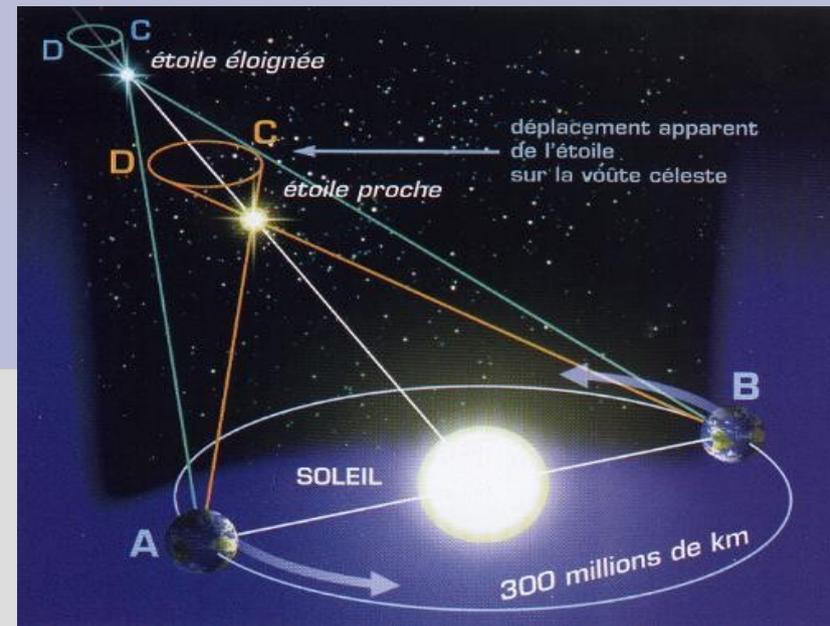


L'arpentage du ciel

II. étoiles proches

- Mesure parallactique :
 - Mouvement annuel de la Terre
 - Limitée à l'environnement proche
- Première mesure de la distance d'une étoile
 - Bessel : 61 Cygni en 1838
- Hipparcos : ~120 000 étoiles
- Gaia : 1 milliard d'étoiles

Parallaxe



- $\tan(\pi) = \text{distance}(\text{Terre-Soleil}) / \text{distance}(\text{Soleil-Etoile})$
 $= 1 \text{ U.A.} / d$
- Petits angles **en radians** : $\tan(\pi) = \pi$
- $d = 1 \text{ U.A.} / \pi(\text{radians})$

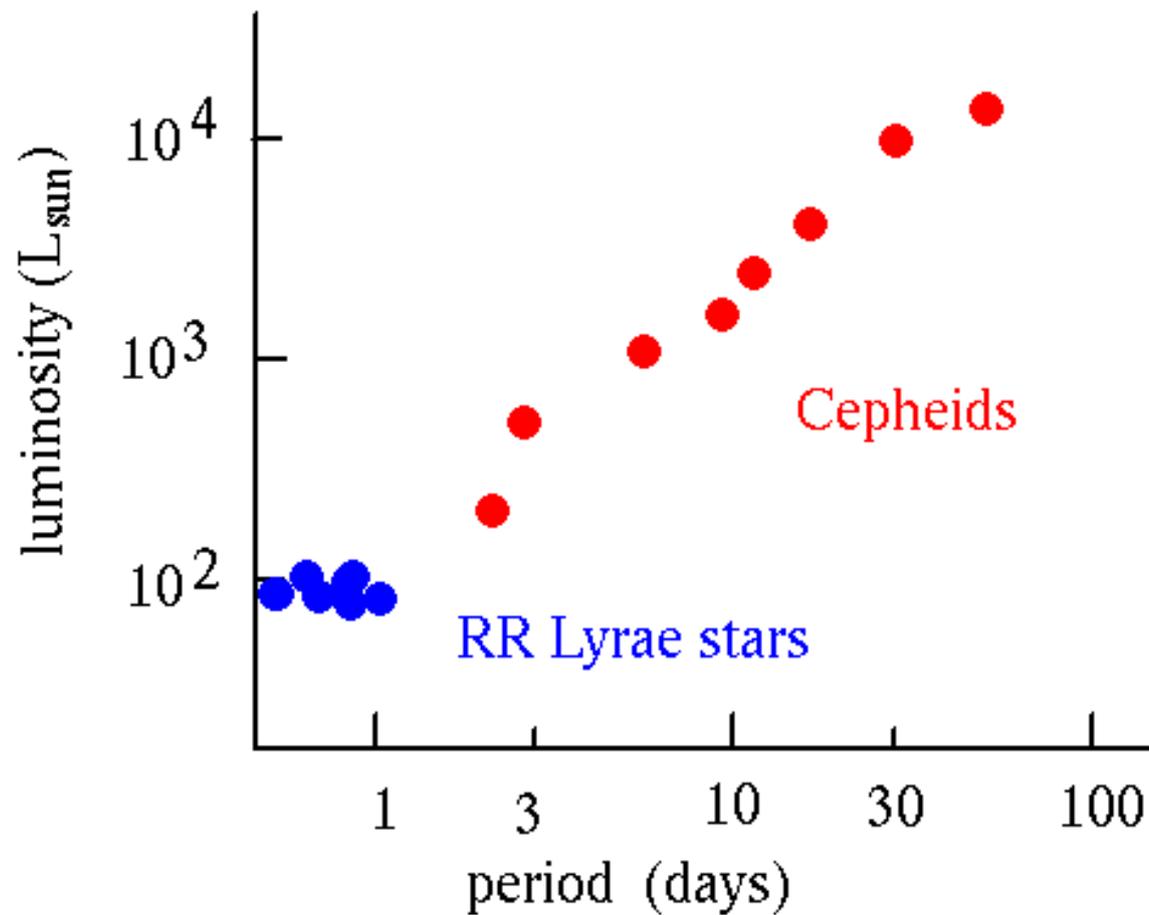
L'arpentage du ciel

III. indicateurs primaires

- Distance photométrique : chandelle étalon
 - Etoiles variables céphéides
 - Miss Leavitt et Shapley (1912) : calibration de la relation période luminosité
 - Mesure de la distance des nuages de Magellan
 - Hubble (1924) : distance de M31
 - Autres indicateurs primaires : novae, binaires à eclipses, RR Lyrae, ...

