

## Plan du cours: Propriétés et observations des galaxies non-résolues en étoiles

Introduction générale du cours, la problématique

1. Historique sur la découverte des galaxies

### 2. La Voie Lactée

- 2.1. Théorème du viriel et masse de la Voie Lactée
- 2.2. Stabilité du disque de la Voie Lactée et des galaxies spirales
- 2.3. La découverte de la raie de l'hydrogène neutre (HI) à 21 cm
- 2.4. La raie à 21cm révèle les bras spiraux, une barre et le "dark halo"
- 2.5. La structure spirale
- 2.6. Les populations stellaires
- 2.7. Détermination de la masse des composantes stellaires
- 2.8. Les composantes de la Voie Lactée

3. Classification morphologique des galaxies

4. Distribution des galaxies aux grandes échelles

5. Propriétés photométriques des galaxies

6. Modéliser l'histoire de la formation d'étoiles

7. Mesurer la formation d'étoiles dans les galaxies

### 2.1 Théorème du viriel et masse de la Voie Lactée: Origine de l'aplatissement du disque de la V.L.

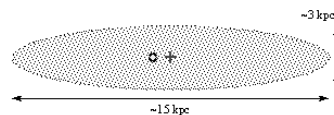
La Voie Lactée est composée au centre d'un bulbe qui possède des propriétés similaires à celles des galaxies elliptiques et un disque.

Bertil Lindblad (1927):

la vitesse radiale des amas globulaires de la Voie Lactée (V.L.) atteint  $250 \text{ km s}^{-1}$  (déduite du décalage Doppler de leurs raies en absorption)

Ceci dépasse la vitesse de libération calculée par Kapteyn (1922) où la V.L. est un disque aplati de  $15 \text{ kpc} \times 3 \text{ kpc}$  avec le soleil décentré et une décroissance rapide de la densité d'étoiles

(90 % des étoiles de la V.L. dans  $R < 2800 \text{ pc}$ )



Les étoiles proches ont une vitesse négligeable par rapport au soleil

⇒ mouvements circulaires des étoiles bien ordonné autour du centre de la V.L.

⇒ ces mouvements sont responsables de l'aplatissement du disque de la V.L.

## 2.1 Théorème du Viriel et masse de la Voie Lactée

On considère les étoiles des amas globulaires, les galaxies et les amas de galaxies comme des systèmes en équilibre dynamique gravitationnel.

Cette hypothèse est confortée par la comparaison du "crossing time" (temps de traversée) d'un objet à l'intérieur du système avec son âge: si les étoiles ont eu le temps de traverser plusieurs fois une galaxie, la galaxie a atteint son état d'équilibre. Sinon, les étoiles auraient déjà quitté la galaxie.

Crossing time:  $t_c = R/\langle v \rangle$

où  $R$  = taille du système,  $\langle v \rangle$  = vitesse typique ou dispersion de vitesses

Au niveau du soleil (8.5 kpc du centre de la VL), la vitesse de rotation des étoiles:

$v_* \approx 220 \text{ km s}^{-1} \Rightarrow$  une rotation complète en:  $t = 2\pi R/v_* \approx 2.5 \times 10^8$  ans

La VL étant âgée de près de  $10^{10}$  ans (40 tours), elle est gravitationnellement liée.

Le théorème du viriel (introduit par Clausius en 1870 pour relier l'énergie thermique d'un gaz et son potentiel gravitationnel, son énergie magnétique,...) permet de relier le potentiel gravitationnel et l'énergie cinétique des systèmes en équilibre gravitationnel. Le viriel,  $\Sigma_i = -1/2 \langle r_i \cdot F_i \rangle$  ( $F_i$  = force agissant sur la particule en  $r_i$ ), représente l'énergie cinétique moyenne du système.

## 2.1 Théorème du Viriel et masse de la Voie Lactée

Théorème du Viriel:  $2T - |U| = 0$ , i.e. énergie cinétique = potentiel gravitationnel/2  
(cf démonstration cours J.P. Chièze ou Sect.3.4.1 "Galaxy Formation" M.Longair)

$$v_*^2 = GM_{VL}/R_{\odot} \Rightarrow M_{VL} = R_{\odot} v_*^2 / G \quad (G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1})$$

où:  $R_{\odot} = 8.5 \text{ kpc} = 8.5 \times 3.0856 \times 10^{19} \text{ m}$  ( $M_{\odot}$  = masse du soleil =  $1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ )

$$v_{\odot} = 220 \text{ km.s}^{-1} \Rightarrow M(\text{V.L.}) \approx 10^{11} M_{\odot} \quad \text{si la vitesse radiale} \approx \text{vitesse réelle}$$

$\Rightarrow$  assez bonne approximation de la masse du disque de la V.L.

A la distance des nuages de gaz aux bords du disque ( $R_{\text{gaz}} = 16 \text{ kpc}$ ,  $v_{\text{gaz}} = 275 \text{ km.s}^{-1}$ )

$$\Rightarrow M(\text{V.L.}) = 2.8 \times 10^{11} M_{\odot}$$

En pratique, on ne mesure que la vitesse radiale des galaxies. Cette technique est donc adaptée à la mesure de la masse des galaxies elliptiques, centro-symétriques, où l'on peut supposer que les vitesses dans les directions perpendiculaires à la ligne de visée sont égales à  $v_{||}$ , alors:  $v_{\text{tot}}^2 = 3v_{||}^2$

*N.B.: le théorème du viriel ne requière aucune hypothèse sur la distribution des vitesses des étoiles. Celle-ci peut être aléatoire, comme dans le cas des amas globulaires ou des galaxies elliptiques, ou fortement ordonnée, comme dans celui des galaxies spirales. Dans tous les cas, le théorème du viriel reste valide si le système est en équilibre et celui-ci ne nous apprend rien sur la distribution des vitesses des étoiles dans le système.*

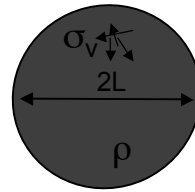
## 2.2. Stabilité du disque de la Voie Lactée et des galaxies spirales en général

Pourquoi le disque de la Voie Lactée ne s'est-il pas effondré sur lui-même sous l'effet de la gravité, par instabilité de Jeans ?

