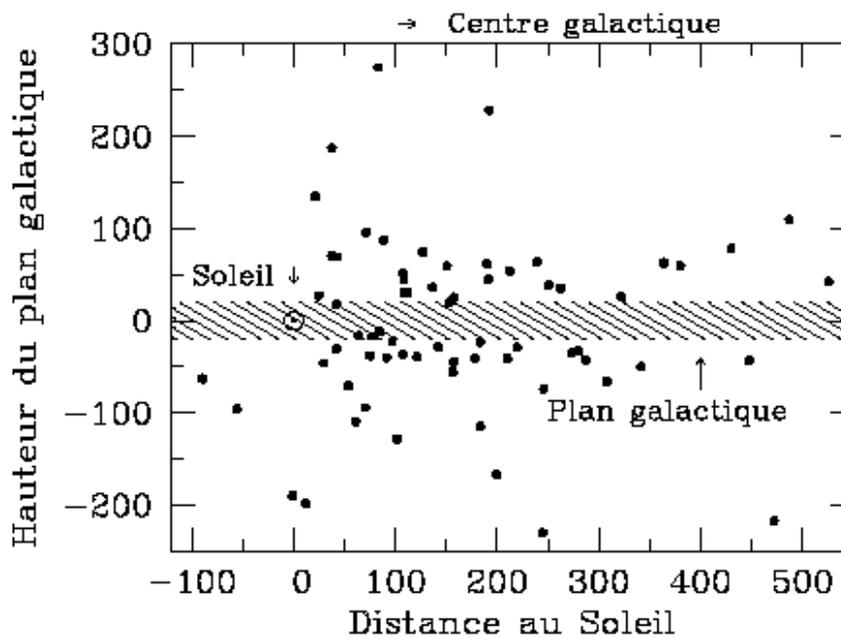


Figure 23.5: Distribution des amas en fonction du plan de la Galaxie

A partir de ces résultats, Shapley en vient à la conclusion que *si les amas globulaires sont distribués uniformément autour du centre de la Galaxie, ce centre ne peut être à la position du Soleil mais plutôt dans la direction du Sagittaire, à quelques 14 kpc de notre étoile*. Qualitativement, le modèle de Shapley est encore valable aujourd'hui et sa méthode a encore été utilisée jusqu'à tout récemment pour déterminer la distance entre le Soleil et le centre de la Galaxie ($8 \leq r_{\odot} \leq 10$ kpc). Le seul problème avec son modèle en était un d'échelle: il a surestimé les distances d'un facteur 1.5-2.0.

Le modèle de Shapley signifie la mort du modèle centré sur la position du Soleil au centre de la Galaxie de la même façon que le modèle de Copernic a entraîné la mort du modèle *géocentrique* du système solaire.

Il ne restait qu'à expliquer la contradiction entre les résultats de Shapley et ceux de Kapteyn. Tant les résultats de Shapley que ceux de Kapteyn s'appuyaient sur des observations fiables. La différence entre les deux est que les objets observés par Shapley étaient situés pour la plupart au dessus ou en dessous du plan galactique, tandis que ceux observés par Kapteyn se trouvaient dans le plan. Or, comme nous le verrons à la prochaine section, le gaz et la poussière interstellaire, principalement concentrés dans le plan de notre galaxie, absorbent en partie la lumière des étoiles lointaines situées dans le plan. Nous avons donc l'impression d'être situés au centre d'une distribution aplatie d'étoile.

Découverte de la poussière et du gaz interstellaires

En 1931, l'astronome **Robert J. Trumpler** (1886-1956) montre d'une façon convaincante que la lumière émise par une étoile est obscurcie au cours de son trajet vers nous.

La matière responsable de cette obscuriation est formée de grains de poussière dont la composition chimique va des silices (p.e.: grains de sable) aux composés de carbone (p.e.: graphite) et dont la dimension moyenne est de l'ordre de $r_g \approx 0.1 \mu\text{m}$ (10^{-5} cm).

L'obscuriation de la lumière stellaire est en fait une combinaison de deux phénomènes: une absorption véritable par les grains et une diffusion de la lumière hors de la ligne de visée. C'est l'ensemble de ces deux effets qu'on appelle **l'extinction interstellaire**. De plus, à cause de la taille des grains légèrement plus petite, en moyenne, que la longueur d'onde de la lumière visible ($0.1 \mu\text{m}$ vs $0.5 \mu\text{m}$), la lumière rouge ($0.6-0.7 \mu\text{m}$), correspondant à des longueurs d'onde plus grandes, est moins affectée que la lumière bleue ($0.3-0.4 \mu\text{m}$). Ceci cause, en plus de l'extinction, un *rougissement* de la lumière stellaire.

Il n'y a pas que de la poussière dans le milieu interstellaire, mais il y a aussi du gaz. En fait, son existence a été mise en évidence presque 30 ans plus tôt par J.F. Hartmann (1865-1936). Celui-ci s'aperçoit qu'un ensemble de raies d'absorption étroites du calcium (CaII, ionisé une fois) ne subit pas les décalages Doppler périodiques observés pour d'autres raies plus larges dans le spectre d'une binaire spectroscopique. En d'autres mots, alors que les longueurs d'onde des raies d'absorption larges produites par les photosphères chaudes des étoiles d'un système binaire se déplacent vers le rouge puis vers le bleu à cause du déplacement des étoiles sur leur orbite (tantôt en s'approchant de nous tantôt en s'éloignant de nous), il y a aussi des raies d'absorption plus étroites qui demeurent stationnaires bien qu'à des longueurs d'onde différentes des longueurs d'onde au repos. Cette situation est illustrée à la **Figure 23.6**. Hartmann conclut correctement que ces raies étroites et stationnaires sont causées par des nuages interstellaires de gaz froid entre nous et le système binaire.

