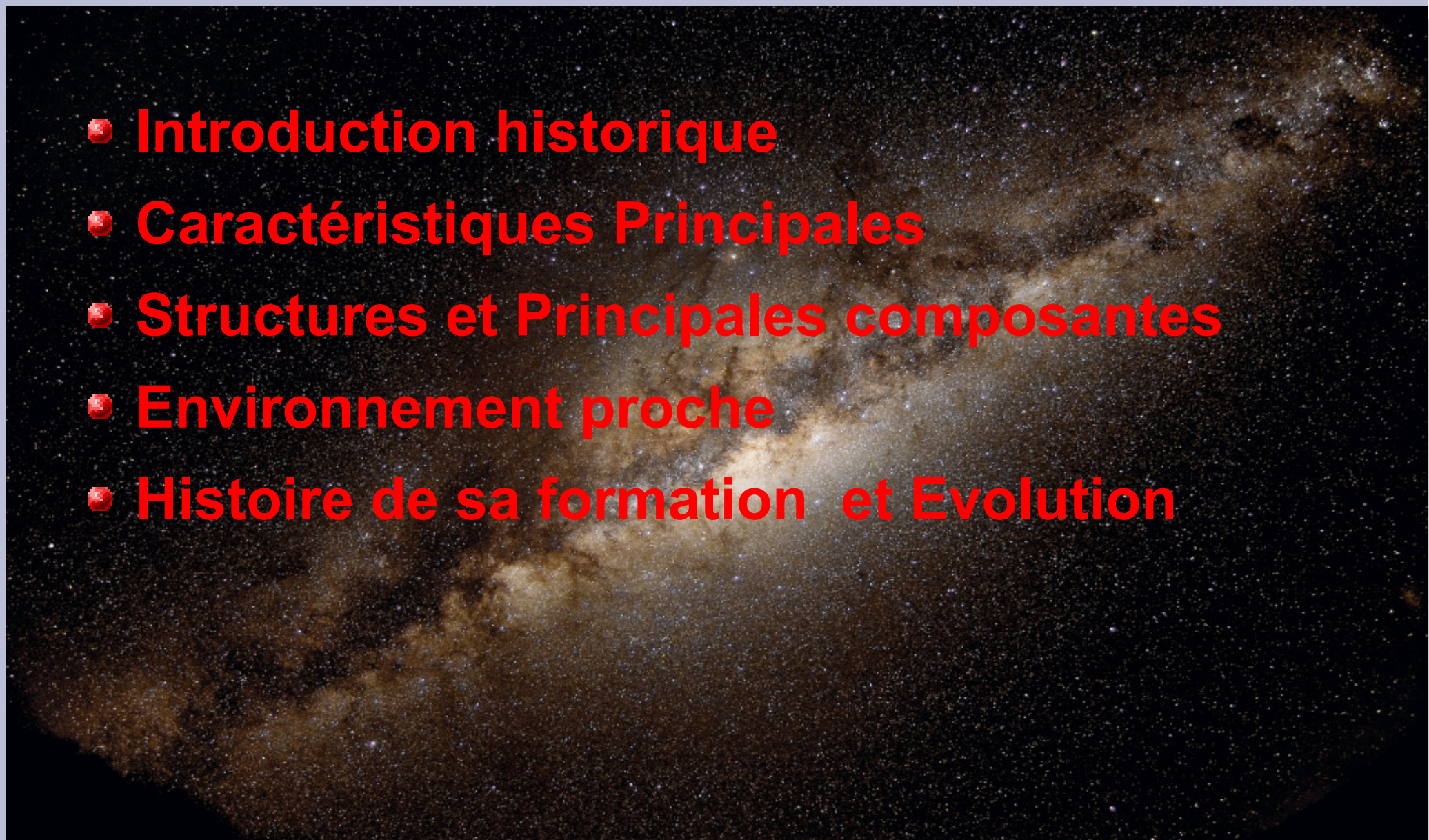
La Voie Lactée



- Introduction historique
- Caractéristiques Principales
- Structures et Principales composantes
- Environnement proche
- Histoire de sa formation et Evolution

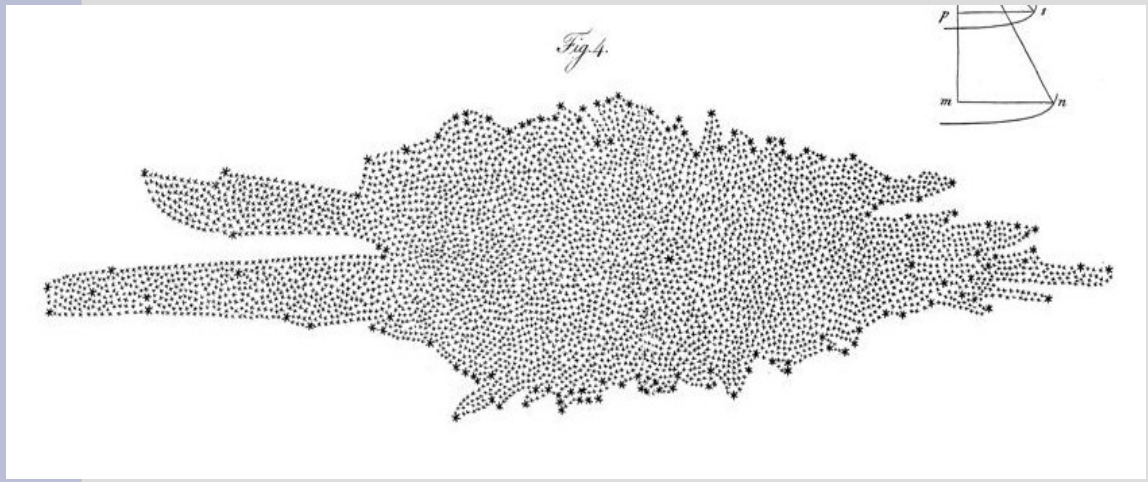
La Voie Lactée

- **FILM : *Voyage Virgo* (Tully)**

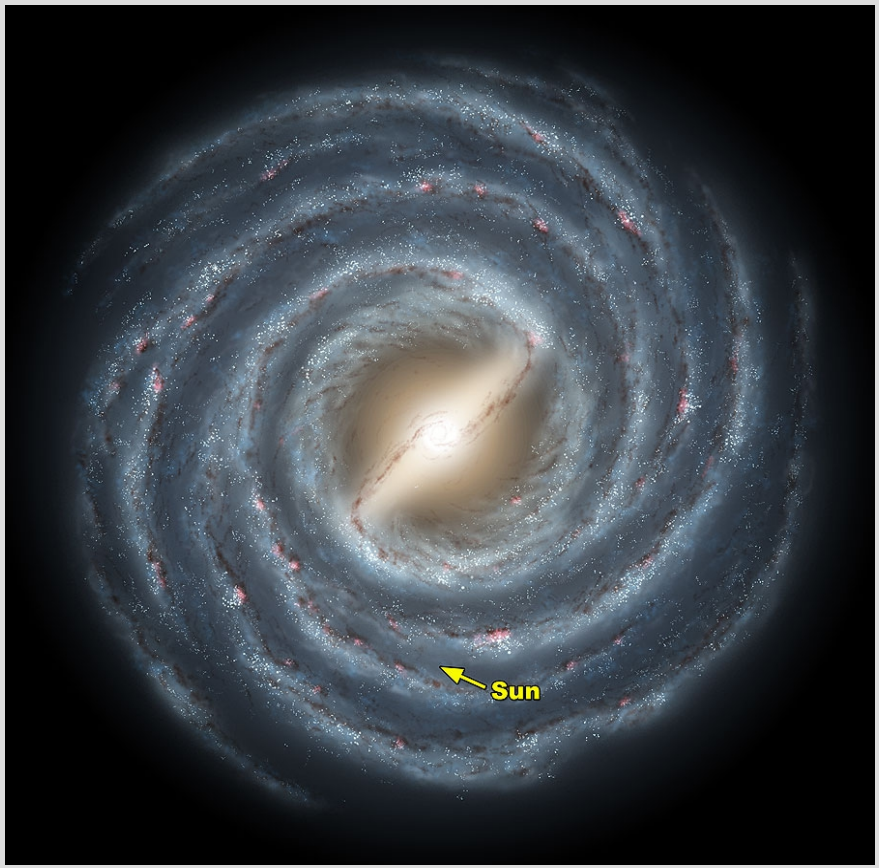


La Voie Lactée
Evolution des idées

- Représentation d'Herschell (1785)



- Analyse IR de 30 millions d'étoiles avec Spitzer
(Benjamin et al., 2005)

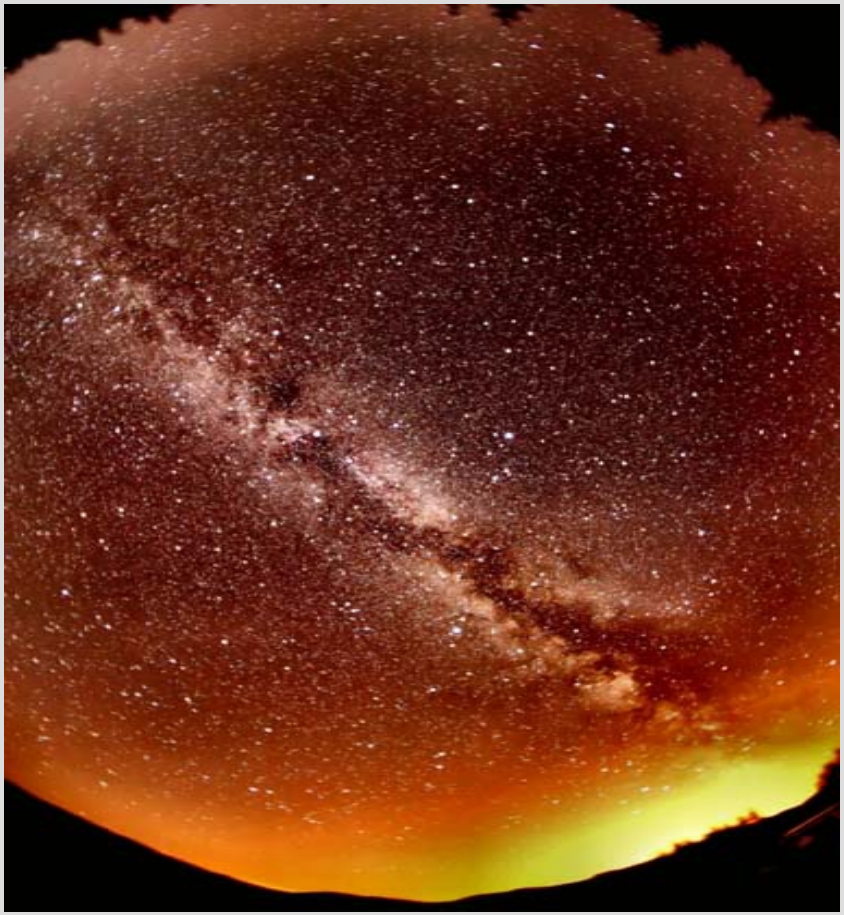


La Voie Lactée
Evolution des idées

- Mythologie : Héra : termes « *Voie Lactée* » et « *Galaxie* »



Tintoret *L'origine de la Voie Lactée (1570)*



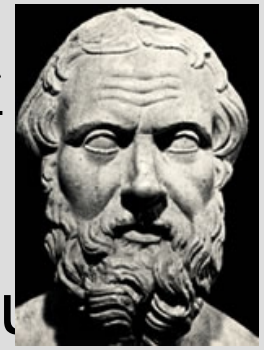
La Voie Lactée
Evolution des idées



- Antiquité :
  - Egypte : *Nil Céleste*
  - Anaxagore (~-450) :

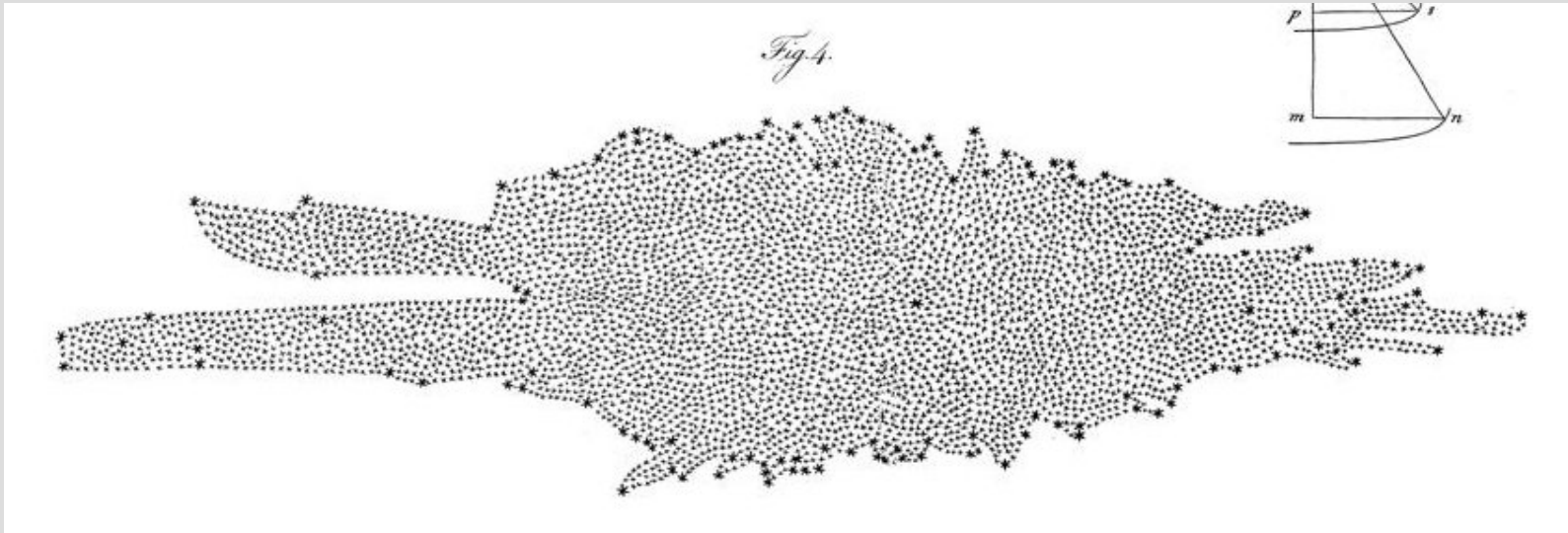
    Partie de la sphère céleste

    non masquée par ombre Terre
  - Démocrite(~-450) : ***Rassemblement d'étoiles***
  - Hypothèse rejetée par Platon
  - Aristote (~-450) : Grande sphère tournant autou
    Terre

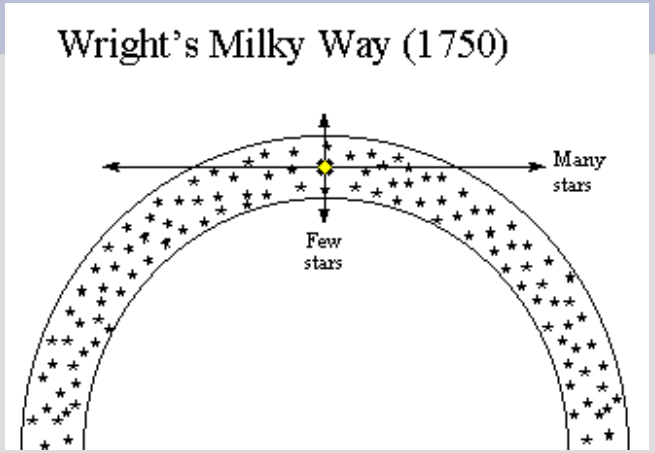


La Voie Lactée
Evolution des idées

- Galilée (1610) résout la Voie Lactée en étoiles
- Kant (1755) : Tâches elliptiques dans le ciel sont des « Voie-Lactées », notion d'*Univers-Iles*
- Herschell (1780) : comptage d'étoiles et Voie Lactée « insondable »

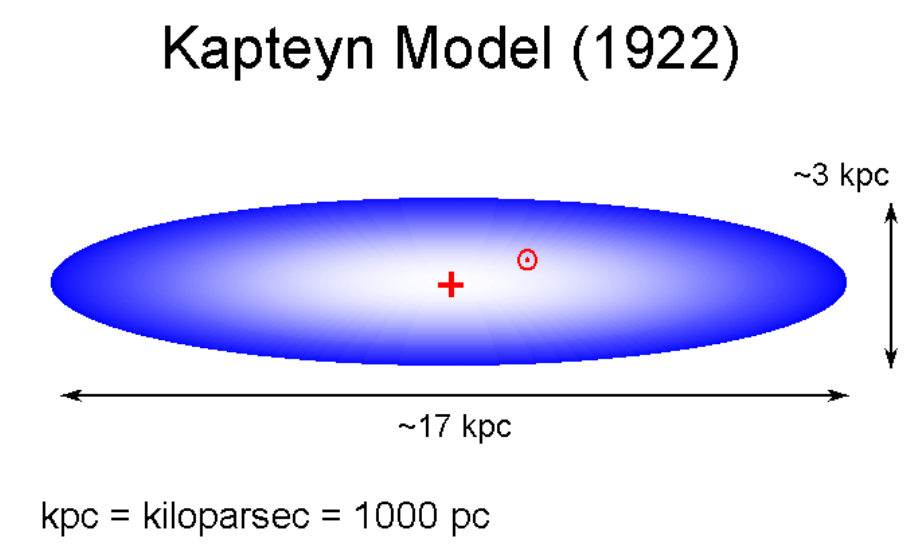


La Voie Lactée
Evolution des idées



- T. Wright (1750) imagine une *strate d'étoiles vue de l'intérieur*

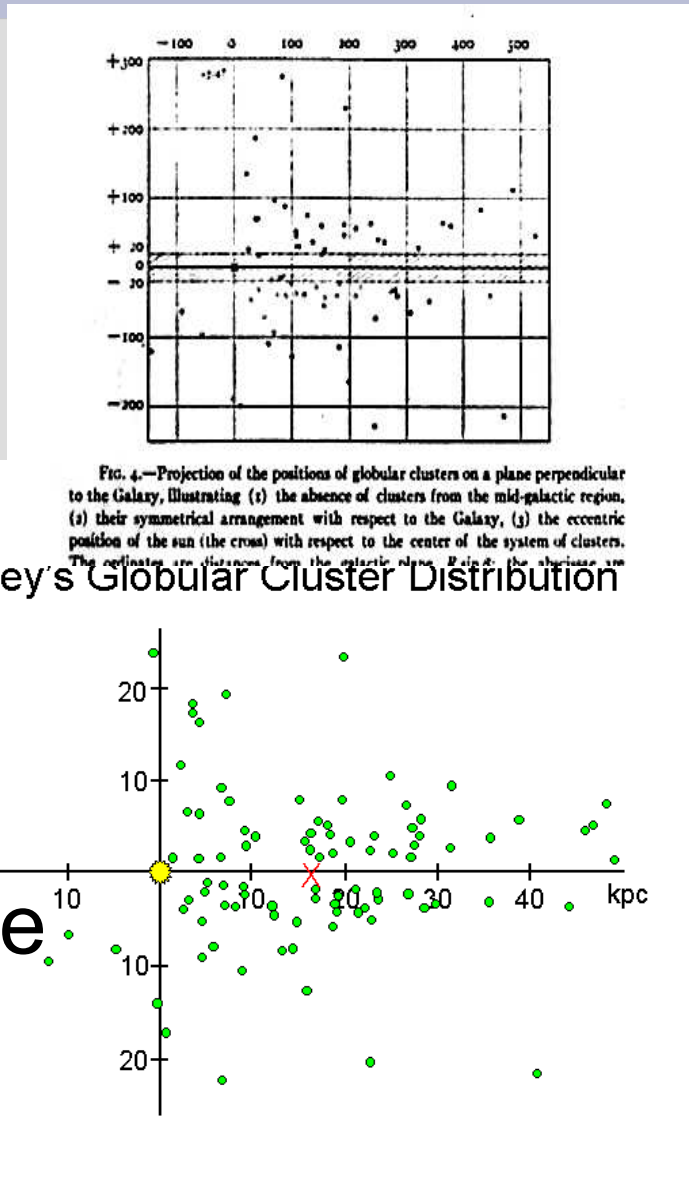
- Kapteyn (1922) : ellipse aplatie et centrée sur le Soleil
- Problème de l'extinction interstellaire !



