

Les galaxies et leur évolution

1. La galaxie « Voie Lactée » : c'est notre Galaxie

Pour un observateur éloigné, notre Galaxie ressemblera à un disque avec un bulbe central.

diamètre env. 30000 pc	(1 pc = $3.0857 \cdot 10^{16}$ m)
épaisseur env. 400 pc	(1 pc = 3.26 a.l.)

1.1. Découverte du disque galactique

Democritus (env. 400 av. J.-C.) décrit la bande qu'est la Voie Lactée comme une région dense en étoiles non résolues.

En 1610, Galileo confirma l'idée de Democritus, grâce à l'aide de ses réfracteurs.

En 1750, le théologien anglais Thomas Wright faisait l'hypothèse correcte que la Galaxie devait être un arrangement stable d'étoiles.

De 1750 à 1760, Immanuel Kant prouva cela plus mathématiquement en usant des lois de Newton.

1.2. Les travaux de William Herschel

En 1773, W. Herschel abandonna la musique pour se consacrer à l'astronomie.

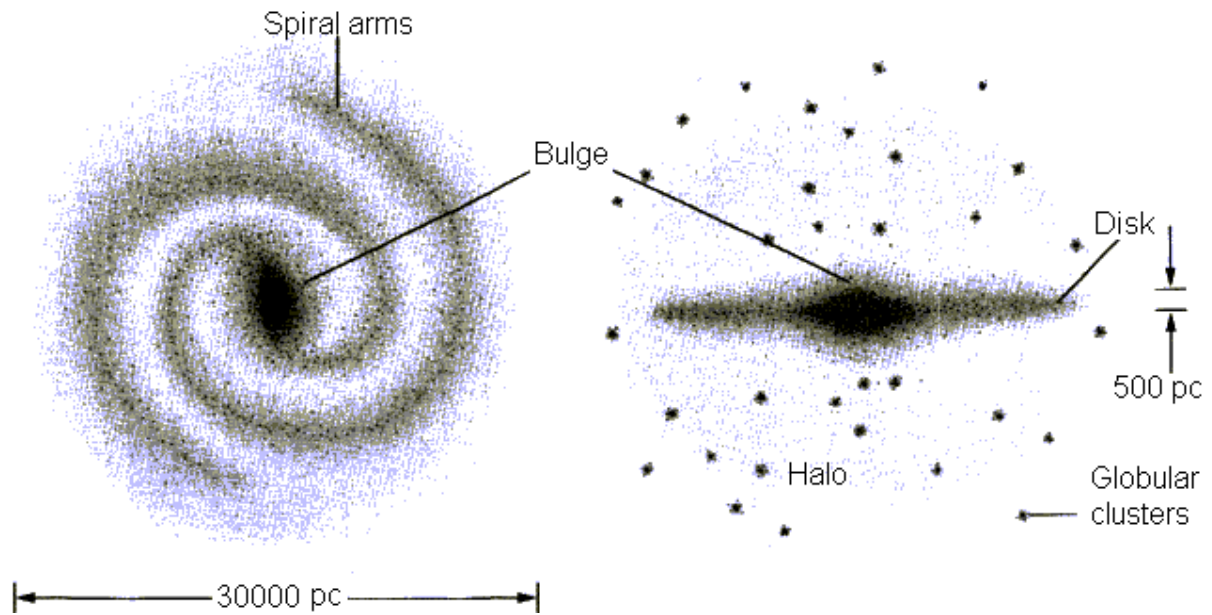
- Construction d'un télescope à miroir de 1.2 m.
- Support financier du Roi George III après la découverte d'Uranus.

William Herschel, assisté par sa soeur Caroline, ont arpenté le ciel dans un peu toutes les directions. Herschel assumait que plus une étoile était faible, plus elle était éloignée. Il trouva beaucoup plus d'étoiles faibles dans la Voie Lactée que dans les autres directions. Il en déduisit que les étoiles étaient réparties plus loin dans la Voie Lactée que dans les autres directions. Il dessina la Voie Lactée sous forme de disque, ce qui est correct. Cependant, il ignora ses dimensions.

1.3. Autres travaux

En 1918, l'astronome J.C. Kapteyn essaya de raffiner le comptage d'étoiles de Herschel. Mais, il ne réalisa pas que la poussière interstellaire faussait totalement l'estimation au-delà de quelques milliers de pc.

- Disque beaucoup trop petit.
- Soleil centré.



Utilisation de la découverte de Henrietta Leavitt : relation entre période et luminosité des étoiles variables « Céphéides ».

- Céphéides de type I (pér. 5 - 10 j)
- Céphéides de type II (pér. 10 - 30 j)