L'arpentage du ciel

III. indicateurs primaires



Magnitudes Apparente et Absolue

- La **magnitude apparente** (m) ne donne aucune indication sur la brillance intrinsèque d'un astre
- Problème du à la **distance** (d) qui est inconnue
- On s'affranchit de ce problème avec la **magnitude absolue** (M) : c'est la magnitude qu'aurait l'astre étudié si il se trouvait à

$$d = 10 \text{ parsecs (1 pc } \sim 3.26 \text{ a.l.)}$$

- On peut alors comparer la **luminosité** des astres

Magnitude Absolue et Module de distance

- Sur Terre, nous mesurons l'éclat apparent (ou flux reçu F) d'une étoile dont la distance est d
- La luminosité (L) de l'étoile est sa puissance totale rayonnée : $F = L / (4\pi d^2)$
- Relation entre magnitudes absolue et apparente :
$$(m-M) = -2.5 \log (L / 4\pi d_{\text{pc}}^2) + 2.5 \log (L / 4\pi 10_{\text{pc}}^2)$$
$$= -2.5 \log (10_{\text{pc}}/d_{\text{pc}})^2 = -5 + 5 \log (d_{\text{pc}})$$
- $(m-M)$ est le **module de distance**

L'arpentage du ciel

IV. indicateurs secondaires

- Luminosité ou dimension maximale d'un objet donné (absent du voisinage solaire... .. mais très lumineux !)
 - * Supergéantes bleues
 - * Supernovae
 - * Etoiles de la branche horizontale
 - * Diamètre des régions HII
 - * Fonction de luminosité amas globulaires

L'arpentage du ciel

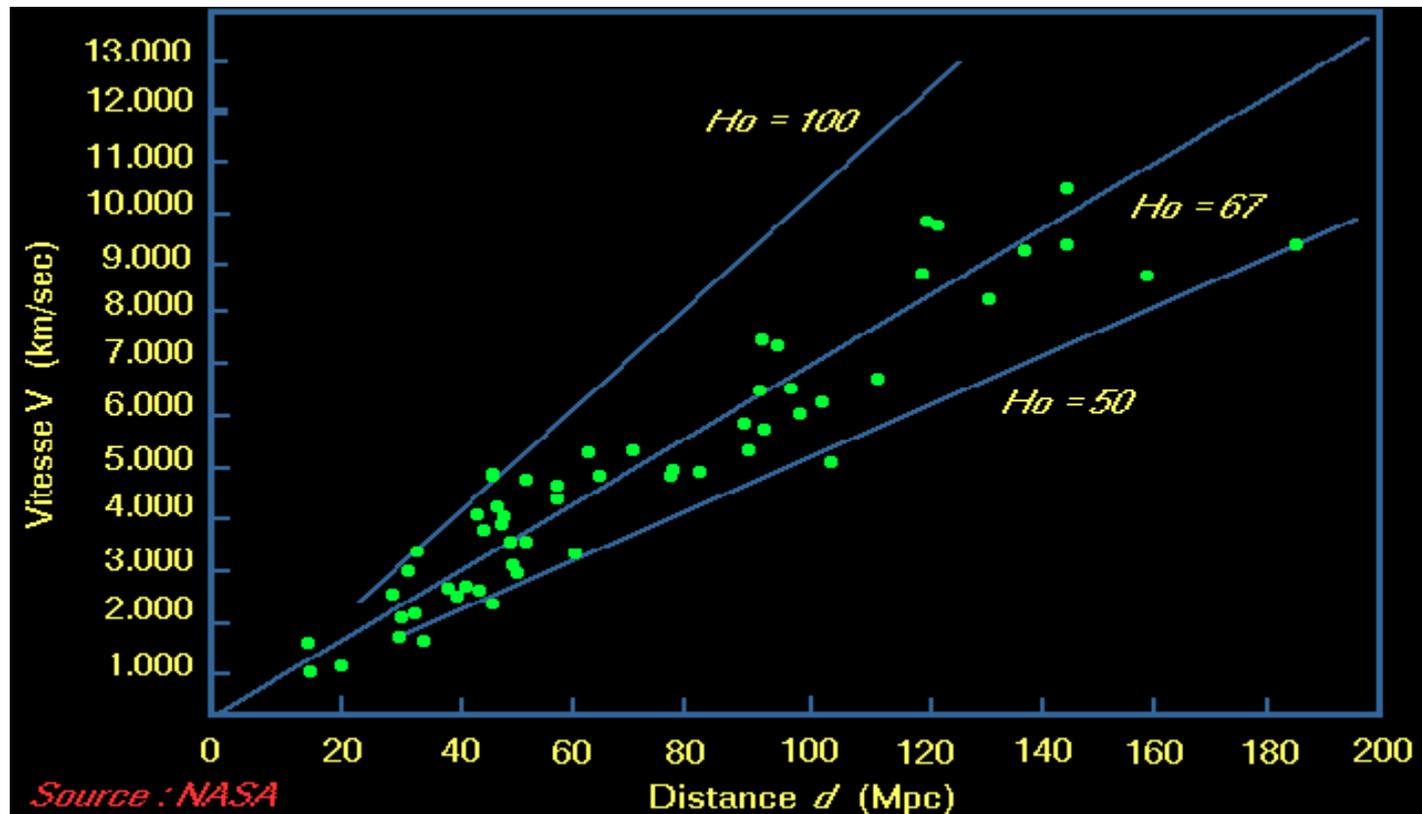
V. indicateurs tertiaires

- Paramètres galactiques globaux :
 - * type morphologique (spiraales)
 - * diamètre des galaxies
 - * Tully-Fischer :
Relation linéaire entre Eclat et Vitesse de rotation