La Voie Lactée
Evolution des idées

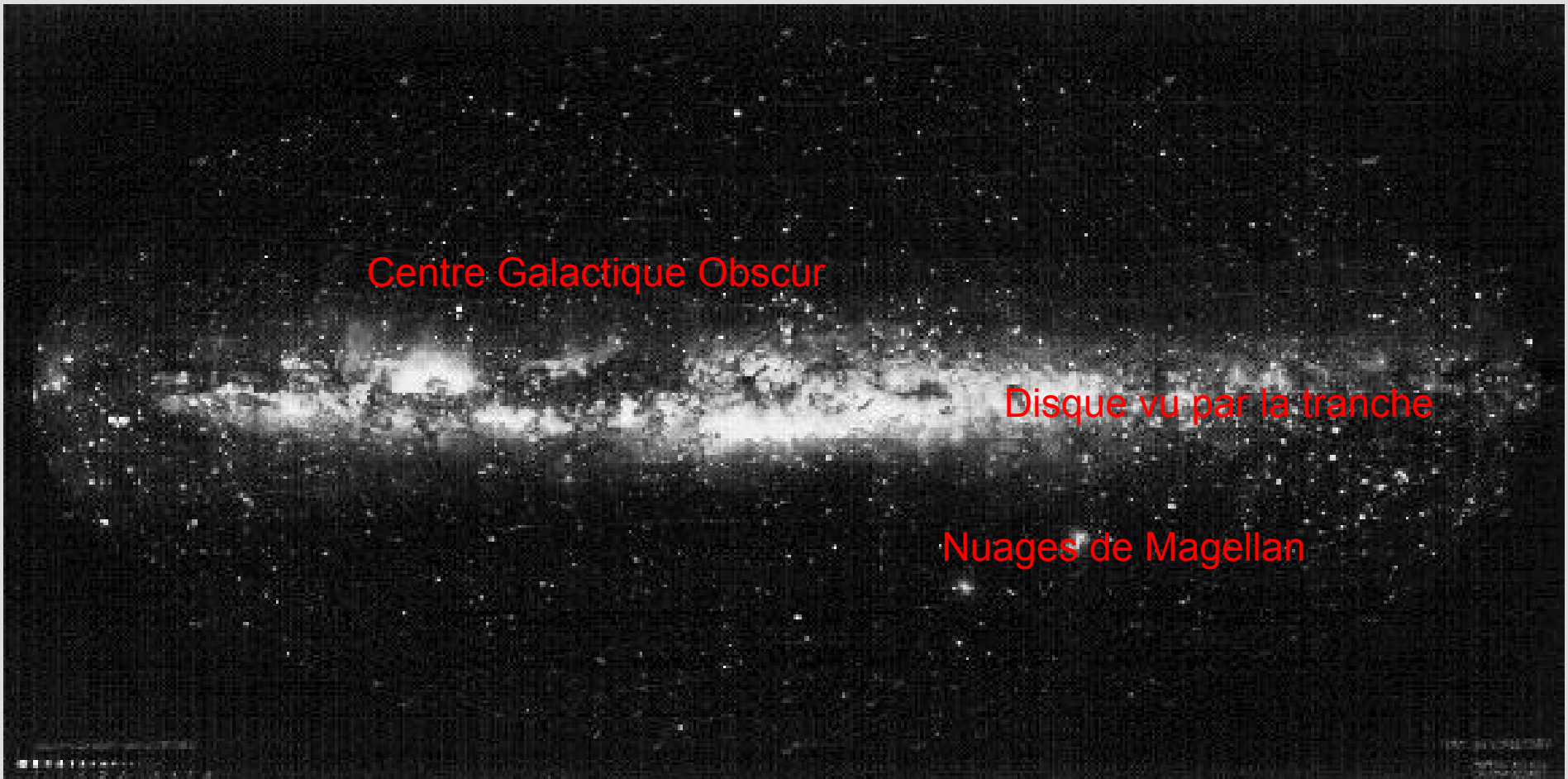


- Shapley (1918)
  - distribution des amas globulaires
  - distances grâce aux Céphéïdes
  - **Centre n'est pas le Soleil**
  - distance de ~60000a.l.
  - vers constellation Sagittaire
  - **taille surestimée : absorption**
- Années 1930 : vision ~correcte



La Voie Lactée
Evolution des idées

- Comptage d'étoiles avec télescopes modernes : carte de 7000 étoiles (1940)



La Voie Lactée
Evolution des idées

- Comptage d'étoiles avec télescopes modernes :

mise en évidence de structures spirales dans le voisinage solaire

Morgan et al. 1953

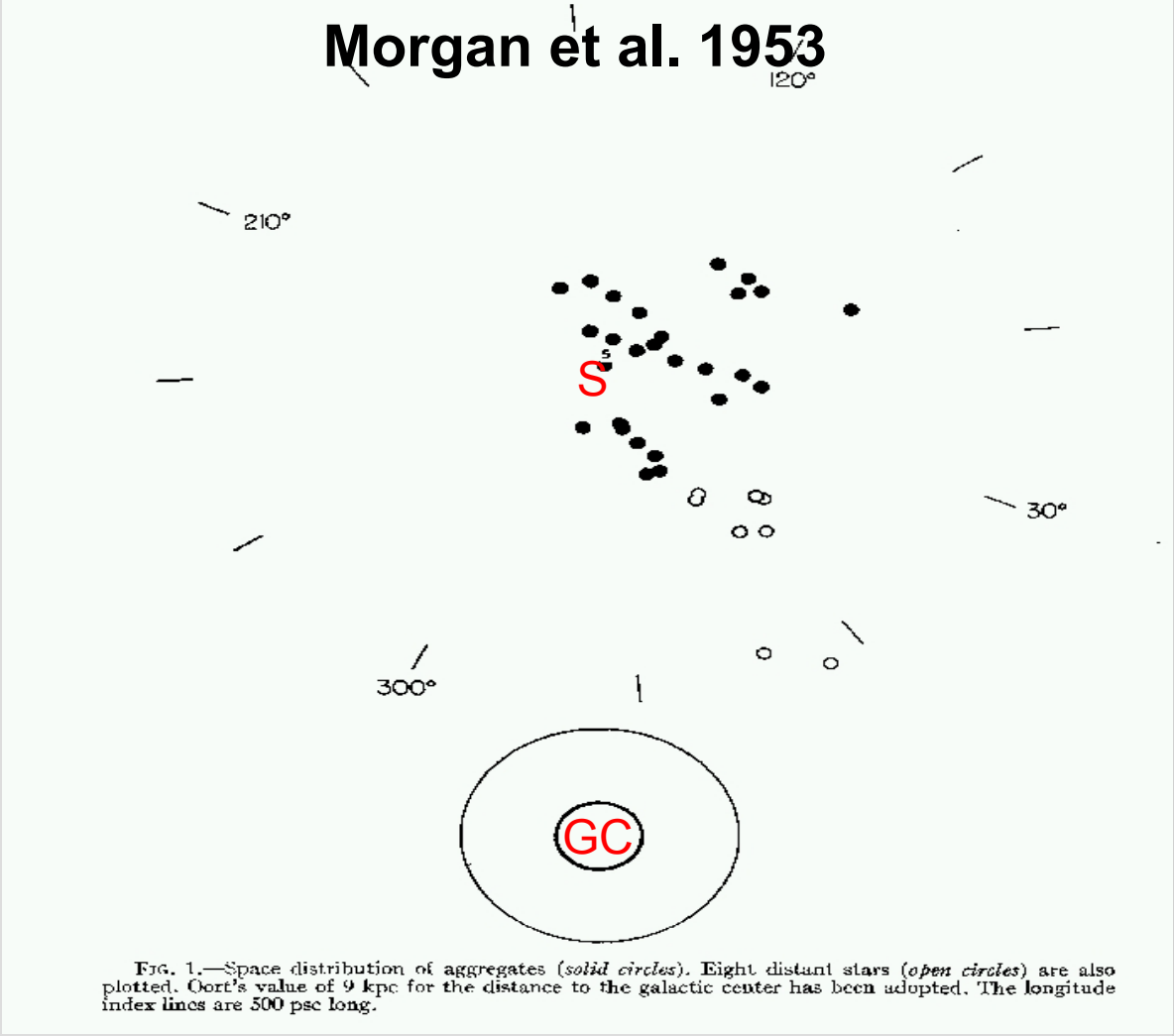
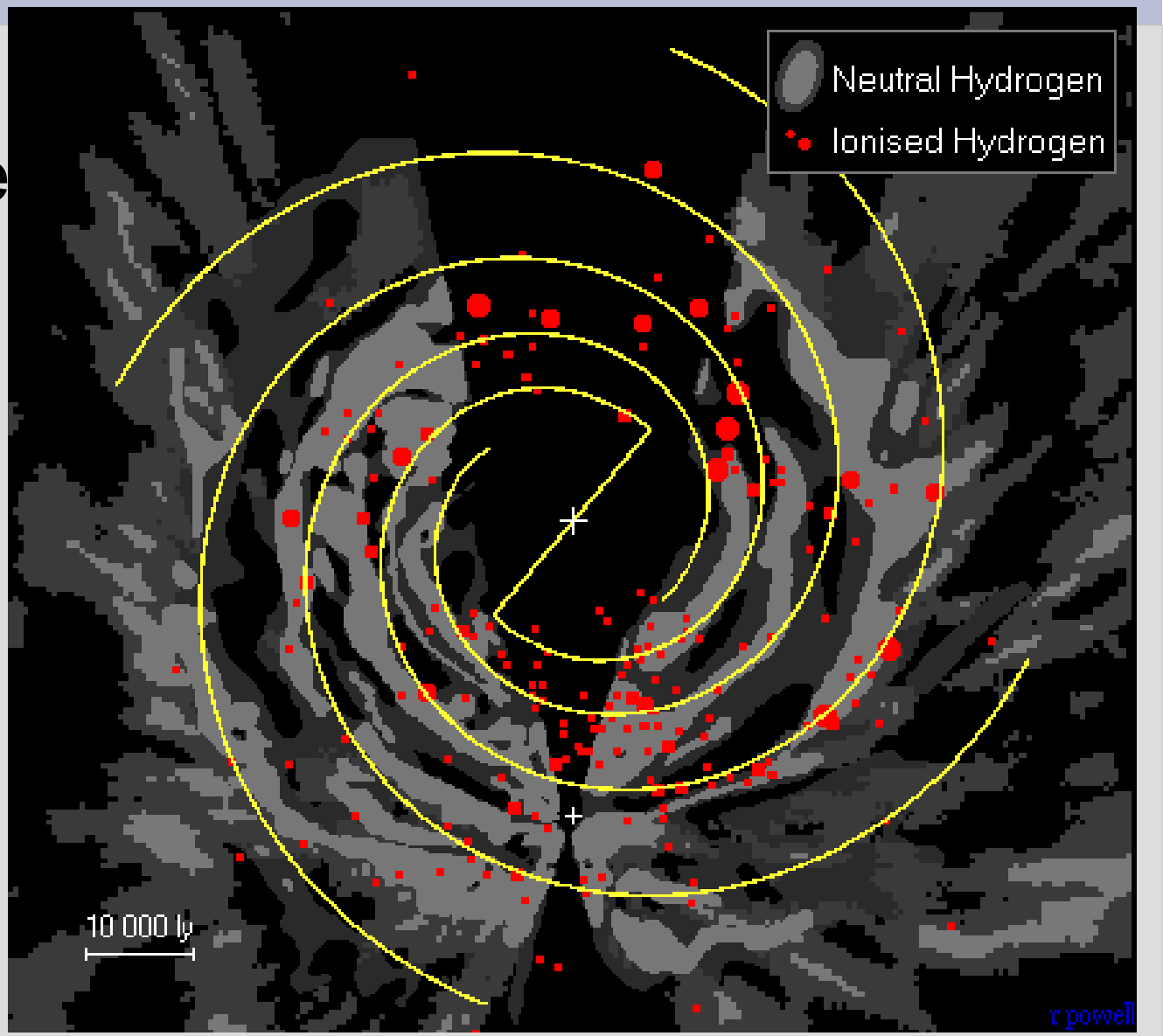


FIG. 1.—Space distribution of aggregates (*solid circles*). Eight distant stars (*open circles*) are also plotted. Oort's value of 9 kpc for the distance to the galactic center has been adopted. The longitude index lines are 500 psc long.

La Voie Lactée
Evolution des idées

- Oort (1920) : rotation galactique
- Oort (1958) : structure spirale (émission HI)

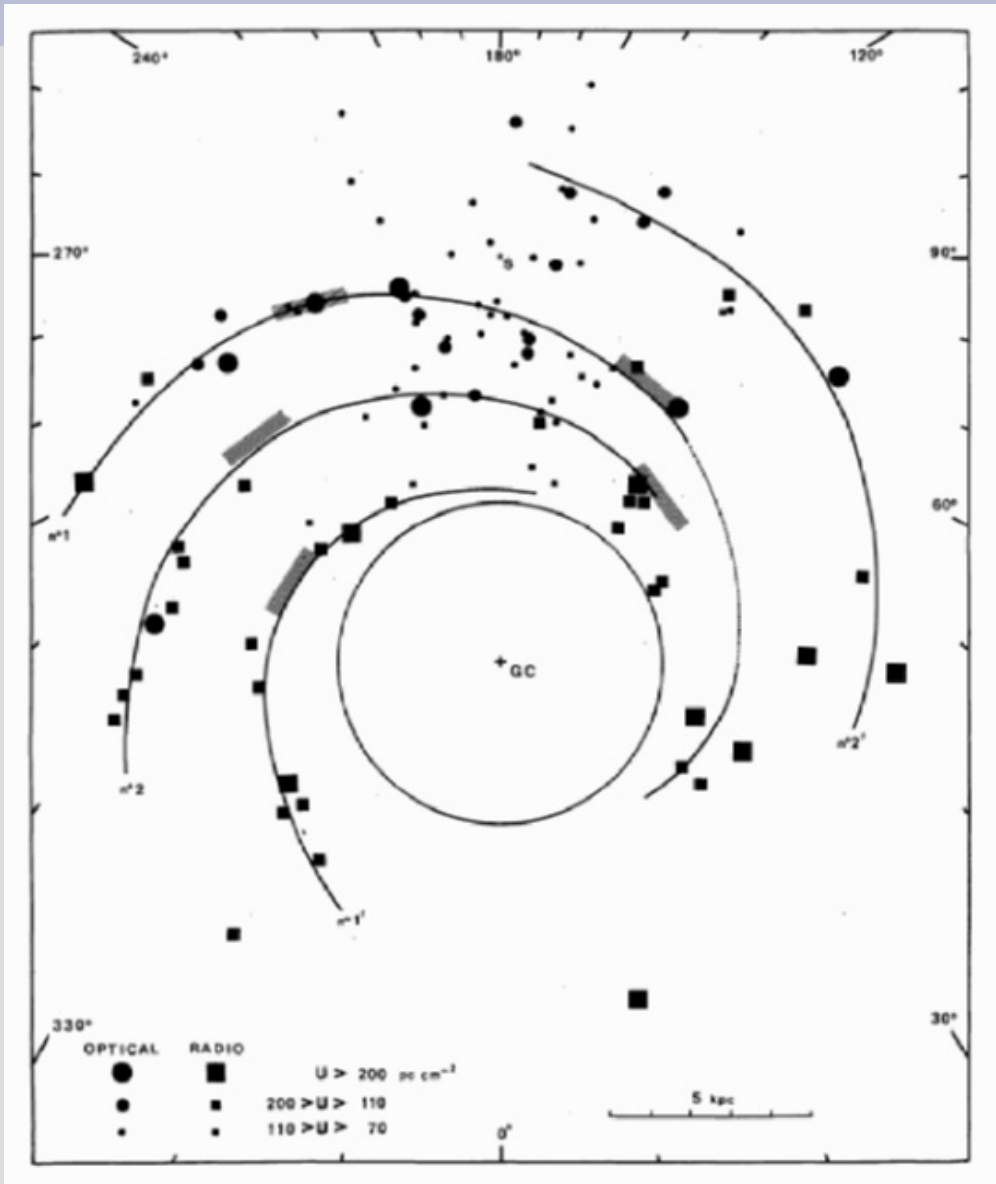


La Voie Lactée
Evolution des idées

- Georgelin & Georgelin (1976) :

Etoiles jeunes

Régions HI et HII



La Voie Lactée



- Introduction historique
- ***Caractéristiques Principales***
- Structures et Principales composantes
- Environnement proche
- Histoire de sa formation et Evolution

