

rotation sur elles-même à une distance r typique de l'étoile.

- d) Quelle est la taille typique r du nuage ?
On suppose que le nuage englobe une étoile jeune du type O ($R=2 \cdot 10^9$ m, $T=37500$ K)

5.8 Le cycle de la matière

- a) Donnez une description concise des phases de la vie d'une étoile massive ($M \geq 5$ Mo) de la séquence principale jusqu'aux phases finales.
b) Expliquez qualitativement l'essentiel du théorème du viriel et discutez son importance pour l'effondrement final de l'étoile. Quels sont les processus qui sont cruciaux pour l'implosion ?
c) Après son explosion, que reste-t-il de l'étoile ? Vu la durée de vie des étoiles massives, quel est leur rôle dans le cycle de la matière ? (rappel : durée de vie d'une étoile $\tau \sim 1/M^2$)
d) Donnez une description concise des phases de la vie d'une étoile du type solaire de la formation jusqu'aux phases finales.
e) Dans un diagramme Hertzsprung-Russel, tracez l'évolution du soleil à partir de la séquence principale. Divisez le parcours en plusieurs étapes (notées 1,2,3,...etc.) que vous indiquerez sur le diagramme HR et dont vous donnerez une description concise.

6 LA GALAXIE ET LES GALAXIES (INCOMPLET)

6.1 LE MILIEU INTERSTELLAIRE

Dans le voisinage du système solaire, la distance entre étoiles est de l'ordre de 1 parsec ($1 \text{ pc} = 3.26 \text{ A.L.} = 3.08 \cdot 10^{13} \text{ km}$), tandis que le diamètre d'une étoile est d'environ (10^6 km) soit un rapport de : $3 \cdot 10^{13} / 10^6 = 3 \cdot 10^7 \Rightarrow$ seulement la $\sim 10^{-22}$ partie de l'espace est donc occupée par la matière sous forme d'étoiles. Et qu'est ce qu'il y a entre les étoiles ?

Comment sait-on qu'il existe un milieu interstellaire ?

Comment sait-on que l'espace entre les étoiles n'est pas vide ? Dans le spectre d'une étoile distante, on peut observer deux types de raies d'absorption : d'une part des raies larges, dues à l'absorption dans l'atmosphère stellaire (où la température élevée cause un élargissement des raies par effet Doppler) ; d'autre part des raies très étroites, dont la finesse suppose une absorption discrète qui doit donc être due à des régions de nature gazeuse froides situées entre la source de rayonnement (l'étoile) et l'observateur.

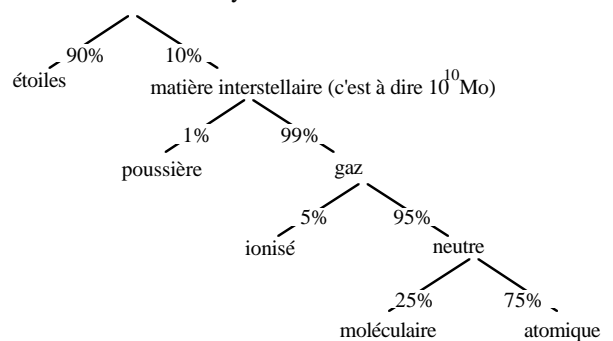
Par ailleurs, on observe des zones sombres en lumière visible dans la voie lactée; on peut montrer qu'il s'agit de nuages de poussière - une matière fine, peu dense, mais dont l'absorption est très efficace (jusqu'à 20 magnitudes).

L'espace interstellaire est peuplé de gaz (essentiellement H et He) et de poussières (on n'y trouve aucun corps sous forme liquide). La densité est généralement très faible, elle est en effet de l'ordre de 1 atome/cm³ ce qui est trop faible pour former des étoiles. (Il existe cependant des régions plus dense que cela, notamment les régions de formation d'étoiles, où l'on peut atteindre 10⁵ atomes/cm³); un nombre à comparer aux 5 · 10¹⁹ atomes/cm³ (1,2 g/l) que l'on trouve dans l'air au niveau de la mer, tandis qu'au niveau des satellites artificiels, on est encore à 10⁹ atomes/cm³.