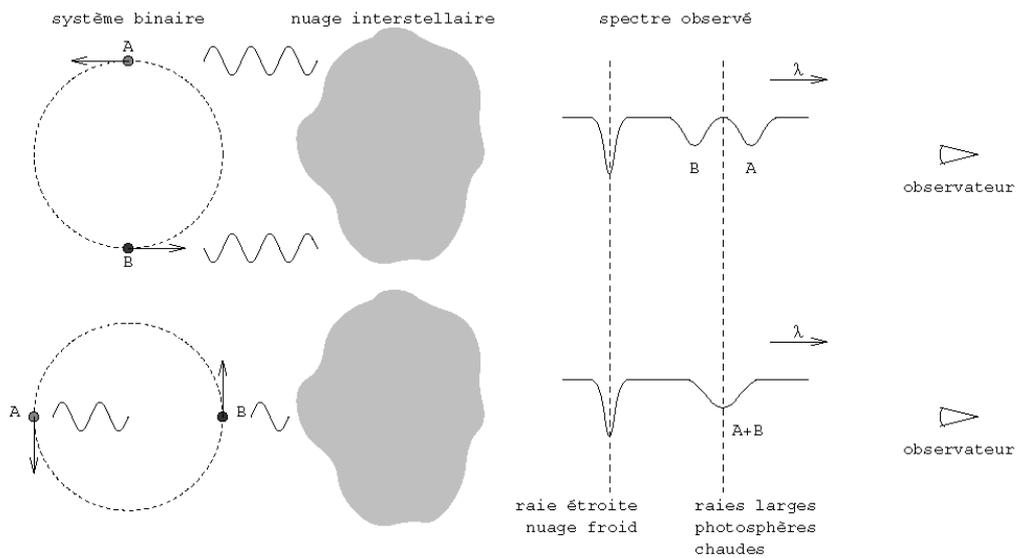


Figure 23.6: Illustration de spectres provenant d'un système d'étoiles binaire et d'un nuage froid interstellaire

Composantes de la Galaxie

Une photographie du centre de la Voie Lactée est présentée à la **Figure 23.7**. Celui-ci devrait être très brillant mais la poussière interstellaire nous empêche de le distinguer clairement.

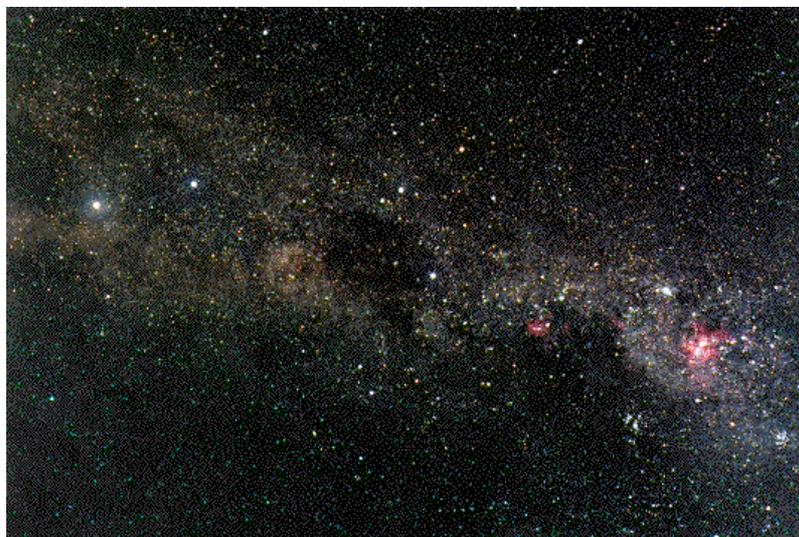


Figure 23.7: Photographie du centre de la Voie Lactée obtenue dans le domaine visible

Si par contre on regarde vers le centre de la galaxie à des longueurs d'onde moins affectées par l'extinction interstellaire (p.ex. l'infrarouge), on constate qu'il y a effectivement un renflement du disque. La galaxie paraît bien comme une galaxie spirale vue par la tranche. La **Figure 23.8**, obtenue par le satellite *COBE* dans le domaine de l'infrarouge lointain permet de bien voir le bulbe de notre galaxie.



Figure 23.8: La Voie Lactée vue par le satellite *COBE*

Si on pouvait être à l'extérieur de la Voie Lactée, elle ressemblerait probablement aux schémas de la **Figure 23.9** qui nous la montre telle que vue par le dessus et par la tranche. On y voit le Soleil à environ 9 ± 1 kpc du centre, à la limite intérieure d'un bras spiral. Ce bras est appelé Orion parce qu'on peut voir les amas d'étoiles jeunes les plus brillantes qui le composent dans la direction de la constellation d'Orion. Les amas jeunes des **Hyades** et des **Pléiades**, que l'on peut distinguer facilement à l'oeil nu, font partis du même bras spiral que le Soleil. On distingue également les trois composantes principales de la Galaxie:

- 1- Le **bulbe** au centre, d'allure plus ou moins sphérique et composé principalement d'étoiles vieilles.
- 2- Le **disque**, beaucoup plus aplati, a un diamètre de $\sim 30\text{-}40$ kpc. Il est composé principalement d'étoiles jeunes et de gaz. Alors que le disque stellaire a une épaisseur de $\sim 400\text{-}600$ pc, le disque gazeux n'a qu'environ $\sim 100\text{-}125$ pc d'épaisseur. Les étoiles les plus jeunes sont regroupées dans les bras spiraux.
- 3- Finalement, le **halo**, composé d'étoiles vieilles, a une distribution sphérique. Les habitants les plus connus du halo sont les amas globulaires qui sont des amas concentrés de plusieurs centaines de milliers d'étoiles vieilles et dont Shapley s'est servi pour déterminer la structure de la Voie Lactée.