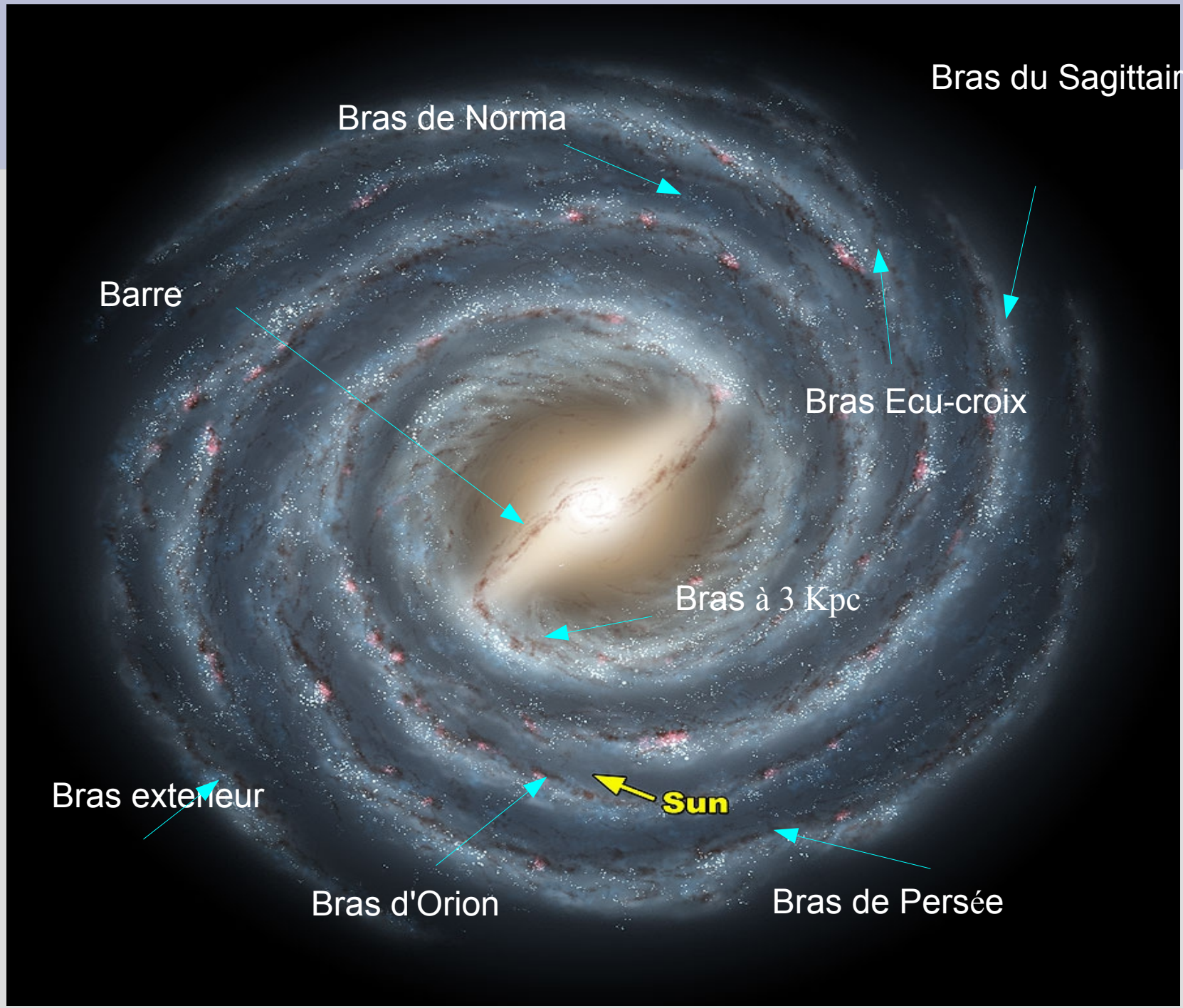
La Voie Lactée



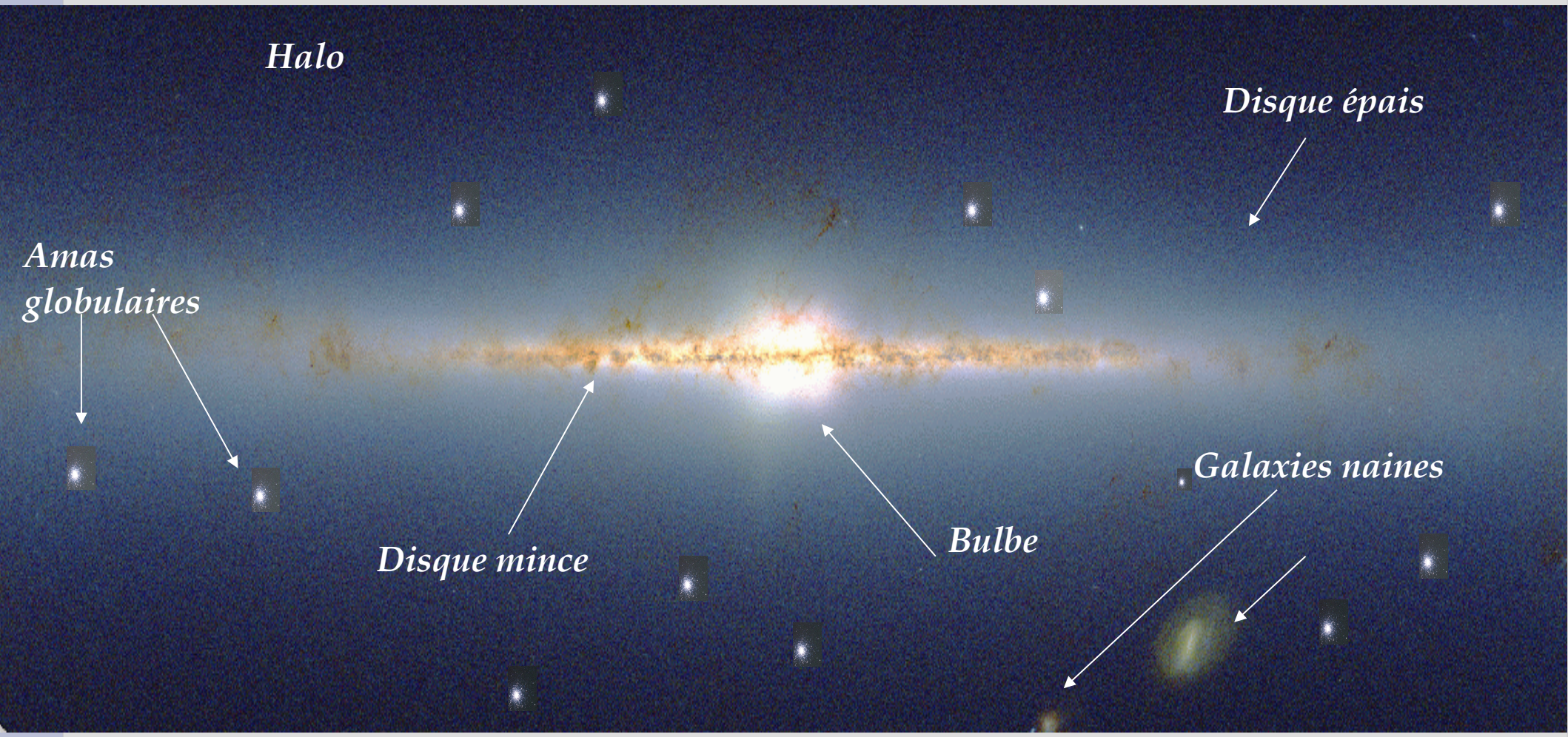
La Voie Lactée



La Voie Lactée



La Voie Lactée

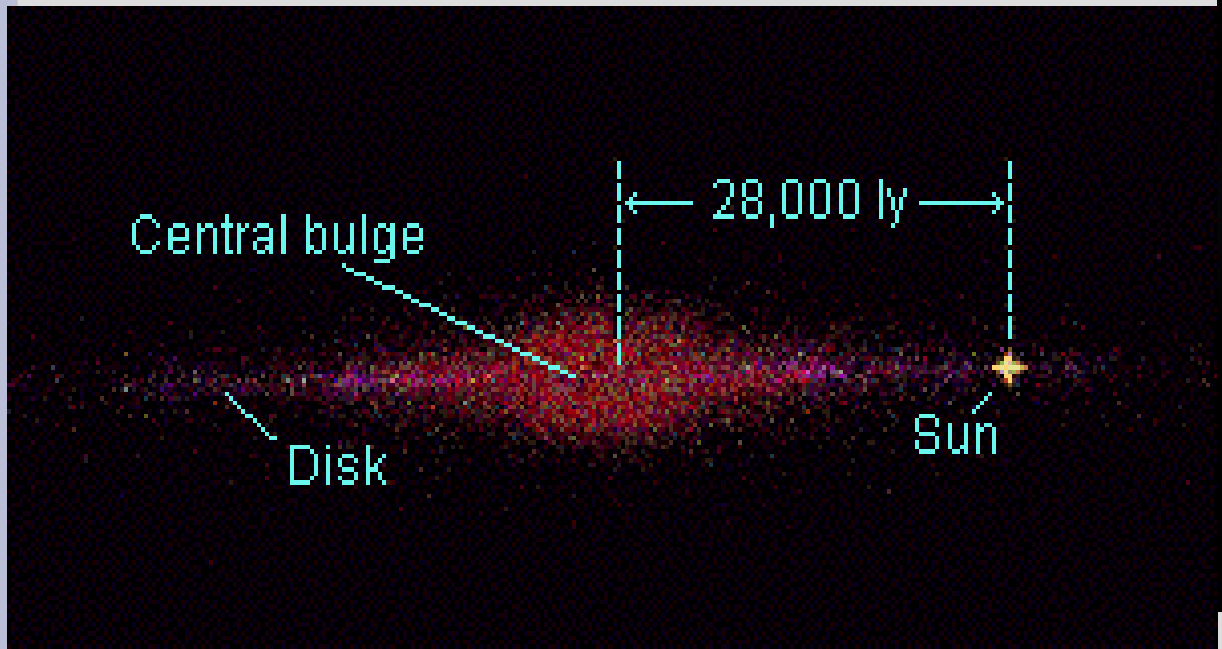


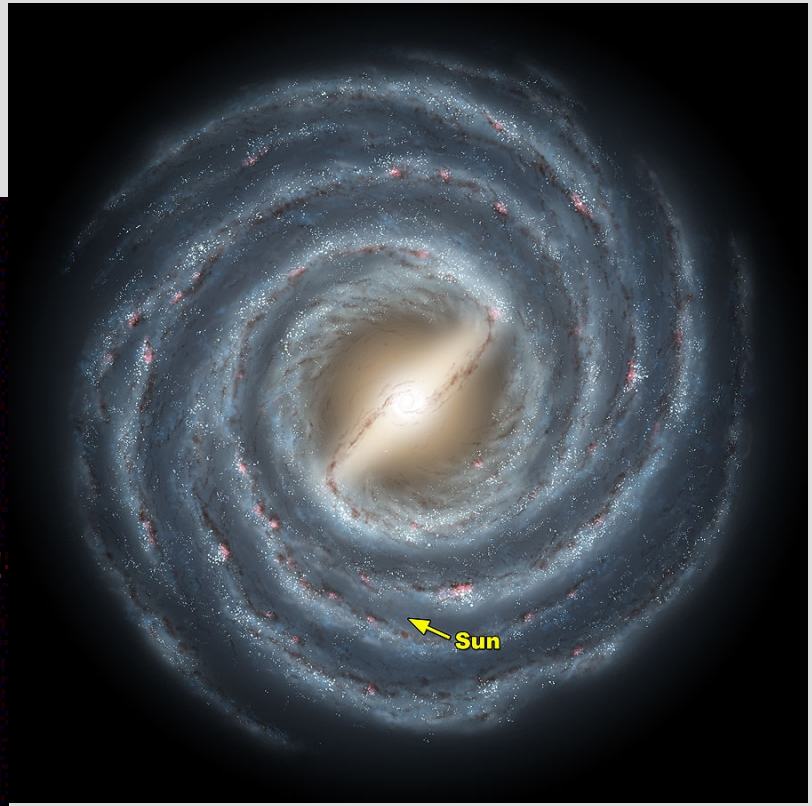
La Voie Lactée
Connaissances actuelles

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

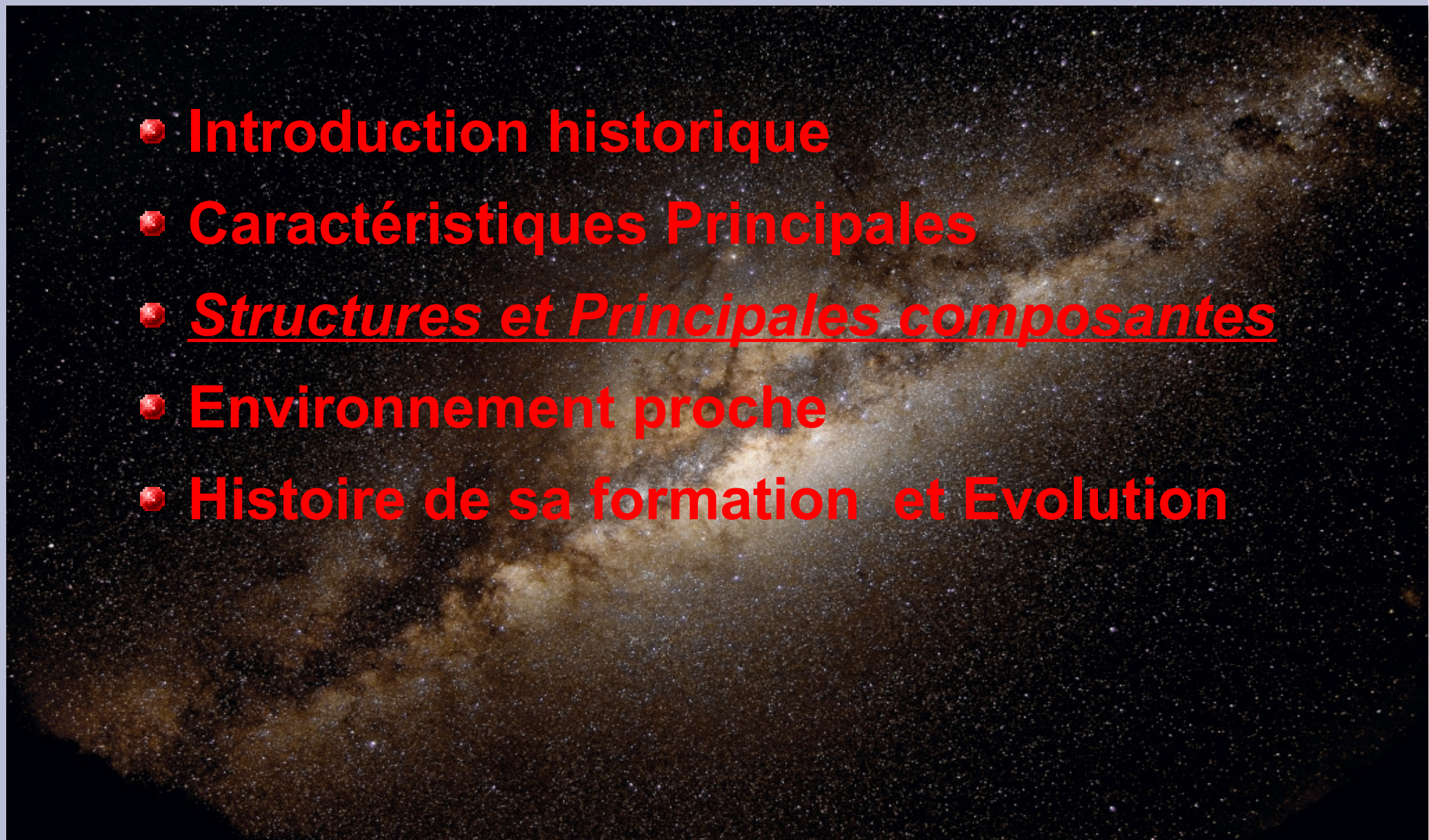
La Voie Lactée
Dimensions

- 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.





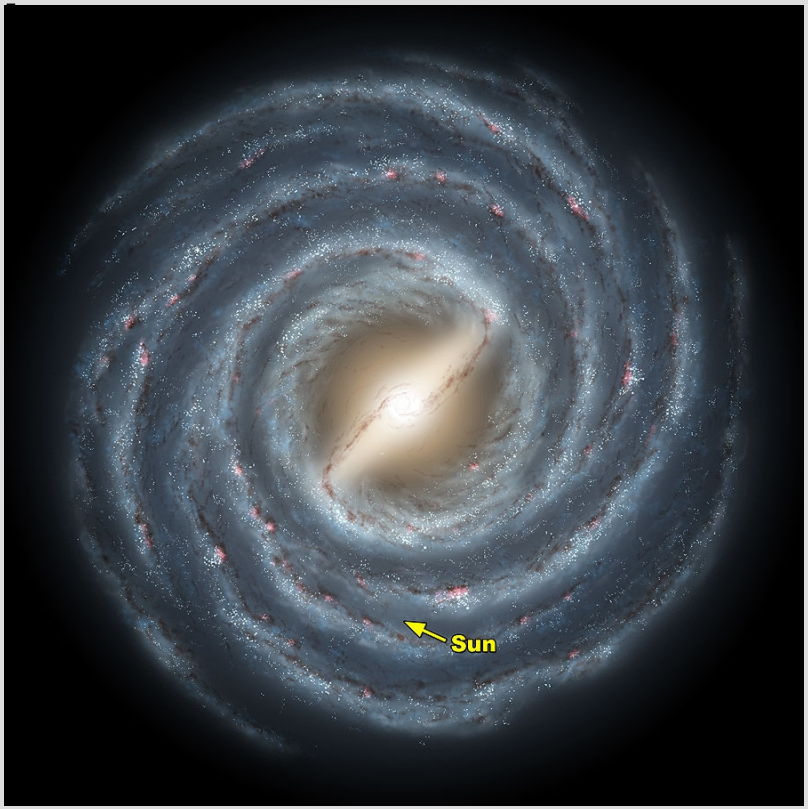
La Voie Lactée



- Introduction historique
- Caractéristiques Principales
- ***Structures et Principales composantes***
- Environnement proche
- Histoire de sa formation et Evolution

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 ?**

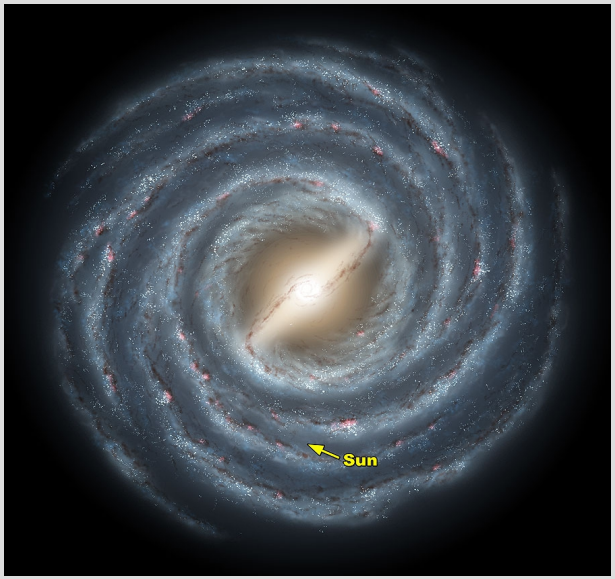


La Voie Lactée
Structure

- 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

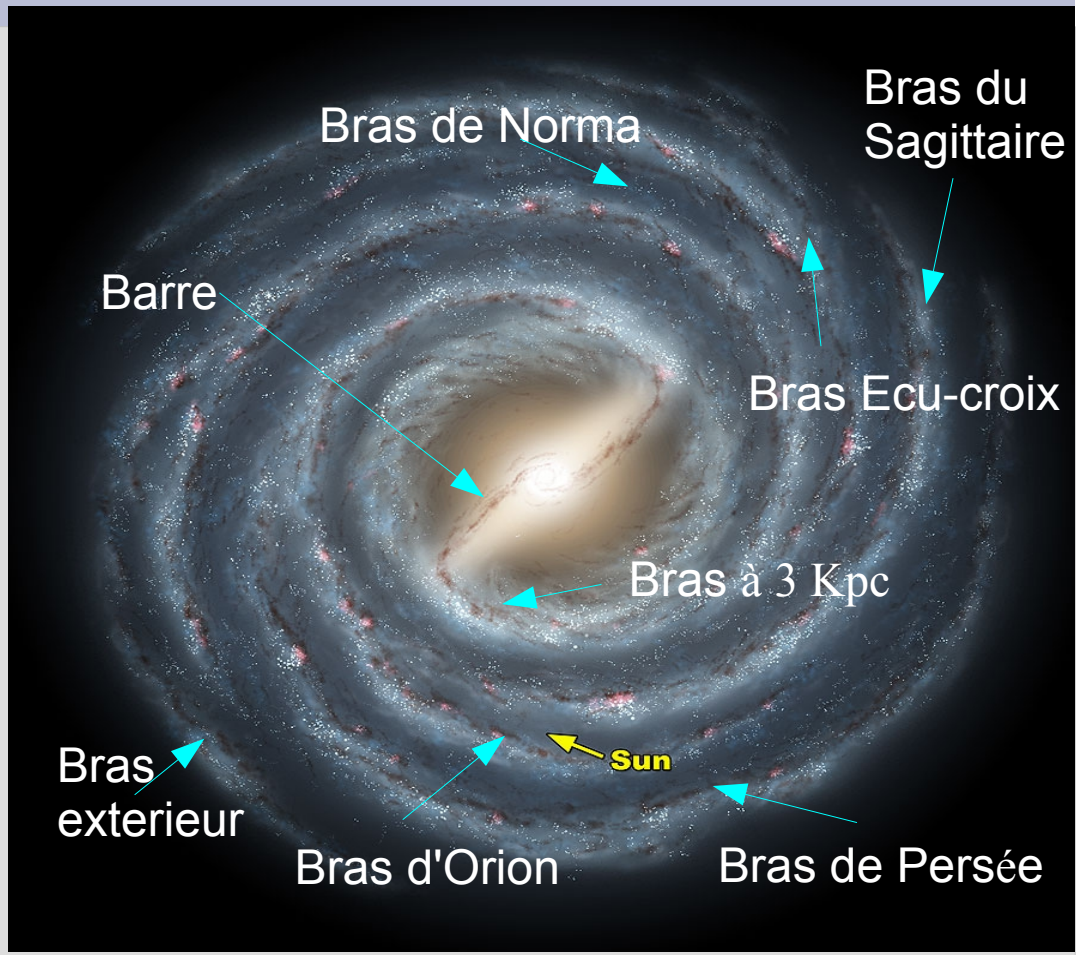
La Voie Lactée
Position du Système Solaire

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

La Voie Lactée
Populations Stellaires

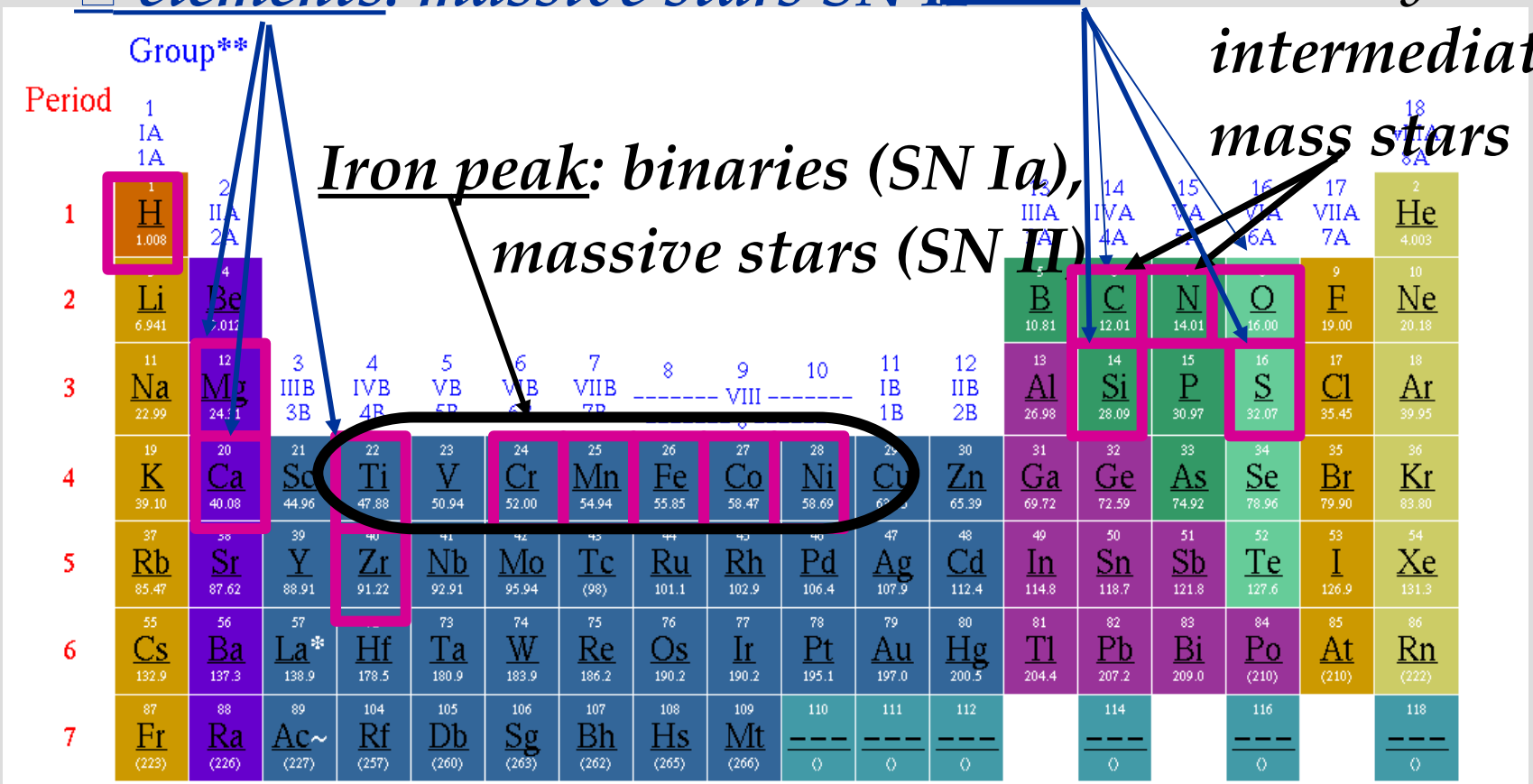
- 5 différentes populations identifiées
- Sixième type de population suspectée
- Différences en :
  - compositions chimiques
  - cinématiques
  - histoire formation étoiles
  - impact sur l'évolution chimique

La Voie Lactée
Populations Stellaires

- Caractéristiques principales :
  - cinématique (3 composantes de la vitesse)
  - composition chimique :
    - *métallicité* = abondance moyenne des éléments lourds
    - [Fe/H] : abondance du Fer rapportée à celle de l'Hydrogène et comparée au Soleil (échelle log)
      - [Fe/H] = 0 : identique au Soleil
      - [Fe/H] = -1 : 10 fois moins de Fer (ou métaux) que dans le Soleil
      - Etoiles de la Galaxie : [Fe/H] entre -3.5 et +1
    - abondance particulière de certains éléments chimiques

La Voie Lactée
Populations Stellaires

- Univers primordial : H, He, traces de Li, Be,...



La Voie Lactée
Populations Stellaires

1) Disque Mince :
   - *Population I* (classification de Baade)
   - Etoiles 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 (~12x10^9ans) et de métallicité intermédiaire [Fe/H]~-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 clasification initiale de Baade
- Etoiles vieilles et riches en métaux (forte dispersion)
- Statistique très faible
- Enrichissement chimique rapide dominé par SNII
- 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 SNII
- 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
Populations Stellaires

6) Hypothétiques étoiles primordiales :

- *Population III* (classification de Baade)
- Non identifées :
  - les faibles masses devraient être encore détectables
  - seules des très massives ont été formées ?
- Etoiles formées avec le gaz primordial, précurseur de la formation galactique
- Extrêmement pauvres en métaux

La Voie Lactée
Matière Noire

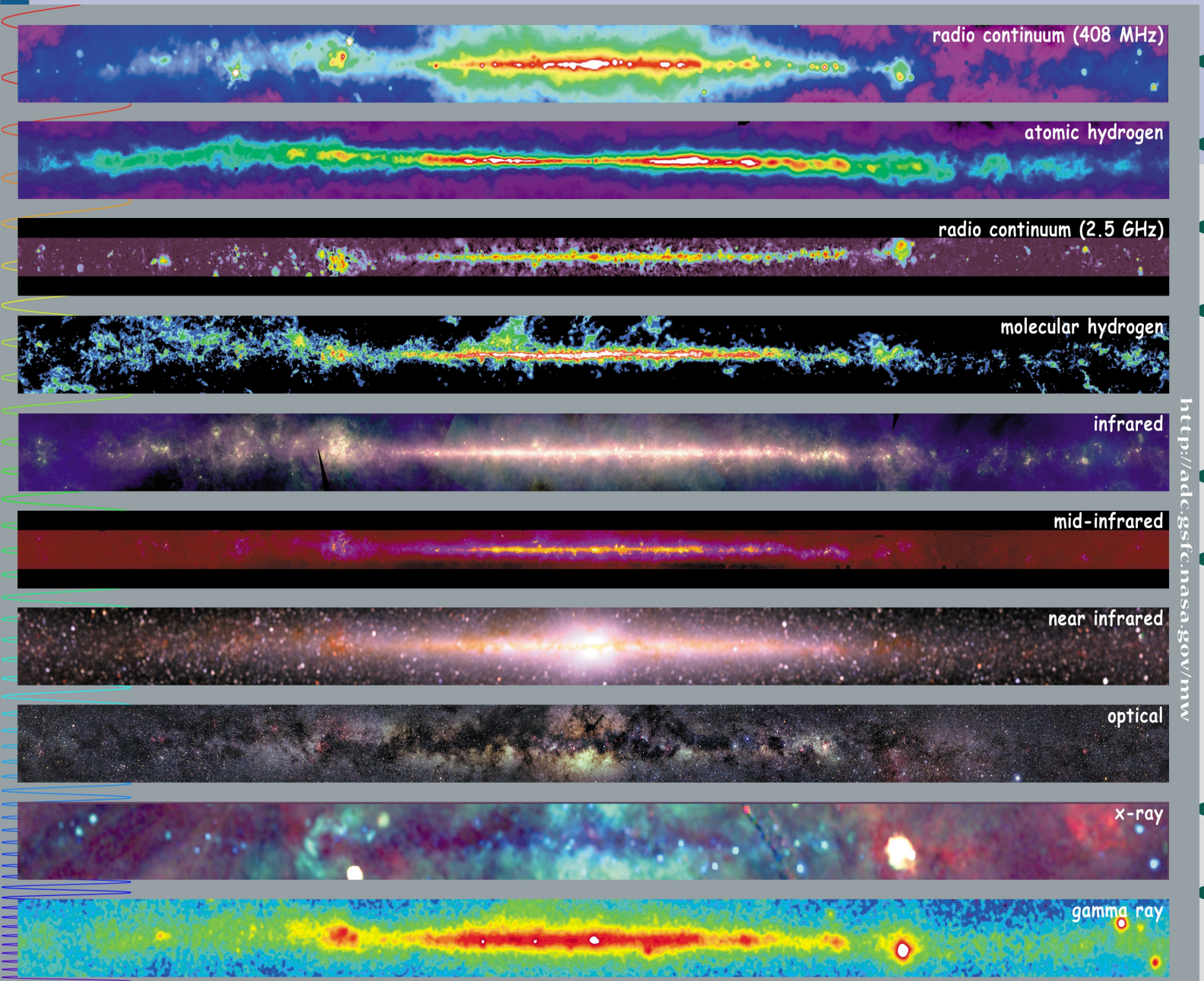
- Population 0 (!)
- Détectée gravitationnellement mais pas directement
- Domine la matière visible (80% masse de l'Univers et de la Galaxie)
- Nature inconnue

La Voie Lactée



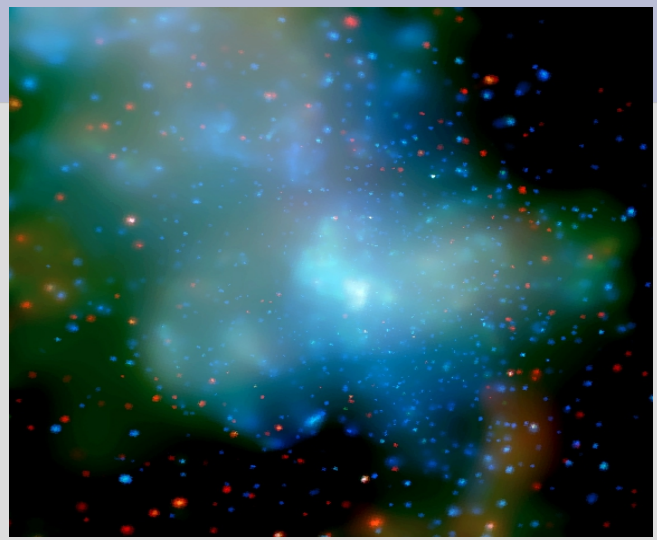
Descriptions des Principales composantes