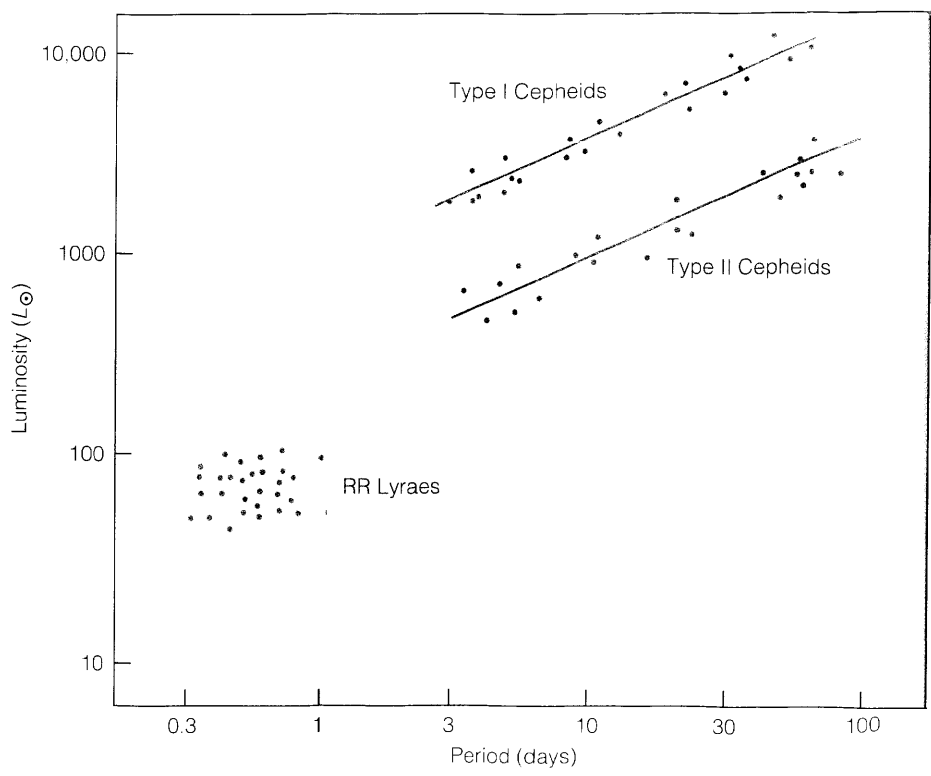
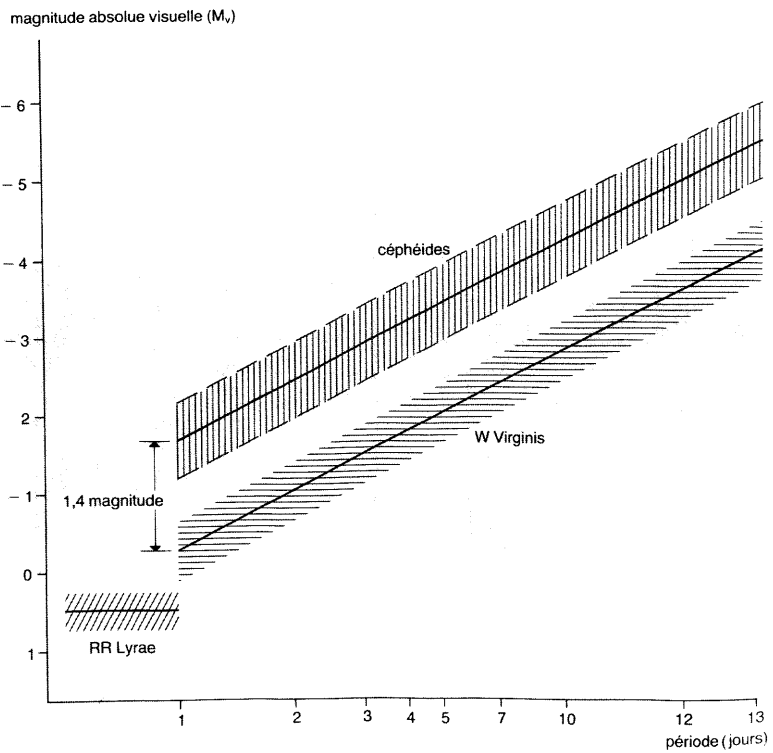
W Virginis RR Lyrae δ Scuti δ Cephei

Ceci permet d'estimer la distance d'amas globulaires. En 1918, Harlow Shapley montra que les amas globulaires sont distribués sphériquement autour du bulbe galactique (halo galactique). Shapley montra également que le halo n'était pas centré sur le Soleil, mais sur un point situé dans la direction du Sagittaire. Il fit l'hypothèse correcte que ce point était le centre galactique.

Loi de Pogson :

$$M = -2.5 \text{Log} \left(\frac{L}{L_{\text{Soleil}}} \right) + 5$$

Mag. abs. et mag. app. : $M = m + 5(1 - \text{Log}(d_{pc}))$



D'autres astronomes ont montré que dans la direction du Sagittaire se trouve une distribution sphérique d'étoiles rouges et anciennes (diam. bien inf. au halo). C'est le bulbe galactique.

Après 1930, les dimensions de la Galaxie étaient fixées.

En 1989, Racine et Harris ont estimé que le Soleil se trouve à 8500 pc du centre. C'est la valeur adoptée actuellement par l'IAU.

En 1924, après la mise en service du télescope de 2.5 m du Mt. Wilson, on parvint à prouver que la « nébuleuse d'Andromède » n'était pas une nébuleuse, mais une galaxie. Grâce aux Céphéides contenues dans Andromède, on parvint à en estimer sa distance. Par la suite, il fallut corriger les atlas contenant faussement des dénominations de nébuleuses pour des objets qui étaient en réalité des galaxies.

2. Longitude et latitude galactique

Un système de coordonnées galactiques a été défini dans le but de décrire le ciel (en particulier de préciser les objets de notre galaxie) vue de la Terre.

- Equateur : il parcourt le centre de la bande qu'est la Voie Lactée.
- Pôle nord : c'est le point de l'hémisphère nord qui se trouve à 90° de tout point de l'équateur galactique.

→ Longitude : elle est désignée par l . Elle mesure la distance angulaire autour de la Voie Lactée.

