

Astrophysique

16 – La Voie lactée



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

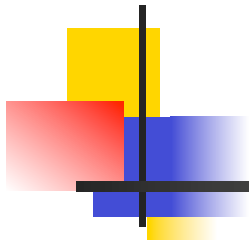




2 mars 2011

Alain Bouquet – Astrophysique 16 – La Voie lactée

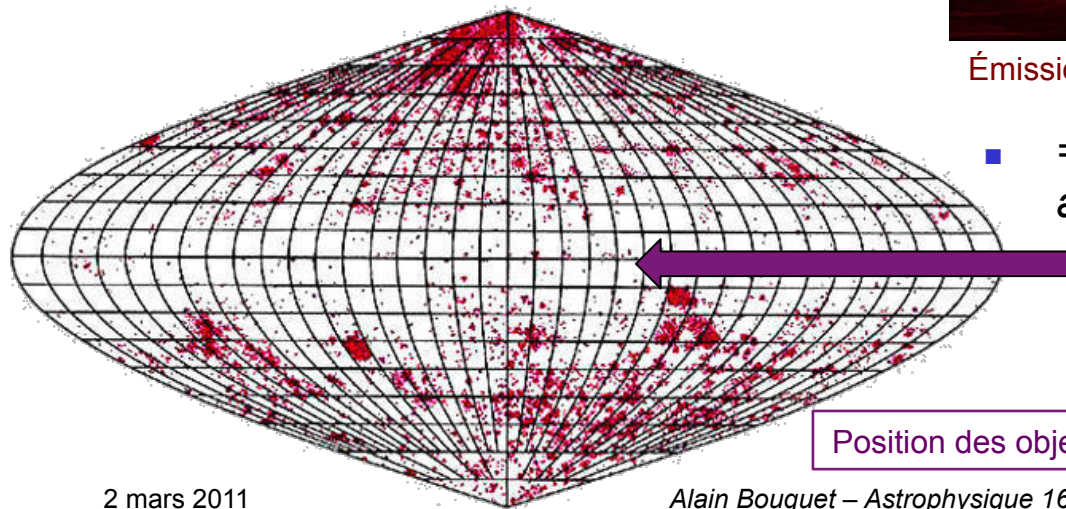
2



UNE ÉTUDE DIFFICILE

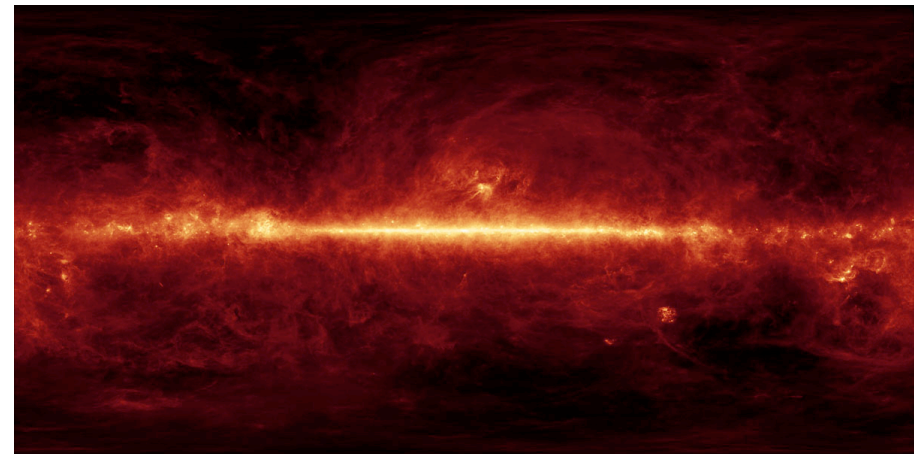
Observations très faciles... et très difficiles !

- Un disque très mince, vu par la tranche



Position des objets extra-galactiques

- Une absorption considérable dans le plan du disque (~ 1 mag/kpc)

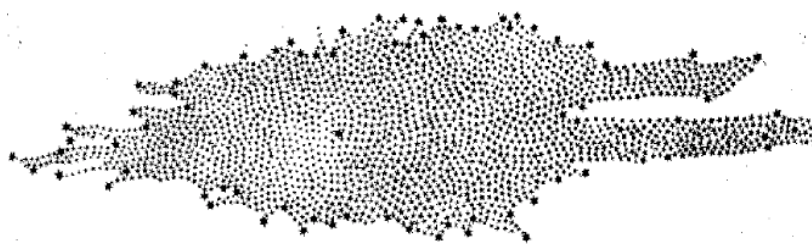
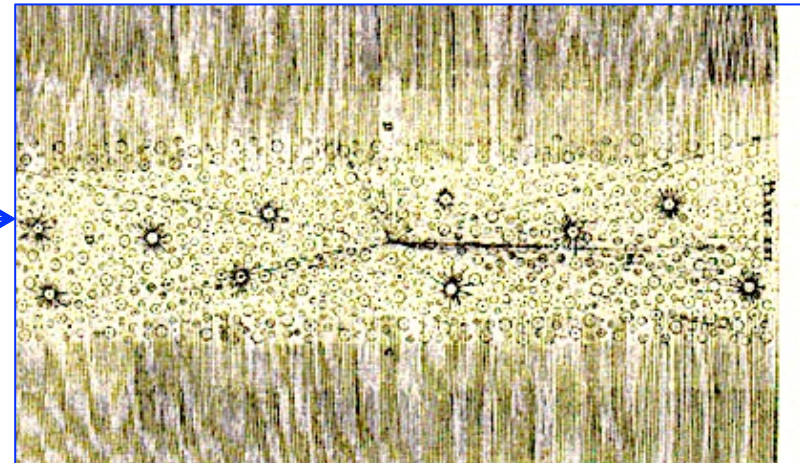


Émission infrarouge de la poussière à $100 \mu\text{m}$ ©Cobe-Dirbe

- \Rightarrow « zone d'évitement » (*zone of avoidance*)

Les Anciens

- Toutes les étoiles visibles à l'œil nu appartiennent à la Voie lactée
- Hipparque, Ptolémée : des étoiles ?
- Galilée (1610) : des étoiles !
- Thomas Wright (1750) : un disque ?
- William Herschel (1785) : un nuage aplati ?

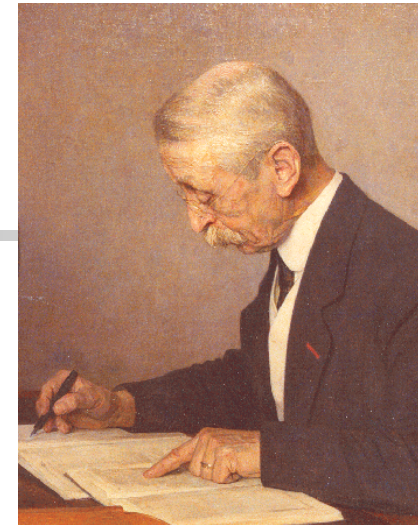


Méthode de Herschel

- Supposer toutes les étoiles de même luminosité
distance \Leftrightarrow magnitude apparente m
- Compter le nombre d'étoiles de magnitude m dans une direction
- Tracer la carte

- Kant et les univers-îles

Jacobus Kapteyn (1851-1922)



- Comptage d'étoiles dans plusieurs directions jusqu'à une magnitude apparente donnée
- Type et classe spectrale \Rightarrow distance (+ parallaxe pour les proches)
- \Rightarrow répartition en 3 dimensions des étoiles
- \Rightarrow ellipsoïde aplati de 10 kpc de rayon et 1 kpc d'épaisseur

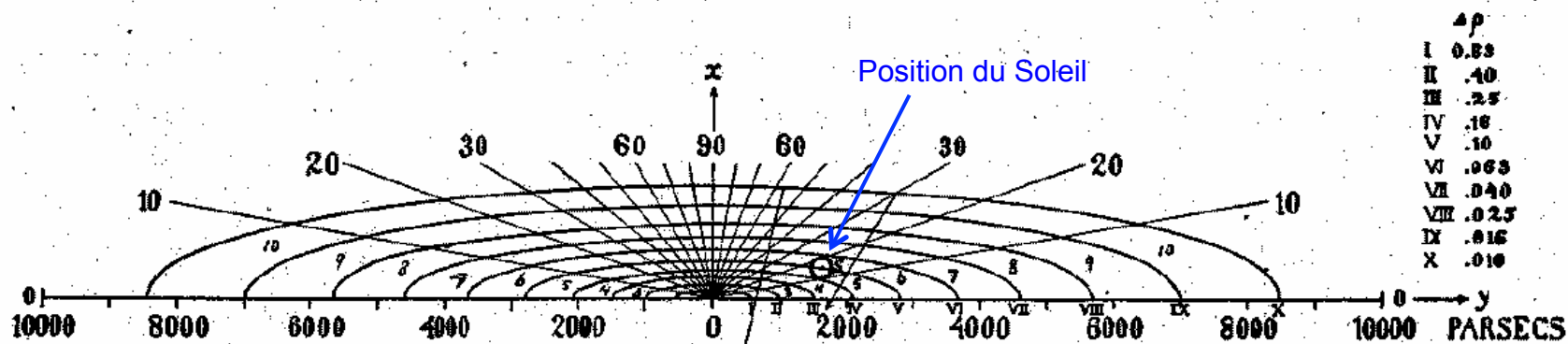
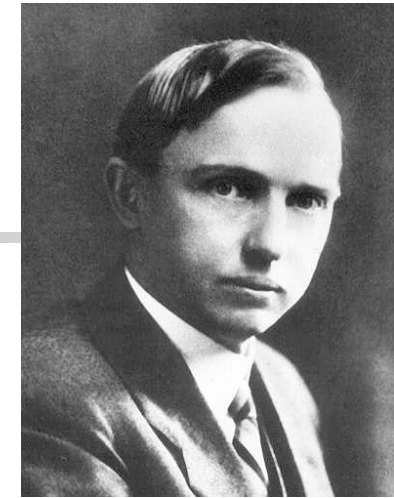