Instabilité de Jeans

Région d'un disque 2D (fin, éventuellement en rotation)

Dimension  $L$ , densité  $\rho$ , dispersion  $\sigma$



*La région s'effondre si les vitesses désordonnées ( $\sigma$ ) des étoiles ne sont pas assez élevées pour les faire sortir de la région avant que l'effondrement ne se produise*

### Instabilité de Jeans (1929) [cf cours T2 G.Mamon]

Supposons une distribution quasi uniforme d'étoiles à l'intérieur de laquelle se trouve une région sphérique légèrement sur-dense de rayon  $L$  et de densité  $\rho$ . Cette région sur-dense s'effondrera sur elle-même si les vitesses aléatoires des étoiles ne sont pas assez grandes pour les emporter hors de la région avant que celle-ci ne s'effondre (Jeans 1929, Toomre 1964).

Le temps d'effondrement se calcule en supposant une étoile au repos sur la surface de la sphère. L'accélération gravitationnelle de cette étoile est:

$$\text{accélération} = GM/L^2 \text{ où } M = (4/3) \pi L^3 \rho.$$

Le temps qu'il faudra à l'étoile pour tomber au centre de la sphère est égal à la période képlérienne pour une orbite de demi grand axe  $L/2$  autour d'un point de masse  $M$ : en remplaçant  $L^3/M$  par  $3/(4 \pi \rho)$ .

3ème loi de Képler:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} \cdot r^3$$

where:

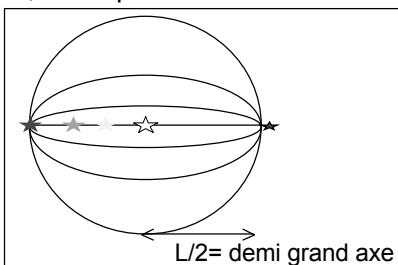
- $T$  = planet's sidereal period
- $r$  = radius of the planet's circular orbit
- $G$  = the gravitational constant
- $M$  = mass of the sun

$$\Rightarrow t_{eff} = \frac{1}{2} \times \left[ 2\pi \frac{(L/2)^{3/2}}{(GM)^{1/2}} \right] = \left( \frac{3\pi}{32G\rho} \right)^{1/2}$$

$t_{eff}$  est aussi appelé temps de chute libre ou free-fall time, en Anglais.

### Le choix de $L/2$ comme demi grand axe dans la 3<sup>ème</sup> loi de Képler

Selon la 1<sup>ère</sup> loi de Képler, une orbite est une ellipse dont le centre de masse occupe l'un des foyers. Dans le cas d'une très petite masse tombant vers une très grande masse, le centre de masse est à l'intérieur de la grande masse. Le foyer de l'ellipse est d'autant plus décentré que l'ellipticité augmente. Dans le cas qui nous intéresse ici d'une trajectoire purement radiale, celle-ci est équivalente à une ellipse "dégénérée", c'est-à-dire d'ellipticité maximale, égale à 1. En conséquence, le foyer est décentré au maximum et le demi grand axe de l'ellipse utilisé dans la 3<sup>ème</sup> loi de Képler est donc  $L/2$ . Comme on s'intéresse à la chute d'une étoile et non à une orbite complète, le temps de "chute libre" est égal à la moitié de la période de l'orbite.



### Instabilité de Jeans (1929)

Le temps d'effondrement (collapse time) est donc:  $t_{eff} = \left( \frac{3\pi}{32G\rho} \right)^{1/2}$

Tandis que le temps qu'il faudrait à une étoile pour s'échapper de la région sur-dense est :

$$t(\text{échappement}) = t_{ech} = L / \sigma_v \text{ où } \sigma_v \text{ est la dispersion de vitesses (r.m.s.).}$$

Notons que  $t_{eff}$  est indépendant de la taille de la région, alors que  $t_{ech}$  croît linéairement avec  $L$ .

Donc:

les petites régions n'ont pas le temps de s'effondrer sous l'effet de la gravité, puisque  $t_{ech} < t_{eff}$ .

Par contre:

les grandes régions sont instables et s'effondrent sous l'effet de leur poids ( $t_{ech} < t_{eff}$ ).

Le rayon critique entre ces deux régimes est la longueur de Jeans:

$$L_{\text{Jeans}} = \left( \frac{3\pi\sigma_v^2}{32G\rho} \right)^{1/2}$$

Les régions sur-denses de taille  $L > L_{\text{Jeans}}$  s'effondrent sous l'effet de l'instabilité de Jeans.

## Stabilité des disques de galaxies

Connaissant maintenant le mécanisme de l'instabilité de Jeans responsable de l'effondrement d'une sphère sur-dense, interrogeons-nous maintenant sur la stabilité d'un disque galactique vis-à-vis de la gravité: *pourquoi le disque de la Voie Lactée ne s'est-il pas effondré sur lui-même sous l'effet de l'instabilité de Jeans ?*

*Comment comprendre l'existence, sur de longues durées, de disques galactiques ?*

Supposons dans un premier temps un disque galactique sans rotation.