$l = 0^\circ$: centre de la Galaxie

$l = 90^\circ$: constell. du Cygne

$l = 180^\circ$: constell. du Taureau

$l = 270^\circ$: sud du Grand Chien

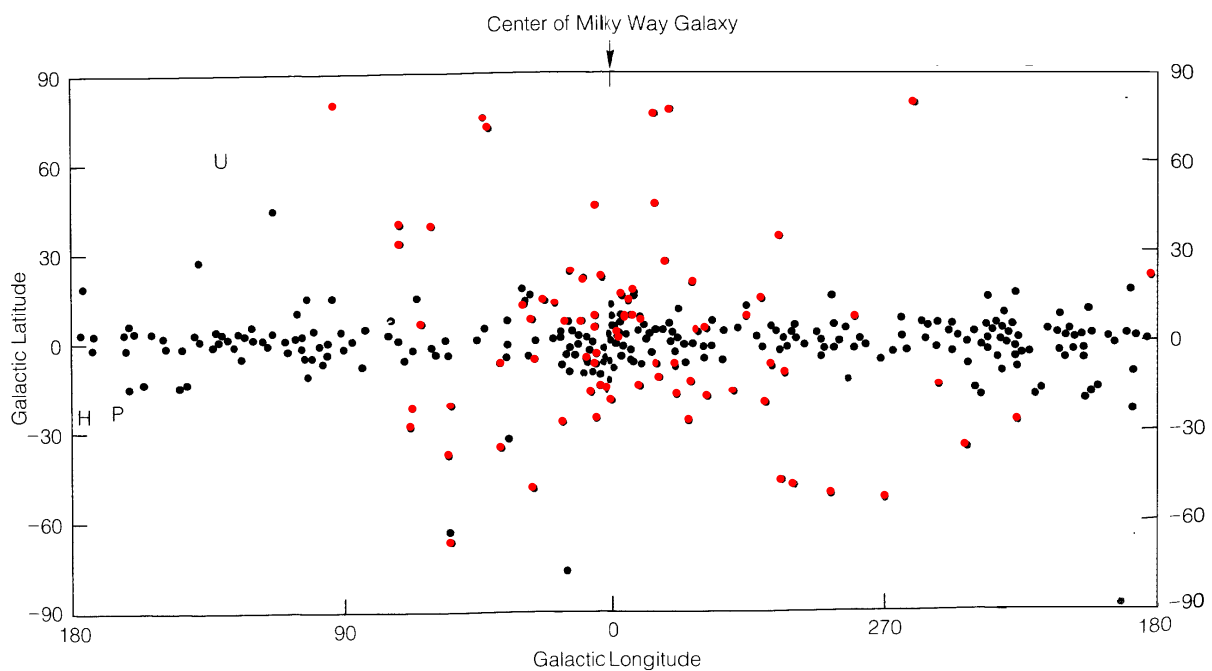
→ Latitude : elle est désignée par b . Sa valeur est nulle

dans la Voie Lactée.

$b = 90^\circ$: pôle nord galactique

$b = -90^\circ$: pôle sud galactique

En fait, la forme de la Voie Lactée est révélée par la distribution de deux types d'amas : globulaires et ouverts. La distribution d'amas n'est pas aléatoire. Harlow Shapley fut un des pionniers pour ces mesures.



3. La rotation de la Galaxie

Il a été remarqué que des systèmes cosmiques de particules ont tendance à s'aplatir lorsqu'ils sont mis en rotation.

Donc, la forme aplatie de notre Galaxie suggère qu'elle est en rotation. Toutes les étoiles, y compris notre Soleil, sont en train d'orbiter autour du bulbe massif.

Dans quel sens sommes-nous en train de tourner ?

On repère notre mouvement d'après l'analyse du red-shift des galaxies éloignées.

Les galaxies dans la direction du Cygne ont un red-shift (en moyenne) beaucoup moins fort que les galaxies dans la direction du Grand Chien.

Conclusion : On se dirige donc apparemment dans la direction du Cygne ($l \gg 90^\circ$ et $b \gg 0^\circ$). Cette vitesse est d'environ 225 km/s.

Curiosité : Le temps mis par le Soleil pour parcourir l'orbite circulaire de 8500 pc de rayon est de 240 millions d'années.

Note :

Les étoiles proches de nous sont à peu de choses près à la même distance du centre galactique. Donc, le Soleil et ses étoiles voisines vont orbiter approximativement à la même vitesse.

3^{ème} loi de Kepler : $\frac{a^3}{T^2} = cte$

On admettra que cette loi est aussi valable pour une galaxie où le bulbe central est très massif.