Dans l'astronomie on distingue trois types d'espaces "vides"

- espace : interplanétaire
- : **interstellaire**
- : intergalactique

Distribution de matière moyenne dans la Galaxie



L'espace entre les étoiles contient du gaz et des poussières. Ce milieu dépourvu de liquide, majoritaire en gaz (99% du milieu) est condensé en nuages interstellaires d'hydrogène.

Les **phases** du milieu interstellaire : On peut classer les "objets" du milieu interstellaire, selon l'état sous lequel existe ses composantes majeures :

- régions HI : H atomique (ou moléculaire; aussi H⁰)
- régions HII : H ionisé (aussi H⁺)
- régions H₂ : H moléculaire (H₂)

(les désignations HI, HII sont dérivées des appellations des spectres atomiques - voir section 3.1.3)

6.1.1 Les régions HII

Parmi tous les nuages cosmiques, les plus frappants sont sans nul doute, les nébuleuses rougeoyantes. Notre Galaxie en contient quelques centaines - elles ont été nommées par des noms poétiques comme la nébuleuse de la Rosette, du Lagon, du Crabe, d'Orion ... de manière générale, on les appelle les régions HII.

La couleur de ces nuages est due à la présence d'étoiles très chaudes, qui produisent du rayonnement UV capable d'échauffer le gaz jusqu'à des températures de 10^4 K, et ainsi d'ioniser les atomes qui le constituent.

Les spectres des régions HII sont constitués de deux composantes distinctes :

- *Un fond continu* qui s'étend de l'UV jusqu'au radio
- *Des raies d'émission* dans le visible.

Raies spectrales émises par les régions HII : Elles sont caractéristiques d'un gaz chaud à faible densité. Parmi les raies d'émission dues à des raies de recombinaison les plus intenses que l'on observe généralement on trouve :

- Les raies d'hydrogène de la série de Balmer (voir 3.1.3), en particulier le rose vif $H\alpha$ à 653.3 nm, qui donne aux nébuleuses leurs couleurs distinctives.
- Une paire de raies d'oxygène (OIII) à 495.9 et 500.7 nm qui leur donne leur teinte verdâtre. Ces raies apparaissent dans ce que l'on appelle les transitions interdites (transitions qui seraient impossible dans un laboratoire terrestre).

Mécanisme : En présence d'un champ UV, les atomes sont ionisés en absorbant des photons, et inversement les ions et les électrons se recombinent pour donner des atomes. Il s'établit alors un état stationnaire dans lequel le nombre d'ionisations est égal au nombre de recombinaisons.

Il existe une distance limite (*rayon de Strömgen*) à une étoile ionisante au delà de laquelle il n'y a plus suffisamment de photons UV pour maintenir le gaz ionisé. La matière se trouve donc ionisée jusqu'à une limite assez nette, le *front d'ionisation*.. L'hydrogène n'est pas le seul élément à être ionisé. Les autres atomes le sont aussi, et leur comportement dépend de leur potentiel d'ionisation I. (p.e $I=13.6$ eV pour H, 24.5 eV, 11.3 eV et 13.6 eV pour la 1^{ère} ionisation du He, C et O). Cela signifie que dans une nébuleuse uniforme, chaque élément est ionisé dans une sphère dont le rayon dépend du potentiel d'ionisation.

6.2 LA VOIE LACTEE

Depuis l'invention du télescope (XVI^e - XVII^e siècles) on savait que la voie lactée était composée d'étoiles.

Par contre, pour l'interprétation, il faut attendre le XVIII^e siècle, où Thomas Wright 1750, suppose soit un arrangement en forme d'anneau autour du soleil, soit une couche sphérique comprenant le Soleil. En 1755, Kant (un philosophe) propose un système stellaire en forme de disque où le soleil n'est plus nécessairement au milieu, hypothèse finalement retenue. Par la suite Herschel (1738-1822) utilise le télescope pour effectuer une étude statistique en prenant comme hypothèses: une luminosité égale des étoiles, une densité stellaire uniforme et un éclat diminuant en $1/r^2$, et en déduit que l'on trouve au centre un disque lenticulaire.