Nous utiliserons une version 2D de l'instabilité de Jeans comme approximation des effets de l'instabilité gravitationnelle dans un disque stellaire. Soit  $\sigma$  la densité de surface du disque et considérons une région sur-dense de rayon  $L$  et de masse:

$$M = \pi L^2 \sigma$$


La formule de la période d'une orbite képlérienne appliquée dans le calcul de l'instabilité de Jeans pour calculer le temps d'effondrement devient:

$$t_{eff}^{2D} = \frac{1}{2} \times \left[ 2\pi \frac{(L/2)^{3/2}}{(GM)^{1/2}} \right] = \left( \frac{\pi L}{8G\sigma} \right)^{1/2}$$

Tandis que  $t_{ech}$  garde la même valeur, i.e. varie linéairement avec  $L$ . En 2D,  $t_{eff}$  dépend de  $L$ , contrairement au cas 3D, mais en  $L^{1/2}$  donc moins vite que  $t_{ech}$ , donc à nouveau les régions sur-denses où  $L > L_{Jeans}^{2D}$  s'effondrent avant d'être effacées par les mouvements aléatoires des étoiles.

$$L_{Jeans}^{2D} = \frac{\pi \sigma_v^2}{8G\sigma}$$

## 2.2. Stabilité du disque de la Voie Lactée et des galaxies spirales en général

Selon le critère d'instabilité de Jeans, un disque galactique sera instable i.e. s'effondrera sur lui-même et perdra sa forme de disque, si: 

soit: 
$$L > L_{Jeans}^{2D} = \frac{\pi \sigma_v^2}{8G\sigma}$$

Dans le cas d'une galaxie spirale comme la Voie Lactée, la dispersion de vitesses des étoiles du disque est typiquement de l'ordre de:  $\sigma_v \sim 45$  km/s et la densité surfacique d'étoiles:  $\sigma \sim 75 M_\odot/\text{pc}^2 \Rightarrow L_{Jeans} \sim 2.5$  kpc

$$L_{Jeans}^{2D} = \frac{\pi \times 45000^2 [m^2 s^{-1}]}{8 \times 6.67 \times 10^{-11} [m^3 kg^{-1} s^{-2}] \times 75 \times 2 \times 10^{30} / (3.0856 \times 10^{16})^2 [kg m^{-2}]} \times \frac{1}{3.0856 \times 10^{19}} [kpc]$$

Seules les petites échelles sont stabilisées par la dispersion de vitesses (pression) et le disque devrait s'effondrer sur lui-même aux plus grandes échelles !...

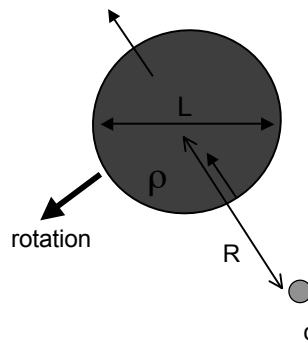
=> Pourquoi les disques sont-ils stables et ne se fragmentent-ils pas ?

## 2.2. Stabilité du disque de la Voie Lactée et des galaxies spirales en général

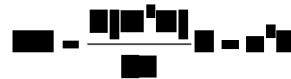
### Stabilisation par la rotation

On a négligé le mouvement d'ensemble dans le disque:

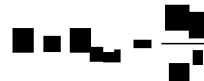
il faut rajouter les accélérations d'entraînement qui dépendent du rayon



=> gradient résultant sur la région étudiée :



La rotation différentielle dans le disque présente une plus grande résistance à la gravité que la dispersion des vitesses stellaires.



La rotation stabilise les grandes échelles :

Toutes les échelles sont stables si  $L_{rot} < L_{Jeans}$

car il faut  $L > L_{Jeans}$  pour effondrement et alors  $L > L_{rot}$ , ce qui implique une stabilisation par la rotation du disque.

## 2.2. Stabilité du disque de la Voie Lactée et des galaxies spirales en général

### Composantes stabilisatrices

-- Masse du disque : accroît  $\rho$ , déstabilise

-- Fraction de gaz : abaisse  $\langle \sigma \rangle$ , déstabilise

-- Bulbe central : augmente  $\Omega, \kappa$  sans modifier  $\rho$  => stabilise

-- Matière noire : idem bulbe : stabilise... sauf si dans le disque

La stabilité des spirales permet certainement d'exclure que toute la matière noire soit dans le disque des spirales (argument historique)

## 2.3 La découverte de la raie de l'hydrogène neutre (HI) à 21 cm

Radioastronomie : de 1 mm à 15 m (au-delà de 15 m, l'ionosphère devient réfléchissante).

En 1880, Edison tenta d'observer le Soleil en utilisant un radiotélescope, mais abandonna car on estima en 1902 que le rayonnement émis par le Soleil était trop faible (loi de Planck).

En 1932, Karl Jansky découvre une émission en continu radio de la V.L. (à 14.6m), dont on ne comprend pas l'origine. Van de Hulst (1944) donne l'explication des raies radio:

1. Raies de recombinaison dans le domaine radio ---> associées aux régions HII (formation d<sup>+</sup>\*)

2. Raie de structure hyperfine ---> associée aux régions HI (gaz neutre)

A cela, il faut ajouter le rayonnement synchrotron responsable de l'émission continue (e<sup>-</sup> se déplaçant dans un champ magnétique), principalement issu des restes de supernovae qui accélèrent les électrons.

En 1951, Ewen & Purcell détectent la raie à 21 cm prédite par Van de Hulst.

### **Raies de recombinaison des régions HII:**

$$E_{\infty} - E_1 = 13.6 \text{ eV} \rightarrow \lambda = 913.5 \text{ \AA}$$

Les photons de  $\lambda < 913.5 \text{ \AA}$  ionisent l'H

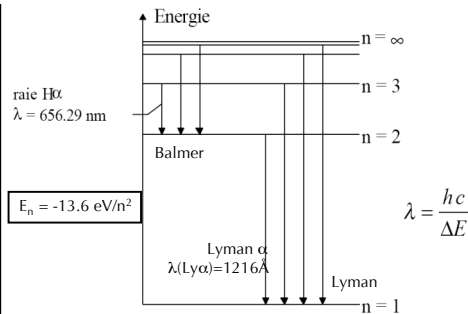
On parle alors de HII (=H<sup>+</sup>) par opposition à HI.