La Voie Lactée



- e accéléres
- HI -> MIS
- Gaz ionisé
- CO
- Poussières
- Nuages moléculaires
- X: Gaz T=10^6K
- Gamma

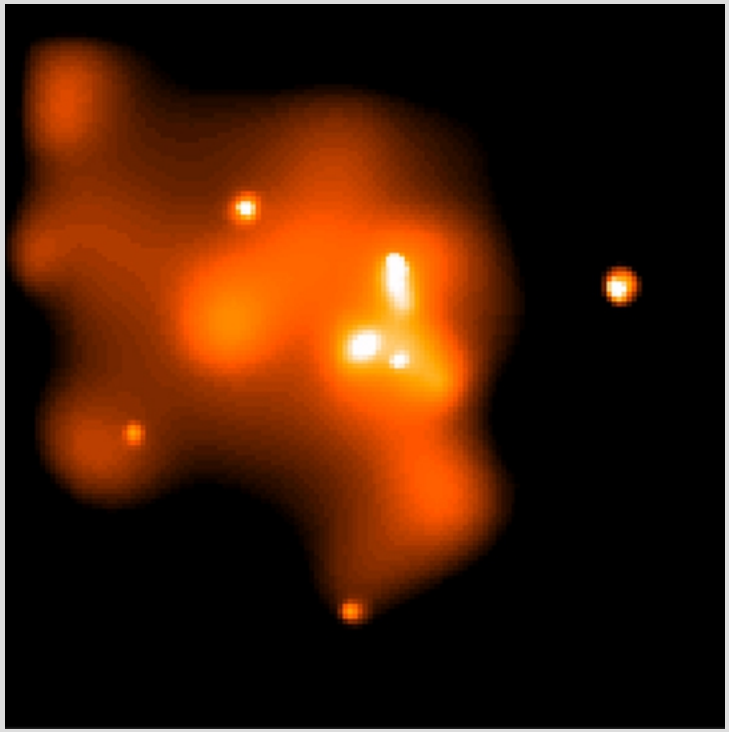
La Voie Lactée
Centre Galactique



- Sgr A : très brillante en radio et X
- Image en X (Chandra) :

130a.l. autour du centre

- *10a.l. autour du centre*

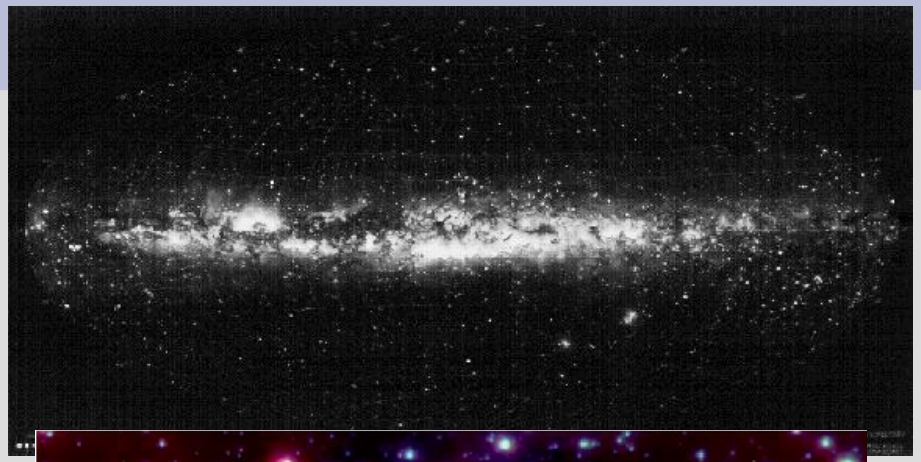


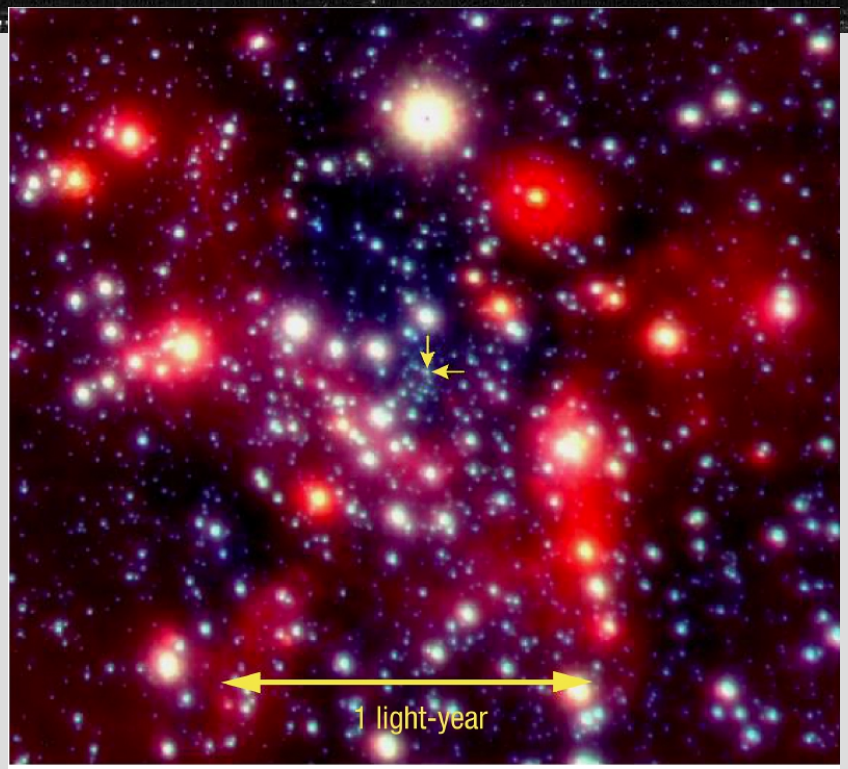
Gas très chaud (10^6K) autour d'un trou noir (?) hyper massif

La Voie Lactée
Centre Galactique

- Centre très obscurci en V
- Poussières du MIS
- Observations IR et

Haute Résolution angulaire

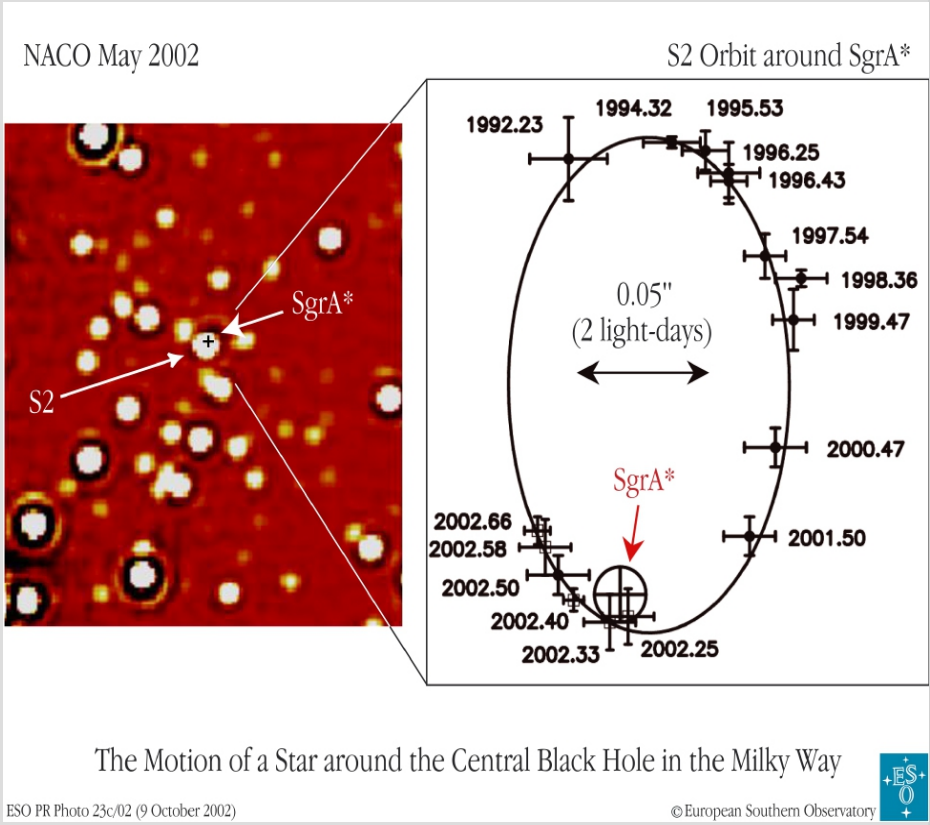




The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

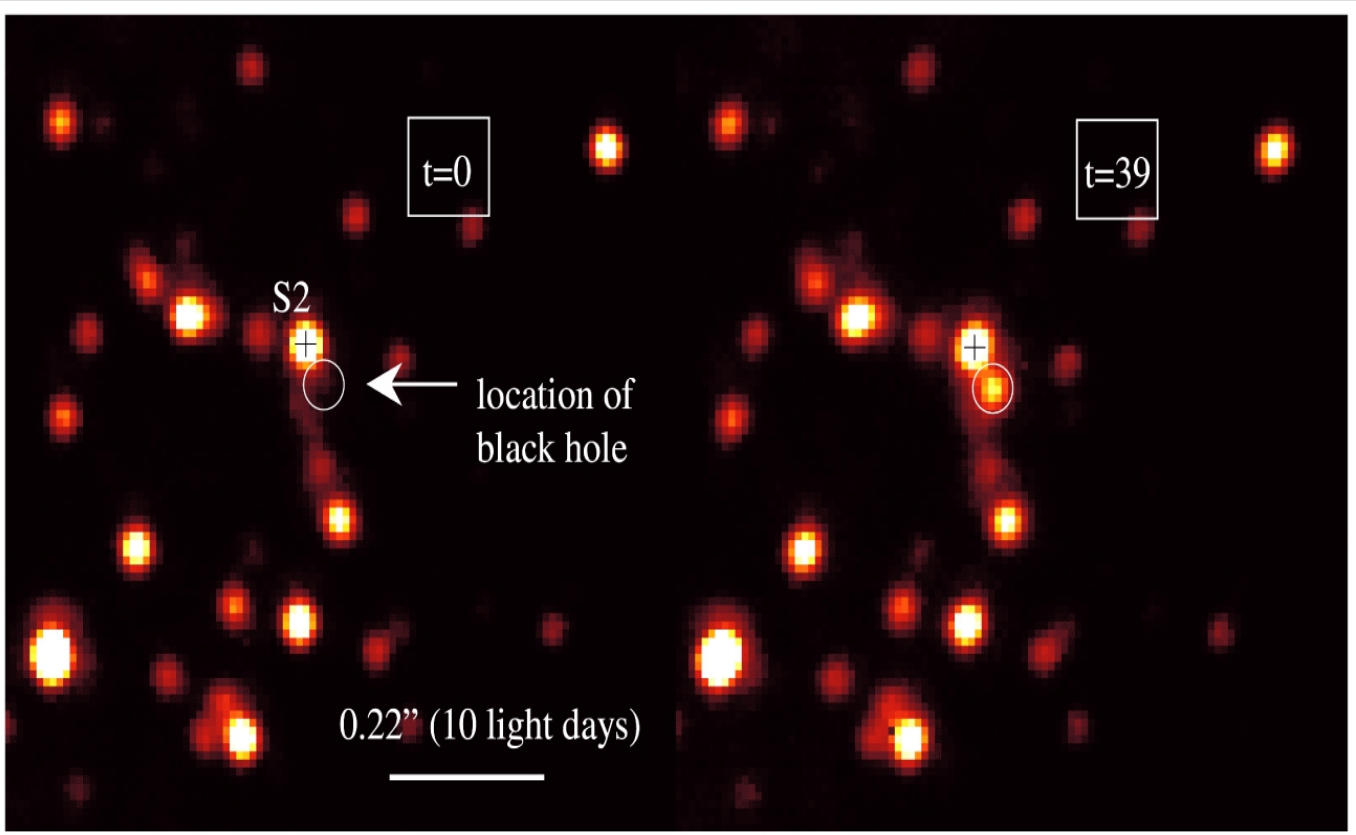
La Voie Lactée
Centre Galactique

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



La Voie Lactée
Centre Galactique

- Observations IR + Haute Résolution angulaire
- Suivi temporel rapide => Accrétion par le trou noir central



Near-IR Flare from Galactic Centre (VLT YEPUN + NACO)

La Voie Lactée
Amas d'étoiles

- Regroupement d'un très grand nombre d'étoiles (milliers à millions)
- *Amas Ouverts*
- *Amas Globulaires*





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_o
- Dimensions : ~50 - ~200 a.l.
- Distances beaucoup plus importantes : toutes les étoiles sont à la même distance

La Voie Lactée
Amas Ouverts

- 1100 connus dans la Galaxie (100 fois +?)
- durée de vie courte
- Connus dès l'Antiquité (Pléiades)
- 1ère résolution en étoiles par Galilée (1609)
- 27 dans le catalogue de Messier



La Voie Lactée

Amas Ouverts



La Voie Lactée

Amas Ouverts

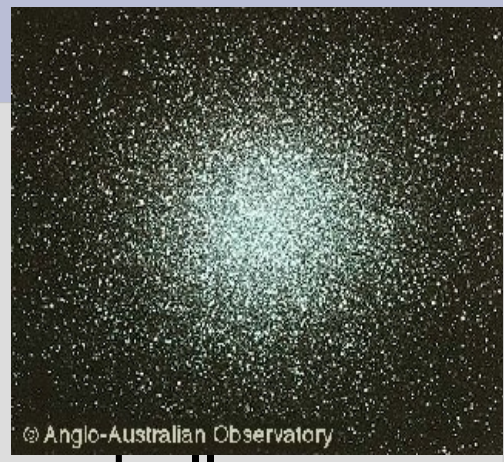


La Voie Lactée
Amas Globulaires



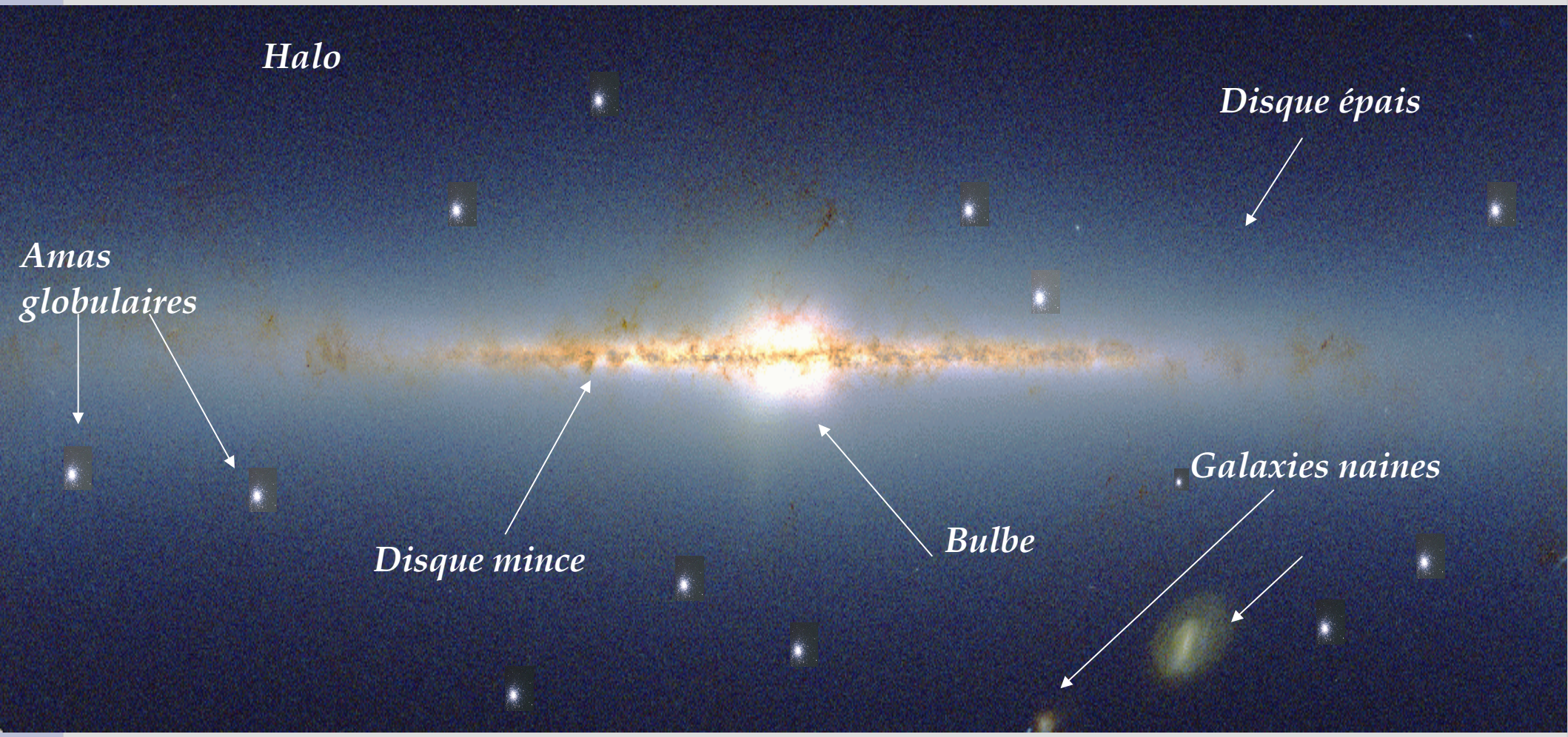
- 10^4 – 10^6 étoiles
  - regroupées par leur propre gravité
  - même métallicité et pauvres en métaux
  - même âge et étoiles très vieilles (Population II)
  - masses entre 0.8 et >50 M_o
- Dimensions : ~50 - ~200 a.l.
- Distances beaucoup plus importantes
  - toutes les étoiles sont à la même distance

La Voie Lactée
Amas Globulaires



- Premières découvertes : XVIIe siècle
- 28 dans le catalogue de Messier
- M4 résolu en étoiles par Messier, autres par Herschell
- 151 connus actuellement dans la Galaxie
  - formant un halo centré sur le Centre Galactique
  - les plus distants sont à 100 000 a.l. du centre
- Grand nombre détectés dans autres galaxies (pas toujours résolus)

La Voie Lactée
Amas Globulaires



La Voie Lactée

Amas Globulaires



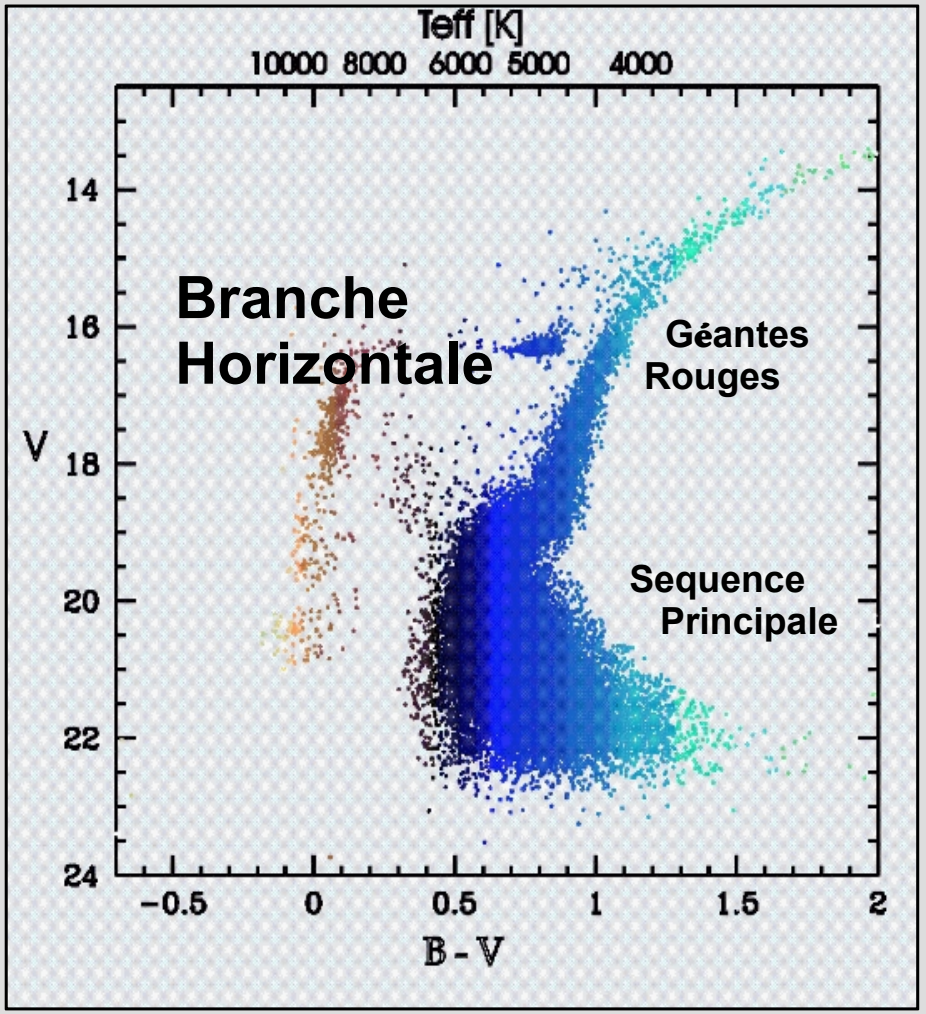
La Voie Lactée

Amas Globulaires

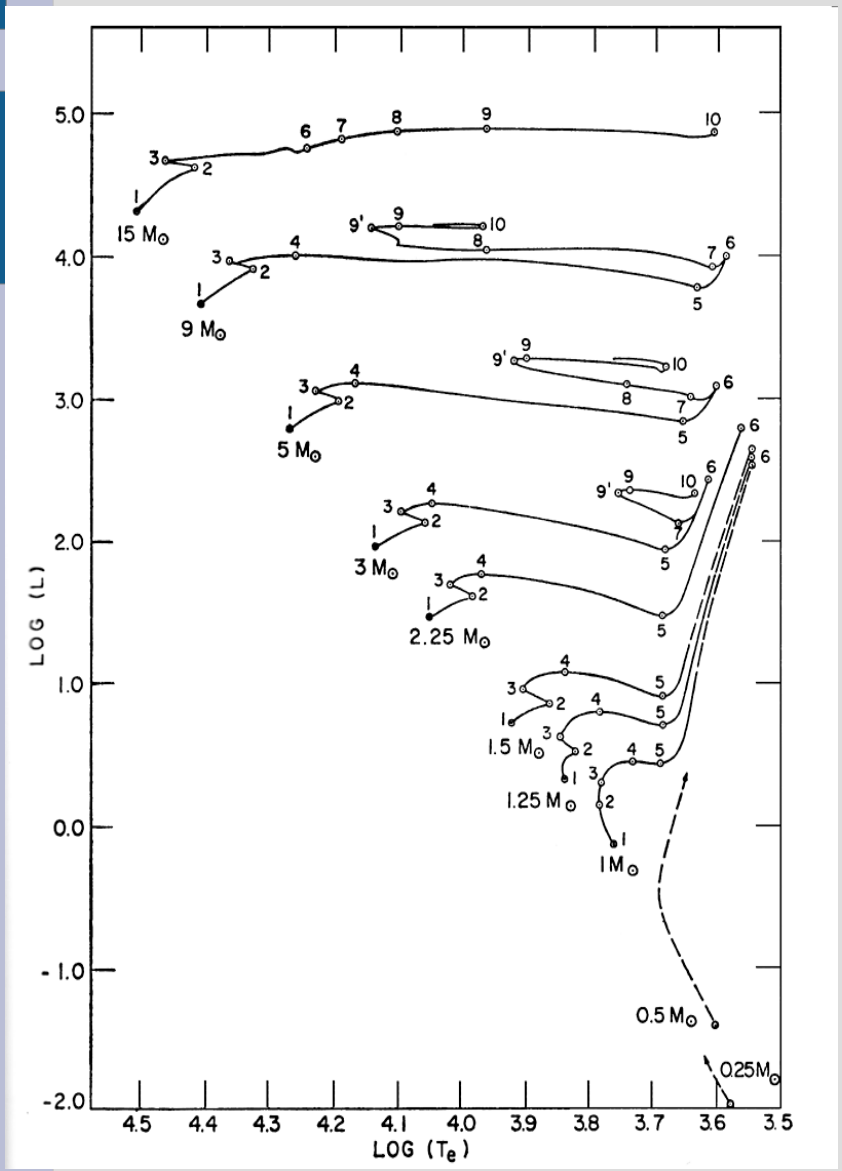


La Voie Lactée
Diagramme HR des Amas

- Identification du stade évolutif des étoiles
- Mesure de l'âge
- Mesure de la distance