$$w = \frac{2p}{T}$$

Donc : $a^3 \frac{w^2}{4p^2} \approx cte$

$$w \propto a^{-3/2}$$

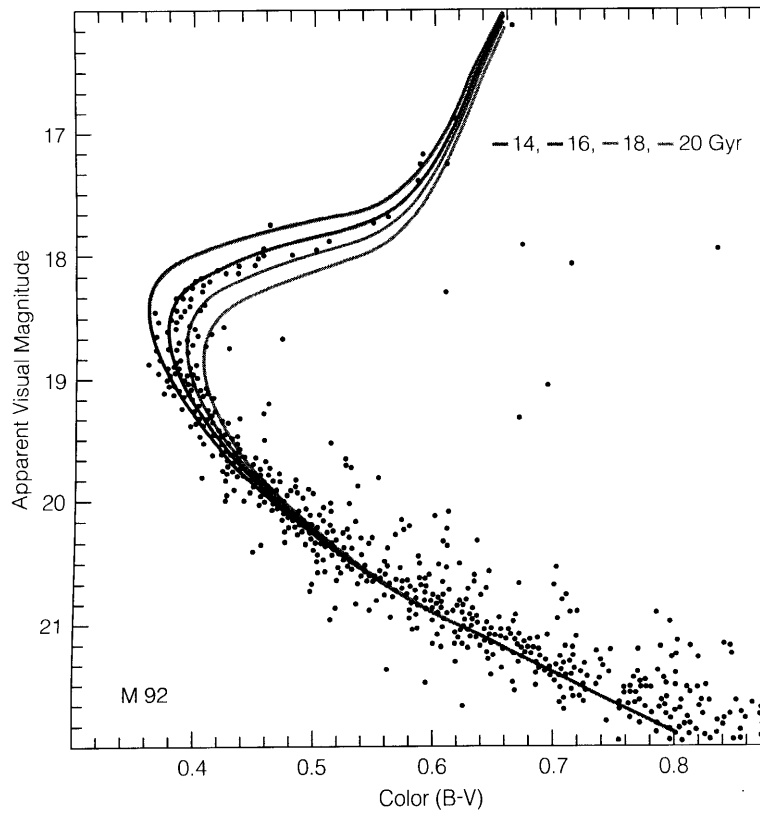
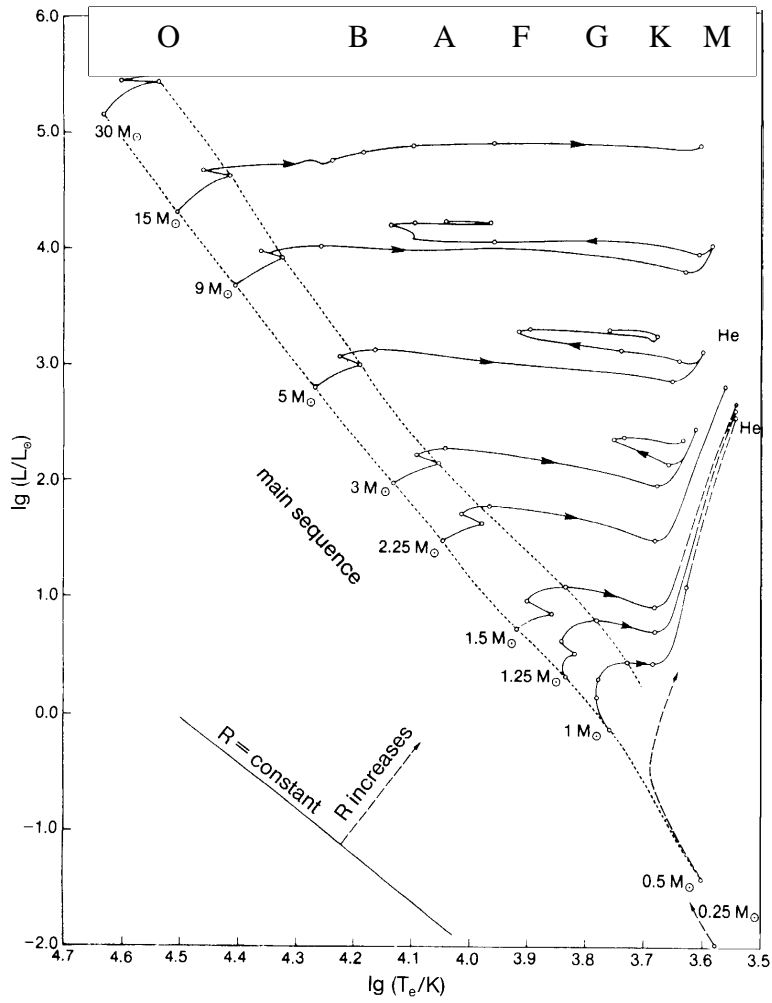
On aura une rotation différentielle. Les régions éloignées du centre ont une vitesse angulaire plus faible.

4. Age de la Galaxie

L'âge de la Galaxie a été déterminé ou plutôt estimé à partir de l'âge des amas globulaires formant le halo. En effet, il est supposé que les amas globulaires ont l'âge de la Galaxie, soit entre 12 et 16 milliards d'années.

Leur âge est déterminé à partir du diagramme de Hertzsprung-Russel.

Sachant que plus une étoile est massive, plus elle évoluera vite. On le voit sur le diagramme d'évolution H-R :



5. Recherche de la structure de notre Galaxie

Chacun sait que certaines galaxies sont de structure spirale. Qu'en est-il de la nôtre ?

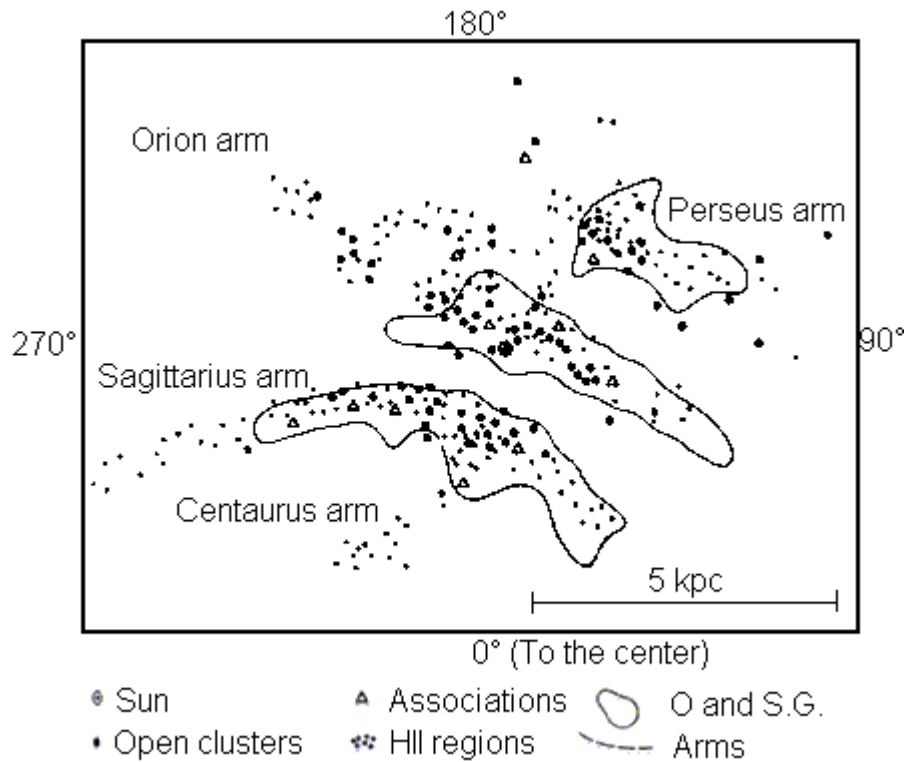
A priori, pour l'amateur astronome campagnard (ayant accès à la Voie Lactée), rien ne permet de conclure que notre Galaxie a une structure en spirale. Pourtant, c'est le cas !