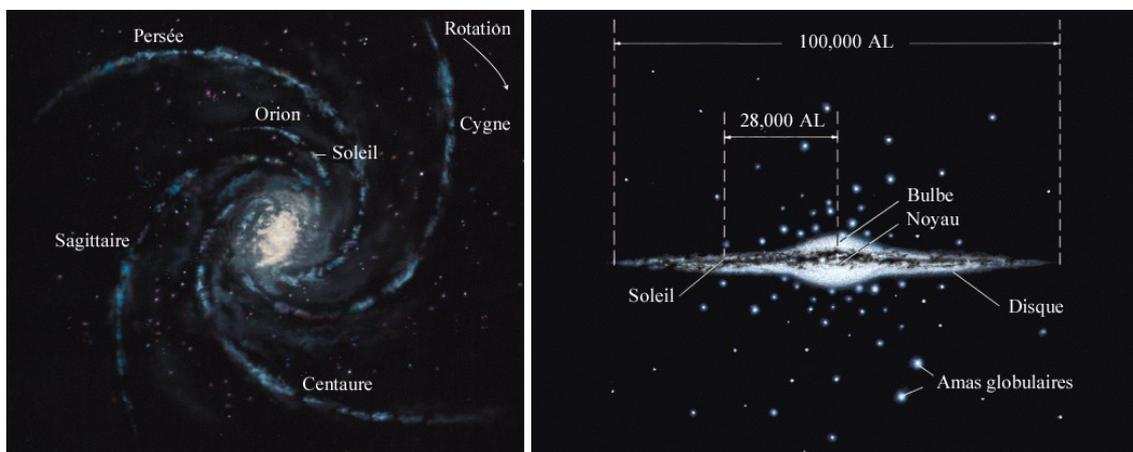


Figure 23.9: Apparences de notre Galaxie telle que vue par dessus et par la

Populations stellaires

Le concept de populations stellaires a déjà été abordé au [Chapitre 16](#) pour distinguer les étoiles *jeunes* et riches en métaux, appelées étoiles de **population I**, des étoiles *vieilles* et pauvres en métaux de **populations II**.

On doit l'introduction du concept de populations stellaires à l'astronome **Walter Baade** (1893-1960) dans la discussion des résultats de ses recherches sur la galaxie d'Andromède et de ses deux satellites, effectuées durant la Deuxième Guerre mondiale. Ces deux populations ne se différencient pas uniquement par leur *composition*, mais aussi par leur *âge*, leur *distribution* et leur *cinématique*. Afin de mémoriser plus facilement ces deux populations d'étoiles, il suffit de se rappeler que les étoiles de Pop I sont les premières avec lesquelles les astronomes ont été familiers puisqu'on les retrouve près du Soleil; les étoiles de Pop II ayant été découvertes en deuxième puisqu'elles sont beaucoup plus distantes.

L'âge des populations stellaires est très intrigant et nous donne sûrement des indices sur la façon dont la Galaxie s'est formée. Les étoiles de Pop I, comme le Soleil, ont des âges variant de quelques milliards d'années ($\text{âge}_{\odot} = 4.5$ milliards d'années) à zéro puisque des étoiles sont encore en train de se former dans les bras spiraux. On évalue l'âge du disque à environ 12 ± 1 milliards d'années sur la base du taux de refroidissement des étoiles naines blanches. D'un autre côté, l'étude des diagrammes H-R (voir [Chapitre 17](#)) d'amas d'étoiles de Pop II ([amas globulaires](#)) montrent que ces étoiles ont *toutes* environ 14 ± 4 milliards d'années. C'est donc une indication que les amas globulaires et les autres objets du halo se sont tous formés à une même époque il y a environ 1.4×10^{10} années.

Tel qu'illustré à la **Figure 23.10**, les étoiles de Pop I et II, en plus de leur composition et de leur âge, se distinguent également par leur distribution. Les objets (étoiles, nébuleuses, régions HII, etc...) de Pop I sont confinés dans un disque plat alors que les objets de Pop II sont distribués dans une sphère centrée sur le noyau de la Galaxie. Leurs positions sont reportées sur une planisphère qui a comme centre celui de la Galaxie; la ligne horizontale correspond au plan galactique.

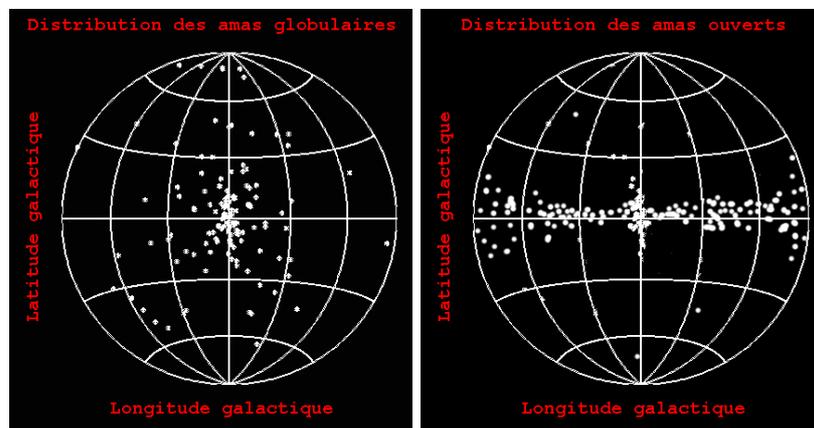


Figure 23.10: Distribution apparente des amas ouverts et des amas globulaires

Cette différence dans la distribution a nécessairement des conséquences sur la cinématique (vitesse de déplacement) des objets des deux populations. Si les objets de Pop I sont confinés dans un disque plat, c'est donc dire qu'ils se déplacent **tous ensemble** autour du centre de la galaxie, le plan de leur orbite étant pratiquement parallèle au plan du disque. Ceci ne veut pas dire, comme nous le verrons, que les étoiles auront toutes la même vitesse de rotation, peu importe leur distance du centre (dans l'environnement du Soleil, cette vitesse de rotation est $v_{\odot} \approx 230 \pm 10$ km/sec). Cela veut plutôt dire qu'à une distance du centre donnée, toutes les étoiles auront à peu près la même vitesse et se dirigeront dans à peu près la même direction.