La recombinaison des e<sup>-</sup>/p<sup>+</sup> entre n=110 et 109 et n=105 et 104 correspond à la radio (≈5 cm)!

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s} = \text{constante de Planck}$$

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$



## 2.3 La découverte de la raie de l'hydrogène neutre (HI) à 21 cm

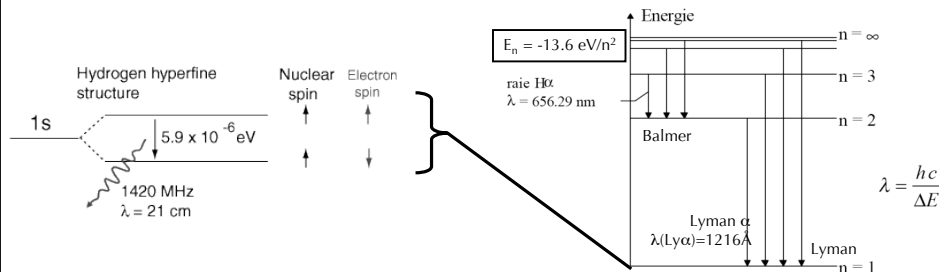
≈ 10 % de la masse baryonique (gaz + étoiles) de la Voie Lactée est sous la forme de HI.

La raie à 21 cm de l'hydrogène est une **raie de structure hyperfine**:

le niveau 1s (n=1, l=0, niveau fondamental) de l'électron est subdivisé en deux niveaux selon le couplage parallèle (niveau excité) ou anti-parallèle (niveau inférieur) des spins du proton et de l'électron.

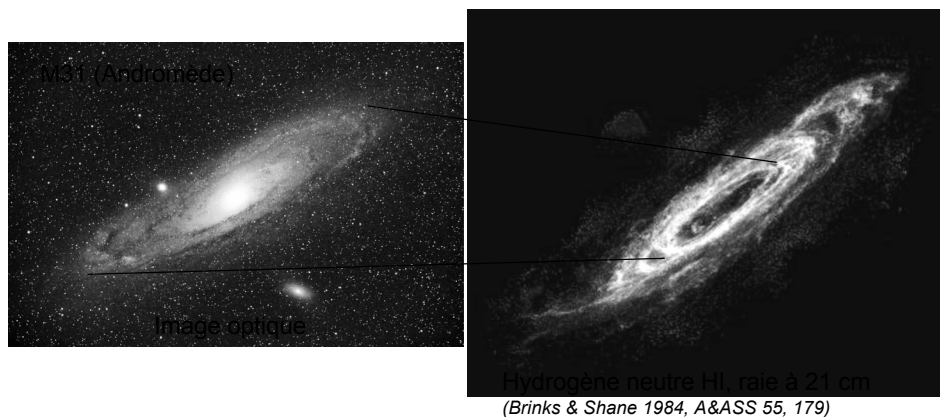
La différence entre les 2 niveaux ( $5.9 \times 10^{-6} \text{ eV}$ ) est 2 millions de fois plus faible que le niveau fondamental (-13.6 eV).

Les collisions entre atomes provoquent le passage du niveau anti-parallèle au niveau excité de l'électron, puis l'e<sup>-</sup> se désexcite en rayonnant à 21 cm. Il faudrait attendre  $10^7$  ans sans collisions, mais les collisions accélèrent aussi les désexcitations et la V.L. contient  $3 \times 10^9 M_{\odot}$  de HI dont 70% au-delà du soleil par rapport au centre de la VL.



### 2.3 La découverte de la raie de l'hydrogène neutre (HI) à 21 cm

Avantage de la raie HI: le domaine radio ( $> 1$  mm) correspond à des longueurs d'ondes bien plus grandes que la taille caractéristique ( $< 10 \mu\text{m}$ ) des grains de poussière interstellaire et en conséquence ne subit pas d'extinction par elle. On a pu ainsi observer le HI jusqu'à 30 kpc et ainsi mieux cartographier la Voie Lactée.

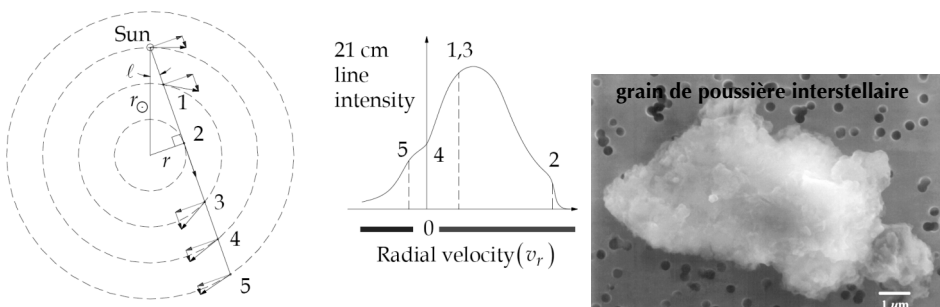


### 2.3 La découverte de la raie de l'hydrogène neutre (HI) à 21 cm

Avantage de la raie HI: le domaine radio ( $> 1$  mm) correspond à des longueurs d'ondes bien plus grandes que la taille caractéristique ( $< 10 \mu\text{m}$ ) des grains de poussière interstellaire et en conséquence ne subit pas d'extinction par elle. On a pu ainsi observer le HI jusqu'à 30 kpc et ainsi mieux cartographier la Voie Lactée.

#### Morphologie de la Voie Lactée dérivée de la raie HI:

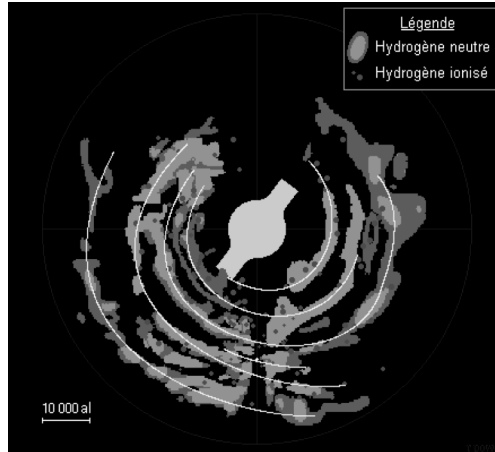
- (i) Intensité de la raie à 21 cm  $\sim$  densité de HI
  - (ii) Distance déduite de la vitesse radiale par le décalage Doppler de la raie
- $\Rightarrow$  structure spirale de la V.L. directement identifiée.