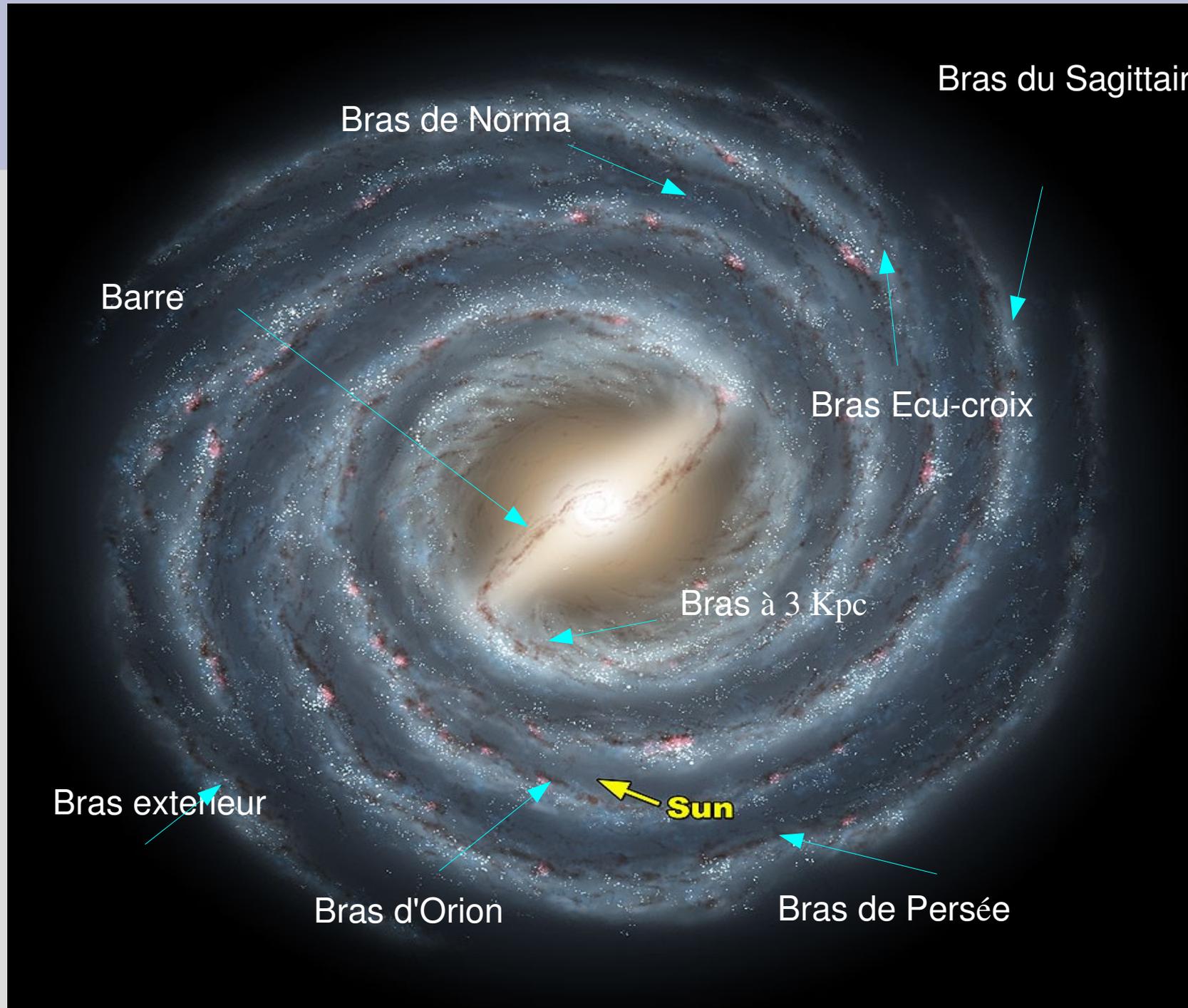
L'arpentage du ciel

V. indicateurs tertiaires

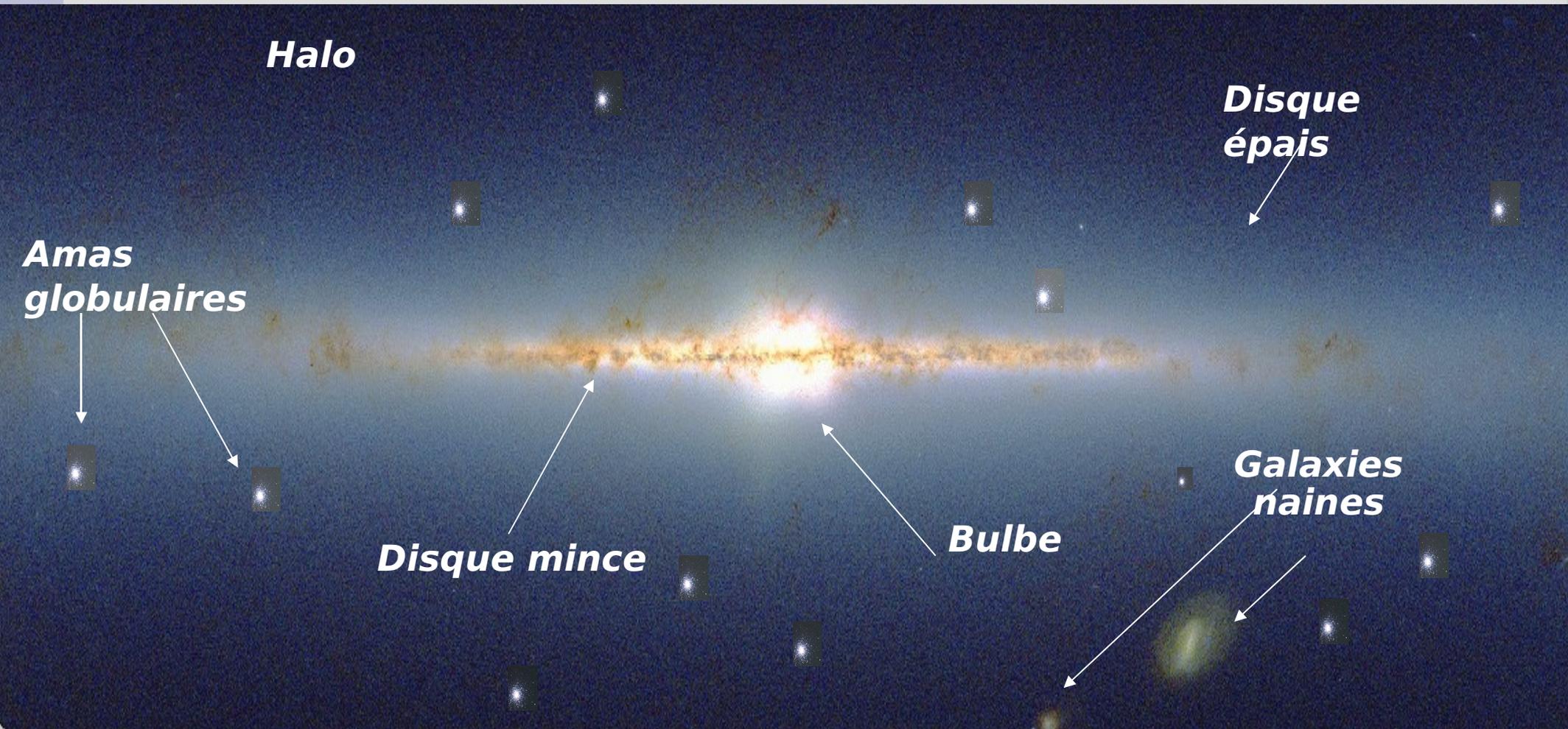
- Loi de Hubble : $V = H \cdot d$



La Voie Lactée



La Voie Lactée



La Voie Lactée

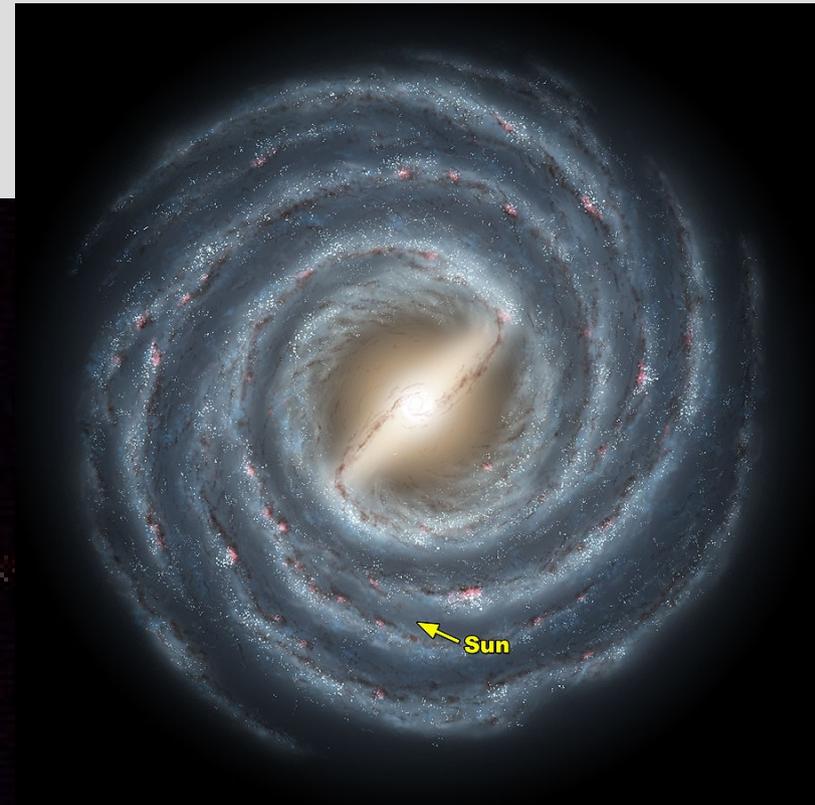
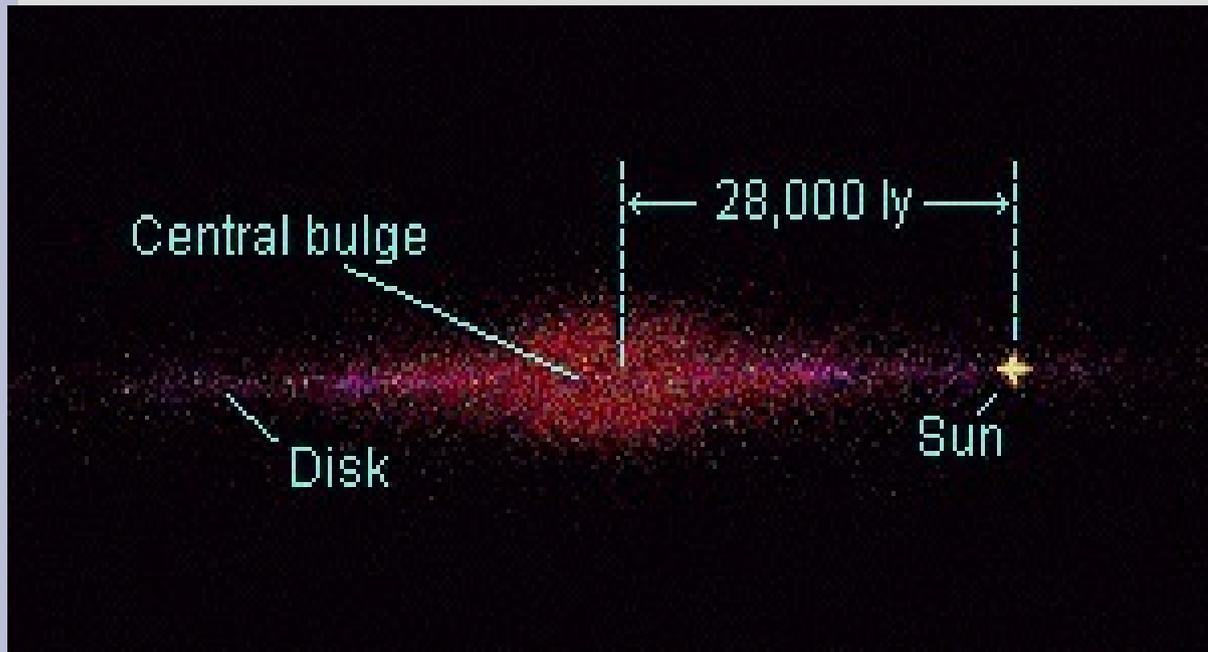
Connaissances actuelles

- Age ~ 13 milliards d'années
- 200-400 milliards d'étoiles
- Milliers d'amas et de nébuleuses
- Masse totale ~ 1000 milliards M_{\odot}
- Distribution HI : galaxie spirale (type Sb ou Sc)
- Disque spiralé très étendu et Région centrale importante (composante du bulbe ou halo)