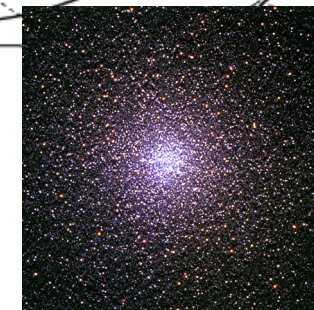
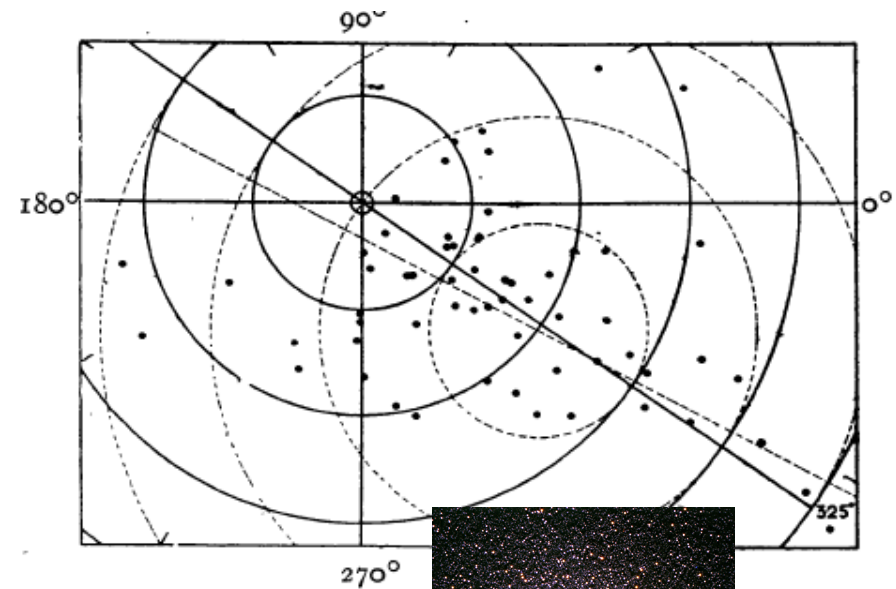
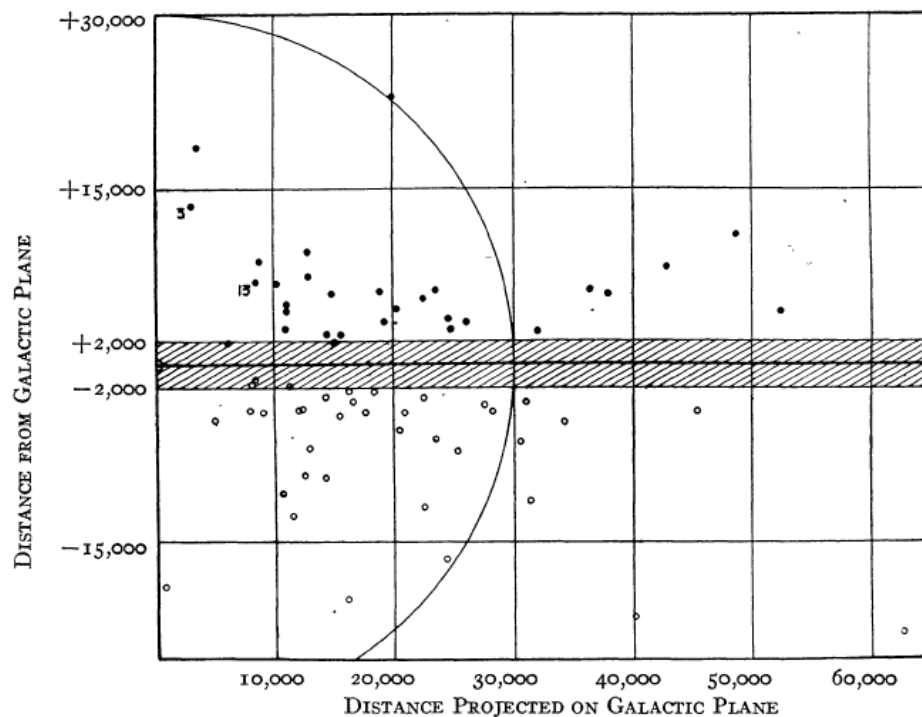
FIG. I Densité d'étoiles selon Kapteyn (1922)

- Mais Kapteyn n'avait pas du tout pris l'absorption interstellaire en compte

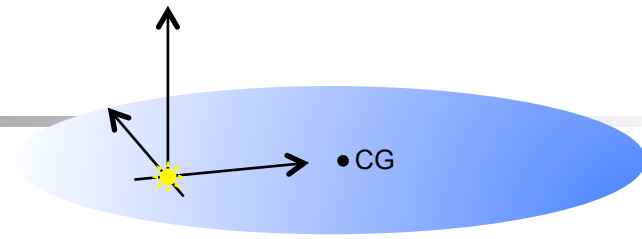
Harlow Shapley (1885-1972)



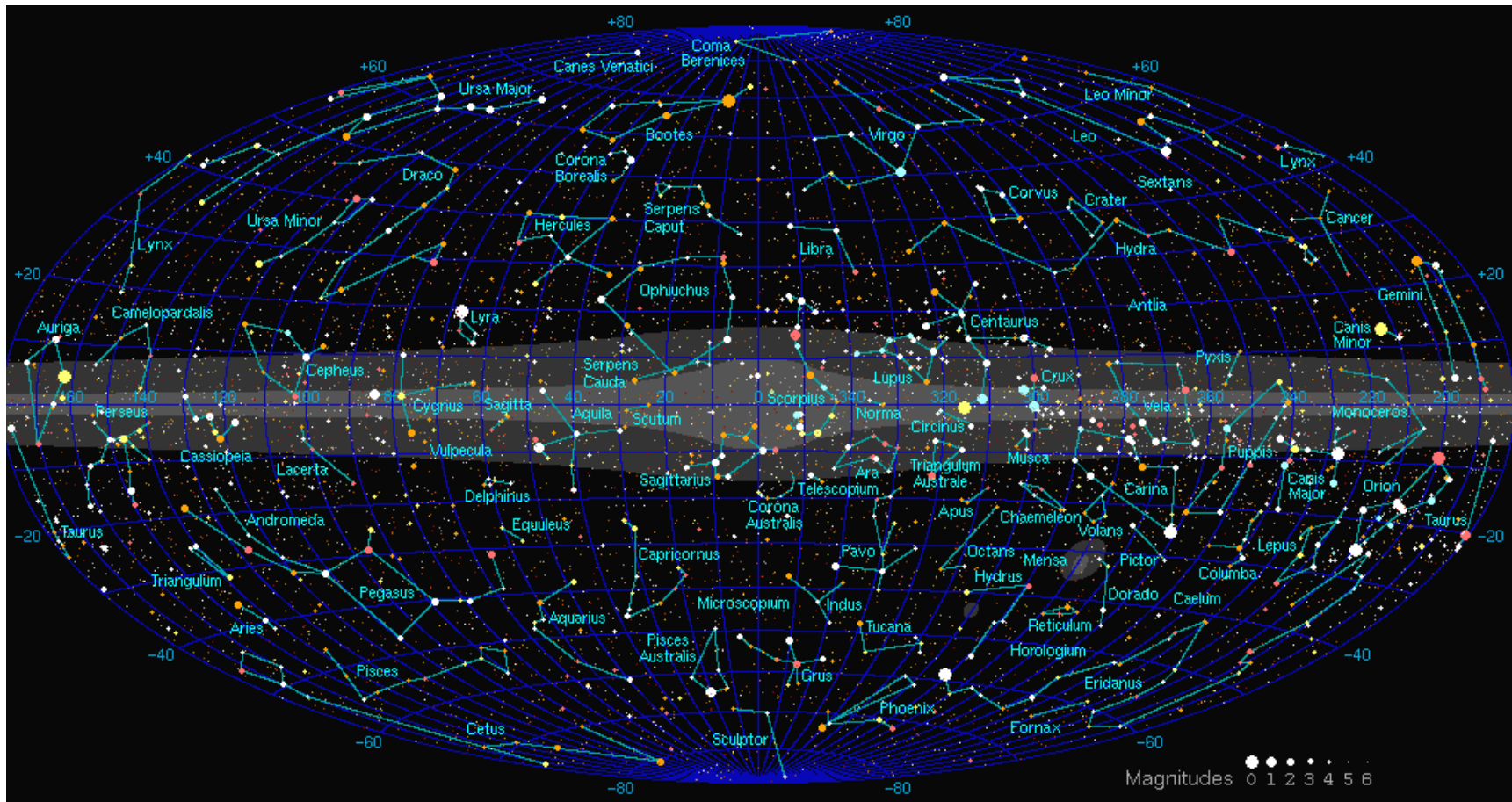
- 1915-1919 : distance des amas globulaires à partir de la relation période –luminosité des RR Lyrae
- 1918 : la distribution des amas globulaires n'est pas du tout centrée sur le Soleil mais sur un point situé à 15 kpc, à peu près dans la direction du Sagittaire



Coordonnées galactiques



- Centrées sur le Soleil



Jan Oort (1900-1992)

- Thèse en 1926 sur la dynamique des étoiles de grande vitesse, sous la direction de J. Kapteyn
- Confirme en 1927 les idées de Bertil Lindblad sur la rotation de la Galaxie et en estime la dimension, la masse et la vitesse de rotation
- Développe dans les années 40 avec son étudiant H. van de Hulst la radioastronomie de l'hydrogène, construit le radiotélescope de Dwingeloo et établit une carte de la Galaxie
- Propose en 1950 une théorie pour l'origine des comètes (le nuage de Oort)
- Identifie la nébuleuse du Crabe comme le reste de la supernova de 1054 (archives chinoises) et en mesure la polarisation (ray. synchrotron)



Jan Oort en 1935



Oort à Dwingeloo

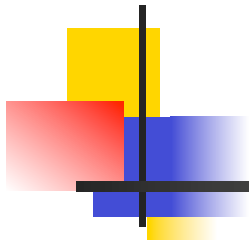
Bras spiraux

- Utilisation de la raie à 21 cm de l'hydrogène atomique (van de Hulst 1945)
- Carte établie en 1954 par van de Hulst, Muller et Oort



Van de Hulst et Oort en 1964





STRUCTURE



Disque(s)

■ Disque

- Diamètre ~ 50 kpc
- Épaisseur ~ 500 pc (1/100 diamètre)
- Distance CG = 8,5 kpc (IAU)
- **Diminution exponentielle de la densité d'étoiles**

$$n(r,z) = n_0 e^{-r/r_0} e^{-z/h}$$

- avec $r_0 \approx 3,5$ kpc et $h \approx 300$ pc

■ Métallicité

- [Fe/H] entre -0,5 et +0,3

■ Luminosité

- $L_B \approx 18 \times 10^9 L_\odot$

■ Masse totale

- $M \approx 60 \times 10^9 M_\odot$
- $\Rightarrow M/L_B \approx 3$
- Étoiles SP : $L/L_\odot \approx (M/M_\odot)^3$
- $\Rightarrow M \approx 0,6 M_\odot$

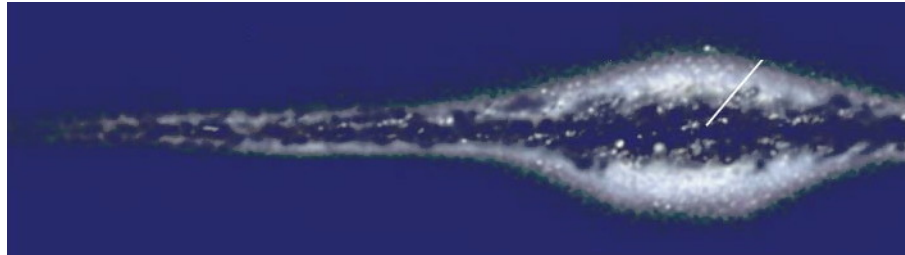
■ Gaz : distribution similaire, mais plus concentrée dans le disque ($h \sim 160$ pc)

- Masse de gaz $\approx 5 \times 10^9 M_\odot$
- Masse de poussières $\approx 10 \times 10^6 M_\odot$

■ « Disque épais »

- Échelle de décroissance $h \approx 1400$ pc
- Métallicité [Fe/H] entre -0,6 et -0,3
- \Rightarrow étoiles plus âgées
- \Rightarrow épaissement dynamique avec le temps