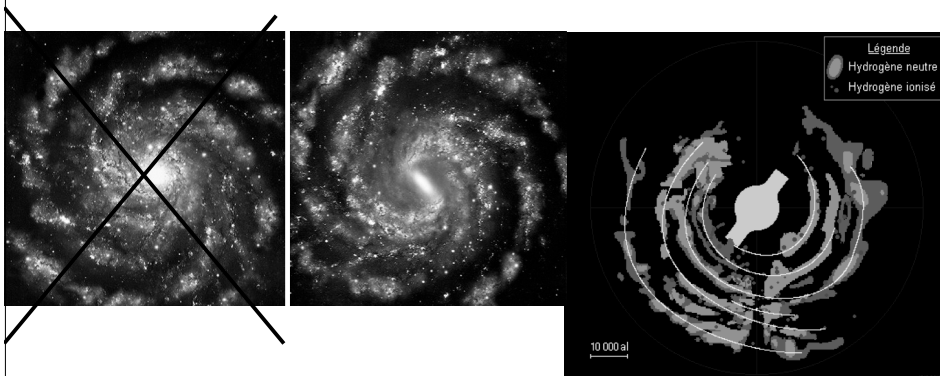
## 2.4 La raie à 21cm révèle les bras spiraux, une barre et le "dark halo"

- On a ainsi non seulement confirmé la forme de disque mais aussi celle de concentrations de gaz associées aux bras spiraux de la Voie Lactée (Oort, Kerr, Westerhout 1958, cf image). Celle-ci fut confirmée par une carte des régions HII (grâce à la raie de recombinaison H $\alpha$  à 6563 Å) montrant les bras spiraux (Georgelin & Georgelin 1976, Taylor & Cordes 1993).



## 2.4 La raie à 21cm révèle les bras spiraux, une barre et le "dark halo"

- Plus récemment, la surprise est venue de la découverte de la présence d'une barre au centre de la Voie Lactée. Soupçonnée par les travaux des années 1970 (Peters 1975), prouvée plus tard (Blitz & Spergel 1991, López-Corredoira et al. 2001) par des travaux concluant que la barre centrale de la Voie Lactée ressemble fortement à celle que l'on peut observer dans la galaxie spirale M95.
- Enfin, dans les années 1970 on a constaté que la vitesse de rotation du gaz HI dans la périphérie de la V.L. impliquait une masse "dynamique" supérieure à la masse "visible" de la V.L. qui a été interprétée comme la preuve de la présence d'un halo de matière noire ou masse cachée, dont la masse est 10 fois supérieure à celle de la matière visible (étoiles+ gaz).

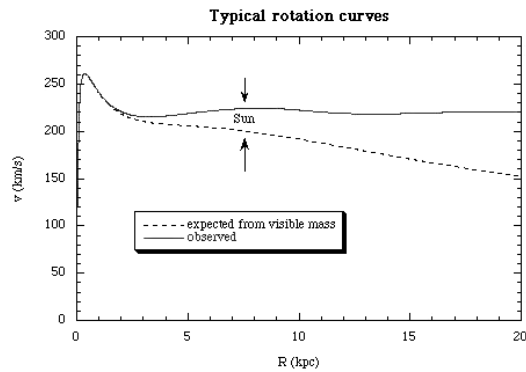


## 2.4 La raie à 21cm révèle les bras spiraux, une barre et le "dark halo"

Si la lumière était un bon indicateur de la masse, l'essentiel de celle-ci se trouverait près du centre et la vitesse de rotation augmenterait d'abord puis diminuerait rapidement avec la distance au centre de la galaxie, selon les lois de Képler.

Les observations sont très différentes: la vitesse de rotation augmente bien près du centre, mais ne décroît pas au-delà, aussi loin qu'on a pu la mesurer, ce qui indique la présence d'une quantité importante de matière dans des régions de faible luminosité.

- En conséquence, la masse augmente linéairement avec  $r$  et la densité décroît comme  $1/r^2$ .
- A l'intérieur de quelques kpc, la masse est dominée par les étoiles, mais au-delà elle est dominée par la matière noire.



## 2.4 La raie à 21cm révèle les bras spiraux, une barre et le "dark halo"

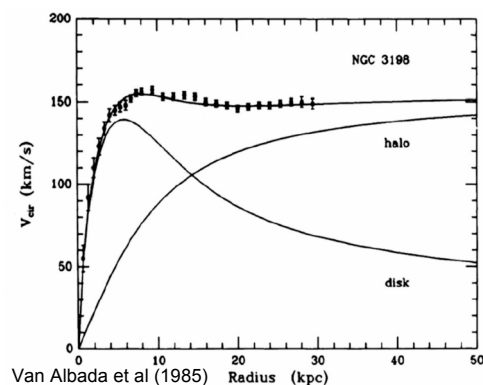
2 techniques ont permis de mesurer la rotation des galaxies en fonction de l'éloignement au centre = courbes de rotation:

- Les raies spectrales décalées par effet Doppler  $\Rightarrow$  la vitesse radiale des étoiles
  - la vitesse du gaz en hydrogène neutre (HI) grâce à la raie en émission à 21 cm de HI.
- = plates à grande distance du centre, i.e.  $v_{rot} = \text{constante}$ :  $M(\leq r) = v_{rot}^2(r)/G \Rightarrow \mathbf{M(\leq r) \sim r}$