Les bras spiraux des galaxies sont formés par les étoiles les plus brillantes et les plus chaudes, ainsi que par leurs nébuleuses associées. Les objets nécessaires à démontrer cette structure spirale sont évidemment à chercher dans le disque et non pas dans le halo. Par conséquent, les astronomes ont commencé par repérer la position des étoiles jeunes et brillantes (type spectral O et B), des amas ouverts et des associations O (cousins des amas ouverts).

(Associations O : étoiles principalement de type O et B
Associations T : étoiles de type T tauri variables.)

Exemples : le trapèze d'Orion
les trois Rois

Ces associations O sont brillantes et faciles à repérer, même sur longues distances. Ces différents objets sont reportés sur un graphique du genre suivant :



Les bras spiraux portent le nom de constellations correspondant à l'endroit où les objets majoritaires ont été repérés.

- ♠ Le bras situé derrière nous est le bras de Persée (+1).
- ♥ Notre bras est le bras d'Orion ou du Cygne (0).
- ♦ Le bras situé devant nous est le bras du Sagittaire (-1).
- ♣ Suspicion d'un bras (-2) que serait le bras du Centaure.

Visualisation de ces bras « locaux » dans le ciel

D'après le graphique précédent, on se situe près du bord interne d'un bras.

En été, regarder en direction du sud (const. du Scorpion et du Sagittaire ($l = 0^\circ$)) : la Voie Lactée y est dense.

!!!! On ne voit pas le centre galactique qui est caché par des poussières. La vue est bouchée plus loin que 7500 pc !!!!

Plus haut dans le ciel (dans la direction $l = 70^\circ$), on voit la constellation du Cygne, elle aussi est très riche.

Puisqu'on se situe à l'intérieur d'un bras, dans la direction $l = 180^\circ$, on voit également notre propre bras (Orion, Pléiades, Hyades,...). [Distance de ces objets : env. 500 pc.]

Recherche du reste de la structure de notre Galaxie

La méthode exposée précédemment a ses limites :

La poussière interstellaire cache les objets distants de plus de 7500 pc environ. C'est pourquoi le graphique précédent ne peut être étendu.

Il y a une autre méthode permettant de trouver cette structure, même de l'autre côté du centre galactique :

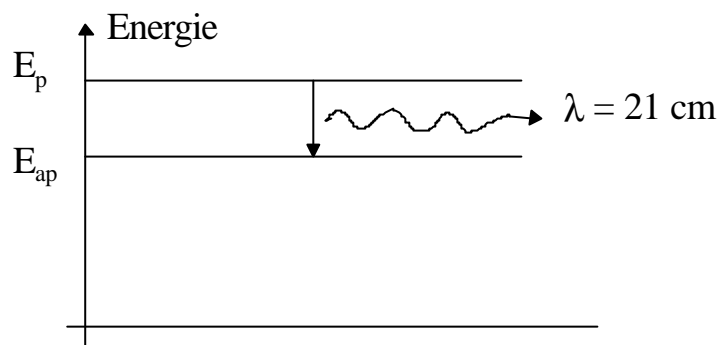
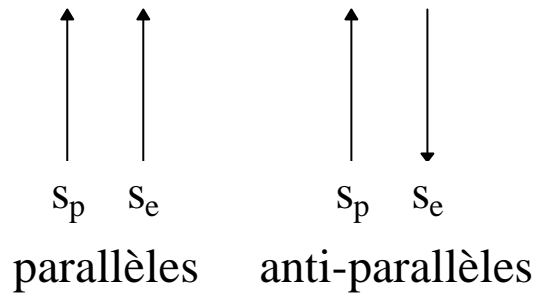
Les ondes radio à $\lambda = 21 \text{ cm}$

C'est le domaine de la radioastronomie !

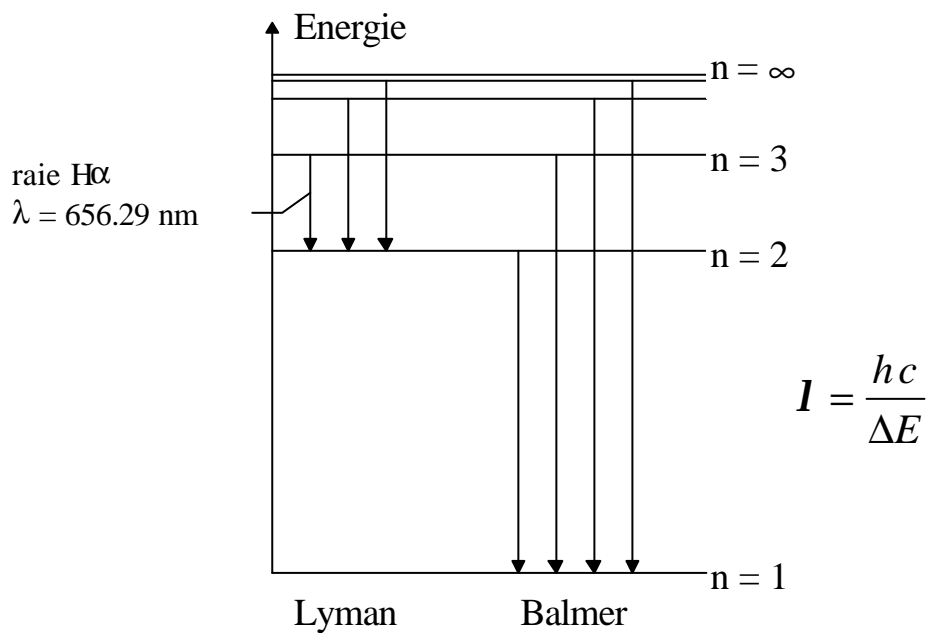
Cette onde à $\lambda = 21 \text{ cm}$ n'est que très peu atténuée par la poussière interstellaire.

D'où vient cette ligne à 21 cm ?