Milieu interstellaire

Le gaz et la poussière interstellaires sont loin d'être distribués uniformément mais se retrouvent surtout dans des nuages denses (nébuleuses) de différentes températures. On identifie principalement 4 types de régions caractérisées par l'état physique et la température du gaz.

- **1-** Les régions froides des nuages sombres et denses de poussière et de gaz à environ 10 K appelées **nuages moléculaires**.

Dans ces régions, le gaz existe sous forme moléculaire. On y retrouve des molécules simples comme l'hydrogène moléculaire H_2 , le monoxyde de carbone (CO), et de l'eau (H_2O). Il y a aussi des molécules plus complexes comme l'alcool éthylique (CH_3CH_2OH). On a recensé, jusqu'à maintenant près de 120 molécules interstellaires.

On pense que la poussière, présente dans ces régions, agit comme catalyseur ("agence de rencontres") pour la formation de molécules tout en les protégeant du rayonnement UV qui pourrait les dissocier. De plus, comme les grains de poussière peuvent émettre de la radiation (observée dans l'infrarouge) plus facilement que le gaz, les régions contenant beaucoup de poussière vont être plus froides que les nuages environnants.

Plus une région est dense et froide, plus il est facile pour des étoiles de se former par effondrement gravitationnel. Les nuages moléculaires sont donc des régions très importantes de formation d'étoiles. Ces régions subsistent typiquement quelques dizaines de millions d'années formant des étoiles en différentes parties du nuage. Finalement, suffisamment d'étoiles chaudes, de type O et B, sont formées et vont chauffer le nuage moléculaire pour le transformer en notre troisième type de région (régions HII).

- **2-** De grandes régions à environ 100 K composées principalement d'hydrogène neutre appelées **nuages HI**.

Ces nuages sont très utiles pour déterminer les vitesses de rotation (courbe de rotation) à partir du centre de la Galaxie jusqu'au rayon de l'orbite solaire. On estimait jusqu'à tout récemment que les nuages HI contribuaient ~85 % de la masse totale en gaz de la Galaxie. Cependant, l'incertitude sur la quantité d'hydrogène moléculaire, H_2 , nous fait maintenant considérer ce chiffre comme une limite supérieure.

- **3-** Des régions chaudes à environ 10 000 K entourant des étoiles chaudes de type O et B et appelées **régions HII**.

Les photons ultraviolets de ces étoiles chaudes excitent les atomes d'hydrogène environnants (leur électron passe à des niveaux d'énergie plus élevés - voir chapitre 4) ou même arrachent leur électron pour les transformer en hydrogène ionisé HII, d'où le nom de ces régions.

- **4-** Finalement, des régions très chaudes appelées **super-bulles**.

Ces régions nous ont été révélées par des observations dans le domaine des rayons-X. Il s'agit de gaz très chaud à des températures de l'ordre de $\sim 10^6$ K. On croit que ces nuages sont chauffés par l'expansion violente du gaz projeté par des supernovae dans l'espace interstellaire.

Le meilleur exemple d'une telle super-bulle est Cassiopée A, une coquille de gaz chaud en expansion rejetée par une supernova qui fut visible vers 1680. Bien que peu impressionnante dans la lumière visible, Cas A est une source X très forte. On croit que l'étoile originelle devait avoir une masse de ~ 10 -30 M_{\odot} .

Ceci résume assez bien les différentes propriétés de la matière interstellaire. Un dernier point à noter est que toute la masse sous forme gazeuse ne représente qu'environ 10% de la masse sous forme d'étoiles ($\sim 10^{10} M_{\odot}$) et que la masse sous forme de poussière ne représente qu'environ 1% de la masse sous forme gazeuse ($\sim 10^8 M_{\odot}$).

Structure de la Galaxie

Maintenant que nous avons une bonne idée de la forme générale de la Galaxie et une connaissance de ses différentes composantes, nous allons étudier plus en détail sa structure par l'analyse des vitesses de ses composantes. La première constatation est que la Galaxie ne tourne pas comme les rayons d'une roue solide. Si, par exemple, on compare les étoiles qui sont sur des orbites plus grandes que l'orbite solaire à celles qui sont sur des orbites plus près du centre, les premières semblent prendre du retard sur les dernières. Ceci produit un effet de cisaillement du disque de la Galaxie que l'on appelle **la rotation différentielle**. On peut détecter cette rotation différentielle par l'observation des *mouvements propres* et des *vitesses radiales* des étoiles autour de nous.

Rotation de la Galaxie

La **Figure 23.11** nous aide à comprendre l'effet de la rotation différentielle sur les vitesses radiales d'étoiles dans différentes directions dans le plan de la Galaxie. Supposons que les étoiles ont des orbites circulaires (ce qui n'est pas tout à fait exact). Si on regarde dans la direction du centre galactique et de l'anticentre, les étoiles (#3, #7) se déplacent perpendiculairement à notre ligne de visée et n'ont, en moyenne, aucune vitesse radiale. La situation est la même pour les étoiles (#1, #5) qui se déplacent sur la même orbite que le Soleil et donc à la même vitesse. D'un autre côté, si on regarde à 45° du centre de la Galaxie, les étoiles vont soit sembler s'approcher (#2, #6) ou sembler s'éloigner (#4, #8) de nous. C'est vraiment l'observation des vitesses radiales dans toutes les directions qui nous a permis de découvrir cette rotation différentielle très différente de la rotation d'un corps solide.