La Voie Lactée

Dimensions

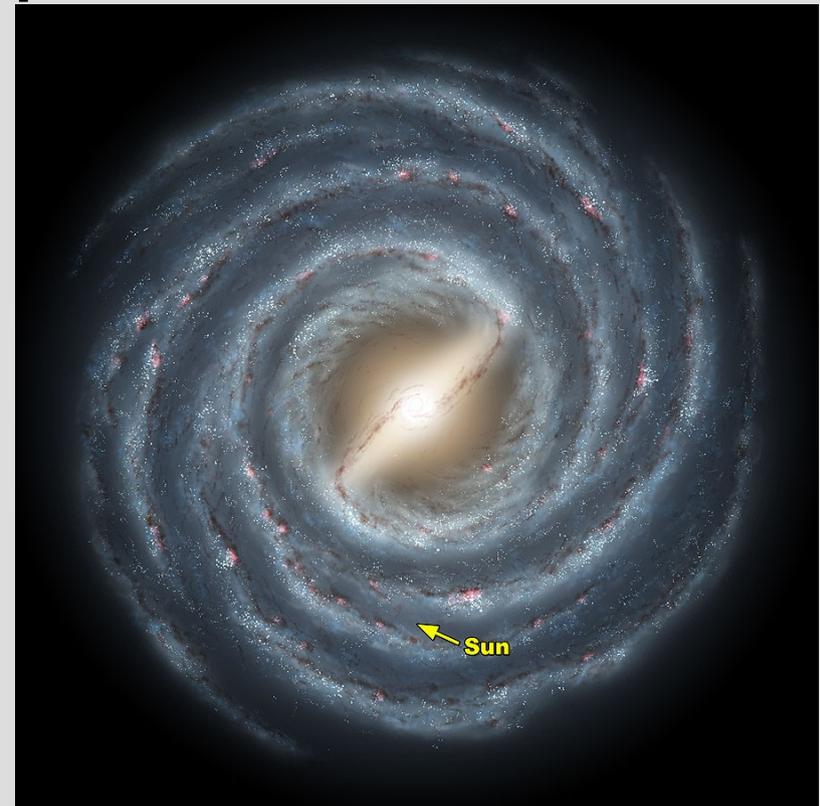
- Diamètre disque = 100 000 a.l.
- Hauteur d'échelle disque = 800 – 2500 a.l.
- Diamètre Halo > 600 000 a.l.
- Barre centrale : L=27000 a.l.



La Voie Lactée

Structure

- Galaxie Spirale de type Sb ou Sbc
- Analyse de 30 millions d'étoiles des régions centrales du disque (2005)
 - Confirmation de la présence d'une barre centrale
 - Stabilité de la barre ?
 - **Type SBb ou SBc ?**



La Voie Lactée

Structure

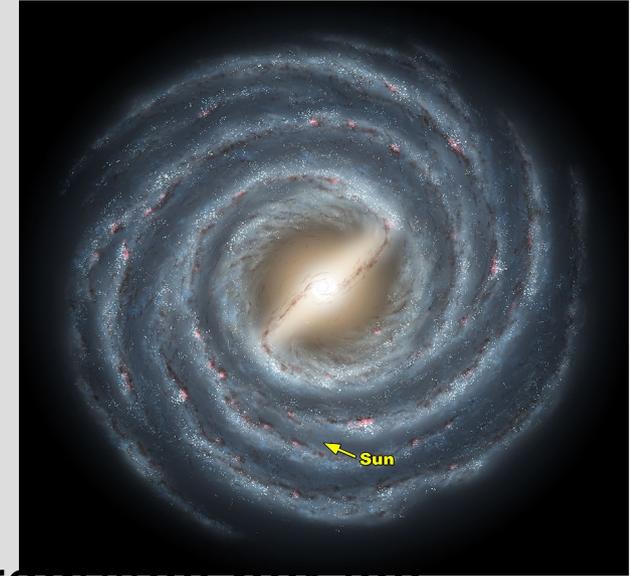
- Disque avec plusieurs Bras spiraux (6?)
- Halo et Bulbe :
 - étoiles vieilles
 - amas globulaires (150 connus sur ~200?)
- Infrarouge : Cobe
 - Bulbe central proéminent
 - Disque peu épais



La Voie Lactée

Structure Spirale

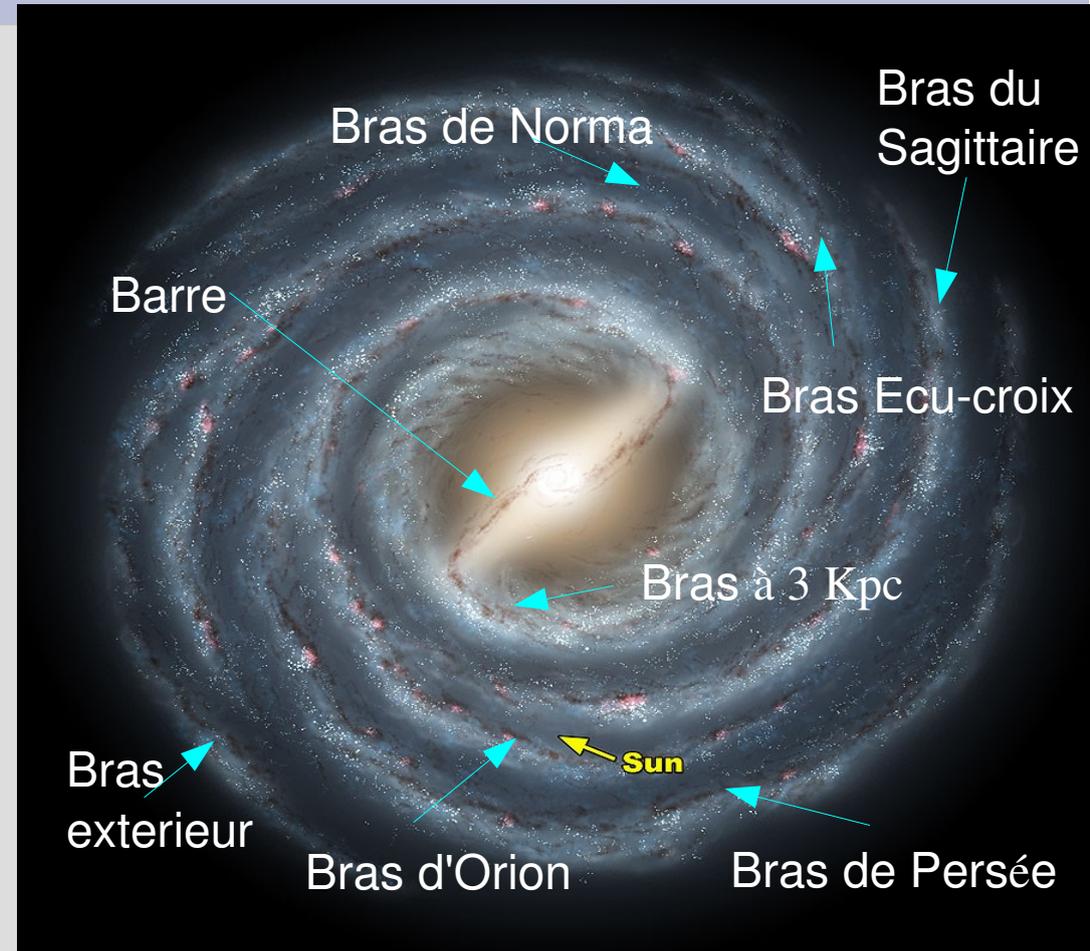
- Bras spiraux dans le disque
 - matière interstellaire (MIS)
 - nébuleuses diffuses (région HII)
 - étoiles jeunes (Population I)
 - amas ouverts
- Origine des bras : Ondes de densité (produites par les interactions gravitationnelles avec galaxies voisines?)
 - Compression du MIS
 - Formation de Nébuleuses diffuses puis étoiles, amas ouverts et associations d'étoiles jeunes