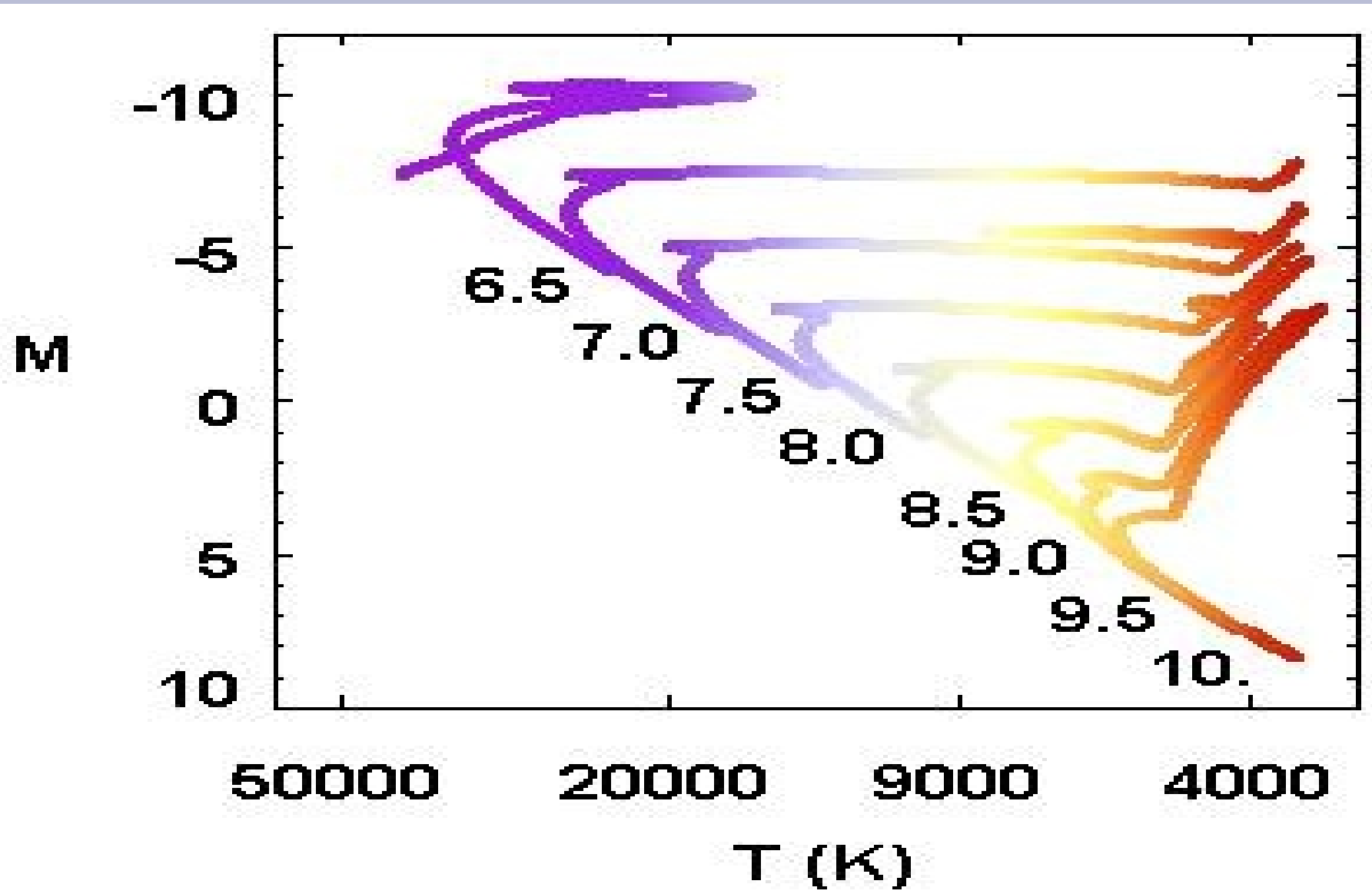
La Voie Lactée
Diagramme HR des Amas



- L'évolution d'une étoile dépend essentiellement de sa masse et de sa composition chimique initiale.
- 1 M_0 : 10 milliards d'années sur la séquence principale
- 0.1 M_0 : 20 à 30 milliards d'années
- 50 M_0 : quelques millions d'années

La Voie Lactée

Diagramme HR des Amas



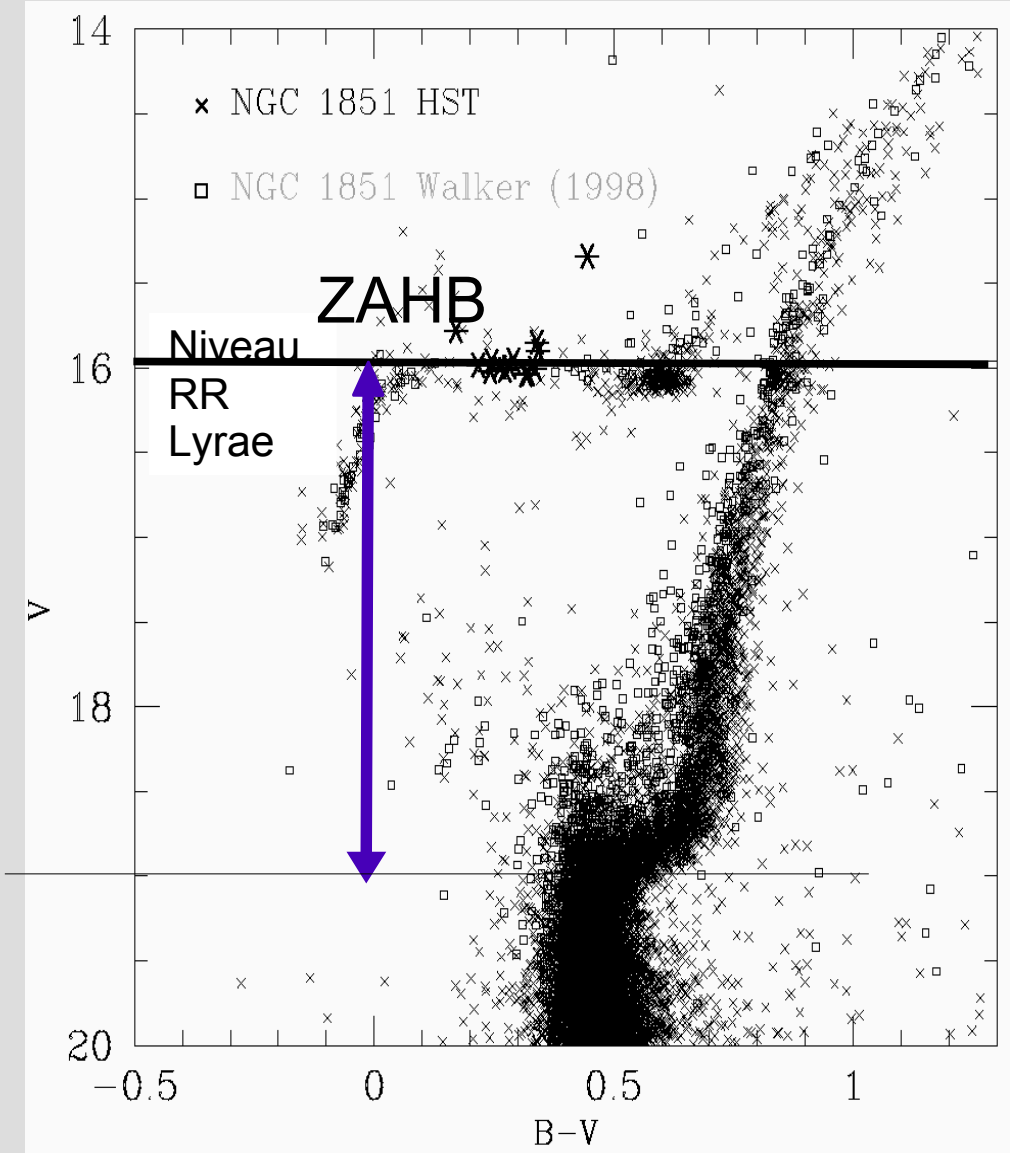
La Voie Lactée
Diagramme HR des Amas

- **Distance : $(m - M)_{ZAHB}$**

  Niveau des RR Lyrae

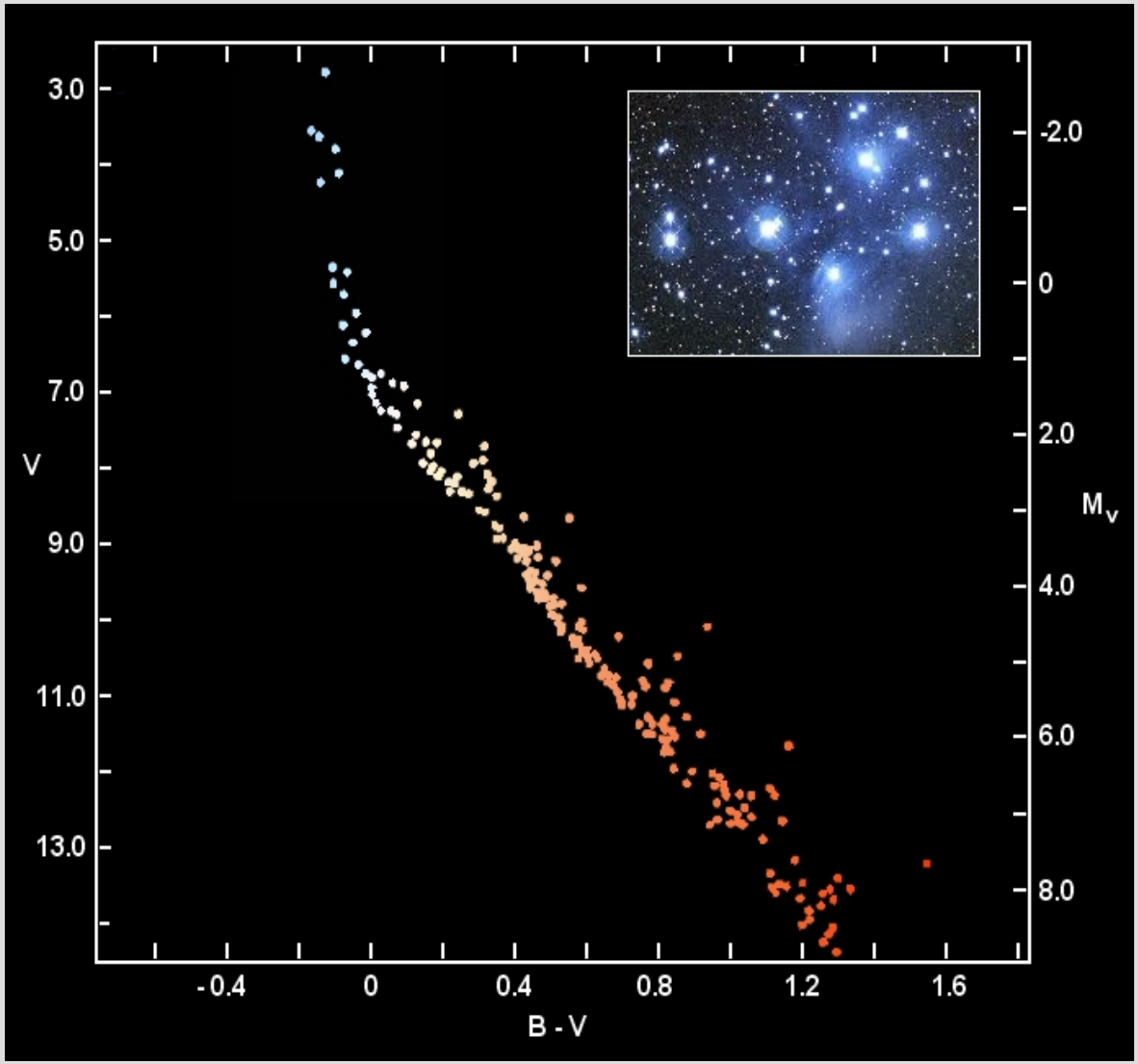
  Modèles

- **Age relatif : $m_{ZAHB} - m_{TO}$**

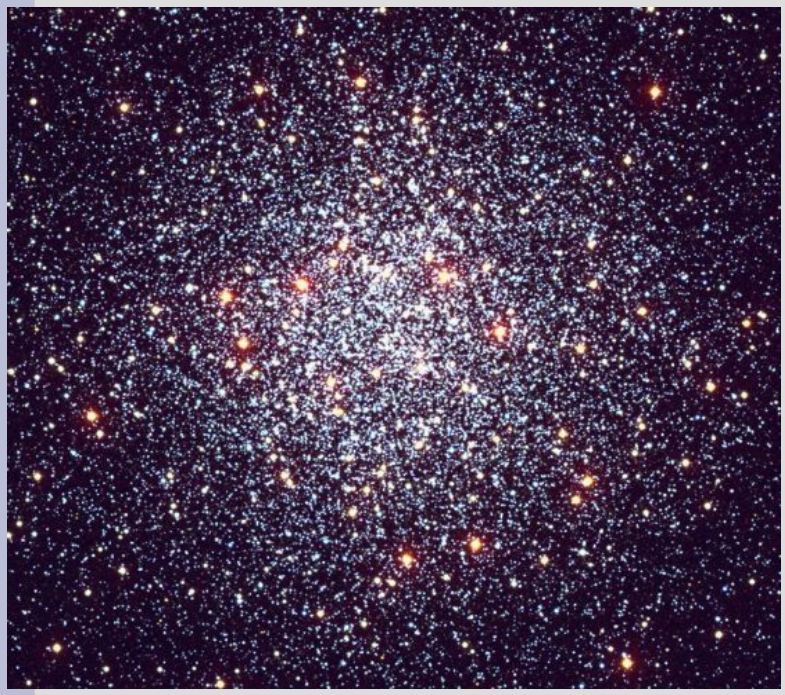


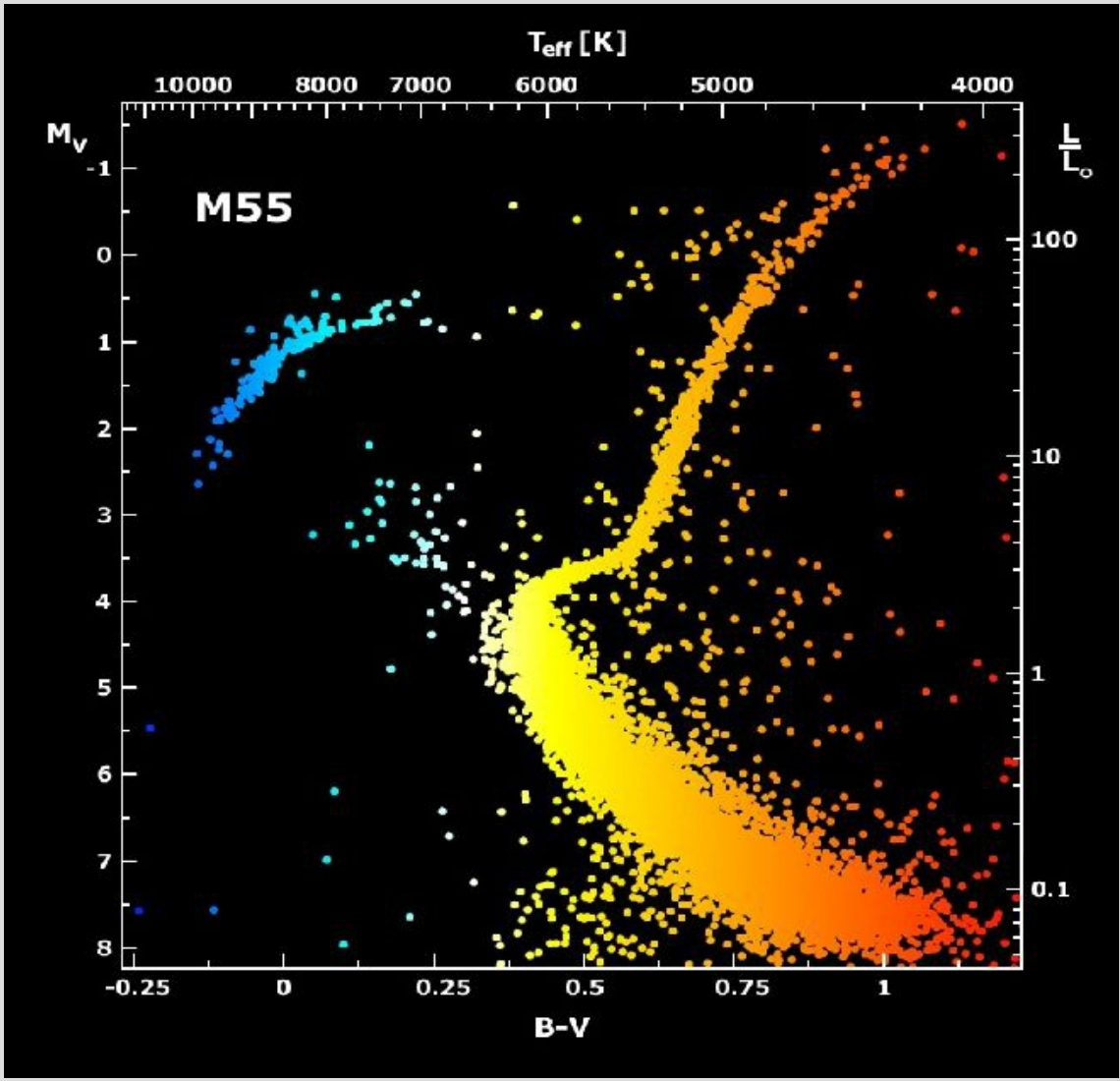
La Voie Lactée
Diagramme HR des Amas

- Amas ouvert des Pleiades
- d = 135 pc
- Age ~ 80 x10^6 ans



La Voie Lactée
Diagramme HR des Amas



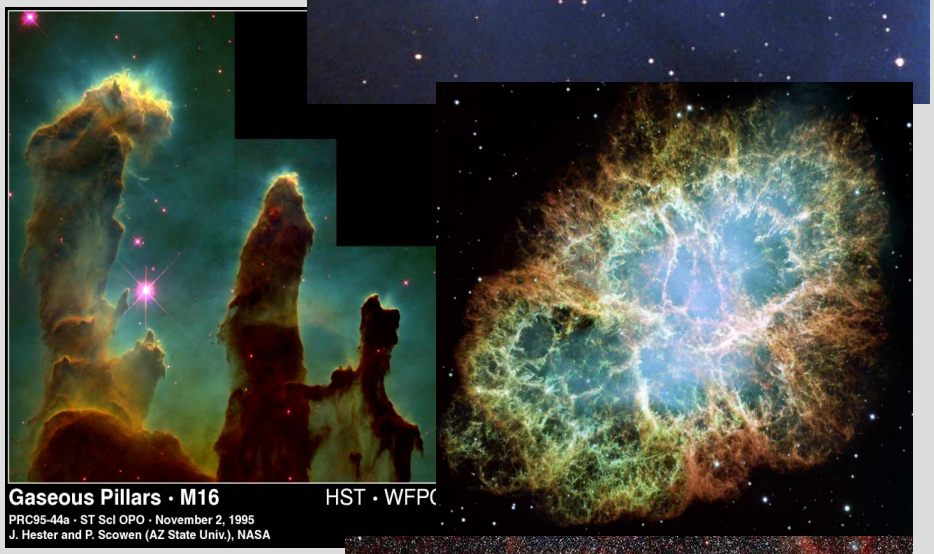


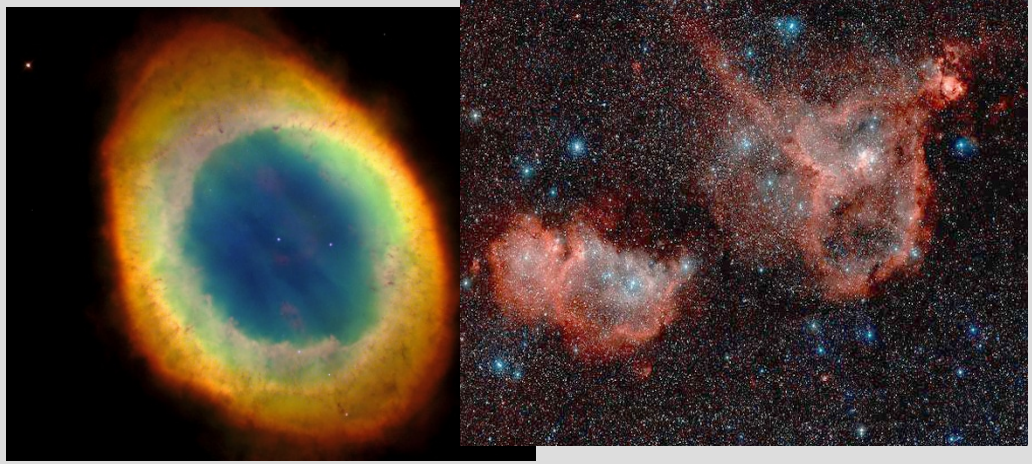
- Amas Globulaire M55
- *d* = 5.3kpc
- Age ~ 14×10^9ans