Arrangements possibles des spins du proton et de l'électron de l'atome d'H :



Notons que cette différence d'énergie entre ces 2 niveaux n'est que $6 \cdot 10^{-7}$ la différence entre le niveau fondamental et le premier état excité.



Donc, la raie $\lambda = 21 \text{ cm}$ est produite par l'hydrogène neutre (HI) et est pratiquement intéressante pour dresser une meilleure carte de la structure de notre Galaxie, car la concentration en HI est élevée dans les bras spiraux.

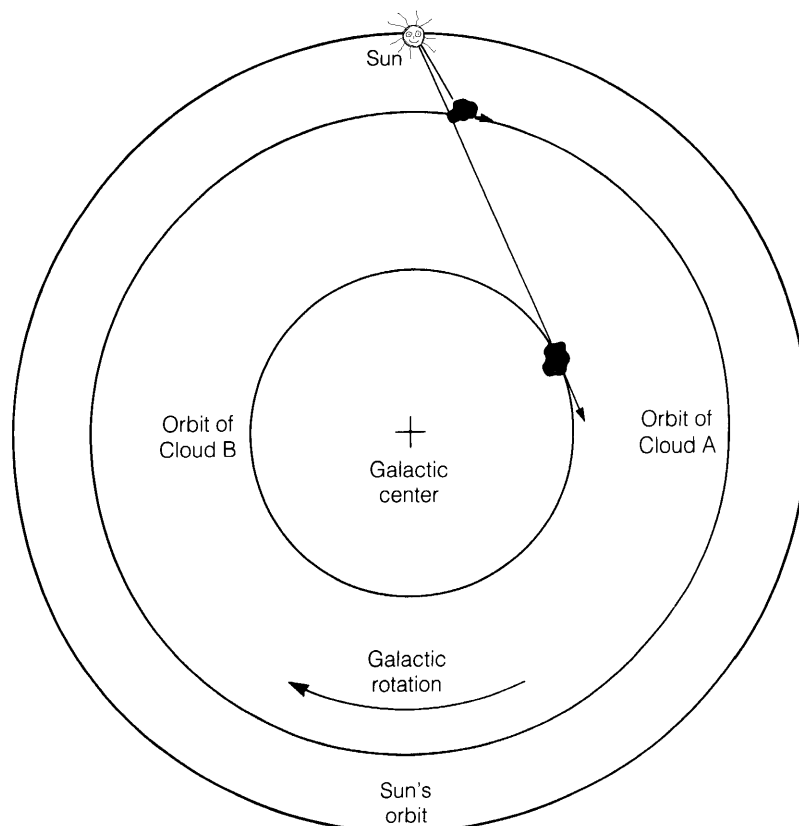
Similairement, on peut aussi utiliser la longueur d'onde millimétrique émise par le monoxyde de carbone (CO).

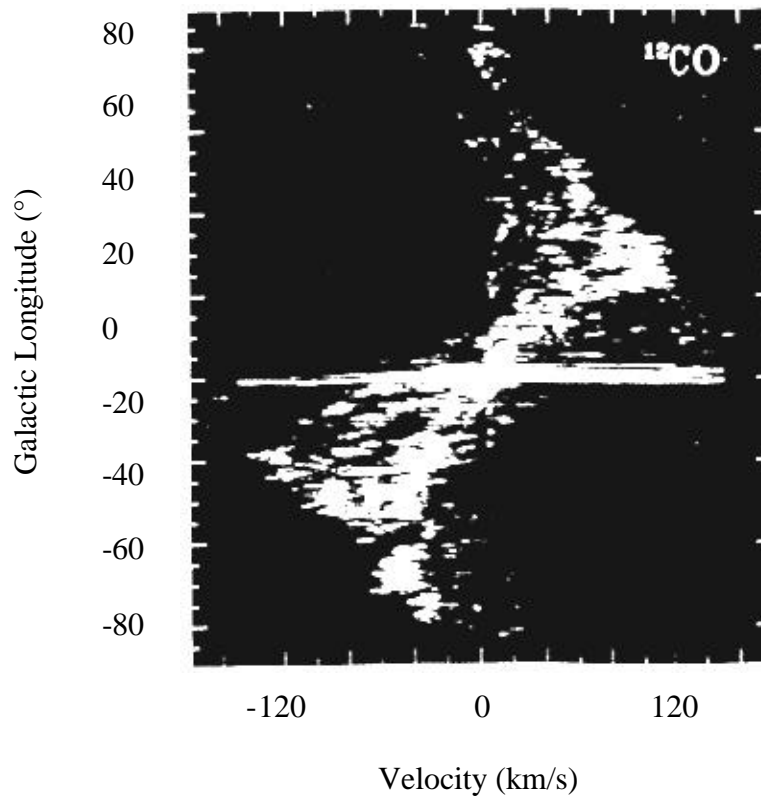
Etablissement complet de la carte de notre Galaxie

Balayage de la Voie Lactée au radiotélescope.

Problème : Comment évaluer la distance d'un nuage HI ?

Solution : Profiter de l'effet Doppler.