Bulbe



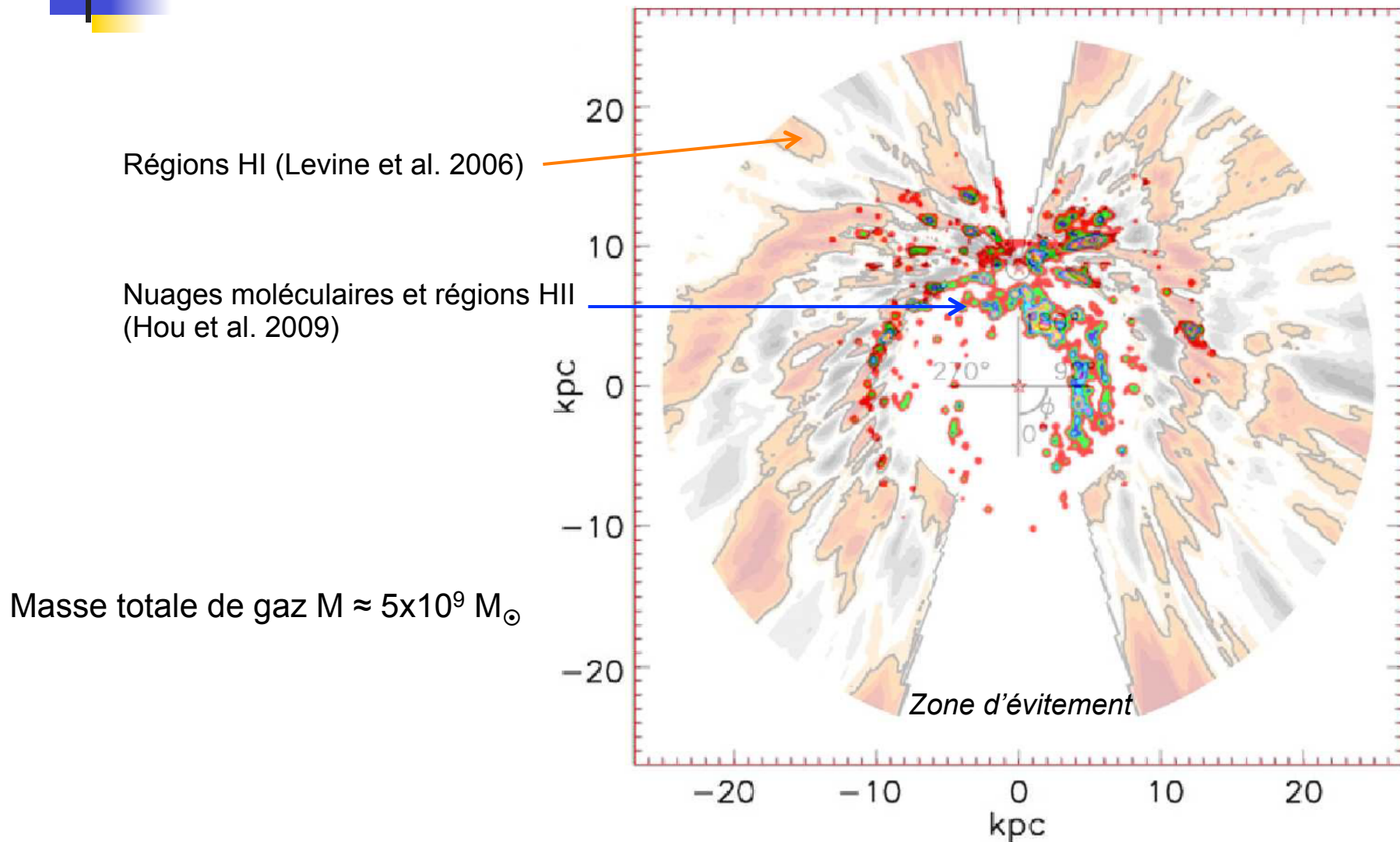
- La galaxie est renflée près du centre (comme d'autres spirales)
- Bulbe en forme de sphère aplatie, de 1 kpc de rayon
- Densité d'étoiles décroissant exponentiellement

$$n(r) = n(0) \exp\left\{-\left(r/r_0\right)^{1/4}\right\}$$

(profil de de Vaucouleurs)

- Étoiles plus rouges que celles du disque
- Métallicité souvent faible
 $[Fe/H] \approx -1$
- \Rightarrow cohérent avec une population d'étoiles plus anciennes que celles du disque
- Mais
 - Luminosité totale $L_B \approx 3 \times 10^9 L_\odot$
 - Masse totale $\approx 10 \times 10^9 M_\odot$
 - $\Rightarrow M/L \approx 3,3$
- et
 - Métallicité moyenne $[Fe/H] \approx 0,3$
 - Présence de Miras (AGB)
 - \Rightarrow population d'étoiles jeunes

Gaz : hydrogène neutre et ionisé, hélium

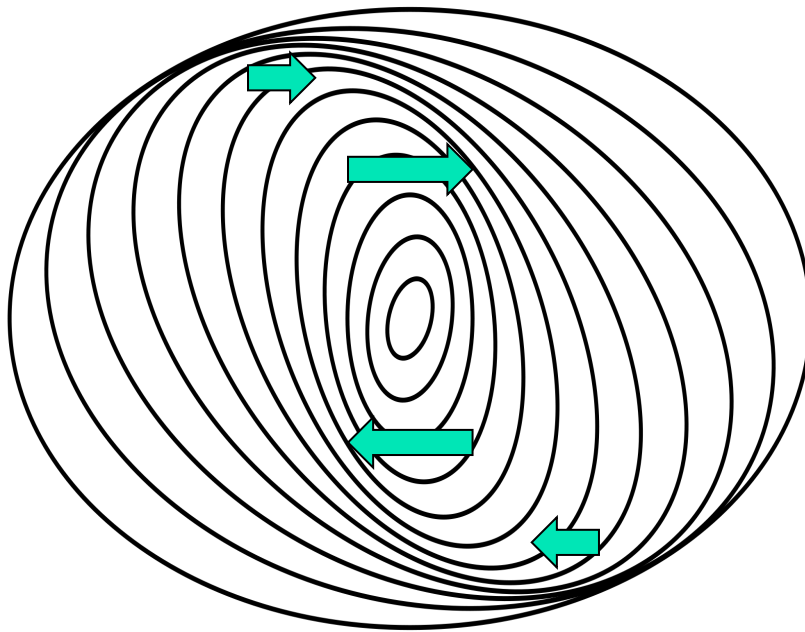


Masse totale de gaz $M \approx 5 \times 10^9 M_{\odot}$

Bras spiraux

- Rotation différentielle

- la Galaxie ne tourne pas comme un corps solide
- l'extérieur « traîne » % intérieur
- ⇒ enroulement des bras



- Mais

- une rotation dure 100 à 300 millions d'années
- la Galaxie est vieille de 14 milliards d'années
- ⇒ les bras spiraux ne sont pas permanents

- ⇒ Ondes de densité (Bertil Lindblad, 1925)

- une onde de densité tourne beaucoup plus lentement que le disque et provoque une formation d'étoiles en passant
- théorie rendue plus quantitative par C.C. Lin et F. Shu en 1964

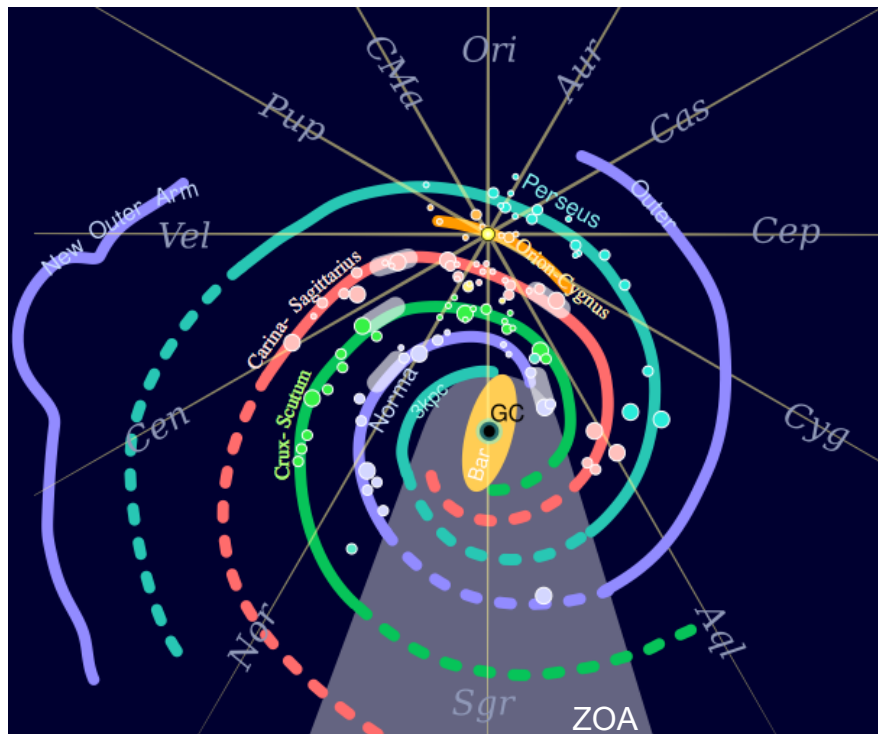
- Formation d'étoiles chaudes et brillantes

- ⇒ matérialisent la position de l'onde de densité lors de leur formation
- ⇒ disparaissent rapidement après le passage de l'onde ⇒ bras marqués

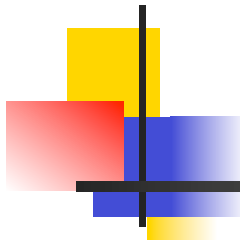
Bras spiraux

- Bras matérialisés par
 - les étoiles O et B
 - les amas jeunes
 - les régions H II
 - les régions H I