La Voie Lactée
Nébuleuses

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

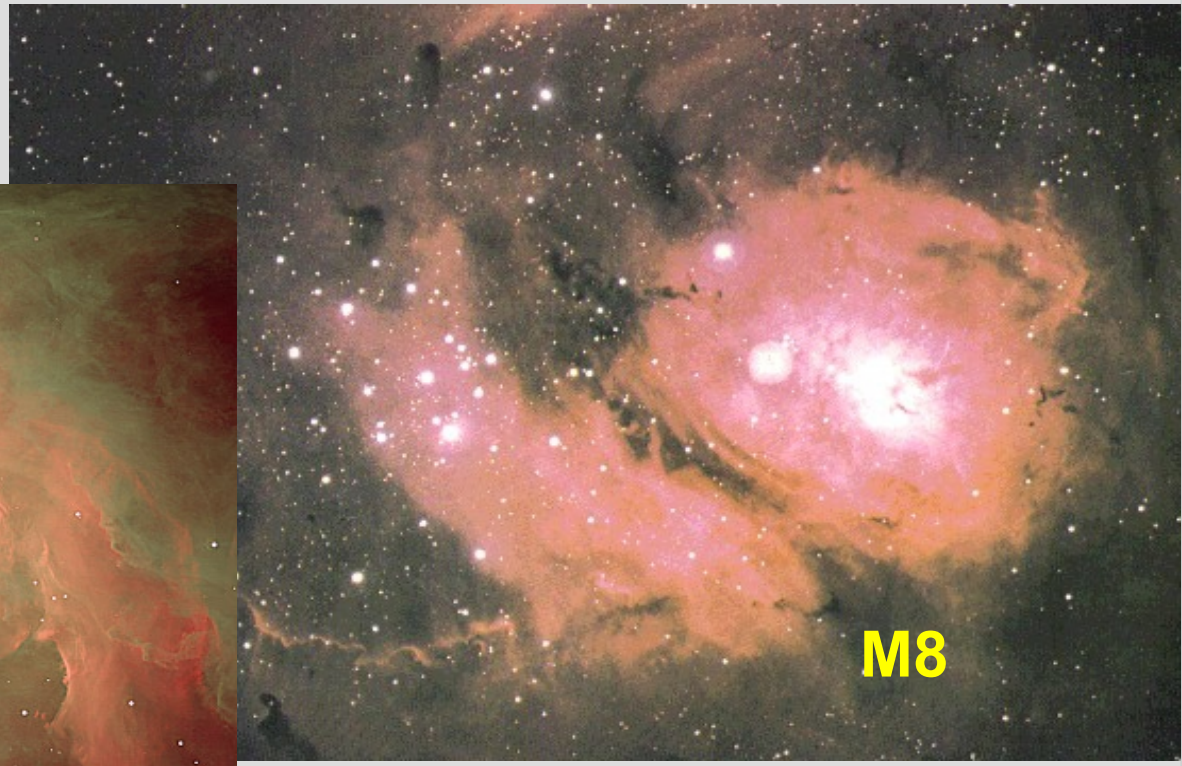






La Voie Lactée
Nébuleuses Diffuses

- Nuages de matière interstellaire constitués de gaz et de poussières
- Régions HII





La Voie Lactée

Nébuleuses Diffuses

Nébuleuse d'Orion





La Voie Lactée
Nébuleuses Diffuses

Nébuleuse de la Tête de Cheval

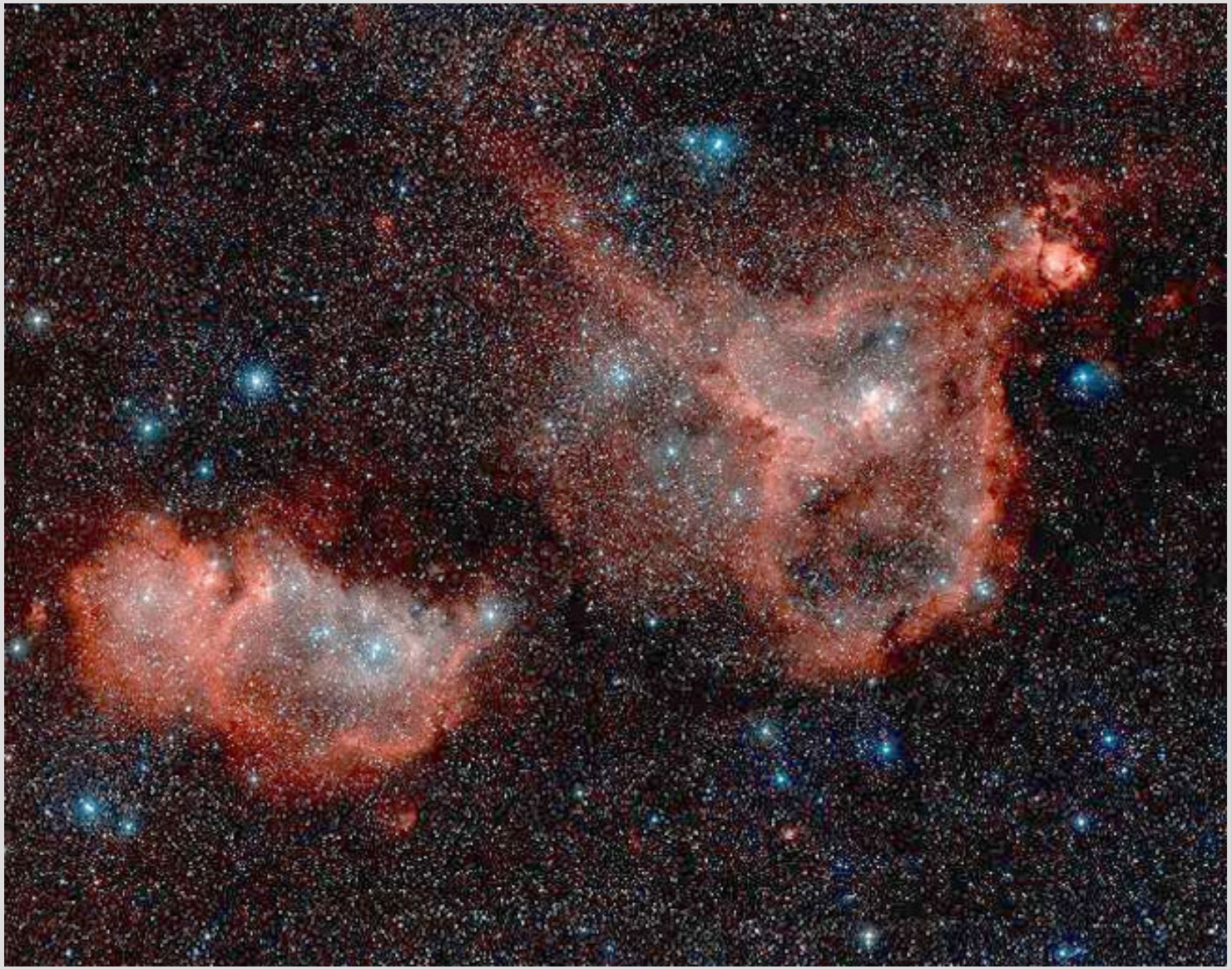
dans Orion



La Voie Lactée

Nébuleuses Diffuses

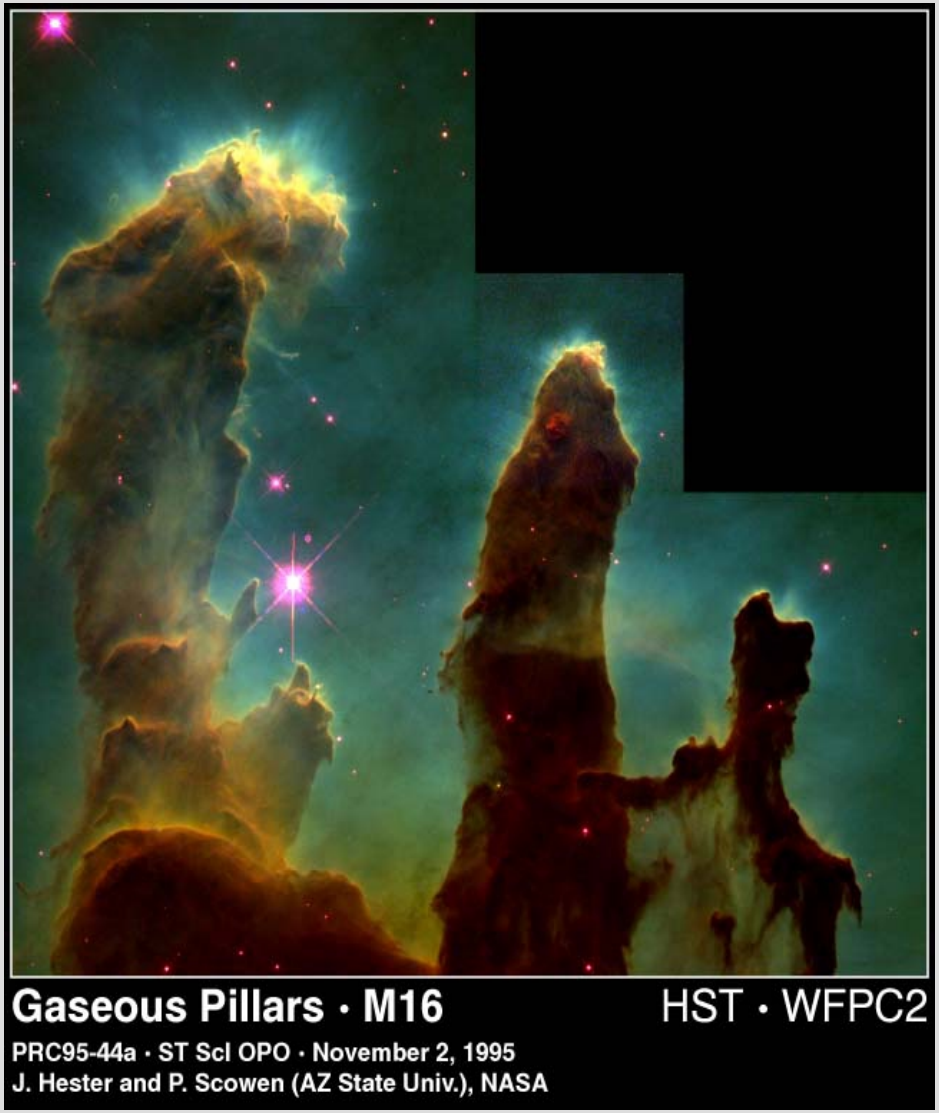
Nébuleuse
Heart & Soul



La Voie Lactée
Nébuleuses Diffuses

- La plupart sont des *nurseries* d'étoiles, produisant des amas et/ou associations d'étoiles chaudes

=> *nébuleuses en émission*



La Voie Lactée
Nébuleuses Diffuses

- MIS diffuse lumière étoiles chaudes :

  nébuleuses par réflection





La Voie Lactée
Nébuleuses Diffuses

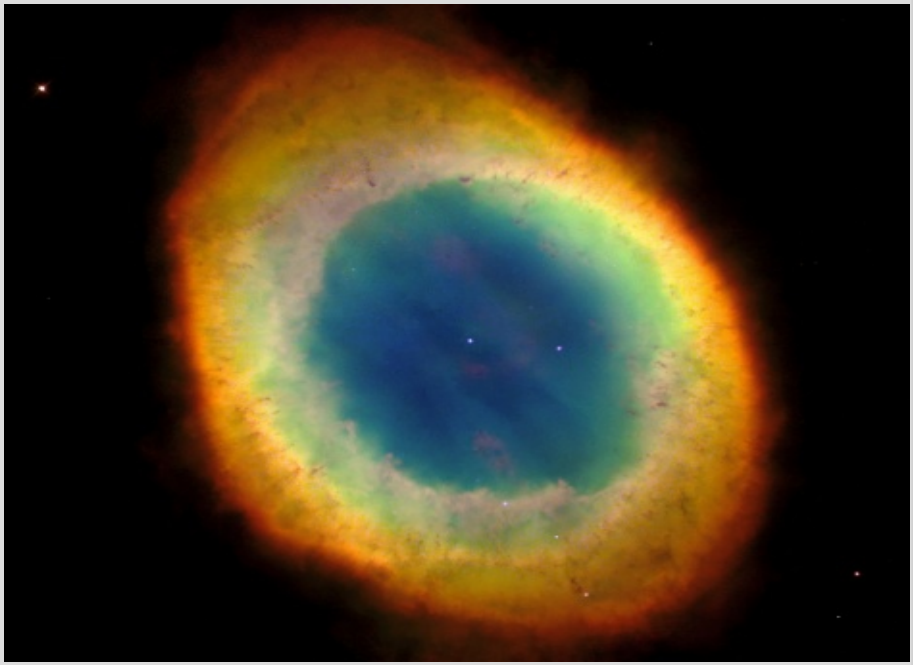
- N*ébuleuses par réflexion*

Tête de la Sorcière



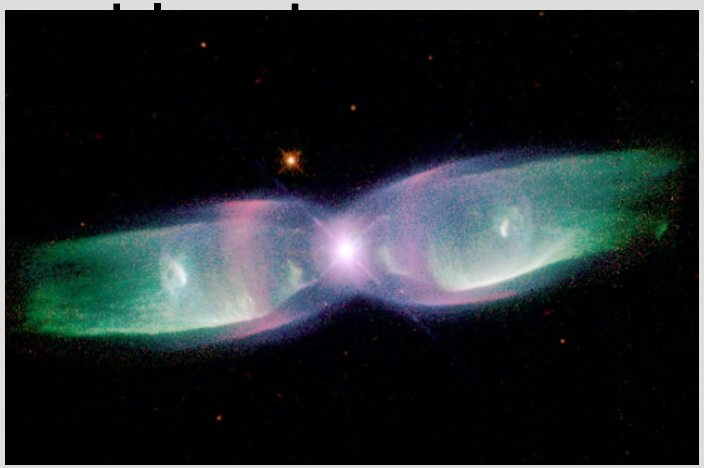
La Voie Lactée
Nébuleuses Planétaires

- Nom donné par Herschell (1785)
- Fin de vie des étoiles de masse faible et intermédaire (~0.8 - ~8M_o)
- Ejection d'une part importante de l'étoile



La Voie Lactée
Nébuleuses Planétaires

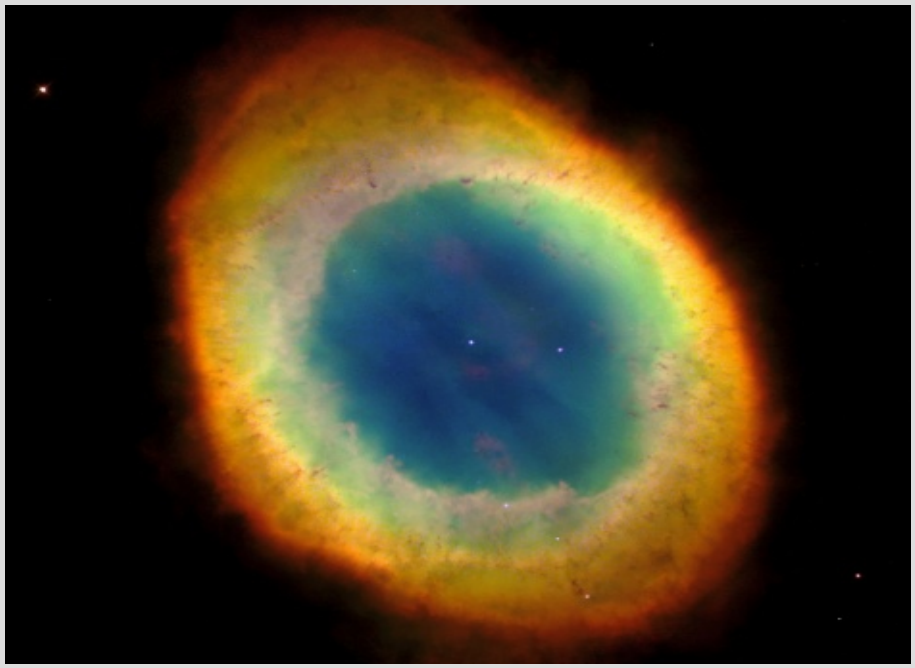
- Coeur forme une étoile très chaude
- Ionisation de l'enveloppe éjectée
- Formation de raies en émission très intenses
  - Raie du *Nébulium* à 500.7nm => [OIII]
- Courte durée de vie (~ 10 000 ans)
- Dilution de l'enveloppe et naine centre
- Evolution chimique de l'Univers



La Voie Lactée
Nébuleuses Planétaires







La Voie Lactée

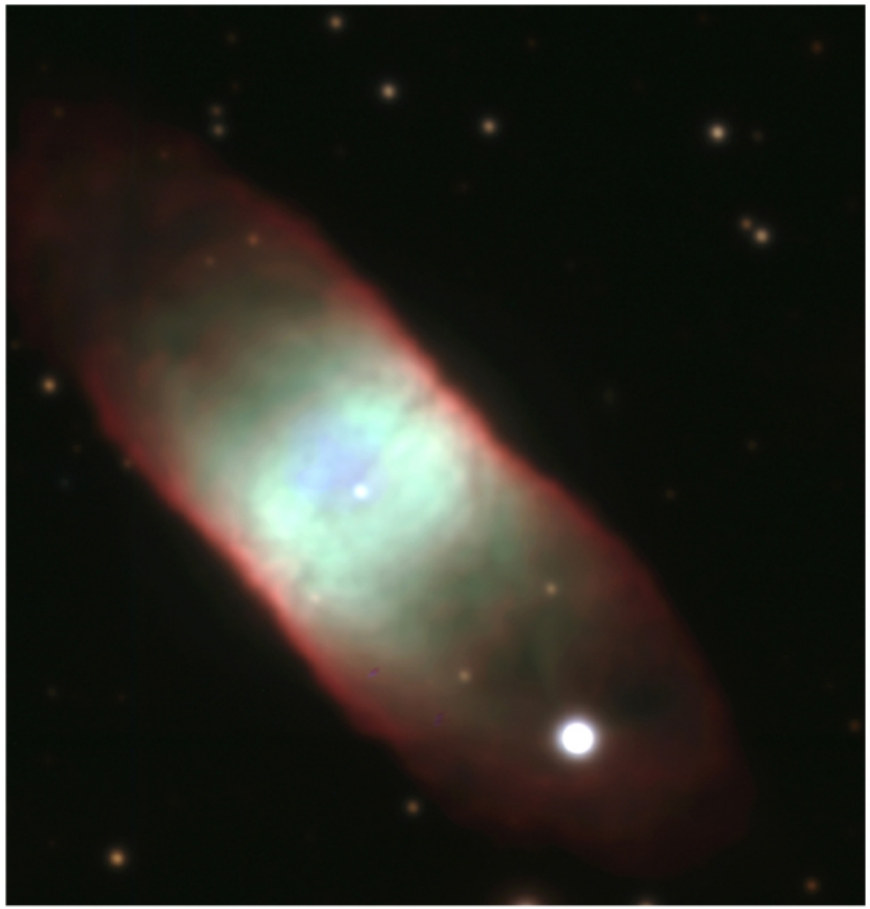
Nébuleuses Planétaires



Fine Structure in the Butterfly Nebula

VLT UT1 First Light Photo No.4

European Southern Observatory



The VLT Images a " Rectangular " Planetary Nebula

ESO PR Photo 21/98 (23 June 1998)

ESO European Southern Observatory

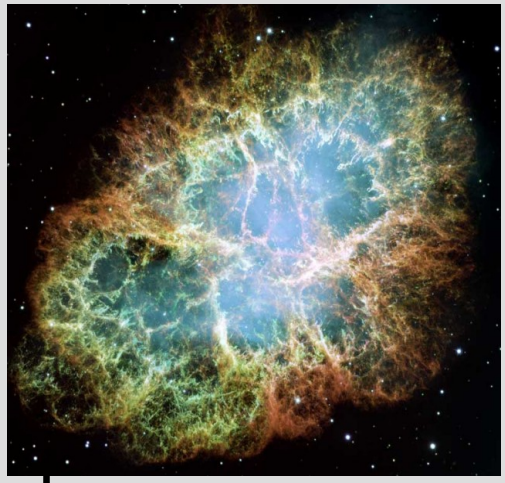
La Voie Lactée
Vents d'étoiles massives

- Bulles cosmiques formées par vents rapides formés par étoiles chaudes et massives
- Etoiles de Wolf-Rayet (centre)
- M ~ 20M_sun (pré-SN?)
- Diamètre ~ 0.6degré ~ 60 a.l.
- Age ~ 70 000 ans



La Voie Lactée
Restes de Supernovae

- Nom donné par Baade & Zwicky (1934)
- Fin de vie des étoiles massives (> ~8M_o)
- 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
Restes de Supernovae

- Ejection violente de l'enveloppe stellaire
- Aussi brillant qu'une galaxie

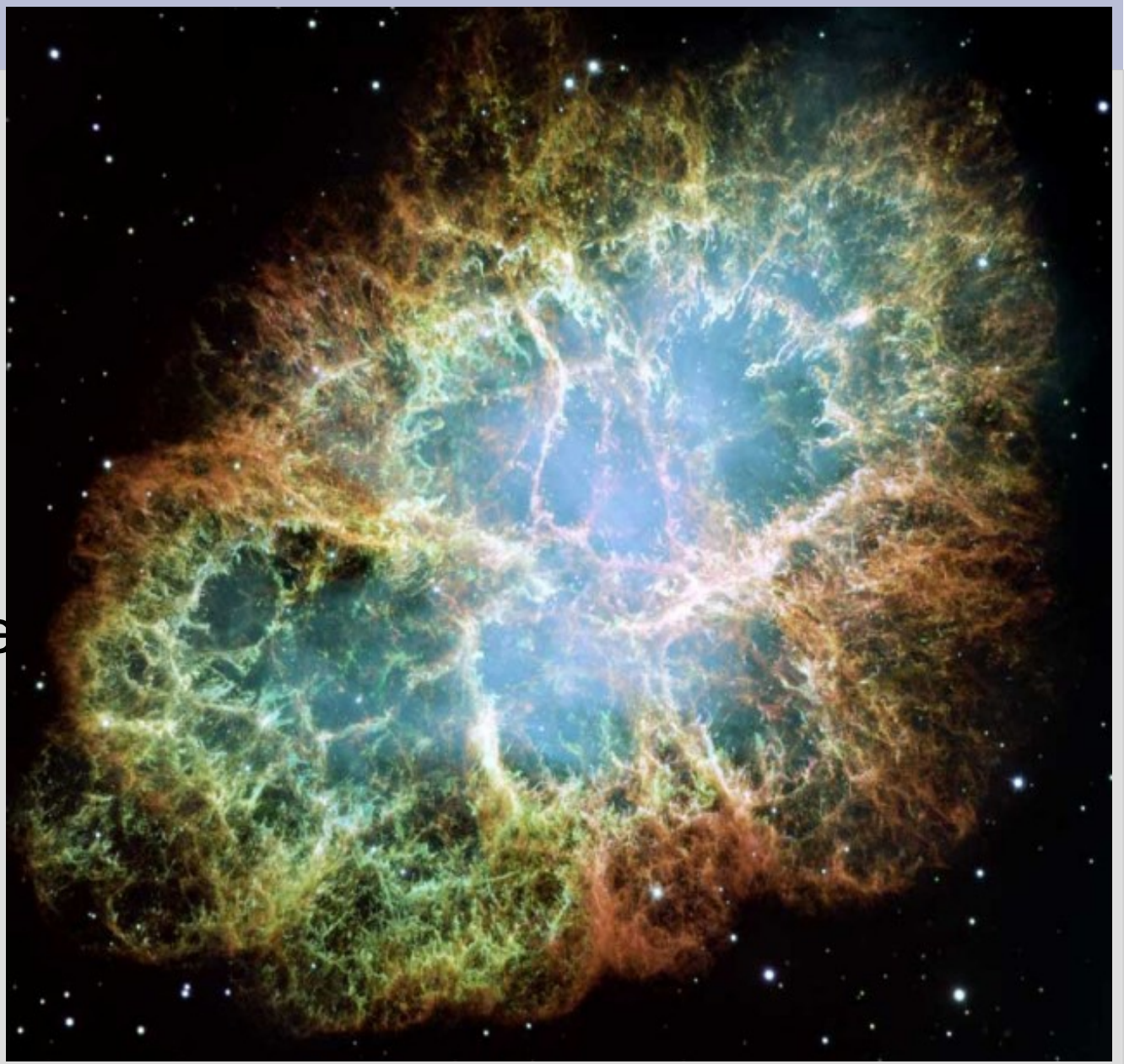
- Film Supernova Cas A

La Voie Lactée
Supernovae de notre Galaxie

- Dernière détectée en 1604 par Kepler (première peut-être en -352 par les chinois)
- 8 détections sures au cours de l'histoire de l'humanité
- Une par siècle en moyenne mais pas toutes détectées
- 2 dans galaxies du Groupe Local : LMC1987 et Andromède1885
- Plusieurs dizaines/an dans galaxies lointaines