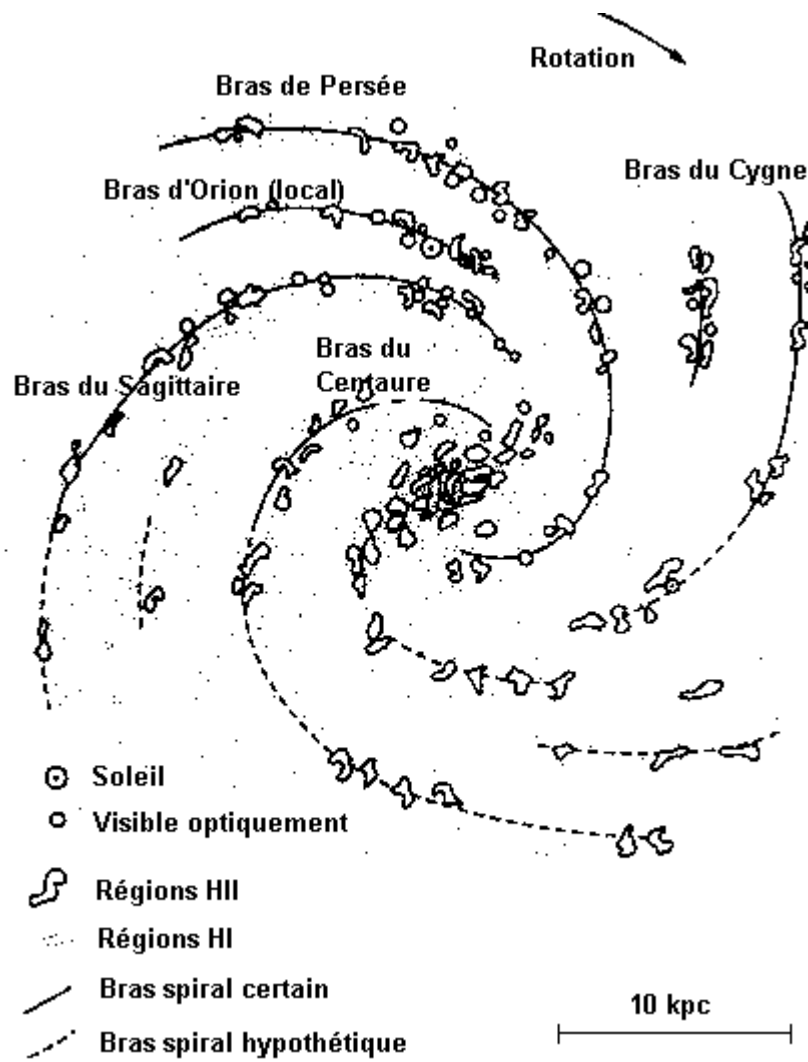




Résultat :

Par cette méthode, on a pu dresser une carte plus ou moins complète de notre Galaxie. Il a été observé que la matière était concentrée dans un disque de 200 à 400 pc d'épaisseur.

Il y a quelques nuages d'HI hors de ce disque. Ils ont probablement été déviés par des amas globulaires du halo.



5.1. Pourquoi notre Galaxie a-t-elle des bras ?

Cette question se rapporte aussi à d'autres galaxies munies de bras.

Cette question divisa les astronomes pendant bien des années. Plusieurs hypothèses ont été émises, mais aucune ne « collait » vraiment.

hypothèse n° 1 :

Jet de jardin mis en rotation. On obtient une structure en spirale. Mais, le problème avec ce modèle est que la matière des bras spiraux ne se déplace pas radialement comme le font les gouttelettes d'eau.

hypothèse n° 2 : Meilleure analogie

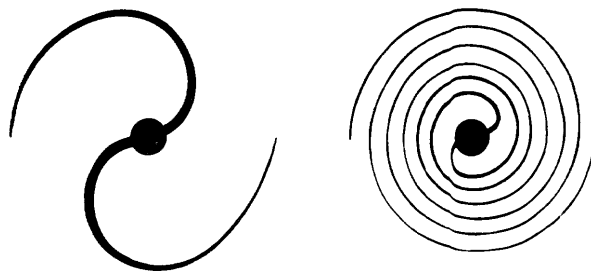
Soit une tasse de café crème. On remue violemment le café, puis on y ajoute une goutte de crème. Au centre, la vitesse angulaire est plus élevée que dans les bords. On observe également une structure de bras. Le problème avec ce modèle est que les bras présents dès le plus jeune âge de la Galaxie sont fortement spiralés.

Age : environ 14 milliards d'années

Un tour du Soleil : 240 millions d'années

Nombre de tours : 60 !

De par la rotation différentielle, on ne devrait plus voir, aujourd'hui, la structure en bras.

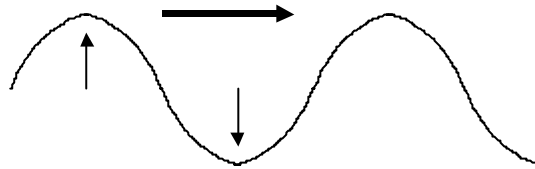


Deux explications plausibles semblent aujourd'hui être retenues. Elles n'expliquent malheureusement pas encore tout.

Exemples :

La théorie d'onde de densité

Tout d'abord, on suppose que les bras spiraux ne sont plus reliés spécifiquement à un groupe d'étoiles, mais plutôt à un lieu de densité maximale de matière galactique. Analogie : vagues sur l'océan.



Les molécules d'eau font essentiellement un mouvement vertical.

Ainsi, dans les bras spiraux entrent des étoiles d'un côté et ressortent de l'autre. Les gaz galactiques ont tendance à s'accumuler dans les bras spiraux. Plus il y a de matière, plus cette accumulation prend de l'importance. Lorsque la densité devient suffisamment élevée un collapse gravitationnel peut intervenir, conduisant à la formation d'étoiles. Cela explique pourquoi la formation d'étoiles intervient principalement dans les bras. En particulier, les gaz interstellaires et les poussières dépassent des bras le long de leur bord interne, cette théorie explique aussi la plus haute concentration de formation d'étoiles le long du bord interne des bras.

Remarque :

Un collapse gravitationnel peut intervenir dans une masse de gaz lorsque :

$$\frac{G M^2}{R} \geq M \langle v^2 \rangle$$

$$M \cong r R^3$$

Donc :

$$M \geq \frac{\langle v^2 \rangle^{3/2}}{G^{3/2} r^{1/2}}$$

En général, pour des densités interstellaires et des vitesses d'agitation normales (liées à la température) :

$$M \geq 10^3 M_{\text{Soleil}}$$

Il est peu probable que l'accroissement de densité et/ou la diminution de température réduisent cette masse à des masses stellaires typiques de une M_{soleil} .