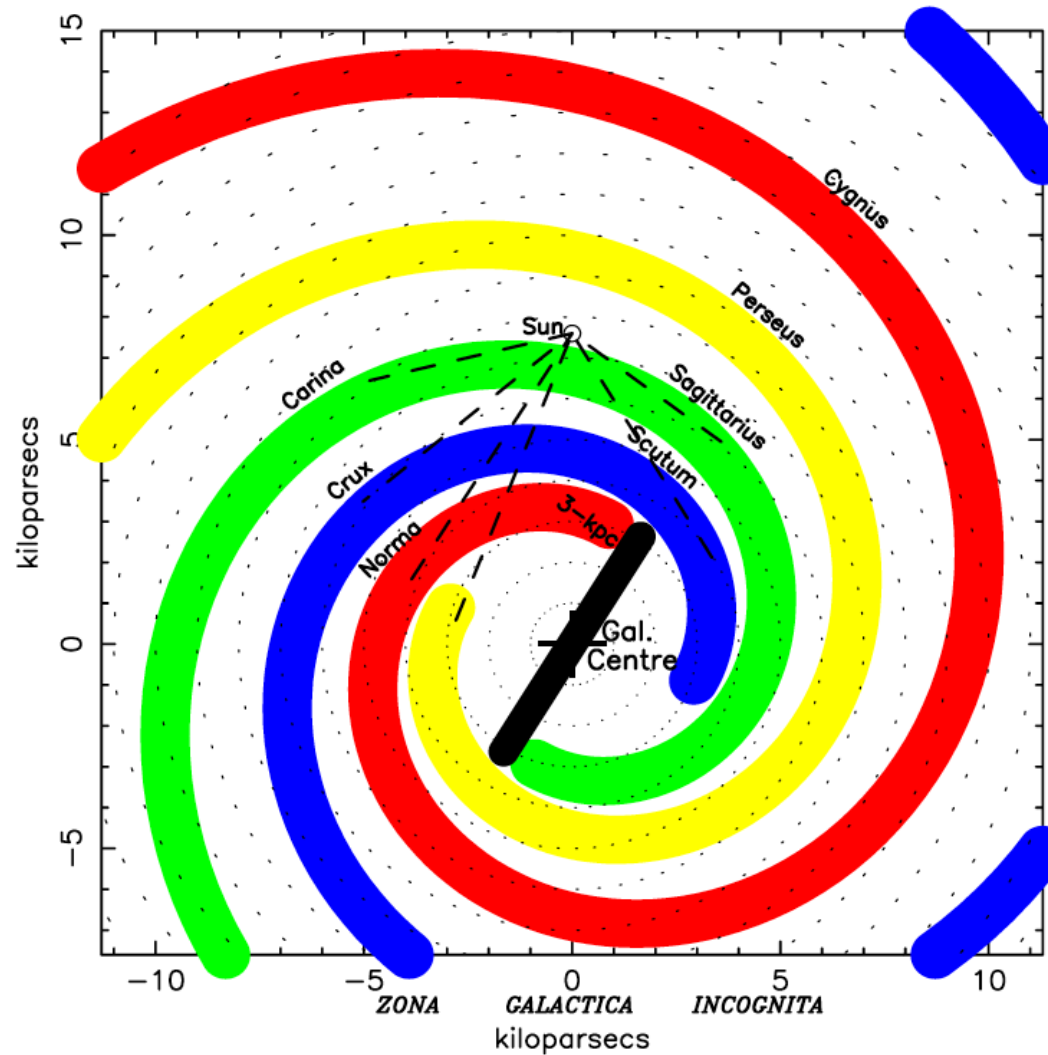
- Quatre bras principaux ?
 - Perseus
 - Norma
 - Sagittarius
 - Crux-Scutum



- Ou 2 seulement ?
 - [observations en infrarouge du satellite Spitzer]
 - Perseus
 - Scutum-Centaurus



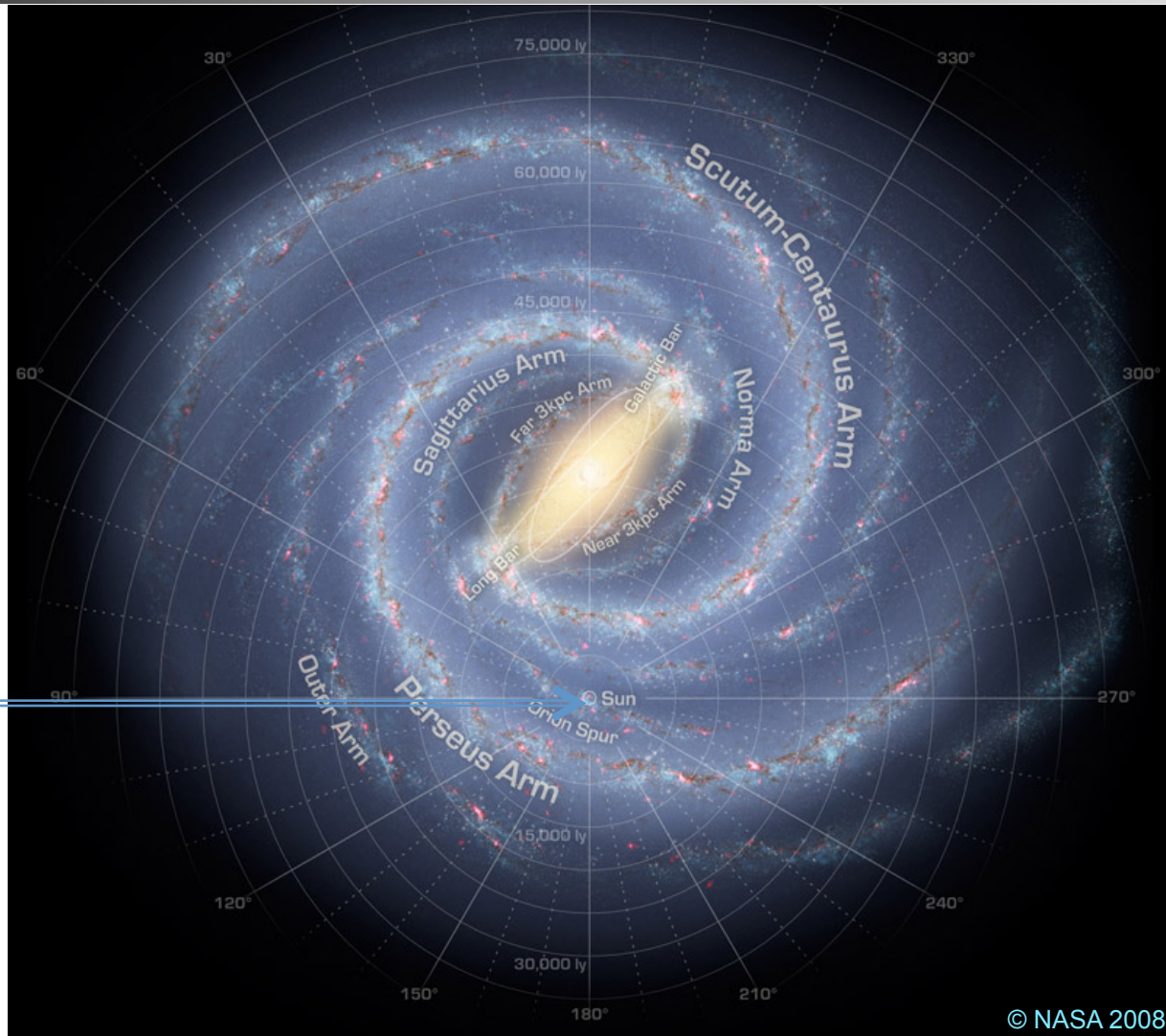
La Voie lactée ?

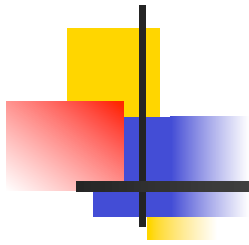


J.P. Vallée AJ135-1301 (2008)

Ou la Voie lactée ?

Le Soleil





CINÉMATIQUE ET DYNAMIQUE

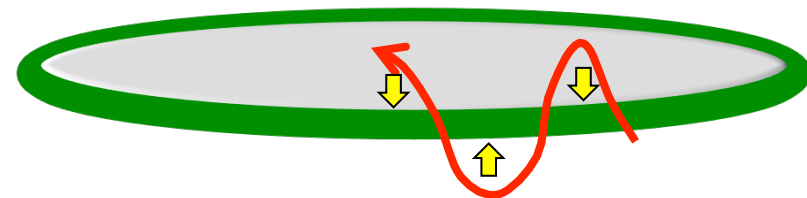
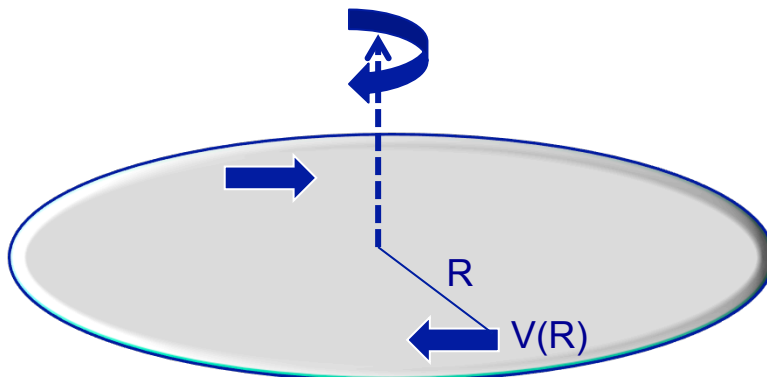
Les mouvements des étoiles (et du gaz)

- Combinaison de 3 mouvements

1. mouvement de rotation d'ensemble
 $V(R) \approx 200-250$ km/s
2. oscillations perpendiculaires au plan du disque
 $V(z) \approx 20-50$ km/s
3. vitesses particulières $V \approx 20-50$ km/s

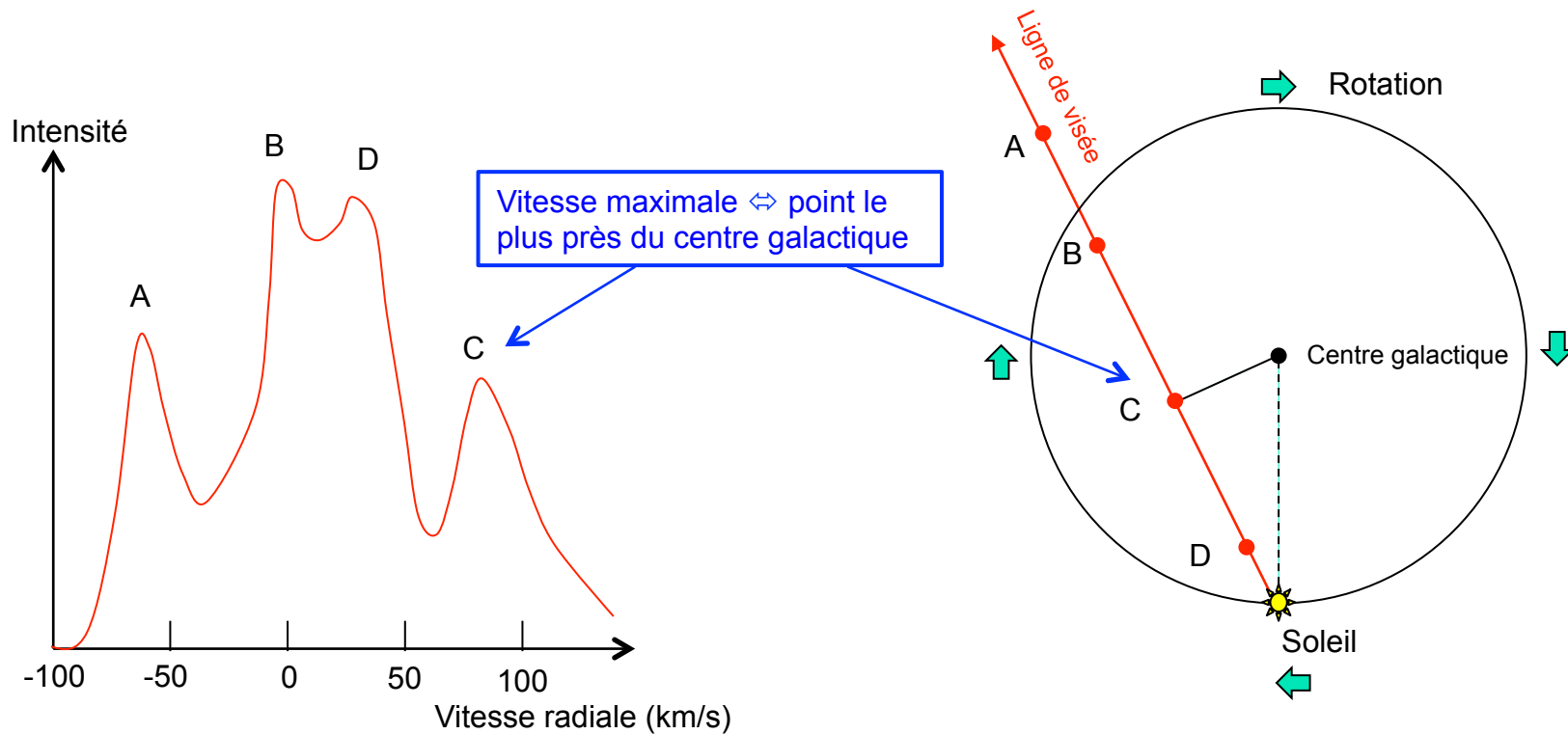
⇒ Masse *totale* à l'intérieur de l'orbite