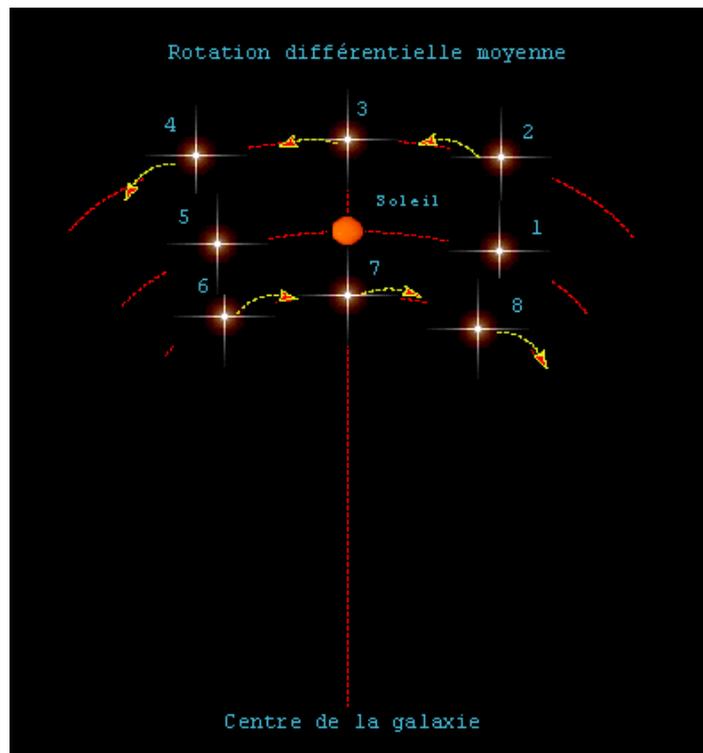


Figure 23.11: Mouvements des étoiles produits par la rotation différentielle

Une mesure des vitesses orbitales en fonction du rayon (distance du centre) est ce qu'on appelle une **courbe de rotation**.

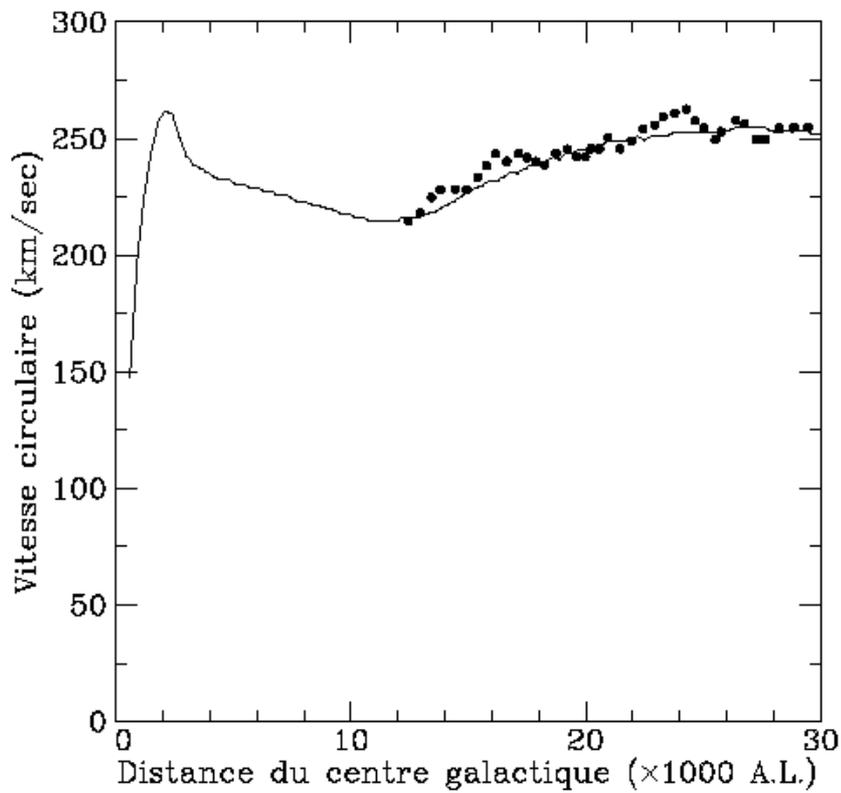


Figure 23.12: Courbe de rotation de la Galaxie

Masse de la Galaxie

A la distance du Soleil ($r_{\odot} \approx 9$ kpc), on a mesuré une vitesse de rotation de $v_{\odot} = 230 \pm 10$ km/sec. Sachant que la définition d'une période est $P = 2\pi r / v$, c'est-à-dire la circonférence divisée par la vitesse de rotation, on trouve que

$$P_{\odot} = \frac{2\pi r_{\odot}}{v_{\odot}} = \frac{2\pi \times 2.8 \times 10^{17} \text{ km}}{230 \text{ km/s}} \approx 2.4 \times 10^8 \text{ années}$$

Le Soleil prend donc 240 millions d'années à faire une rotation complète autour du centre de la Galaxie. Puisque l'on estime l'âge du Soleil à environ 4.5 milliards d'années, celui-ci a complété environ 20 révolutions depuis sa formation. Sur le *calendrier galactique*, le Soleil est donc âgé de 20 ans et les premiers dinosaures ne sont apparus qu'il y a environ 1 an! ne sont apparus qu'il y a environ 1 an!

En faisant l'hypothèse simplificatrice que toute la masse intérieure au rayon solaire est concentrée en un point, on peut ramener l'estimation de la masse de la Galaxie jusqu'à $r = r_{\odot}$ à un problème à deux corps comme le cas du Soleil avec une de ses planètes. Dans ce cas, la troisième loi de Kepler, telle que modifiée par Newton peut être utilisée et on obtient ainsi

$$M_{Gal} \approx 10^{11} M_{\odot}$$

Ce calcul ne donne cependant pas la masse totale de la Galaxie. L'astrophysicien canadien Scott Tremaine a estimé cette masse *totale* de la Galaxie, il y a quelques années, en étudiant la dynamique des objets du halo de la Galaxie. Sans entrer dans les détails du calcul, il suffit de mentionner qu'il a obtenu

$$M_{Gal} \approx 10^{12} M_{\odot}$$

pour un rayon total estimé du halo de la Galaxie de 50 kpc. Cette masse est environ 10 fois plus grande que la somme de toutes les composantes connues, d'où le problème connu sous le nom de **masse manquante**. Nous discuterons de ce problème au prochain chapitre.