La Voie Lactée

Position du Système Solaire

- Régions externes du disque : centre=28000 a.l.
- Dans le disque (20a.l. au-dessus du Plan)
- Petit bras spiral (Orion)
 - Reliant bras du Sagittaire-Carène (externe) et celui de Persée (interne).



Benjamin et al., 2005
(GLIMPSE)

La Voie Lactée

Dynamique du voisinage Solaire

- Rotation Galactique : Orbite quasi-circulaire
 - $V \sim 220$ km/s
 - 1 orbite = 250 millions d'années
 - ~ 21 orbites depuis sa formation
- Mouvement particulier par rapport aux étoiles voisines ($V \sim 20$ km/s) vers l'APEX
- Attention : bras spiraux ne tournent qu'en
180 millions d'années

La Voie Lactée

Populations Stellaires

1) Disque Mince :

- *Population I* (classification de Baade)
- Étoiles orbitant autour du centre avec grand moment angulaire (et faible dispersion vitesse)
- Formé par *collapse* du gaz puis peu de perturbations
- Métallicité et âge des étoiles bien connus que dans le voisinage solaire
- Accrétion de gaz pauvre en métaux et formation d'étoiles régulières

La Voie Lactée

Populations Stellaires

2) Disque épais :

- Identifié comme composante différente depuis 1983
- Population dominante vieille ($\sim 12 \times 10^9$ ans) et de métallicité intermédiaire $[Fe/H] \sim -0.6$ (avec dispersion)
- Enrichissement chimique différent du disque épais
- Formé (?) lors d'une accrétion modérément violente il y a longtemps

La Voie Lactée

Populations Stellaires

3) Bulbe central :

- Pas dans la classification initiale de Baade
- Étoiles vieilles et riches en métaux (forte dispersion)
- Statistique très faible
- Enrichissement chimique rapide dominé par SNI
- Formation *in situ* des étoiles lors d'une flambée d'étoiles (~10Mo/an) ancienne
- Relation avec le trou noir supermassif central
- Liens entre bulbe et partie centrale des disques inconnus

La Voie Lactée

Populations Stellaires

4) Etoiles du Halo :

- *Population II* (classification de Baade)
- Etoiles vieilles et pauvres en métaux
- Enrichissement chimique rapide dominé par SNI
- Formation rapide des étoiles dans chacune des composantes du Halo à partir d'un milieu homogène
- Etoiles : Masse (Bulbe) / Masse (Halo) ~ 10

La Voie Lactée

Populations Stellaires

5) Régions externes du Halo

- Très peu peuplées
- Histoire et Structure complexes
- Indications claires d'accrétions de matière
- Dominé (?) par l'accrétion de la Galaxie du Sagittaire avec étoiles d'âge intermédiaire et de métallicités plus riches que le reste du Halo
- Très forte et rapide déformation de cette Galaxie

La Voie Lactée

Matière Noire

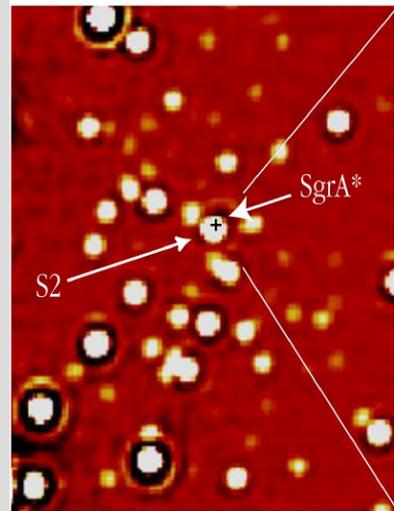
- Population 0 (!)
- Détectée gravitationnellement mais pas directement
- Domine la matière visible (80% masse de l'Univers et de la Galaxie)
- Nature inconnue

La Voie Lactée

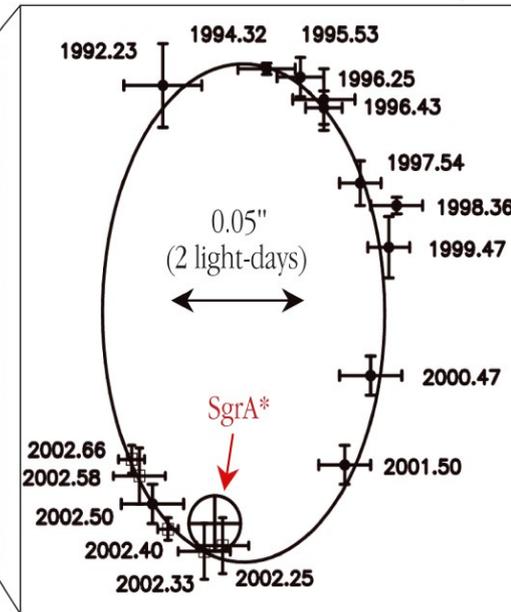
Centre Galactique

- Suivi temporel : Orbite d'une étoile autour d'un objet central hyper massif $M = 2.6 \times 10^6 M_{\odot}$
- Distance mini = 17 h.l.
- $V = 5000 \text{ km/s}$
- Location précise de ce corps
- Volume très faible pour une telle masse
- => Détection d'un **trou noir** !