Mais vers 1930 on montre que cette image est fautive car on établit que les magnitudes absolues ne sont pas les mêmes pour toutes les étoiles - il y a différents types d'étoiles ! En outre, même en ne considérant qu'une classe spectroscopique, la magnitude limite étant $\sim m_v \sim 13$ m, on ne peut faire de sondages statistiques que jusqu'à 500 pc pour les étoiles F-G et 2 kpc pour les B-A (distances très insuffisantes puisqu'il

s'avérera par la suite que le seul Centre Galactique est déjà à près de 10 kpc !)

Env. en 1900 - "Univers de Kapteyn" : La mesure de la parallaxe annuelle & statistique des étoiles révèlent que la Galaxie est un disque d'environ 8 kpc de diamètre avec le soleil au milieu (à l'époque la voie lactée était équivalente à l'Univers entier - on ne savait pas encore que certaines des nébuleuses étaient elles même des galaxies ... à comparer à l'Univers des anciens : Système solaire = Univers ... on se croit toujours au centre). L'absorption interstellaire fausse énormément les mesures; par exemple la lumière du Centre Galactique est absorbée de 20 magnitudes (réduction de la luminosité d'une étoile d'un facteur d'environ 10^{-8})

(Cette situation peut se comparer à la situation d'un visiteur de la tour Eiffel au cours d'une nuit brumeuse - il ignore l'existence de la brume - il fait noir. En voyant les lumières proches qui l'entourent il découvre qu'il se trouve exactement au centre de Paris ...)

Finalement en 1917 (date assez récente !) Harlow Shapley, à partir de l'étude de la distribution des amas globulaires (exemple Fig 6.1), montre que ceux-ci sont arrangés symétriquement autour du centre de la Galaxie (Fig 6.2). Si les amas globulaires font partie du système de la voie lactée (c.a.d. ils gravitent autour du même centre - celui de la Galaxie) le Centre Galactique est loin, dans la direction du Sagittaire.

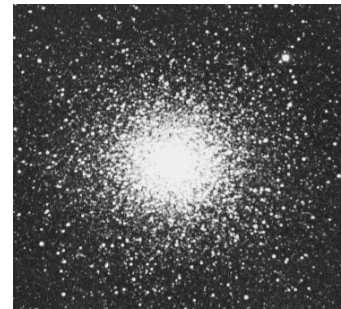


Fig 6.1 : l'amas globulaire M3 (catalogue de Messier, N° 3) - selon les estimations il contiendrait un demi million d'étoiles

La distance des amas globulaires étant évaluée par exemple à l'aide des étoiles de type RR Lyrae, on connaît alors leur position, et la détermination du centre de masse donne la position du Centre Galactique : soit à environ $r_{SCG} \approx 10$ kpc (à 20% près ok avec la valeur actuelle $r_{SCG} \approx 8.7$ kpc, la distance étant encore mal connue) de la Terre.

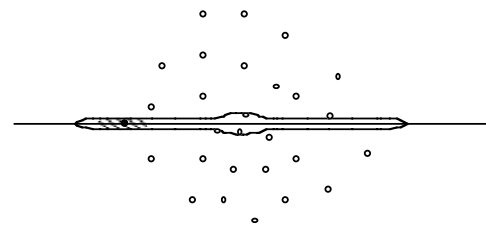


Fig 6.2 : schéma en coupe de la Galaxie, les amas globulaires sont arrangés symétriquement autour du centre de la Galaxie. (les études classiques concernent ~ la région hachurée \approx Univers de Kapteyn)

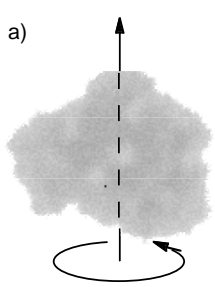
Combien d'étoiles, la Galaxie ? Connaissant la distance r_{SCG} entre soleil et Centre Galactique (env. 10 kpc) et la vitesse de rotation v (env. 250 km/sec) autour de celui-ci (en $2.5 \cdot 10^8$ ans), nous pouvons estimer la masse galactique M à l'intérieur de l'orbite solaire.