- Alors que la distribution de lumière des **galaxies spirales** décroît de manière exponentielle:

$$I(r) = I_0 \exp(-r/h)$$

- $\Rightarrow$   **$M/L$  augmente avec le rayon**
- $\Rightarrow$  la masse diminue moins vite que la lumière
- $\Rightarrow$  **Un halo de matière noire (masse cachée) en  $1/r^2$  permet de rendre compte de ces courbes de rotation.**



## 2.5 La structure spirale



- Les bras spiraux "traînent" dans la rotation.
- Ils ne s'enroulent pas plus d'une ou deux fois autour d'une galaxie
- La concentration de régions HII (=H<sup>+</sup>, hydrogène ionisé) et d'étoiles bleues est plus grande dans les bras qu'ailleurs dans une galaxie: le taux de formation d'étoiles y est supérieur.
- Des traces noires dues à l'absorption par la poussière interstellaire longent le bord des bras spiraux.
- Les nuages moléculaires sont plus massifs dans les bras qu'ailleurs.

## La structure spirale (suite)



- Les bulbes centraux sont la plupart du temps ovales ou elliptiques, plutôt qu'axi-symétriques.
- Parfois le bulbe présente une morphologie barrée: galaxies SB.
- Ceci est en accord avec les simulations numériques d'amas stellaires en rotation: avec des conditions initiales symétriques, les amas stellaires dessinent rapidement (en quelques périodes de rotation) des profils elliptiques ou barrés.

### Interprétation de la structure spirale

- La rotation différentielle (vitesse supérieure au centre qu'au bord) joue un rôle important mais elle ne suffit pas à expliquer la structure spirale: les bras ne s'enroulent pas plusieurs fois.
- Le taux de formation d'étoiles élevé dans les bras spiraux consumerait la totalité du gaz interstellaire qui y est localisé en un temps court par rapport à l'âge de l'univers. Or nous observons beaucoup de galaxies spirales dans le ciel, donc les bras ne sont pas matériels ! De la matière doit circuler constamment à l'intérieur et en sortir.
- Les masses des complexes de nuages moléculaires contenus dans les bras spiraux et le fort taux de formation d'étoiles impliquent tous deux que la matière interstellaire contenue dans les bras spiraux soit compressée, en comparaison du reste du disque d'une galaxie.

### Interprétation de la structure spirale

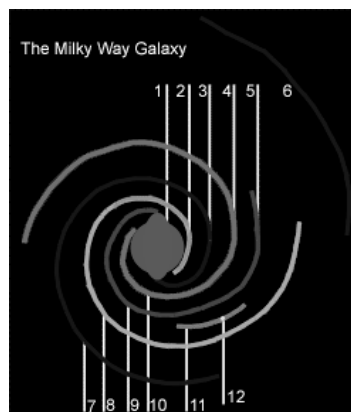
Lin et Shu (1963): ondes de densité pour expliquer la persistance des structures spirales.

Les bras spiraux = ondes stationnaires, permettant aux nuages d'hydrogène de s'agglomérer pour former de nouvelles étoiles.

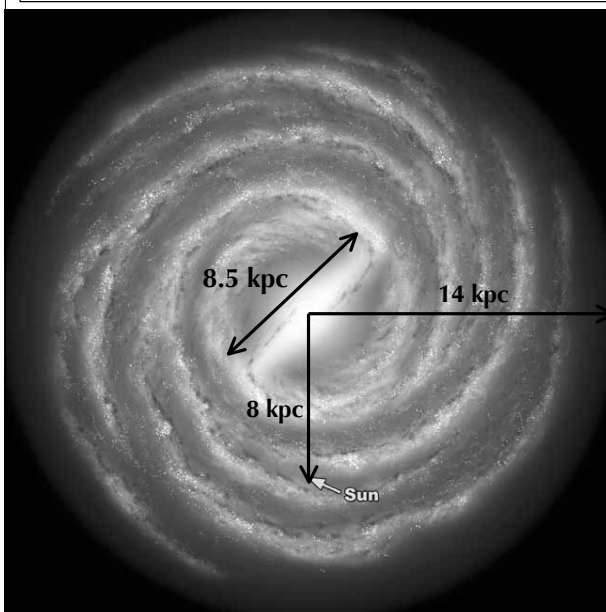
Les étoiles se déplacent à une vitesse différente de celle des ondes de densité spirales.

## 2.5 La structure spirale de la Voie Lactée

1. Galactic Core and Bar
2. 3kpc Arm
3. Norma Arm
4. Crux Arm
5. Carina Arm
6. Newly discovered extension of the Outer Arm
7. Outer Arm
8. Perseus Arm
9. Sagittarius Arm
10. Scutum Arm
11. Orion Arm
12. Location of our Sun



## La Voie Lactée: une galaxie de type SBbc



La Voie Lactée est une galaxie de type SBbc qui possède :

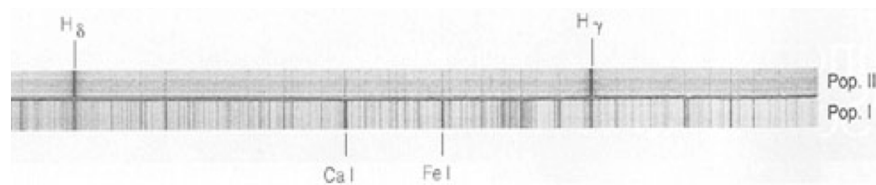
- un disque "fin" constitué de  $\sim 6 \times 10^{10} M_{\odot}$  d'étoiles jeunes (Population I), de gaz et de poussière, de 100 pc d'épaisseur.
- un disque "épais"  $\sim 10^9 M_{\odot}$  d'étoiles vieilles (population II) sans gaz ni poussières, de 1000 pc d'épaisseur.
- un bulbe central de rayon 1kpc, constitué de  $\sim 1.7 \times 10^{10} M_{\odot}$  d'étoiles vieilles + un peu d'étoiles jeunes, de gaz et de poussière
- une barre centrale qui transporte du gaz dans une région de 1kpc où se produit de la formation d'étoiles.
- un halo  $\sim 10^8 M_{\odot}$  d'étoiles vieilles