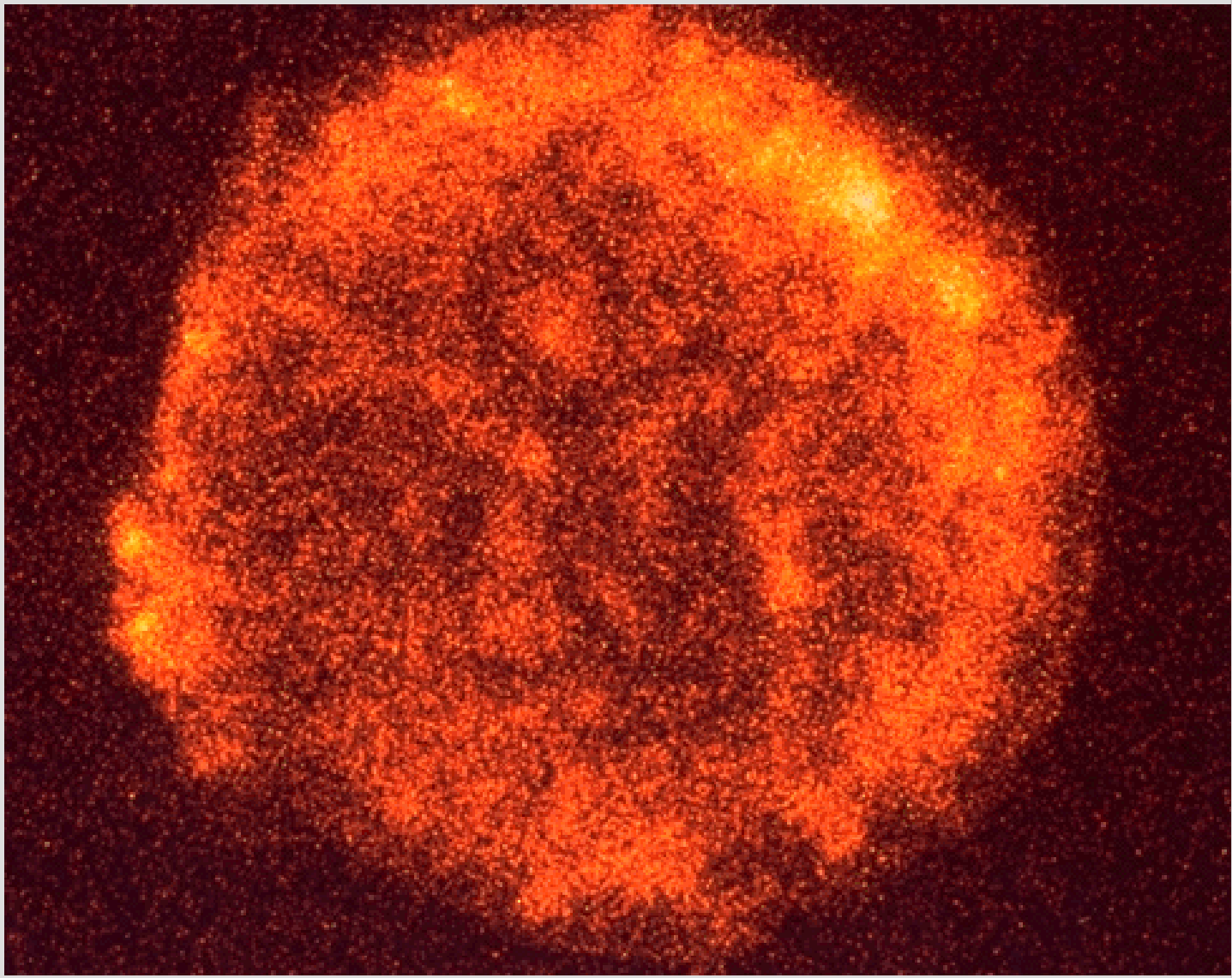
La Voie Lactée
Restes de Supernovae

- Nébuleuse du Crabe (HST)
- SN en 1054 à 6500a.l. de nous
- Ejection de matière à 1000km/s
  => Diam = 3 a.l.



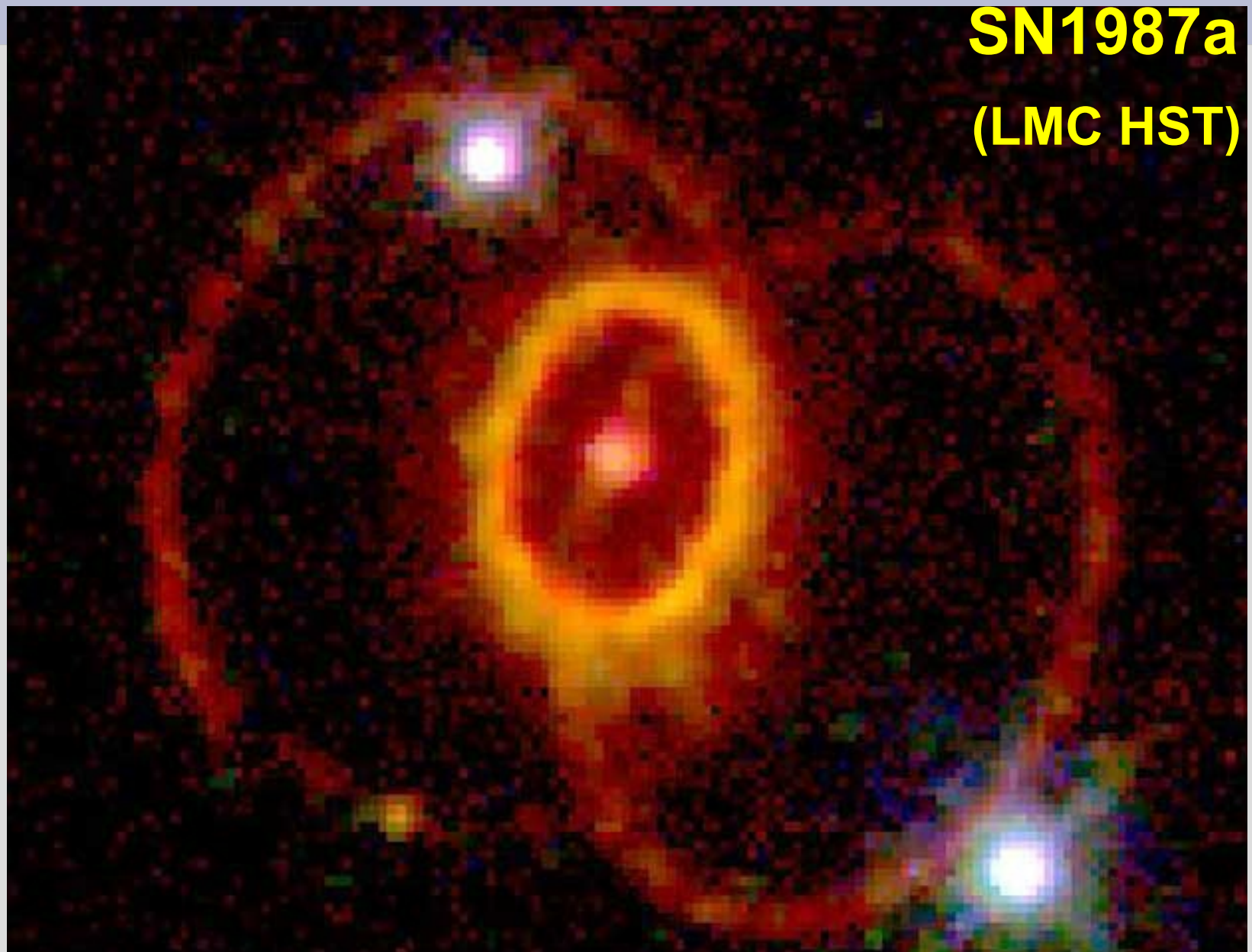
La Voie Lactée
Restes de Supernovae

- SN de Tycho en 1572 (X Rosat)



La Voie Lactée

Restes de Supernovae



La Voie Lactée
Nébuleuses Obscures

- Absorption par nuages de poussières devant nébuleuses brillantes et étoiles





La Voie Lactée

Nébuleuses Obscures



La Voie Lactée

Nébuleuses Obscures



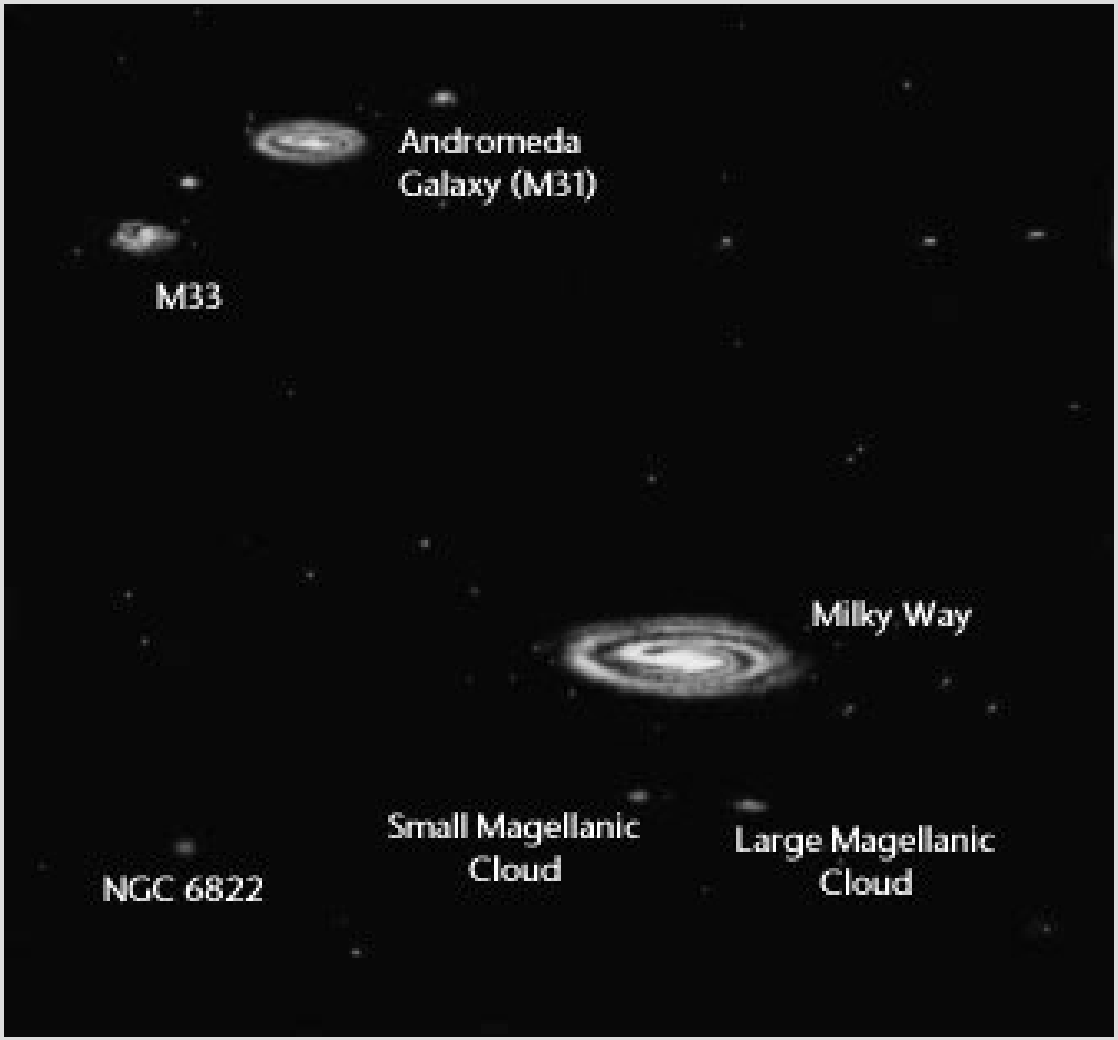
La Voie Lactée



- Introduction historique
- Caractéristiques Principales
- Structures et Principales composantes
- *Environnement proche*
- Histoire de sa formation et Evolution

La Voie Lactée
Environnement

- Le Groupe Local :
  - 2 grandes galaxies
  - ~30 galaxies naines



La Voie Lactée
Environnement

- Andromède :
  - spirale géante
  - d=2.9x10^6 a.l.
  - 2-3 fois plus grande

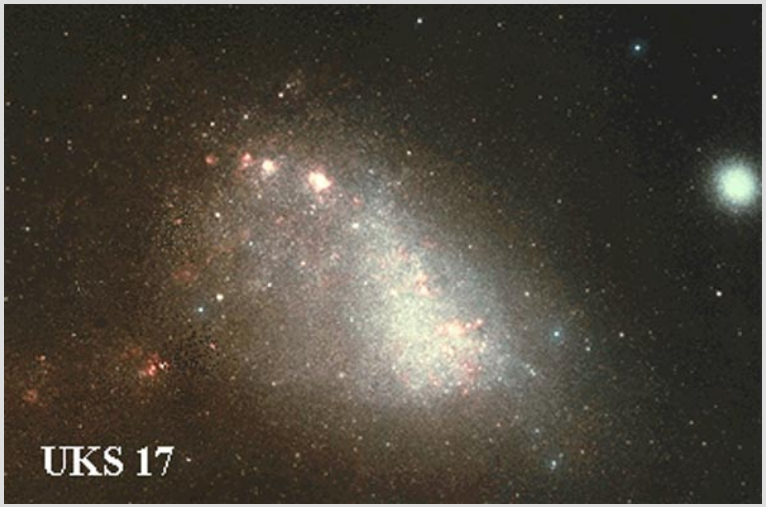
  que Voie Lactée
  - 500 amas globulaires
  - Taille disque ~400 000 a.l.
  - Disque plus lumineux et massif
  - Bulbe : 5 fois plus lumineux

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

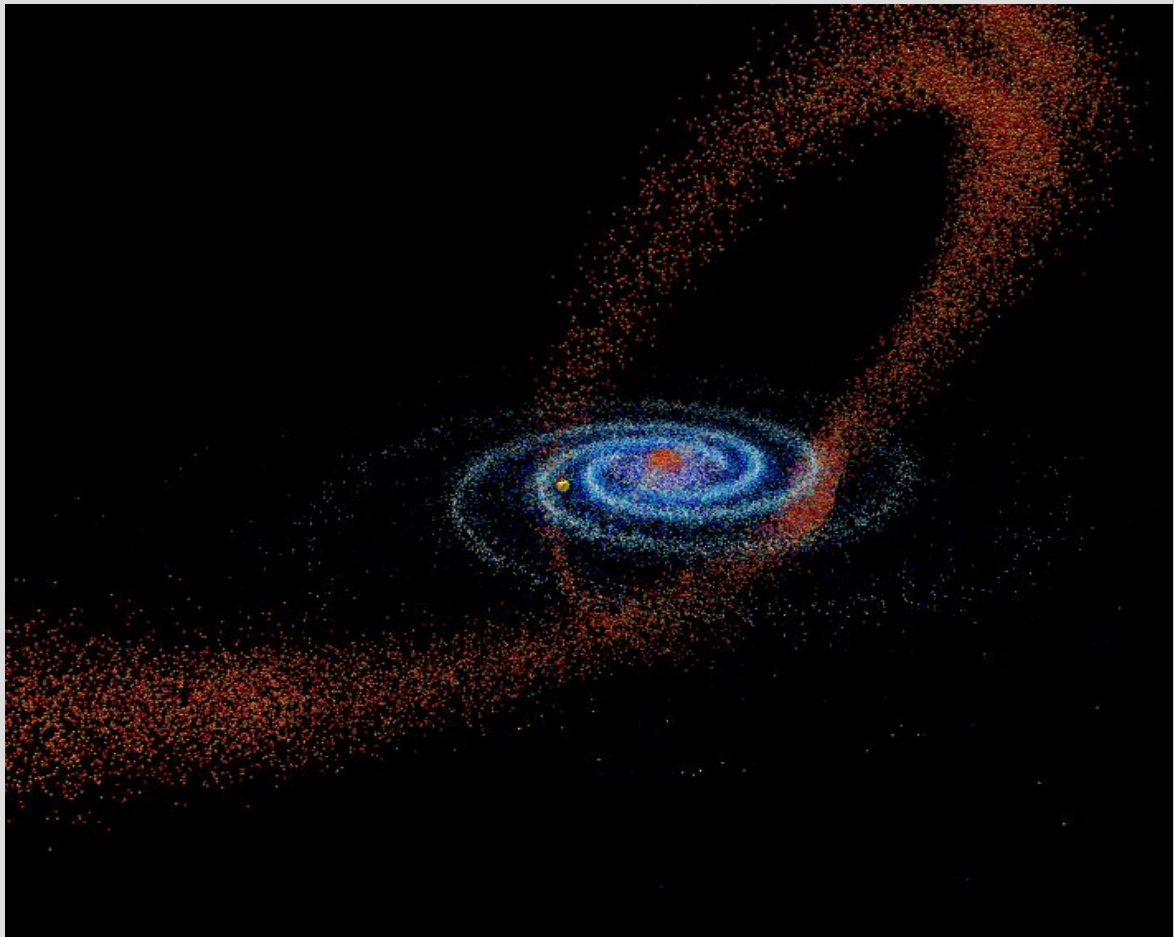


La Voie Lactée
Environnement

- Galaxies naines satellites ou compagnons de la Voie Lactée :
  - Naine du Sagittaire

    (1994)

    d = 88 000a.l.



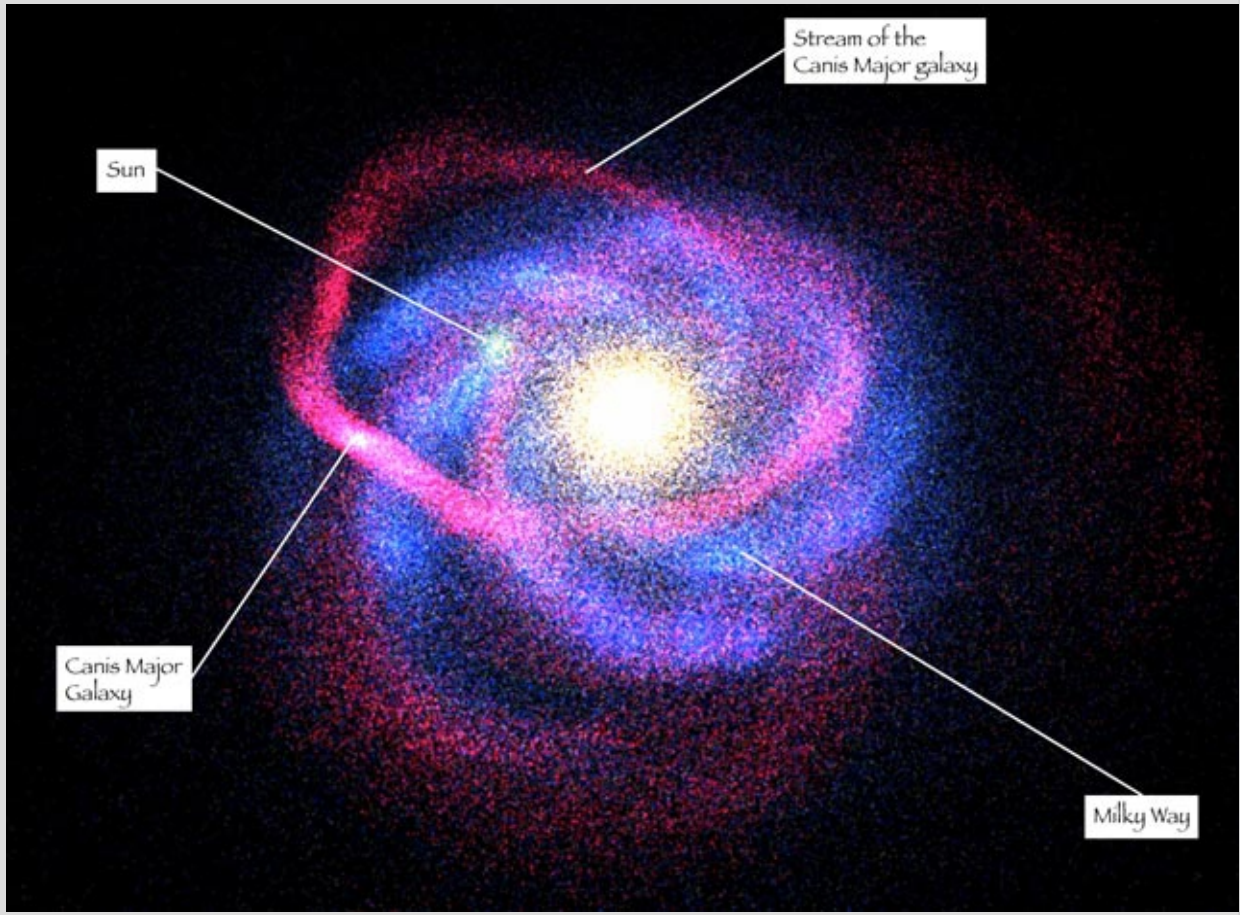
- Carte 3D (FILM)

La Voie Lactée
Environnement

- Galaxies naines satellites ou compagnons de la Voie Lactée :
  - Naine Canis Major

    (2003)

    d = 25 000a.l.