⇒ Masse *locale* de rappel

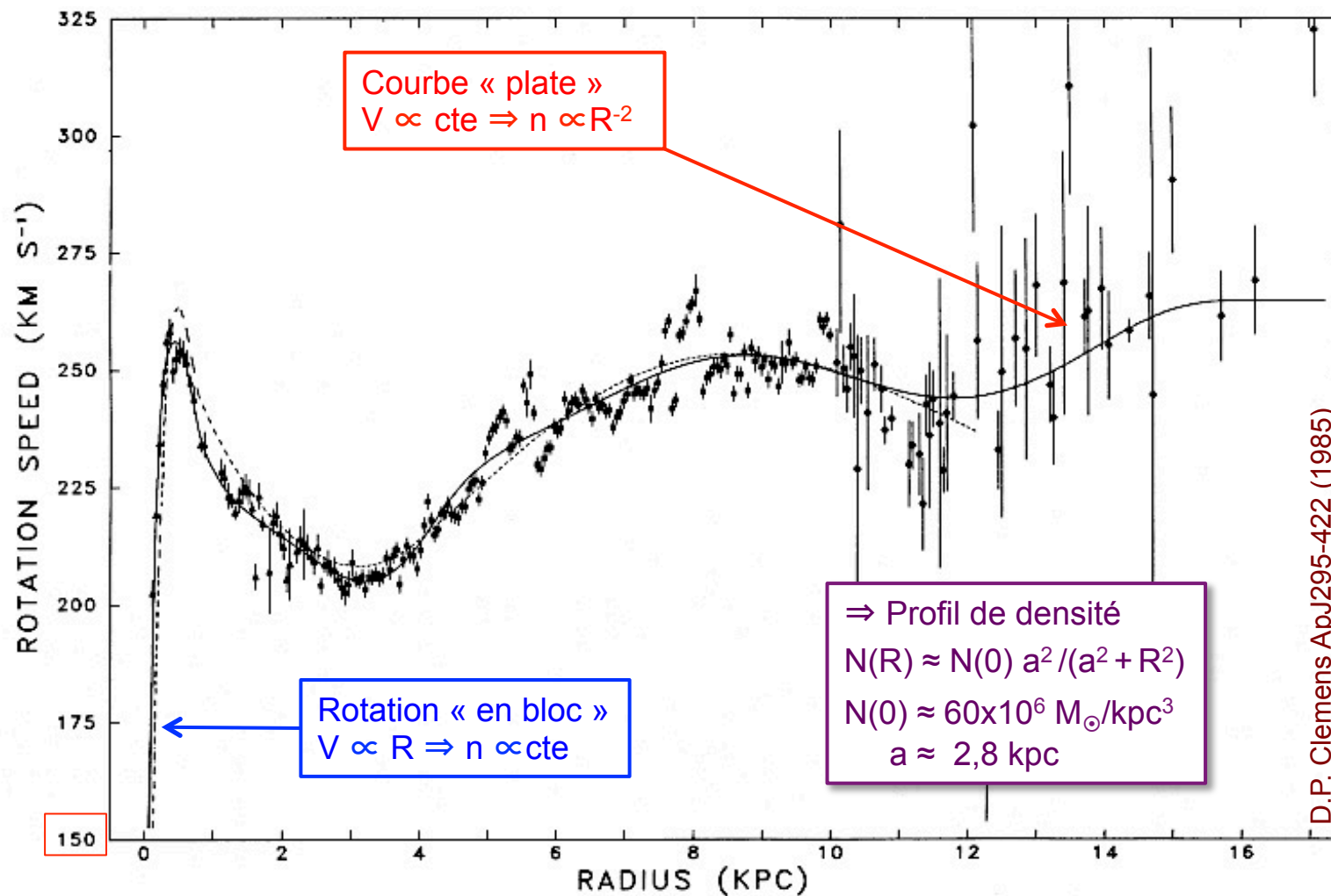


Étoiles et gaz

- On peut mesurer la vitesse *radiale* des étoiles, et en estimer la masse et la distance
- On peut mesurer la vitesse *radiale* du gaz, et en estimer la masse *mais pas la distance*

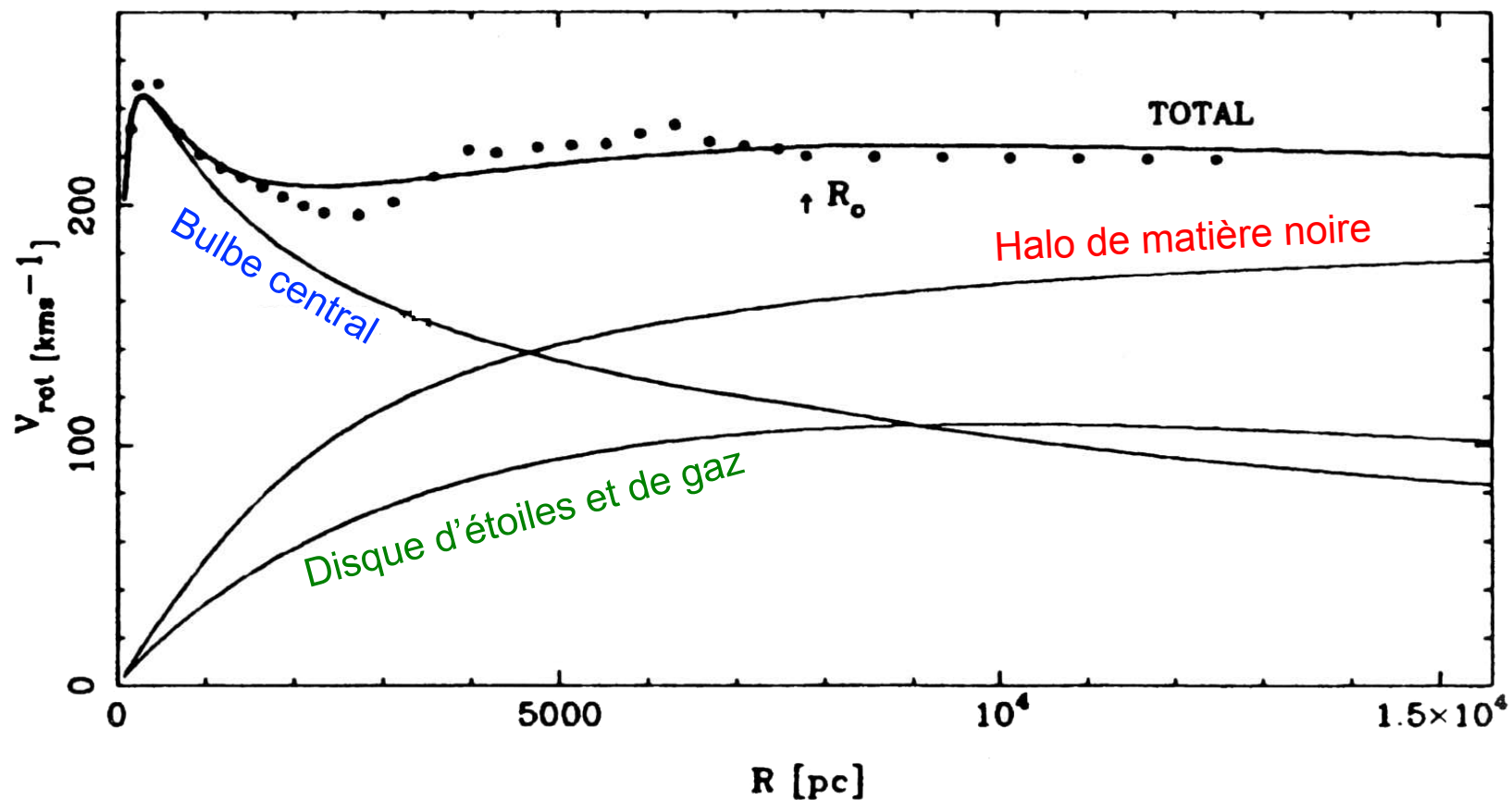


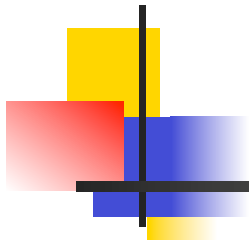
Courbe de rotation de la Voie lactée



Un problème de poids

- Il est impossible de reproduire la courbe de rotation à partir des contributions du disque et du bulbe : un halo massif est indispensable