## 2.6 Populations stellaires

Les étoiles ont été classées selon leur composition chimique par Baade (1941):

**Population I : les étoiles du voisinage solaire, des amas ouverts, et plus généralement du disque des galaxies spirales. Ce sont des étoiles jeunes de Métallicité solaire (en masse): 70% H ( $X=0.7$ ), 28% He (Y), ~2% métaux (Z)**

**Population II : ces étoiles plus anciennes se trouvent principalement dans le halo des galaxies spirales et en particulier dans les amas globulaires (qui ne constituent que 1 % des étoiles du halo).  
Métallicité 0.1-1% solaire: 75% H, 24.99% He, ~0.01% métaux**



## 2.6 Populations stellaires

Les étoiles ont été classées selon leur composition chimique par Baade (1941):

**Population I : les étoiles du voisinage solaire, des amas ouverts, et plus généralement du disque des galaxies spirales. Ce sont des étoiles jeunes de Métallicité solaire (en masse): 70% H ( $X=0.7$ ), 28% He (Y), ~2% métaux (Z)**

**Population II : ces étoiles plus anciennes se trouvent principalement dans le halo des galaxies spirales et en particulier dans les amas globulaires (qui ne constituent que 1 % des étoiles du halo).**

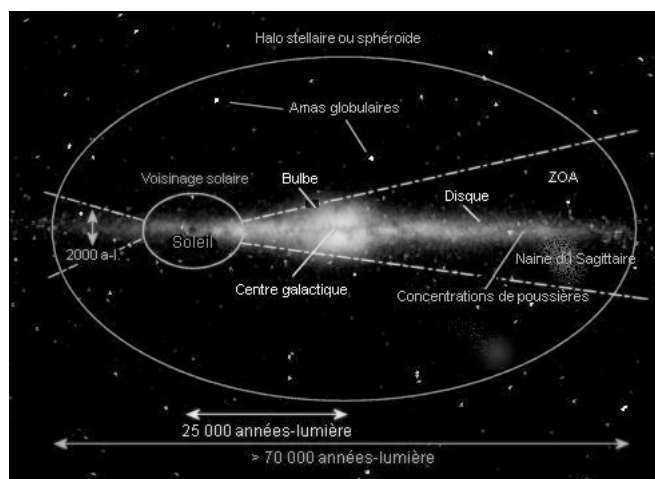
**Métallicité 0.1-1% solaire: 75% H, 24.99% He, ~0.01% métaux**

Aujourd'hui, on parle aussi de:

- **Population I extrême:** les étoiles les plus jeunes.
- **Population III:** les premières étoiles formées, à partir d'une gaz non enrichi en éléments lourds, puisqu'il n'y aurait eu aucune génération d'étoiles antérieures. On pense que les étoiles de population III étaient massives (plus de 100  $M_{\odot}$ ).
- Elles ont dû exploser très tôt et disperser autour d'elles les éléments qu'elles avaient synthétisés, affectant ainsi la composition chimique de leurs contemporaines.

## Distribution spatiale des populations stellaires de la V.L.

ZOA= zone of avoidance= région inaccessible à l'œil à cause de l'absorption dans la ligne de visée par la poussière interstellaire.



## 2.7 Détermination de la masse des composantes stellaires

(1) On mesure la luminosité de la galaxie dans un filtre, une bande: par exemple, dans le bleu (bande B à 4400 Å) ou l'infrarouge proche (bande K à 2.2  $\mu\text{m}$ ) : L(B) ou L(K)

(2) On étudie le spectre optique de la galaxie, ou de l'une de ses régions, pour déterminer sa population stellaire (âge, température moyenne, distribution en masses des étoiles):

chaque étoile possède une masse et une luminosité et donc un M/L

=> une population d'étoiles possède un M/L intégré

Les modèles de synthèse de populations stellaires permettent de reproduire les spectres des galaxies avec une population synthétique et d'en déduire un rapport  $M_*/L(K)$  (il ne s'agit pas de la masse totale mais de la masse d'étoiles).

On déduit ensuite  $M_*$  de  $L(K) \times M_*/L(K)$

## 2.7 Détermination de la masse des composantes stellaires

*Calcul de la masse stellaire du bulbe:*

A l'aide d'un modèle de synthèse de population (compilation de Charlot et al. 1996) et pour un sphéroïde (étoiles de pop° II), Fukugita, Hogan & Peebles (1998) trouvent:

$$(M_*/L_V)_{GBF} = (4.0 \pm 0.3) + 0.38(t_G - 10 \text{Gyr}) M_\odot / L_{V,\odot}$$

où  $t_G$  est l'âge du sphéroïde et GBF indique la fonction de masse initiale (IMF), i.e. la proportion des étoiles en fonction de leur masse au moment de leur naissance (celle de Gould, Bahcall & Flynn 1996, ApJ 465, 759). Ce qui donne:

$$(M_*/L_V)_{GBF} = (4.8 \pm 1.1) M_\odot / L_{V,\odot} \text{ pour } t_G = 12 \pm 2 \text{ Gyr}$$

Une valeur proche de celle de **Binney & Tremaine pour le disque de la V.L.** ( $M/L_V=5$ )

A l'aide de la couleur, B-V, on en déduit M/L en bande B:

$$(M_*/L_B)_{GBF} = (5.4 \pm 0.3) + 0.7(t_G - 10 \text{Gyr}) M_\odot / L_{B,\odot}$$

$$\Rightarrow (M_*/L_B)_{GBF}^{\text{bulbe}} = (6.8 \pm 1.7) M_\odot / L_{B,\odot} \text{ pour } t_G = 12 \pm 2 \text{ Gyr (halo/bulbe)}$$