Pourquoi la Galaxie a-t-elle des bras spiraux?

Cette question a hanté les astronomes pendant longtemps et continue de le faire. Bien que les preuves, en ce qui concerne notre Galaxie, ne datent que des années 50, on avait observé depuis longtemps les patrons de bras spiraux bien définis dans les autres galaxies. On peut tout d'abord essayer de se servir de notre expérience de tous les jours pour tenter d'expliquer cette structure si dominante dans les

galaxies spirales.

Prenons l'exemple d'un arrosoir rotatif de jardin. L'eau qu'il projette a bien la forme de bras spiraux. Le problème cependant avec ce modèle est que le matériel qui forme les bras spiraux de la Galaxie n'a pas de mouvement radial net vers l'extérieur comme les gouttes d'eau de l'arrosoir. En d'autres mots, la Galaxie n'est pas en expansion, mais est plutôt un système en équilibre en ce sens que la force gravitationnelle qui cherche à tirer la matière vers le centre est exactement contrebalancée par la force centrifuge de rotation qui cherche à tirer la matière vers l'extérieur.

Une meilleure analogie est celle de la tasse de café dans laquelle on mélange de la crème. Parce que la surface du café tourne plus rapidement au centre que sur les bords (où elle est ralentie par la force de friction sur le bord de la tasse), on peut dire que, tout comme les étoiles dans la Galaxie, la crème est en rotation différentielle. Le résultat est que la crème développe rapidement une structure spirale. Cependant, pour qui a le moindrement déjà observé sa tasse de café, on sait très bien qu'en peu de temps ces bras spiraux vont complètement s'enrouler sur eux-mêmes et disparaître.

L'équivalent de ce phénomène dans la Galaxie est appelé le *dilemme de l'enroulement*, et est illustré à la **Figure 23.13**. On voit qu'à cause de la rotation différentielle, si à un certain moment on a un nuage intérieur et extérieur à une position identique sur leur orbite respective, après environ $\sim 10^8$ années, le nuage intérieur aura effectué une rotation complète alors que le nuage extérieur n'aura effectué qu'un quart de tour. Comme on a déjà évalué l'âge du disque à $\sim 10^{10}$ années, ceci veut dire que typiquement des bras spiraux devraient avoir l'allure de spirales de 50-100 tours. Ce résultat contraste avec ce qui est observé dans les autres galaxies extérieures qui n'ont typiquement que 1 ou 2 tours.

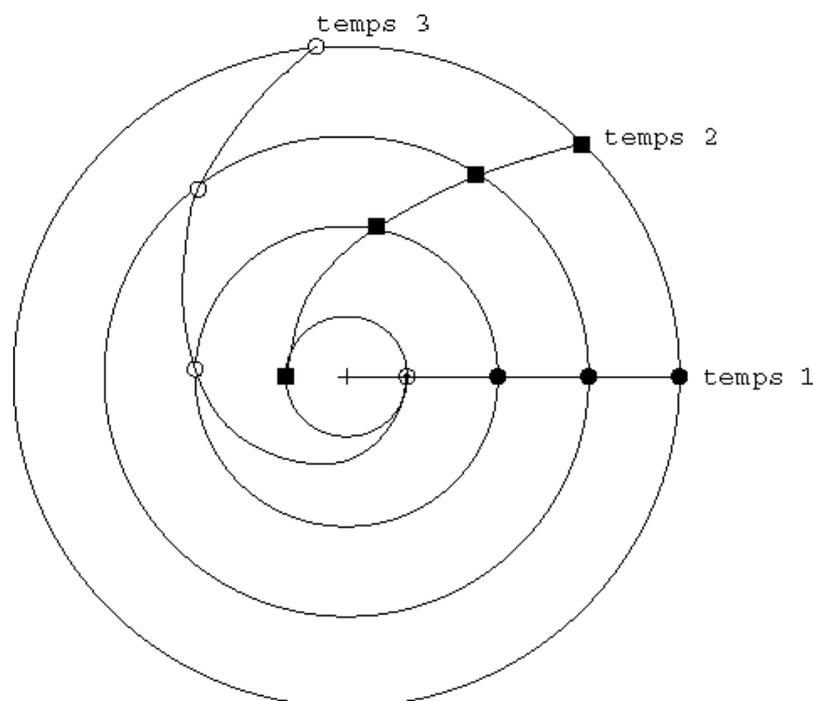


Figure 23.13: La structure rigide des bras spiraux et la rotation différentielle

L'autre aspect intrigant des bras spiraux est le *dilemme de l'âge*. Ce qui rend les bras spiraux si contrastés (très lumineux par rapport aux régions inter-bras), est qu'ils sont composés principalement d'étoiles massives O et B qui n'ont cependant qu'une espérance de vie de quelques millions d'années alors que la Galaxie a

environ 10 milliards d'années. Les bras spiraux ne peuvent donc pas être constitués depuis le début du même matériel qui aurait gardé la même forme depuis la formation du disque. Les bras spiraux semblent plutôt délimiter des régions privilégiées dans la Galaxie où de nouvelles étoiles se forment à partir du gaz et de la poussière qui s'y accumulent. Ces régions privilégiées ne peuvent cependant être en rotation différentielle comme les étoiles car elles seraient détruites. Alors quelle est la solution ?

Depuis les années 60, deux théories se font concurrence pour expliquer les structures observées: la **théorie des ondes de densité** et la **théorie de réactions en chaîne**. La théorie d'ondes de densité met l'accent sur le fait que les bras spiraux ne sont pas des structures fixes composées de groupes spécifiques d'étoiles mais plutôt des ondes qui se propagent dans le matériel galactique.

Prenons l'exemple d'une vague sur l'océan qui est justement un phénomène ondulatoire. A un certain moment, la crête de la vague est constituée de certaines molécules d'eau et, quelques instants plus tard, elle est constituée d'autres molécules. Pourtant, pour un observateur extérieur, la vague lui apparaît comme une entité solide se déplaçant par elle-même. De la même façon, un bras spiral serait une région de concentration permanente de matériel (gaz et poussière) avec des étoiles individuelles entrant dans le bras, passant au travers et en ressortant de l'autre côté.