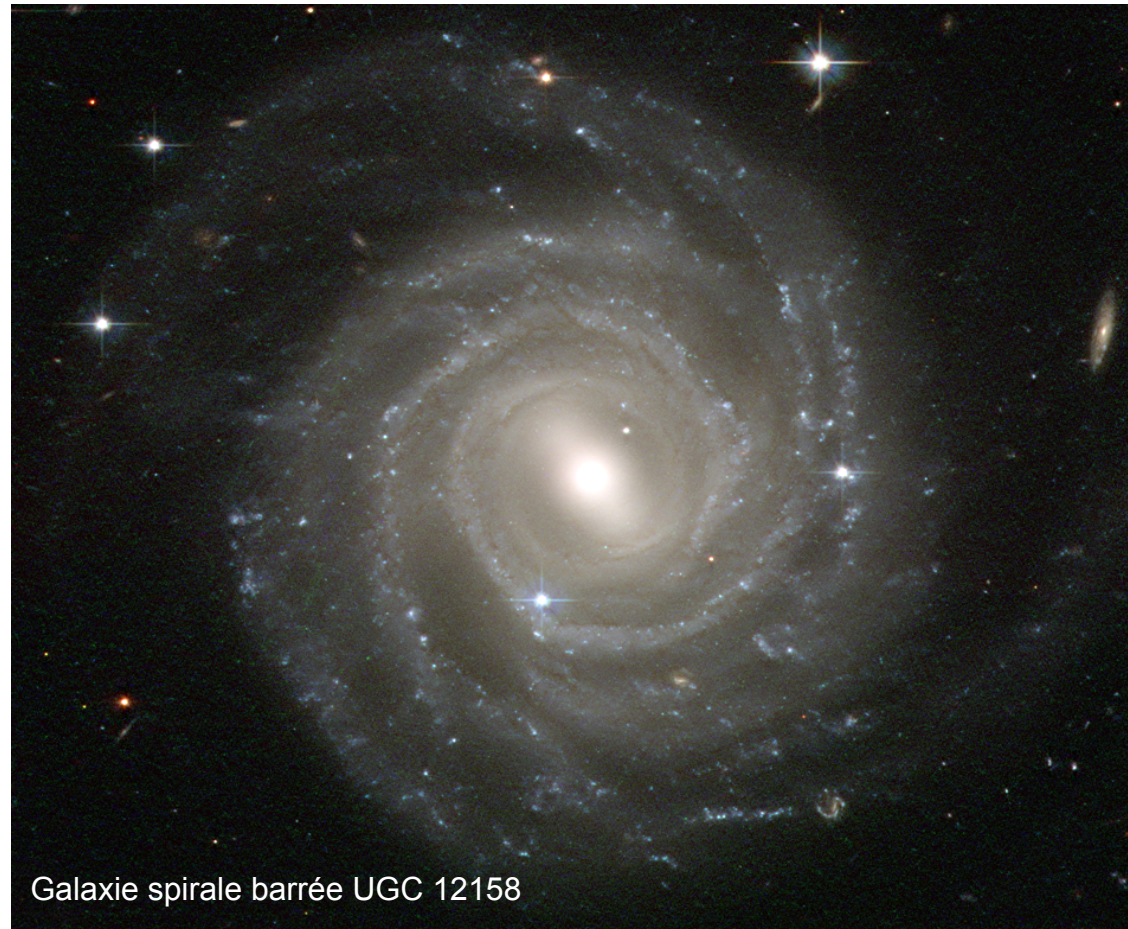




LE CENTRE GALACTIQUE

La barre

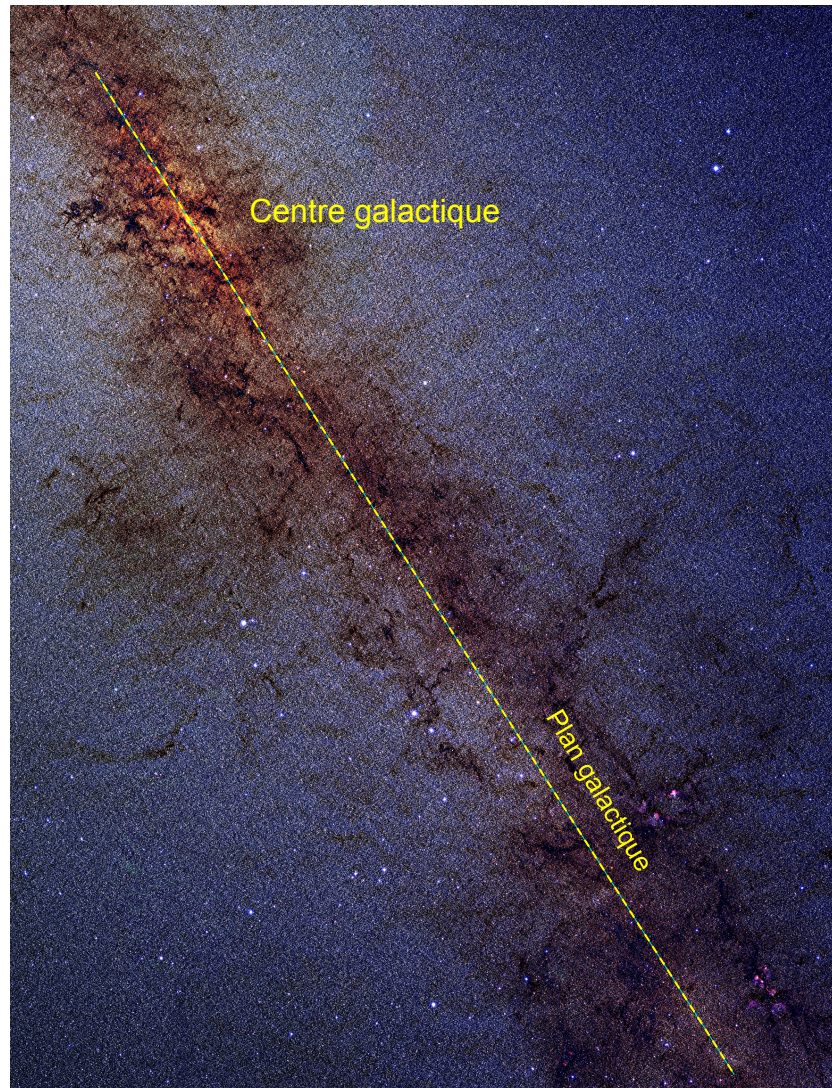
- Barre ?
 - La moitié des galaxies spirales ont une barre
 - Soupçonnée dès les années 1970
 - Confirmation par Blitz et Spergel en 1991
 - Puis par les données du satellite Spitzer
 - Difficile à détecter car le Soleil est presque dans l'axe de la barre (elle est vue presque de face)



Galaxie spirale barrée UGC 12158

Le centre galactique en infrarouge ($10^\circ \times 8^\circ$)

À 8,5 kpc, $1^\circ \Leftrightarrow 150$ pc



© 2MASS (2 μ m All Sky Survey)
10 millions d'étoiles identifiées *ici*

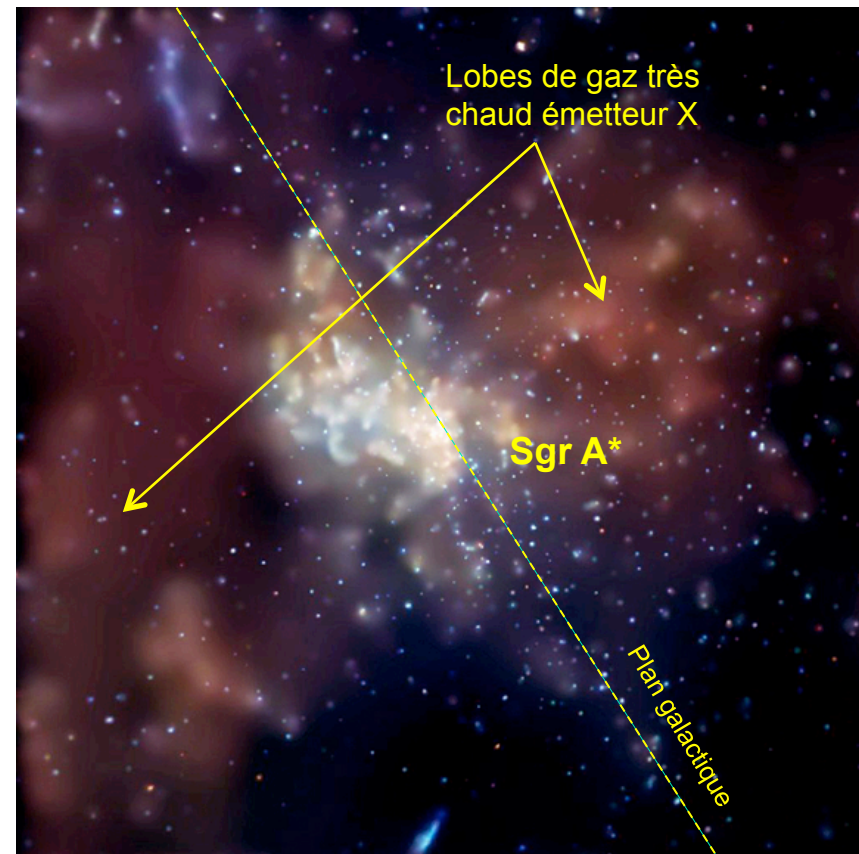
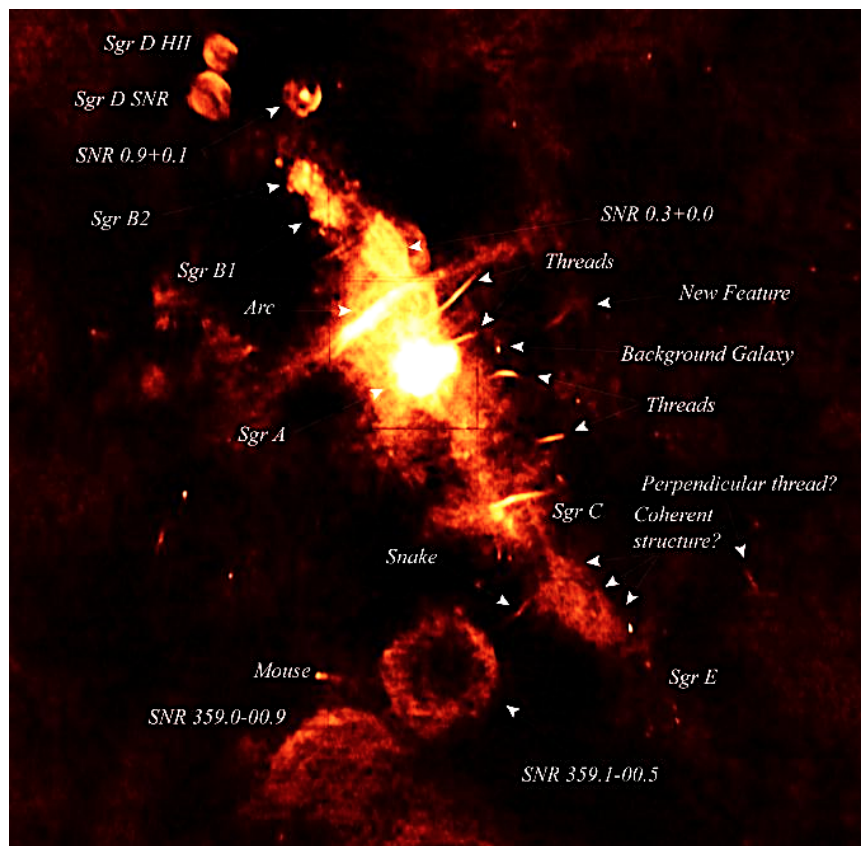
2 mars 2011

Alain Bouquet – Astrophysique 16 – La Voie lactée

26

Les radiosources Sagittarius A (Ouest, Est et A*)

- En radio (VLA) à 90 cm de longueur d'onde
- En rayons X (satellite Chandra)

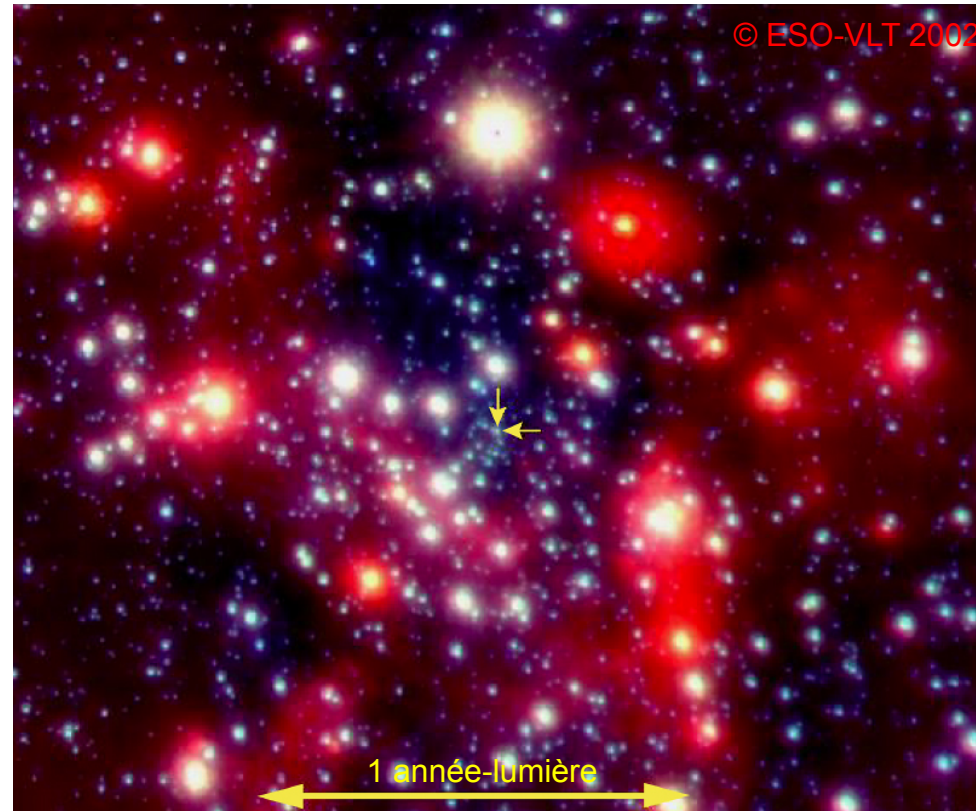


← 500 pc →

← 20 pc →

Le parsec central : Sagittarius A*

- Mouvement orbital des étoiles
 - S2 : période 15,2 ans
 - Distance périastre : 18×10^9 km (120 UA)
 - Distance apoastre : 260×10^9 km (1700 UA)
- $\Rightarrow M \approx 2,6 (\pm 0,2) \times 10^6 M_{\odot}$
- \Rightarrow **un trou noir supermassif**
- \Rightarrow rayon de Schwarzschild
 $R_S = 7,7$ millions km (26 s)
- Autres indices
 - Émission radio des électrons accélérés
 - Émission gamma du gaz chaud