NACO May 2002



S2 Orbit around SgrA*



The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

ESO PR Photo 23c/02 (9 October 2002)

© European Southern Observatory



La Voie Lactée

Amas Ouverts

- Appelés aussi *Amas Galactiques*
- $10^4 - 10^6$ étoiles
 - regroupées par leur propre gravité
 - même métallicité et riches en métaux
 - même âge et étoiles jeunes (Population I)
 - masses entre 0.8 et $>50 M_{\odot}$
- Dimensions : $\sim 50 - \sim 200$ a.l.
- Distances beaucoup plus importantes : toutes les étoiles sont à la même distance



La Voie Lactée

Amas Globulaires

- $10^4 - 10^6$ étoiles
 - regroupées par leur propre gravité
 - même métallicité et pauvres en métaux
 - même âge et étoiles très vieilles (Population II)
 - masses entre 0.8 et $>50 M_{\odot}$
- Dimensions : $\sim 50 - \sim 200$ a.l.
- Distances beaucoup plus importantes
 - toutes les étoiles sont à la même distance



La Voie Lactée

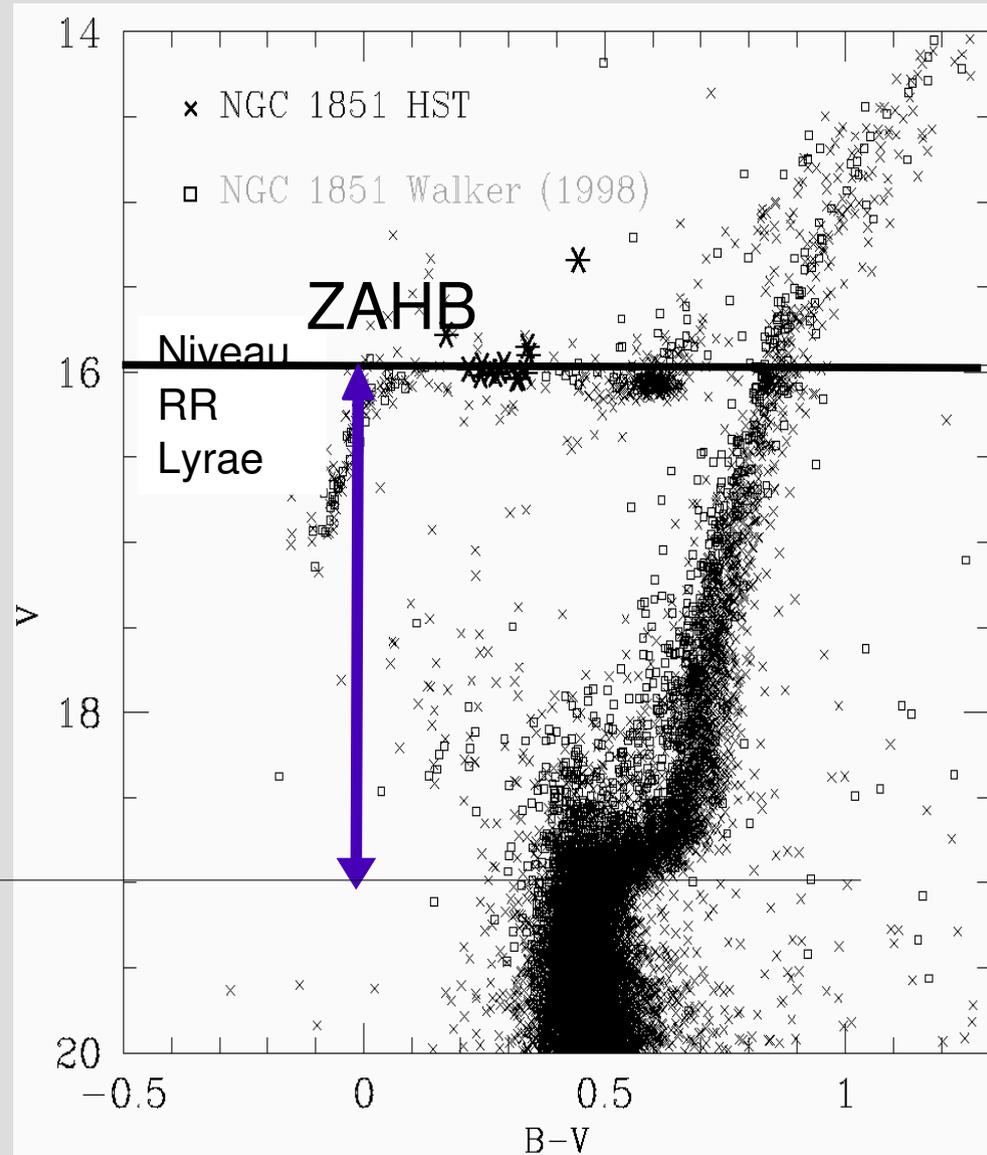
Diagramme HR des Amas

● **Distance :** $(m - M_{\text{ZAHB}})$

Niveau
des RR
Lyrae

Modèles

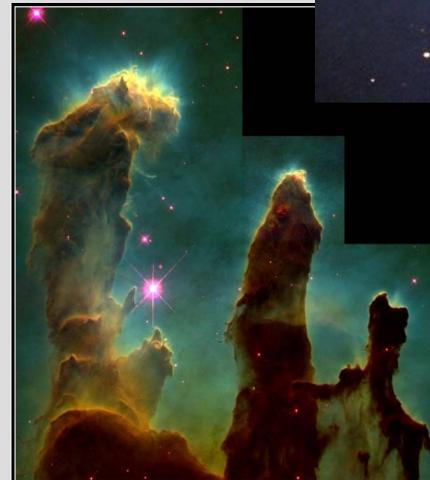
● **Age relatif :** $m_{\text{ZAHB}} - m_{\text{TO}}$



La Voie Lactée

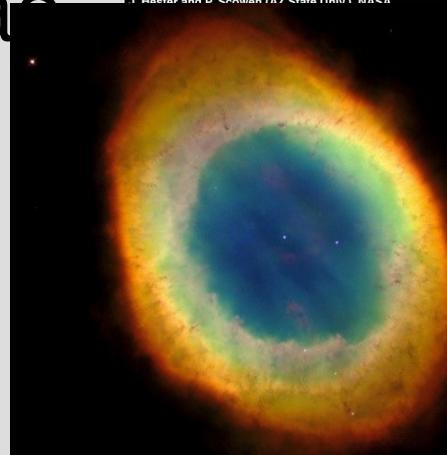
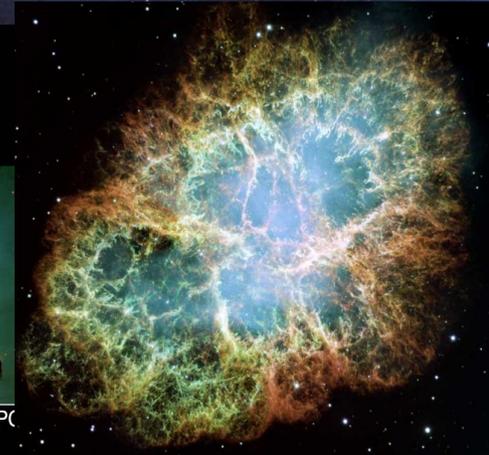
Nébuleuses