Cependant, une fois que le collapse dans un grand nuage a commencé, ρ croît. On peut voir que la masse conduisant à la formation d'une étoile diminue.

Dans le collapse d'un nuage, on a scission en un lot de petits collapses. Ainsi, la formation d'étoiles se produit par un processus de fragmentations successives. C'est pourquoi, les étoiles naissent en amas.

6. Mesure de la masse de notre Galaxie

Vitesse du Soleil : $v \approx 225 \text{ km/s}$

Distance au centre galactique : $d \approx 8500 \text{ pc} \approx 2.5 \cdot 10^{17} \text{ km}$

Masse du centre :

$$a_n = \frac{v^2}{d} = G \frac{M_{\text{centre}}}{d^2}$$

Donc :

$$M_{\text{centre}} = \frac{d v^2}{G} \approx 2 \cdot 10^{41} \text{ kg} \approx 100 \cdot 10^9 M_{\text{Soleil}}$$

Ce calcul n'est bien sûr qu'une approximation. Les étoiles extérieures à l'orbite solaire ne sont pas prises en considération...

Jusque dans les années 1970, on pensait que c'était une excellente approximation de la masse de notre Galaxie.

On avait négligé une grosse contribution à la masse située dans le halo peu brillant entourant notre Galaxie. On constatait que les vitesses circulaires des étoiles ne diminuaient pas avec le rayon comme la 3^{ème} loi de Kepler le prévoyait.

Récente estimation : $M_{\text{Galaxie}} \approx 10^{12} M_{\text{Soleil}}$

[On pense que la principale contribution à la masse est la matière sombre et non pas les étoiles, les nébulosités brillantes...]

7. Echelles de distances dans notre Galaxie

Destination	Distance (pc)	Distance (a.l.)
α du Centaure	1.3	4.2
Sirius	2.7	8.8
Véga	8.1	26
Hyades	42	134
Pléiades	125	411
Centre du bras Orion	400	1300
Nébuleuse d'Orion	460	1500
Bord de la Galaxie (dir. Z)	1000	3300
Bras du Sagittaire	1200	3900
47 Tucanae	4600	15000
Centre de la Galaxie	8500	29000
M13	11000	36000
Bord le plus éloigné	24000	78000
Diamètre du disque	30000	98000

8. Les deux populations d'étoiles de notre Galaxie

L'une des plus saisissante découverte à propos de notre Galaxie fut qu'elle renferme tout un lot d'étoiles de tailles différentes, d'âges différents, distribuées et orbitant différemment.

Division en 2 groupes :

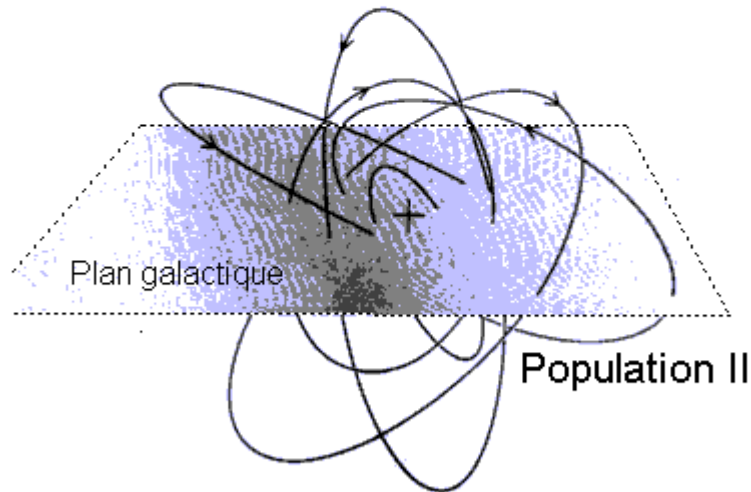
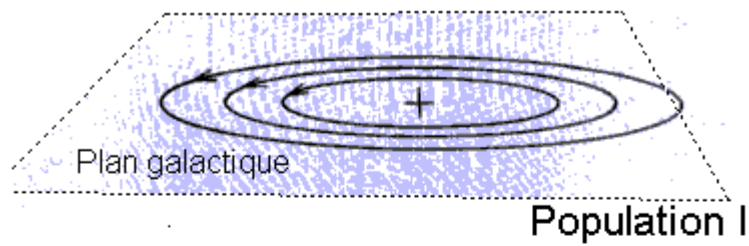
Population I :
- composition similaire au Soleil
- relativement jeune
- distribuée dans le disque galactique

Population II :
- H et He, presque uniquement
- assez vieilles
- ass. au bulbe ou aux amas globulaires
- orbites externes au disque galactique

Les astronomes sont devenus familiers en premier avec la population I, car proche du Soleil.

Résumé des propriétés des 2 populations :

Propriété	Population I	Interméd.	Population II
Orbite	Circulaire	Allongée	Elliptique
Distribution	Dans les bras	Irrégulière	Régulière
Conc. vers le centre gal.	Très peu	Légère	Elevée
Coordonnée Z typ. (pc)	120	400	2000
Éléments lourds (%)	2 à 4	0.4 à 2	0.1
Masse totale (en M_{Soleil})	$2 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$
Age typique (années)	10^8	10^9	10^{10}
Vitesse perp. typ. (km/s)	10 à 20	20 à 100	120 à 200
Objets typiques	AO, associations régions III, étoiles O et B	Soleil, RR Lyrae, étoiles A, néb. pl. étoiles géantes, novae, variables à p grand	Amas globul., RR Lyrae avec p > 0.4 jour, Céphéides de la popul. II



8.1. Age des ces différentes populations

Population I :

Comme le Soleil et les autres étoiles du disque galactique. Age variable de 0 à 1 milliard d'années.

Population II :

Par l'étude du diagramme H-R, on montre qu'elles ont pratiquement toutes entre 12 et 16 milliards d'années. Ceci indique que les amas globulaires et les autres étoiles du halo sont les plus vieux objets de notre Galaxie.