Pour bien saisir l'idée de la théorie des ondes de densité, comparons les étoiles d'une galaxie en rotation différentielle à des autos sur les voies d'une autoroute ceinturant une grande ville. Chaque voie possède une limite de vitesse différente. Supposons que la voirie décide de déneiger la voie de droite en se déplaçant nécessairement à une vitesse réduite. Notre expérience nous montre que le résultat sera une augmentation de la densité locale d'autos (une congestion) derrière les camions de voirie sans pour autant que cette région de concentration maximale ne soit constituée toujours des mêmes autos. Bien que les autos individuelles se déplacent au travers de la zone d'augmentation de densité plus vite que les camions de la voirie, un avion, filmant la scène du haut des airs, ne verrait que la concentration maximale d'autos se déplaçant à la vitesse des camions de la voirie. La vitesse à laquelle voyagent les autos individuelles et la vitesse des camions de la voirie peuvent être très différentes. On dirait alors que la congestion représente l'onde de densité des autos et que la vitesse de déplacement du maximum de densité (vitesse de l'onde) peut être très différente de la vitesse des autos individuelles.

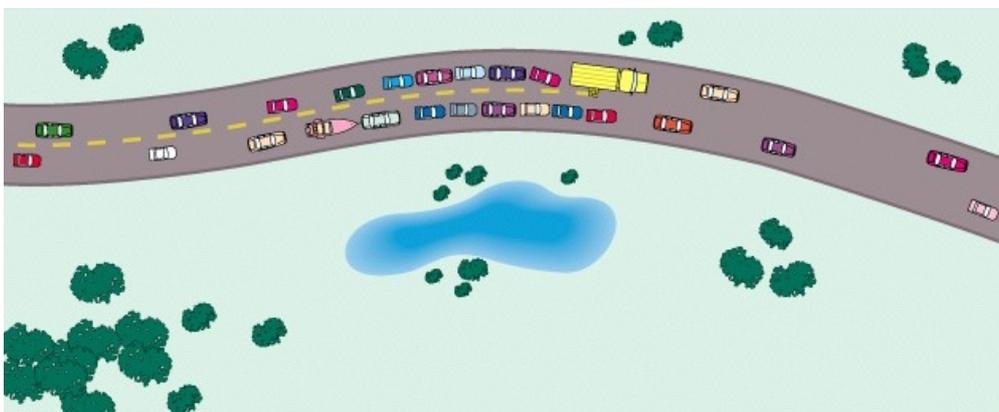


Figure 23.14: L'onde de densité sur l'autoroute

De la même façon, le gaz galactique tend à s'empiler dans les bras spiraux,

atteignant des densités environ 10 % plus grandes qu'entre les bras. On a vu que des densités élevées entraînent l'effondrement gravitationnel, expliquant pourquoi la formation d'étoiles se fait principalement dans les bras. Ceci explique alors pourquoi les bras sont si contrastés puisque les étoiles massives nouvellement formées sont les étoiles les plus brillantes de la Galaxie.

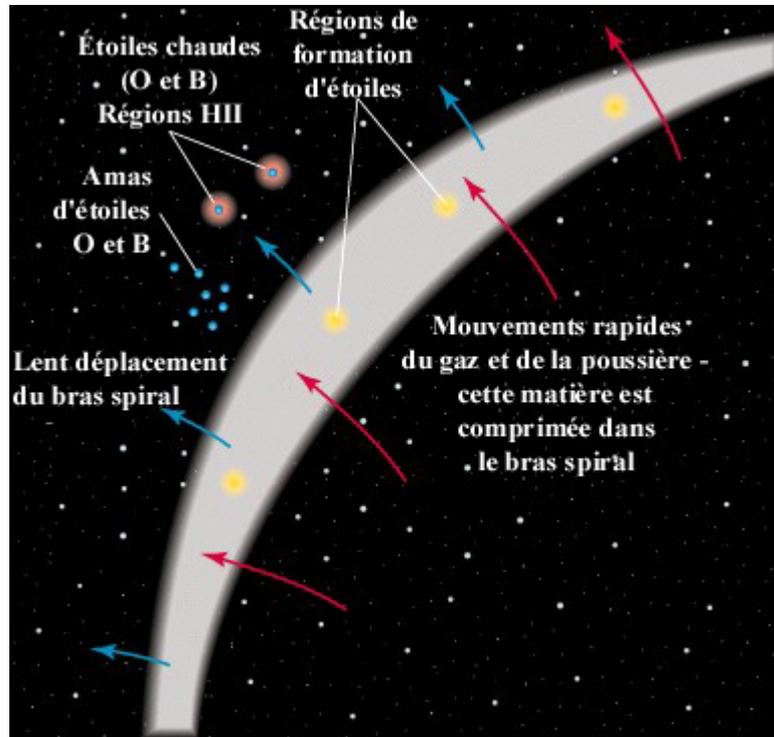


Figure 23.15: L'onde de densité dans la galaxie

Selon la théorie des ondes de densité, le patron de bras spiraux ne tourne pas à la même vitesse que les étoiles qui le constituent, mais plus lentement; avec des étoiles différentes constituant les bras à différentes époques. En 1959, l'astronome Bertil Lindblad (1895-1965) a estimé que le patron spiral de notre Galaxie a une période orbitale d'environ 480 millions d'années ($r > 4$ kpc), soit deux fois la période orbitale du Soleil.

La deuxième modèle, la théorie de réactions en chaîne (ou sursauts de formation d'étoiles), la formation d'étoiles n'est pas un phénomène uniforme et continu depuis la formation de la Galaxie. Il s'agit plutôt d'une suite de réactions en chaîne. La formation d'étoiles se fait dans les amas ouverts et le gaz en expansion provenant des supernovae massives d'un amas comprime les nuages de poussière et de gaz environnants entraînant la formation de nouveaux amas qui à leur tour perpétuent la chaîne.