En orbite autour d'un trou noir

NACO May 2002

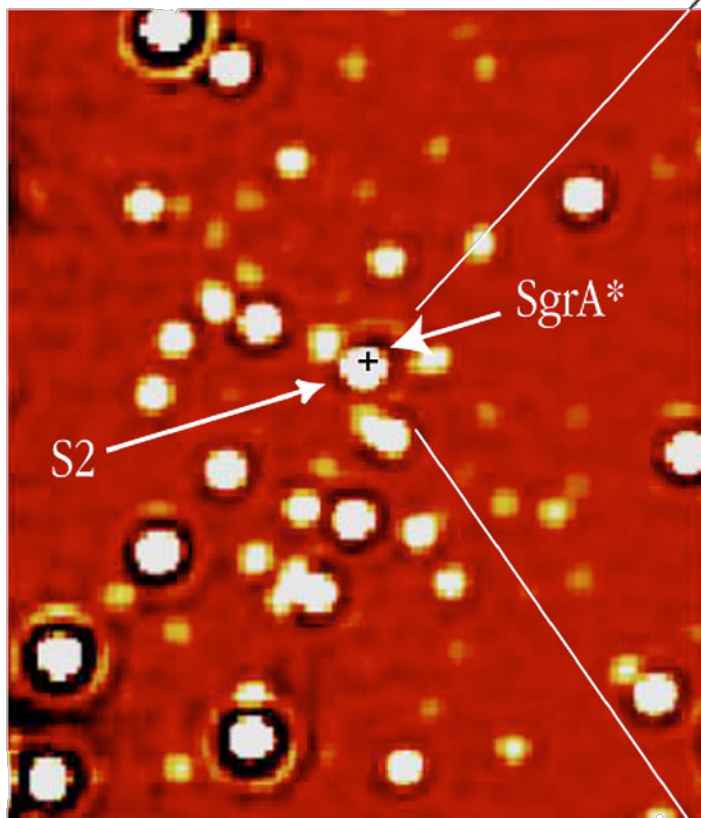
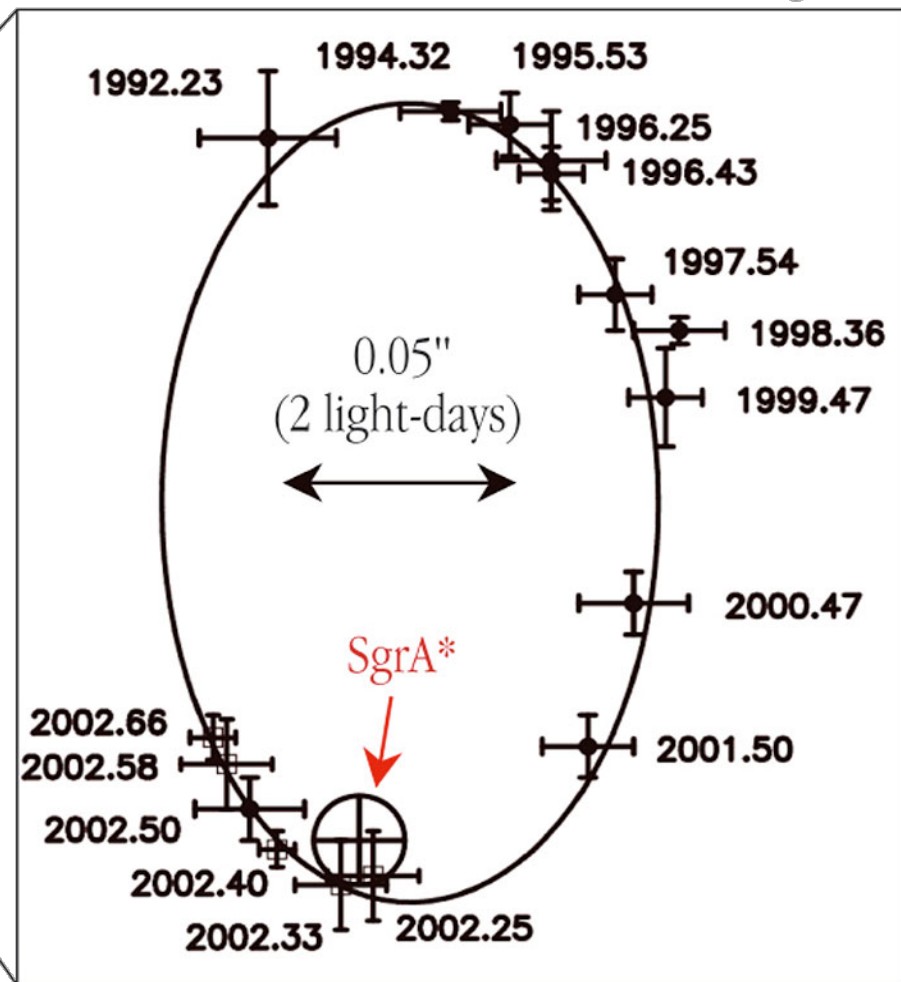


Image prise au VLT avec la caméra infrarouge NACO ($\lambda = 2,1 \mu\text{m}$)

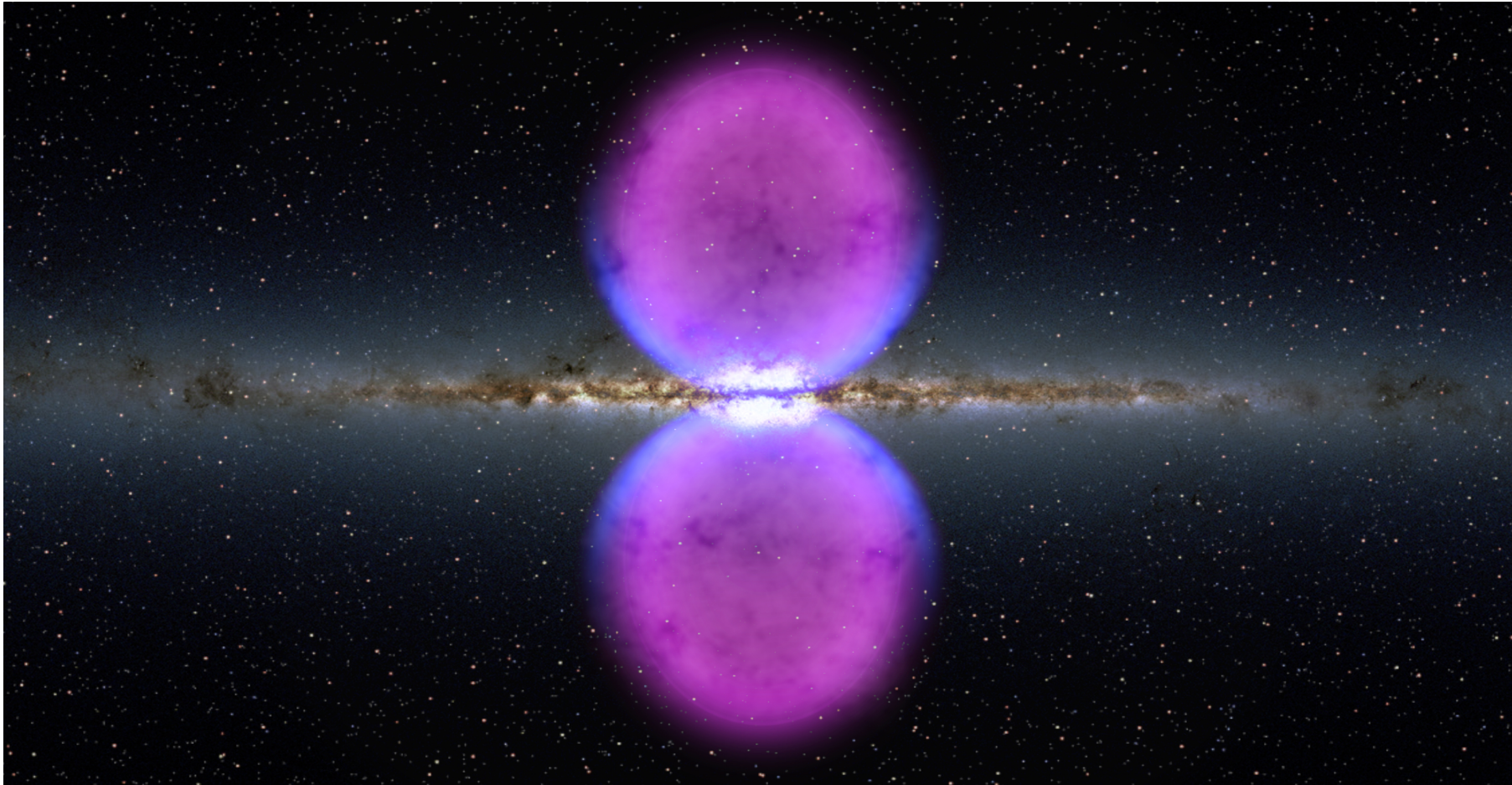
S2 Orbit around SgrA*

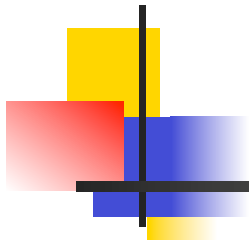




De quoi s'agit-il ?