force gravitationnelle		force centrifuge	
GMm/r_{SCG}^2	=	mv^2/r_{SCG}	6.1
M	=	$v^2 r_{SCG}/G$	6.2
	≈	$10^{11} M_{\odot}$	

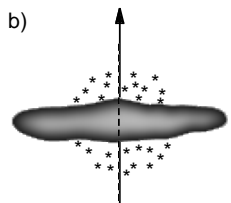
correspondant à 100 milliards d'étoiles du type solaire ...

6.2.1 Modèle pour la formation de la Galaxie

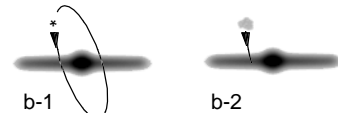
Un nuage de gaz d'une masse de 10^{11} à $10^{12} M_{\odot}$, composé presque entièrement d'hydrogène et d'hélium et contenant des irrégularités de densité, est en rotation lente sur lui-même (a).



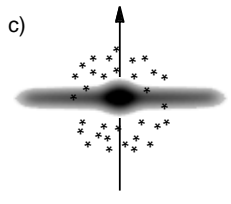
effondrement du nuage
Le nuage s'effondre sous l'effet de la gravitation en conservant son moment angulaire. Pendant la contraction gravitationnelle, la formation stellaire commence (b) et donne naissance à une première génération d'étoiles (population II extrême).



formation d'un disque
Tandis que la trajectoire d'une de ces étoiles n'est quasiment pas affectée durant le passage par le plan galactique (b-1),



un nuage de gaz, sur une trajectoire inclinée par rapport au plan galactique, rentrera en interaction avec le gaz du disque. (voir section 2.4 - disques) La collision entraîne forcément une dissipation d'énergie cinétique orbitale du nuage. D'autre part, le moment angulaire du nuage est conservé - par conséquent, l'inclinaison de l'orbite du gaz incident se rapprochera du plan galactique, jusqu'à être compris dans le plan du disque (c).



formation d'étoiles dans le disque
Les étoiles massives qui se forment dans le gaz du disque produisent des éléments lourds qui enrichissent le disque d'éléments chimiques.

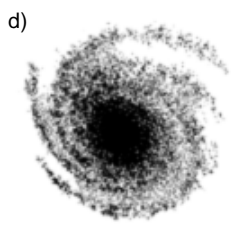


Fig. 6.3

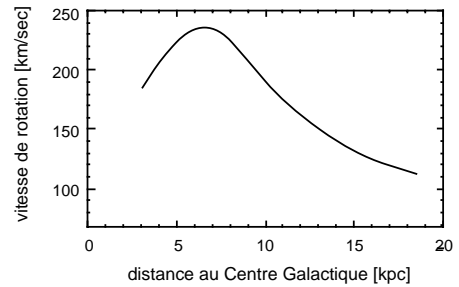
formation de bras spiraux

Le gaz est comprimé pendant le passage des bras spiraux (d) entraînant une flambée d'étoiles.

6.3 PROBLÈMES : LA GALAXIE

6.1 Combien d'étoiles, une Galaxie

- a) Commentez la courbe de rotation de notre Galaxie ci-dessous.



- b) A l'intérieur de quel rayon galactocentrique se trouve la plus grande partie de la masse de la Galaxie ?
c) Estimez la masse de la Galaxie en M_{\odot} (masses solaires).

6.2 Les couleurs de la Galaxie

Comparez les cartes du ciel visible, infrarouge et X (basses énergies) de la figure 8.8 i, e, k : discutez de manière concise les principales origines des différentes émissions, les intensités dans les trois cartes sont elles corrélées ?

6.3 Vision de l'Univers

Dans l'histoire de l'astronomie, l'homme croyait plusieurs fois occuper le centre de l'Univers. Caractérisez en quelques mots clefs ces Univers, puis commentez succinctement l'évolution de notre vision du monde.

7 COSMOLOGIE (A REDIGER)