- Nébuleuses diffuses
- Nébuleuses planétaires
- Restes de Supernovae
- Nébuleuses sombres



Gaseous Pillars • M16
PRC95-44a • ST ScI OPO • November 2, 1995
J. Hester and D. Scowen (Arizona State Univ.), NASA

HST • WFPC



La Voie Lactée

Restes de Supernovae

- Nom donné par Baade & Zwicky (1934)
- Fin de vie des étoiles massives ($> \sim 8M_{\odot}$)
- Ejection violente de l'enveloppe stellaire
- Aussi brillant qu'une galaxie
- Dilution dans le MIS
- Différents types de Supernovae produisent différents éléments chimiques (SNII ou SNIa)
- Evolution chimique de l'Univers

La Voie Lactée

Environnement

• Andromède :

- spirale géante
- $d=2.9 \times 10^6$ a.l.
- 2-3 fois plus grande que Voie Lactée
- 500 amas globulaires
- Taille disque $\sim 400\,000$ a.l.
- Disque plus lumineux et massif
- Bulbe : 5 fois plus lumineux



La Voie Lactée

Environnement

- Galaxies naines satellites ou compagnons de la Voie Lactée :

- LMC :

- d = 179 000 a.l.
- Irrégulière
- barre



- SMC :

- d = 200 000 a.l.
- Irrégulière



La Voie Lactée

Environnement

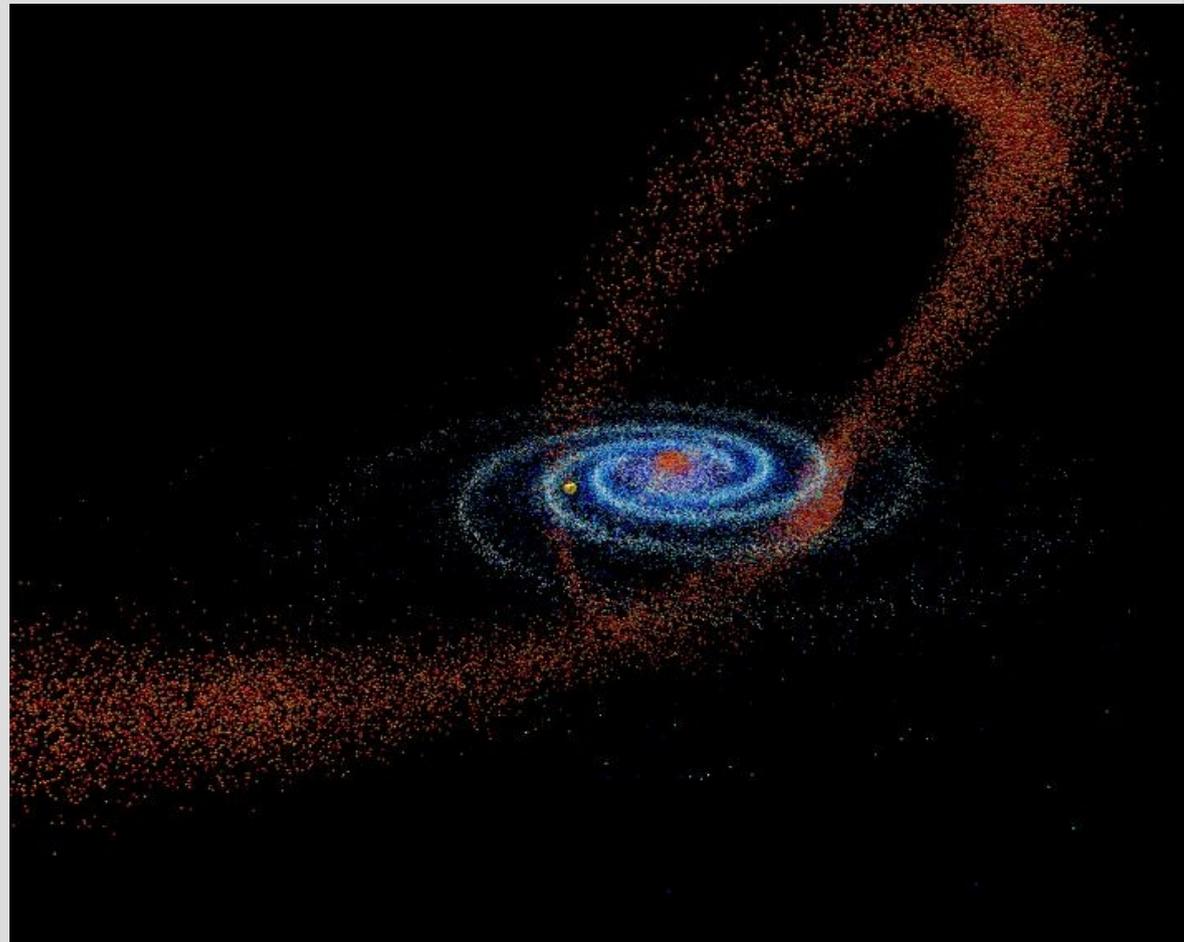
- Galaxies naines satellites ou compagnons de la Voie Lactée :

- Naine du Sagittaire

- (1994)

- d = 88 000a.l.

- Carte 3D (FILM)



La Voie Lactée

Formation et Evolution

- Modèles LCDM : Galaxies se forment par accrétions et fusions successives de systèmes moins massifs
- Simulations cosmologiques confrontées aux observations
 - Matière Noire
 - Etoiles + Gaz
 - Soumis à la gravitation
- Evolution chimique et dynamique

La Voie Lactée

Une vision partielle

- Il y a encore de (trop !) nombreux problèmes à résoudre
 - Cartographie détaillée
 - Distribution des satellites
 - Formation des différentes structures (disque épais, bulbe,...et tailles respectives)
 - Rôle des accrétions successives
 - Evolution chimique des différents éléments
 -

La Voie Lactée

Gaia

- *Une carte 3D de la Galaxie*
- *Caractérisation des populations stellaires :*
 - *Recensement*
 - *Dynamique*
 - *Abondances chimiques*
 - *Quelle est leur origine?*
- *Nouvelle vision de la Formation et de l'Histoire de notre Galaxie*