- Evolution sur 2 milliards d'années

(FILM)

La Voie Lactée

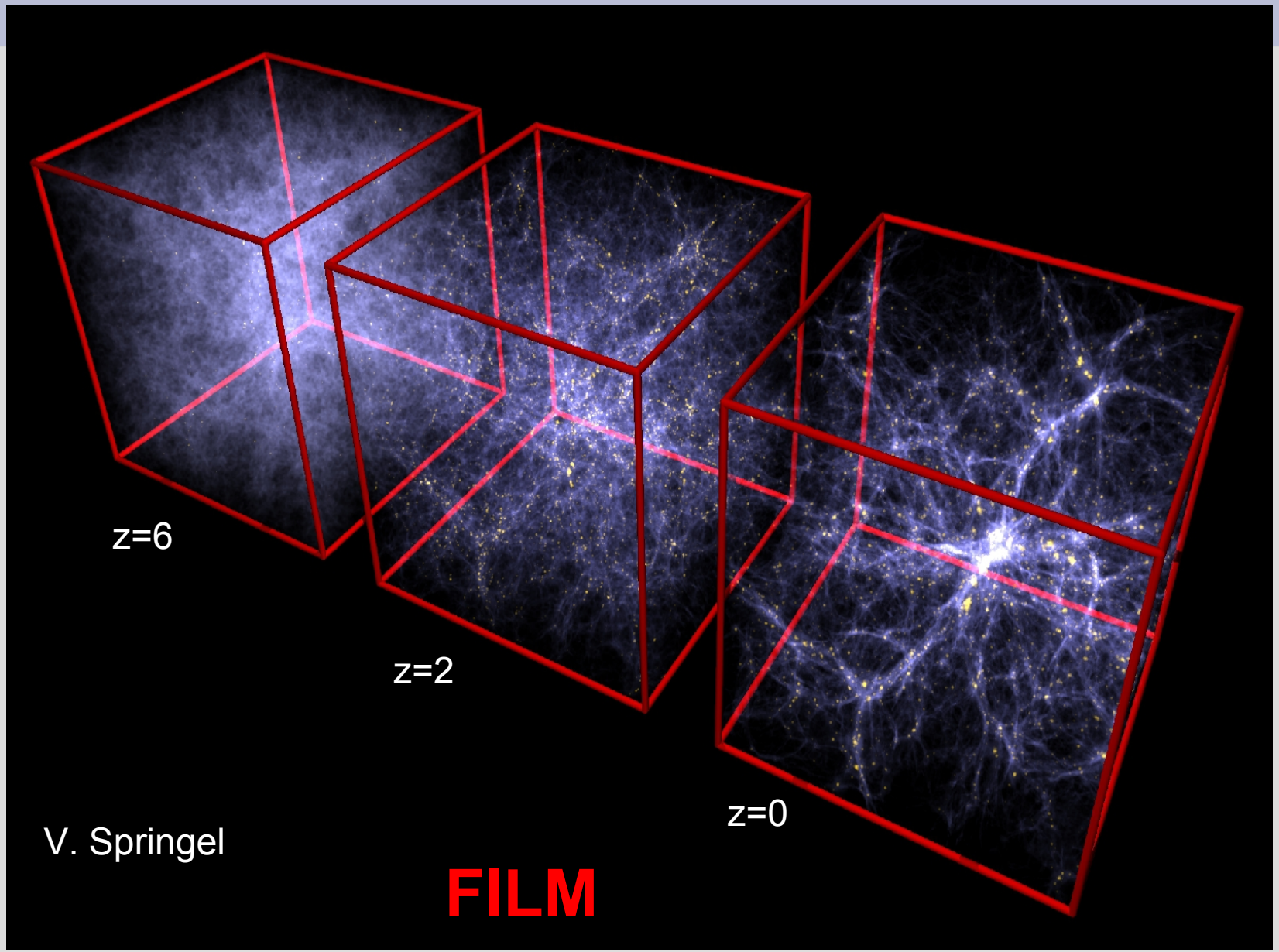


- Introduction historique
- Caractéristiques Principales
- Structures et Principales composantes
- Environnement proche
- ***Histoire de sa formation et Evolution***

La Voie Lactée
Formation et Evolution

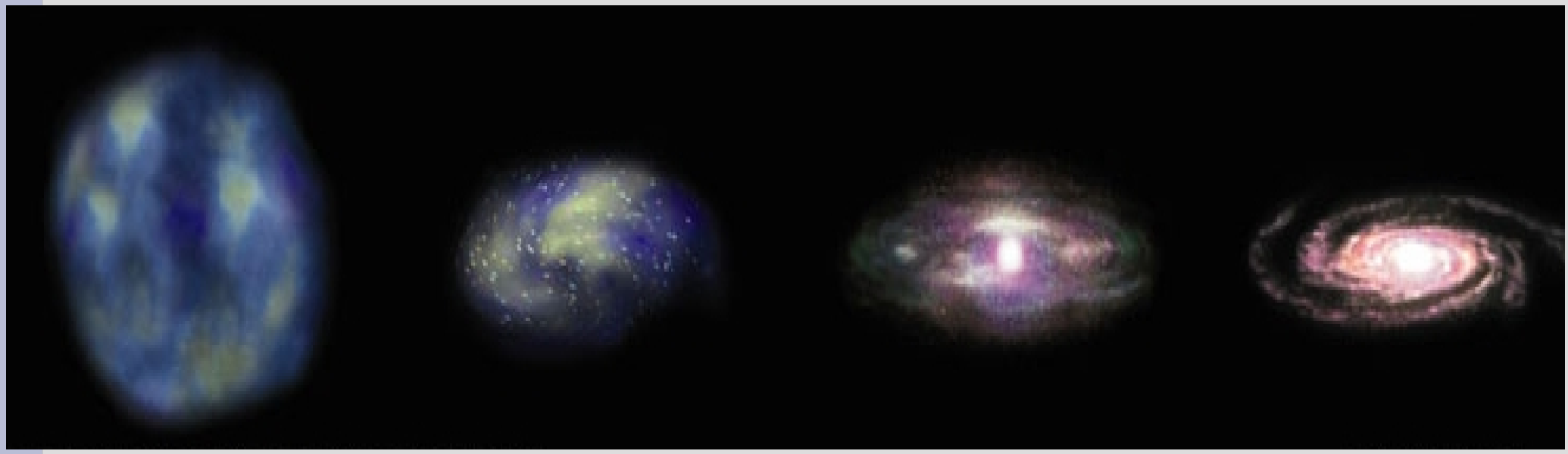
- Modèles LCDM : Galaxies se forment par accrétions et fusions successives de systèmes moins massifs
- Simulations cosmologiques confrontées aux observations
  - Matière Noire
  - Etoiles + Gaz
  - Soumis à la gravitation
- Evolution chimique et dynamique

La Voie Lactée
Formation et Evolution



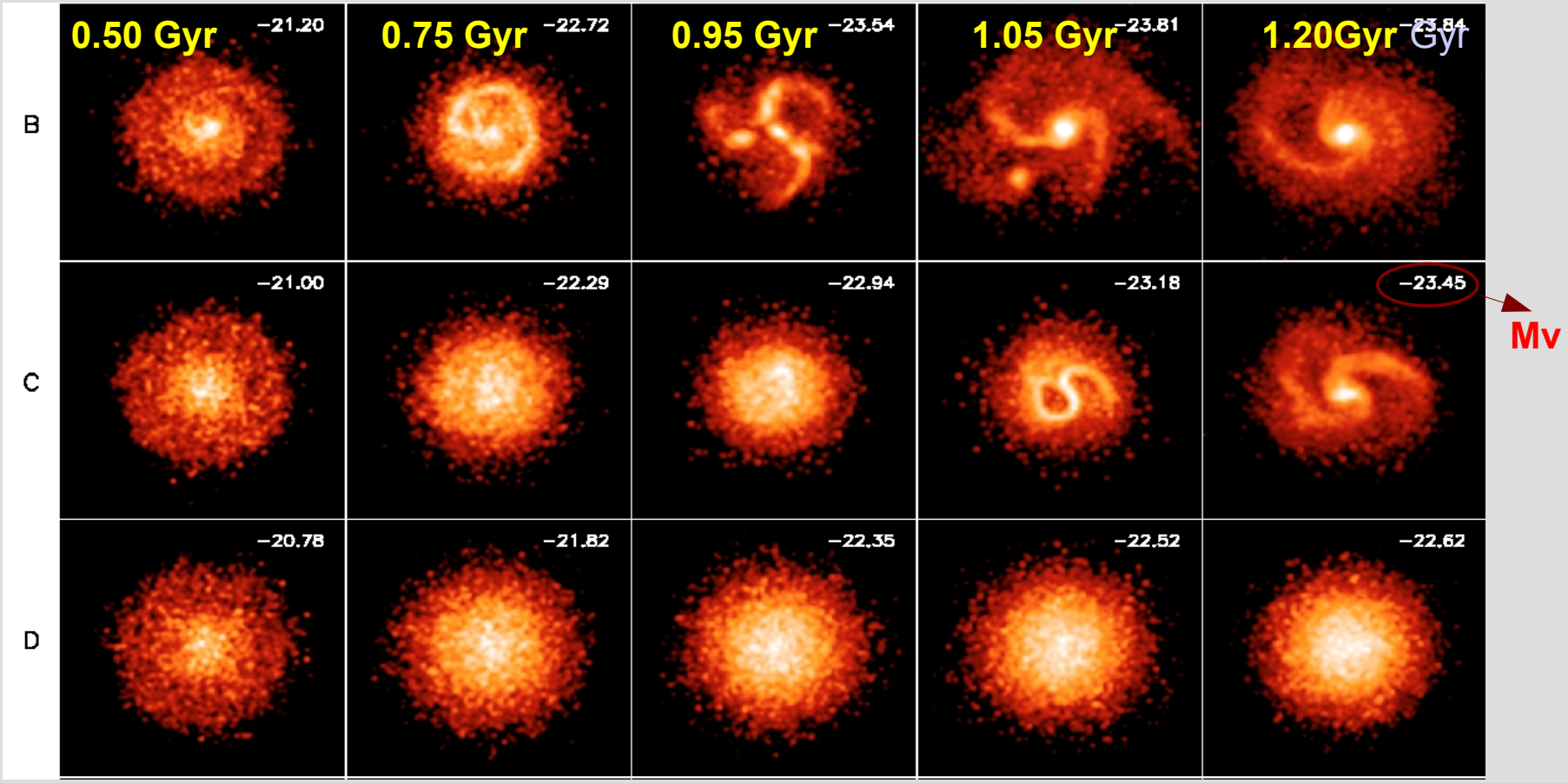
La Voie Lactée
Formation et Evolution

- Simulations numériques du refroidissement et de l'effondrement de la matière baryonique dans le puits de potentiel de la matière noire => formation de la Galaxie

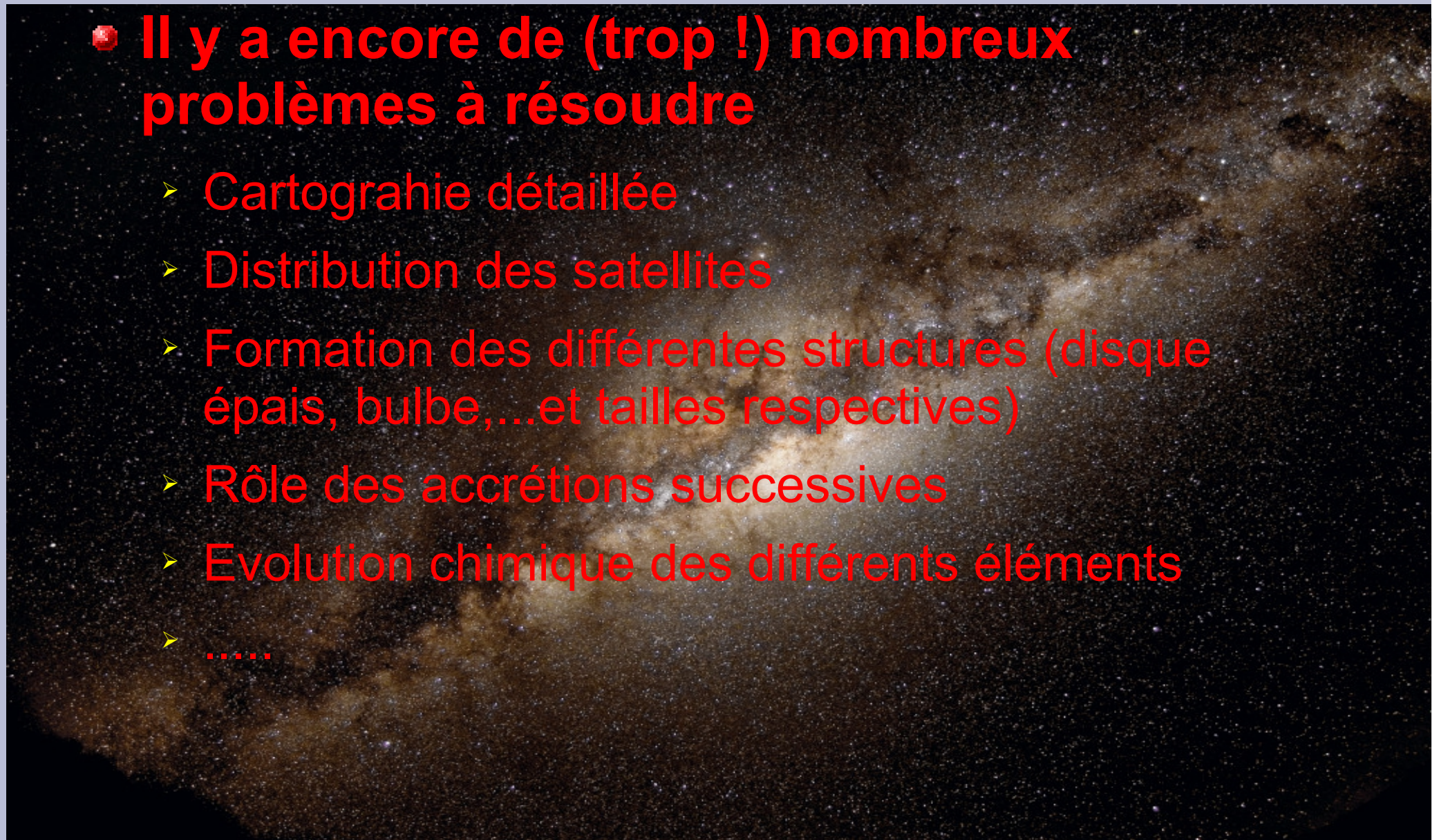


La Voie Lactée
Formation et Evolution

- Simulations numériques de formation du bulbe et des bras spiraux : dynamique et abondances chimiques



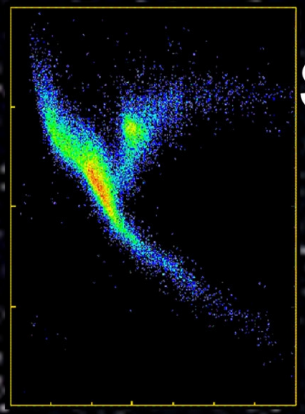
La Voie Lactée
Une vision partielle



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

GAIA

Stellar Astrophysics



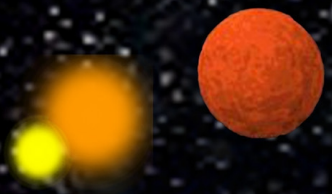
Star Formation History of the Milky Way

Galactic Structure

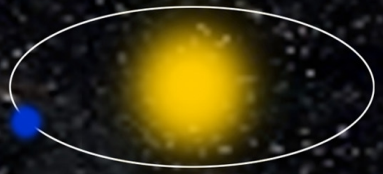


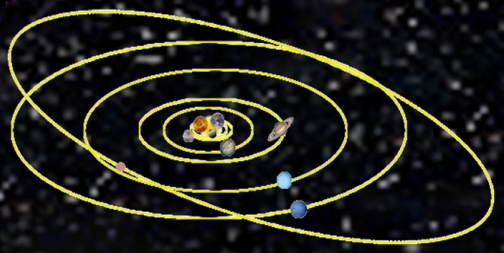
Fundamental Physics

Binaries and Brown Dwarfs



Extrasolar Planets





Solar System

Reference Frame

La Voie Lactée

Une vision partielle

Exemple : Distance de 47 Tuc

reference	D [kpc]	method
Storm et al. (1994)	4.4±0.4	Baade-Wesselink
Reid (1998)	5.1±0.4	MS f tting
Carretta et al. (2000)	4.8±0.2	MS f tting
Zoccali et al. (2001)	4.2±0.3	WD f tting
Percival et al. (2002)	4.5±0.3	MS f tting
Gratton et al. (2003)	4.8±0.2	MS f tting
Recio-Blanco et al. (2005)	4.6± 0.3	ZAHB magnitude
De Angeli (2005)	4.62±0.08	Direct astrometry

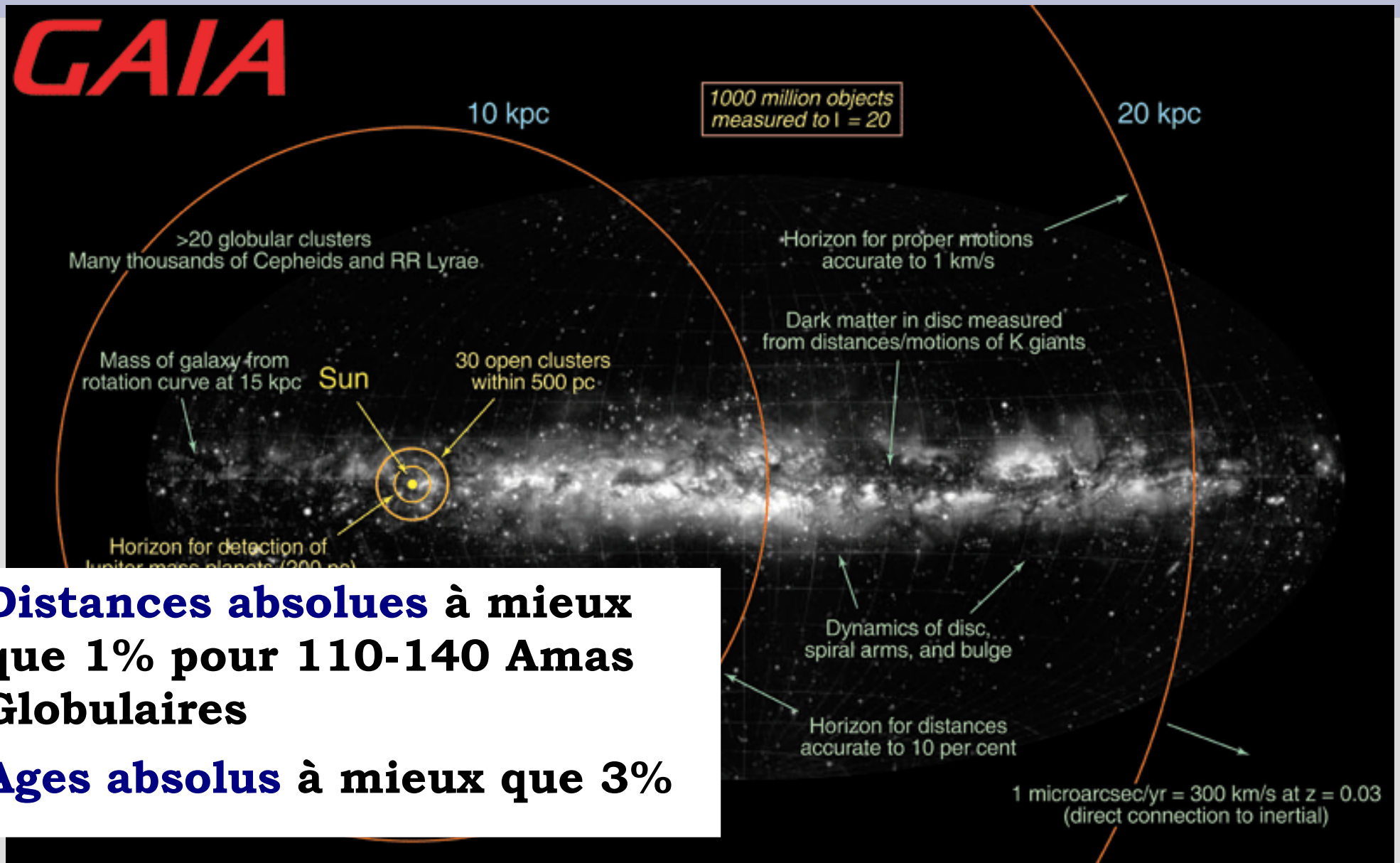
D = 4.2-4.8 Kpc (dernière décénnie)

Age (MS TO) => Différences de ~ 20% !

Trop grande incertitude pour une compréhension détaillée de l'époque de formation du Halo

La Voie Lactée

GAIA



Distances absolues à mieux que 1% pour 110-140 Amas Globulaires

Ages absolus à mieux que 3%

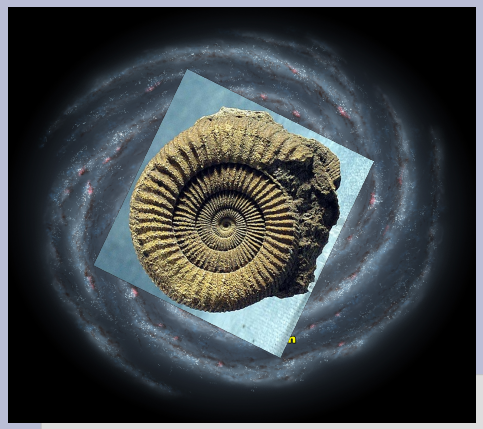
La Voie Lactée
Gaia

- Cinématique et Abondances des étoiles



- *Archéologie Galactique*





La Voie Lactée

Gaia

Observations

- [α/Fe] plus précis que 0.1dex
- Informations chimiques + cinématiques + âges
- Abondances chimiques de RR Lyrae
- Chimie + stade évolutif des étoiles

Modèles de formation et évolution galactiques

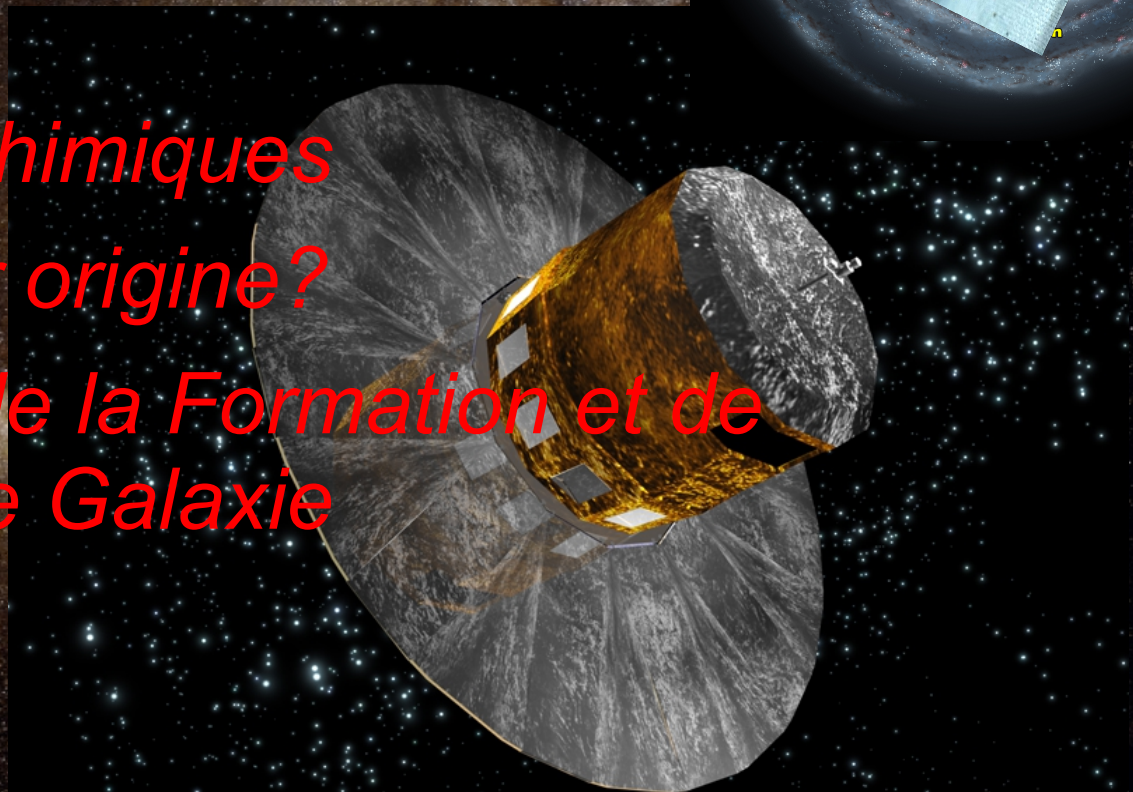
- Taux d'explosion de SN
  Quantité de gaz
  Lieux de la nucléosynthèse
- Identification de sous-structure
  Rôle de l'accrétion de matière
- Calibration d'indicateurs de distances
- Modélisation des anomalies d'abondances chimiques

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*





La Voie Lactée