- NASA, satellite Fermi (GLAST) novembre 2010, rayonnement gamma du ciel (1 à 10 GeV)





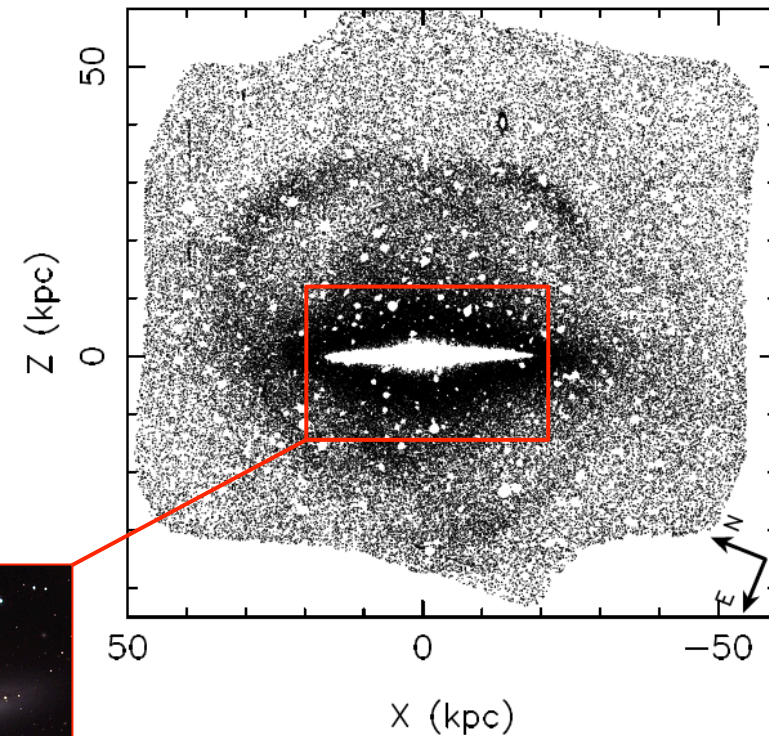
LES MARCHES DE L'EMPIRE

Le halo d'étoiles

- Toutes les étoiles n'appartiennent pas au disque, certaines forment un halo diffus
 - étoiles proches du Soleil mais avec des vitesses élevées % Soleil
 - étoiles plus éloignées avec une distribution à peu près sphérique (comptages des grands relevés comme le SDSS et 2Mass)
 - ⇒ étoiles *anciennes* de faible métallicité
- Plus facile à détecter sur des galaxies extérieures comme Andromède, ou NGC 891



Le halo d'étoiles autour de NGC 891
(Mouhcine et al. 2007, données HST)



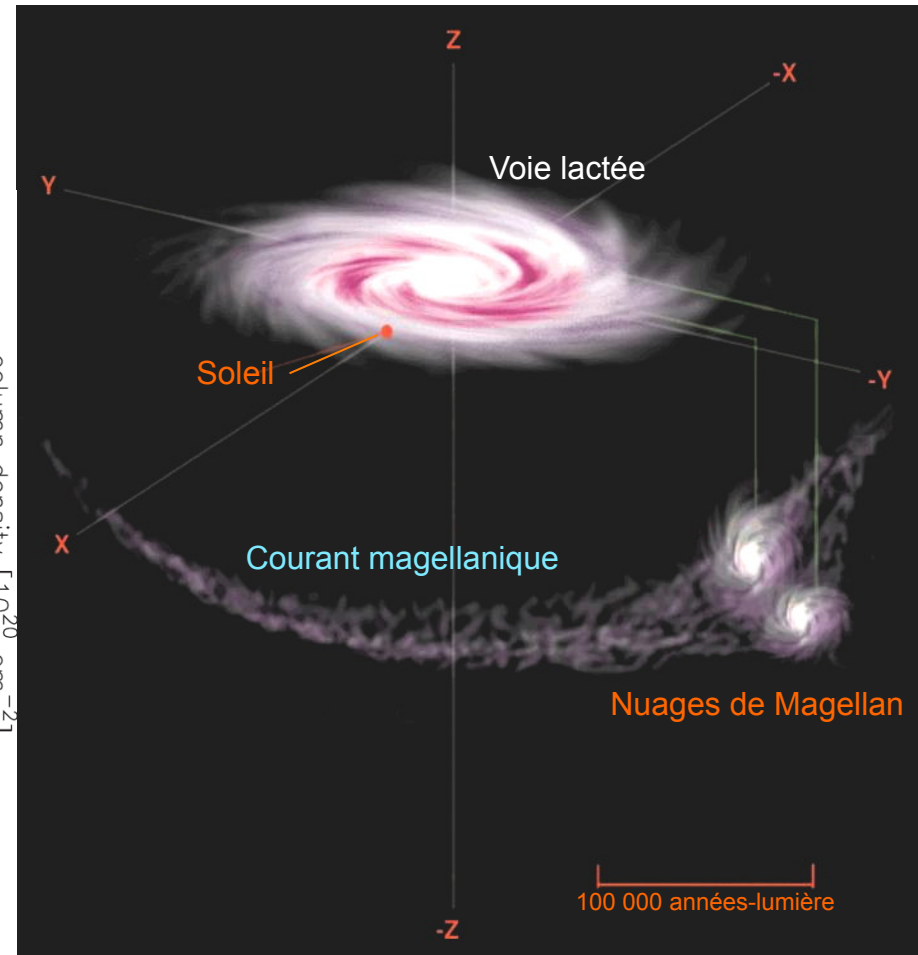
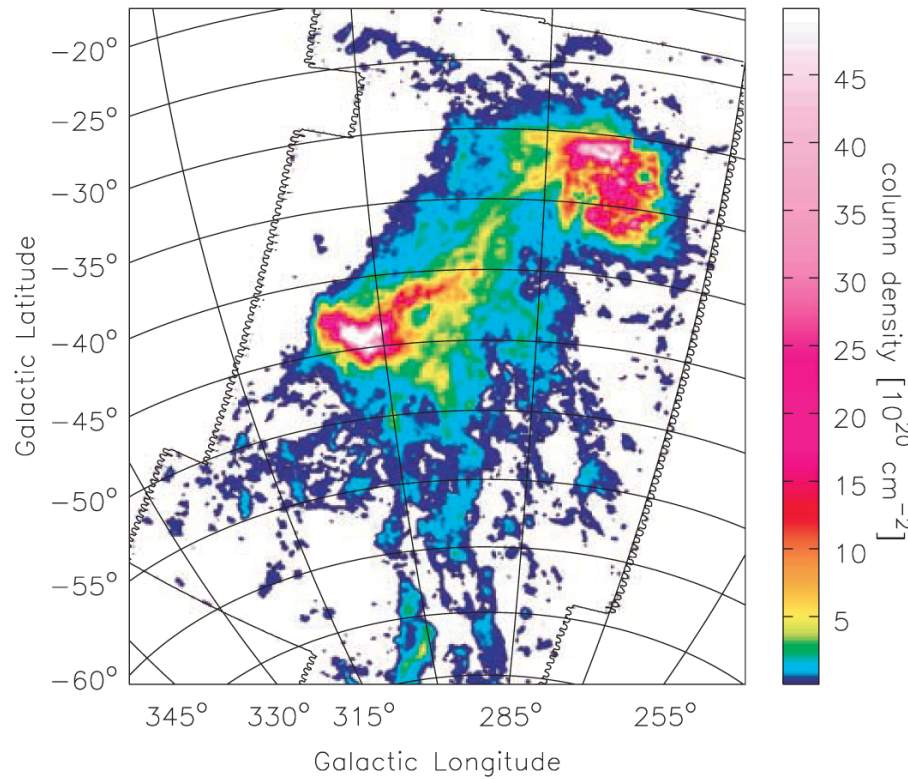


Les Nuages de Magellan

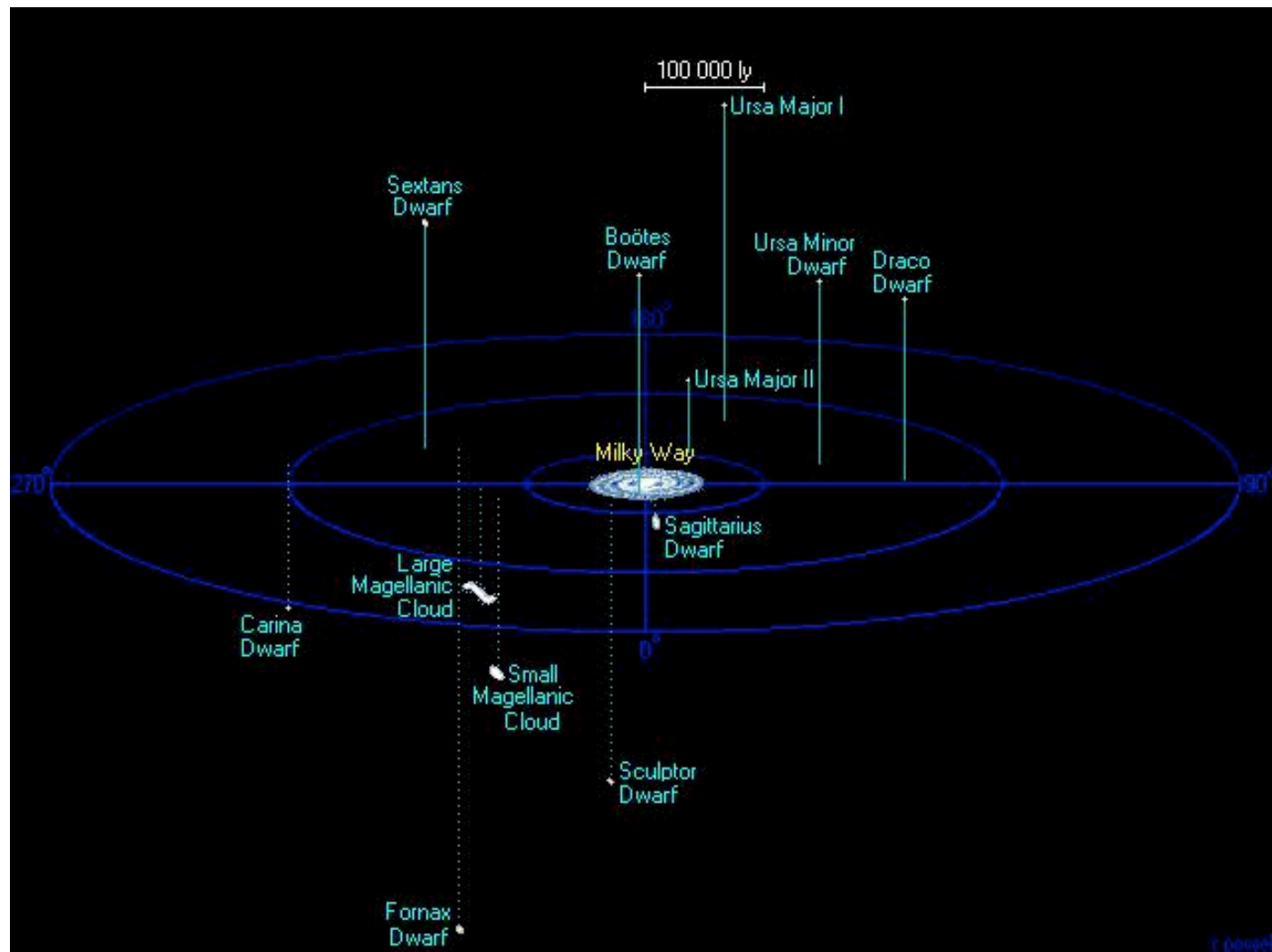


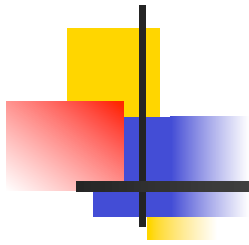
Courant magellanique

Émission radio de l'hydrogène atomique



Les galaxies satellites





Merci de votre attention !