Donc, pendant des périodes pouvant aller jusqu'à 100 millions d'années, une région importante de nouveaux amas contenant des étoiles massives brillantes et chaudes, mais de courtes durées de vie, peut être produite dans une région quelconque de la Galaxie. Pendant la rotation de la Galaxie, en cent millions d'années, la partie intérieure de cette région va prendre de l'avance sur la partie extérieure à cause de la rotation différentielle et la région d'étoiles nouvelles brillantes va être cisailée en un segment de bras spiral.

Après quelques centaines de millions d'années, cette région va avoir épuisé tout le matériel nécessaire pour former de nouvelles étoiles et va graduellement devenir

moins brillante (*s'éteindre*). C'est ce qui expliquerait pourquoi les patrons spiraux n'ont pas plus de 1-2 tours. Cette théorie explique également pourquoi les bras spiraux apparaissent fréquemment comme étant faits de multiples segments plutôt que comme un patron continu du centre jusqu'au bord de la galaxie.

En un sens, cette théorie ressemble à notre modèle de la tasse de café, mais dans laquelle de nouvelles gouttes de crème sont ajoutées d'une façon intermittente plutôt que de mettre toute la crème au début.

Comment la Galaxie s'est-elle formée?

C'est une autre question à laquelle les astronomes n'ont pas encore apporté de réponse définitive. Cependant, on peut certainement à partir des propriétés que l'on vient de décrire essayer d'imaginer le scénario le plus probable. La première constatation que l'on peut faire, c'est que la forme aplatie de notre Galaxie suggère que le processus de base doit être similaire à celui qui a formé notre système solaire (voir [Chapitre 13](#)).

Selon le modèle traditionnel, présenté à la **Figure 23.16**, la Galaxie s'est formée à partir d'un seul nuage en rotation. Puisque les plus vieilles étoiles que l'on connaisse (les étoiles du halo et celles des amas globulaires) sont distribuées dans une sphère centrée sur le noyau de la Galaxie, nous pouvons supposer que le nuage protogalactique était sphérique. Parce que les étoiles les plus vieilles du halo ont 13-15 milliards d'années, on estime que l'effondrement du nuage initial s'est produit vers cette époque. L'effondrement du nuage amena la formation d'un disque mince, comme ce fut le cas dans les phases initiales de formation du système solaire. Les étoiles qui se sont formées loin du disque avant que le nuage ne s'effondre, n'ont pas participé à l'effondrement et continuent d'orbiter dans le halo.

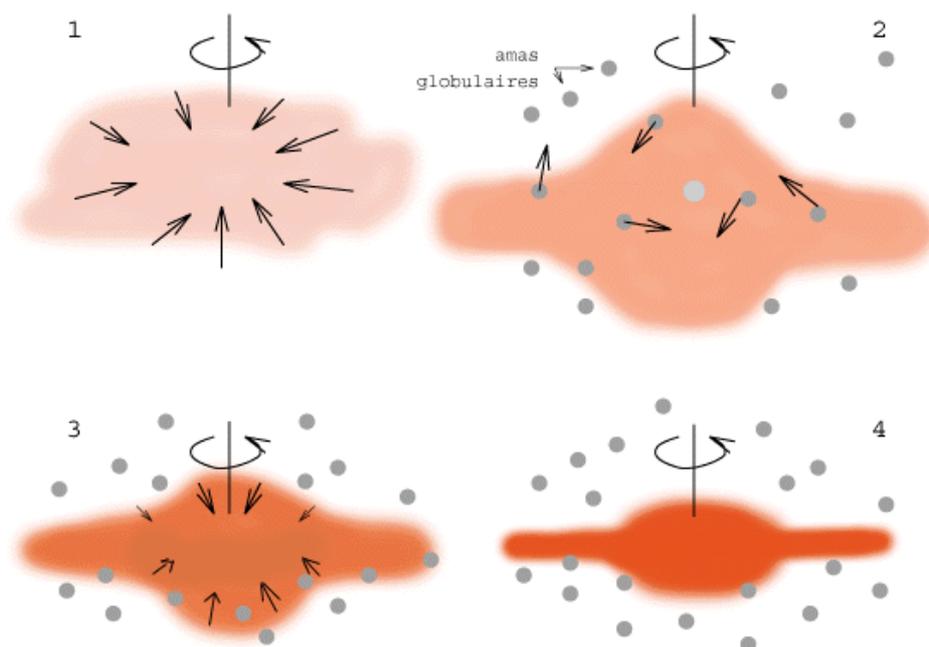


Figure 23.16: Modèle de formation de la Galaxie à partir d'un nuage initial de gaz en rotation

Les forces gravitationnelles à l'intérieur du disque amène le gaz à se fragmenter en plus petits nuages ayant la masse d'amas d'étoiles. Par la suite, ces nuages se fragmentent à nouveau pour former des étoiles individuelles. Puisque les étoiles les plus vieilles du disque sont pratiquement aussi vieilles que celles du halo, l'effondrement a dû être rapide, probablement de l'ordre de quelques centaines de millions d'années.

Quelques étoiles de faible masse, membres des premières générations d'étoiles brillent toujours. L'abondance des éléments plus lourds que l'hélium dans ces très vieilles étoiles (Pop II) est 1% ou moins de l'abondance en éléments lourds dans le Soleil. Les étoiles plus massives des premières générations ont depuis longtemps épuisé leur réserve nucléaire et cessé de briller. Ces étoiles ont produit des éléments lourds dans leur intérieur qui ont été recyclés dans le milieu interstellaire et qui ont par la suite été incorporés dans de nouvelles générations d'étoiles (Pop I) qui ont un plus haut contenu en éléments lourds. Ceci nous amène alors à l'état actuel de la Galaxie.

Yannick Dupont
V2.0, été 2001