**Masse de la Voie Lactée:**

$$L_V(\text{disque}) = 1.2 \times 10^{10} L_\odot \text{ [x } 5 = (M/L_V)] \quad \Rightarrow M_*(\text{disque}) = 6.0 \times 10^{10} M_\odot$$

$$L_B(\text{bulbe}) = 0.25 \times 10^{10} L_\odot \text{ [x } 6.8 = (M/L_B)_{GBF}] \quad \Rightarrow M_*(\text{bulbe}) = 1.7 \times 10^{10} M_\odot$$

## Dark matter versus masse stellaire

Notez bien que pour une galaxie spirale:

$$M_*(\text{étoiles})/L_B \approx 5 M_\odot / L_{B,\odot}$$

$$M(\text{dynamique})/L_B \geq 30 M_\odot / L_{B,\odot}$$

La masse totale de la Voie Lactée calculée par Lynden-Bell et al. (1983) en utilisant les amas globulaires à la périphérie de la Voie Lactée ou encore les galaxies satellites qui gravitent autour est de:

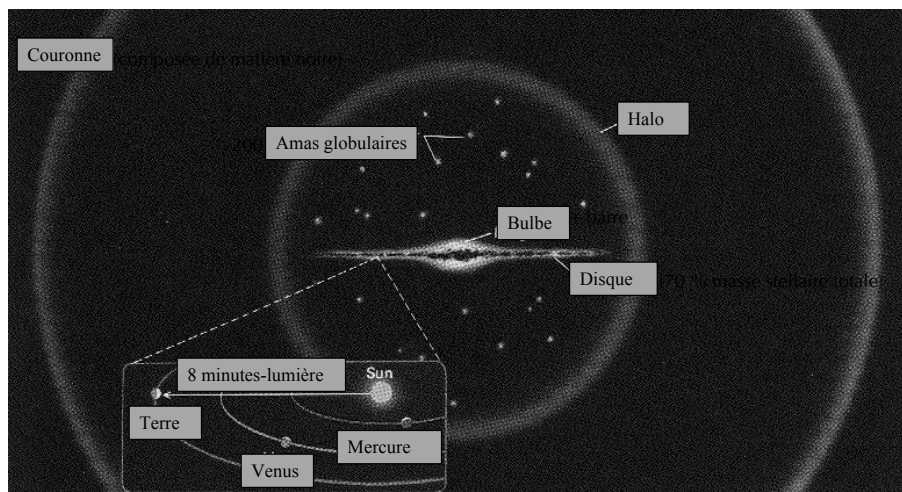
$$M_{\text{tot}}(\text{Voie Lactée}) \approx 0.2 - 2 \times 10^{12} M_\odot$$

à comparer à :  $M_*(\text{Voie Lactée}) \approx 7.8 \times 10^{10} M_\odot$

Ce qui donne :  $M_{\text{tot}}/M_*(\text{Voie Lactée}) \approx 10$



## 2.8 Les composantes de la Voie Lactée



## Caractéristiques de la Voie Lactée

### Classification de la Galaxie

### SBbc

Diamètre & masse du disque fin

28 kpc,  $6 \times 10^{10} M_{\odot}$  ( $v_{\text{rot}} \sim 250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Autres composantes

disque épais:  $10^9 M_{\odot}$ , halo:  $10^8 M_{\odot}$

Diamètre & masse du bulbe

4.6 kpc,  $1.7 \times 10^{10} M_{\odot}$  ( $v_{\text{rot}} \sim 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )

### Masse totale d'étoiles

**$7.8 \times 10^{10} M_{\odot}$**  (disque  $\approx 78\%$ , bulbe  $\approx 22\%$ )

Diamètre de la couronne

110 kpc (extension matière noire)

### Masse totale de la Galaxie

**$\approx 10^{12} M_{\odot}$  (matière noire incluse)**

Longueur de la barre centrale

8 kpc

Distance du Soleil au centre

8.5 +/- 0.5 kpc

Épaisseur Galaxie au niveau Soleil

615 pc

Vitesse du Soleil dans la Galaxie

220 km/sec

Période de révolution du Soleil

225 millions années

## 2.8 Les composantes de la Voie Lactée

	Métallicité	Age *	M*
<b>Bulbe</b>	Z~0.4Z <sub>⊙</sub>	12-15 Gyr	1.7x10 <sup>10</sup> M <sub>⊙</sub>
Pop° II intermédiaire [Minniti 1995, Barbuy et al. 1999]		[Ortolani et al. 1995]	
Pop° II extrême au centre	Z<0.4Z <sub>⊙</sub>	10-14 Gyr	
<b>Halo</b> Pop° II extrême	Z<0.4Z <sub>⊙</sub>	10-14 Gyr	0.01x10 <sup>10</sup> M <sub>⊙</sub>
<b>Disque épais</b>	Z=0.25xZ <sub>⊙</sub>	10 Gyr	0.1x10 <sup>10</sup> M <sub>⊙</sub>
<b>Disque fin</b>			6x10 <sup>10</sup> M <sub>⊙</sub>
Pop° I extrême (bras spiraux)	Z~1.5xZ <sub>⊙</sub>	0.02-0.05 Gyr	
Pop° I intermédiaire (ailleurs)	Z=0.5-1xZ <sub>⊙</sub>	1-10 Gyr	

Gyr= giga-year= 10<sup>9</sup> ans

Abondance en nombre: [Fe/H]=0 ⇒ métallicité solaire

Abondance en masse:

Z=(masse en éléments autres que H et He)/(masse totale) = 0.02 ⇒ métallicité solaire

[α/Fe]= éléments α produits lors de la nucléosynthèse explosive des Supernovae de type II (étoiles plus massives que 8 M<sub>⊙</sub>) par capture de noyaux d'Hélium, dits noyaux α.

Ces éléments sont : C, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti



Galaxies J1 - David Elbaz

2. La Voie Lactée

Page 35

