

Galaxies



Georges Kordopatis





La Voie Lactée, notre Galaxie





Ursa Minor

← Polaris

Cepheus

Cassiopeia

Andromeda
↓

Pegasus

Lacerta

Cygnus

Delphinus

Equuleus

Aquarius

Vulpecula

Sagitta

Capricornus

Aquila

Scutum

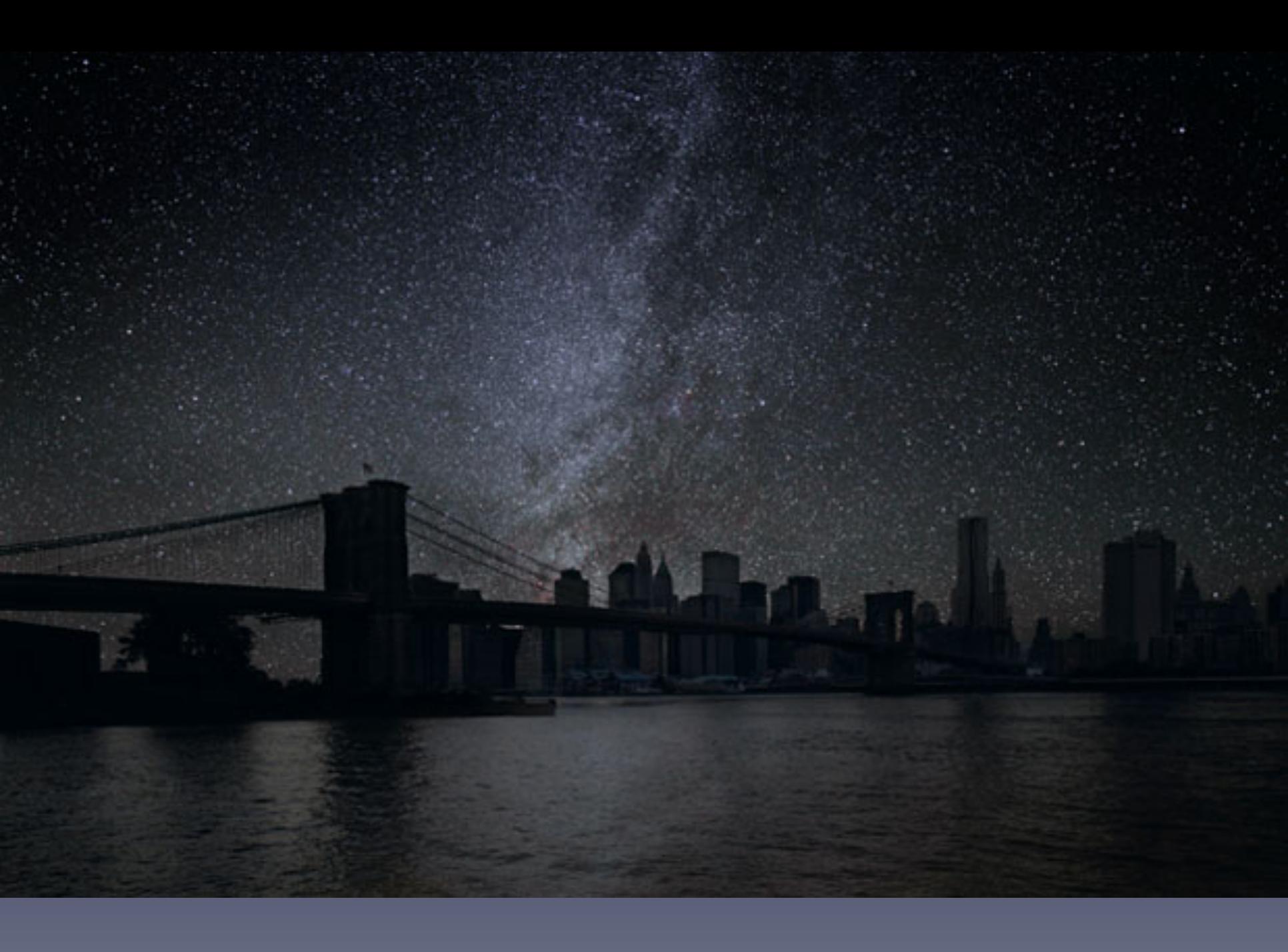
Sagittarius

Serpens Cauda

Ophiuchus

Serpens Caput

Scorpius



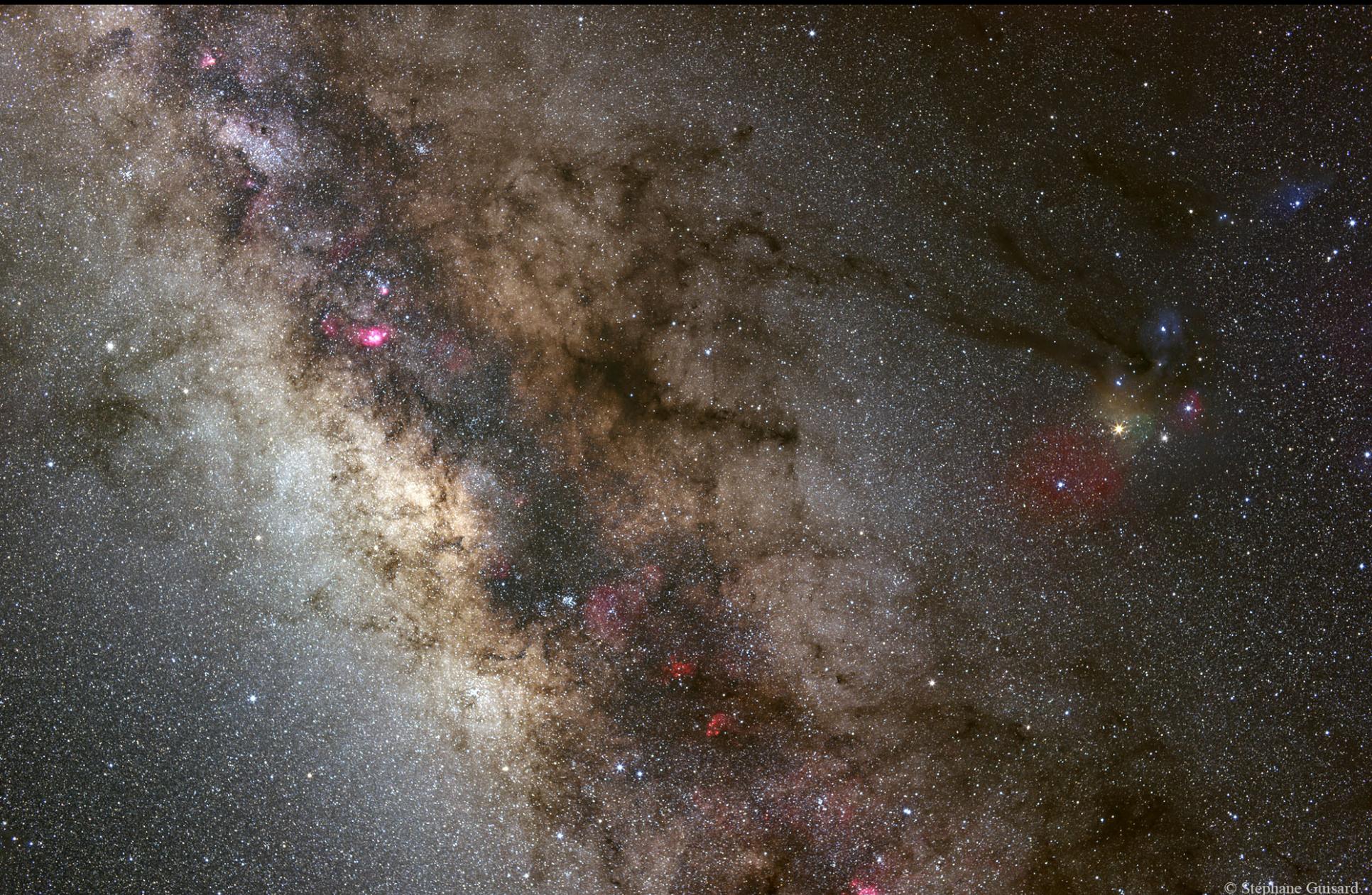




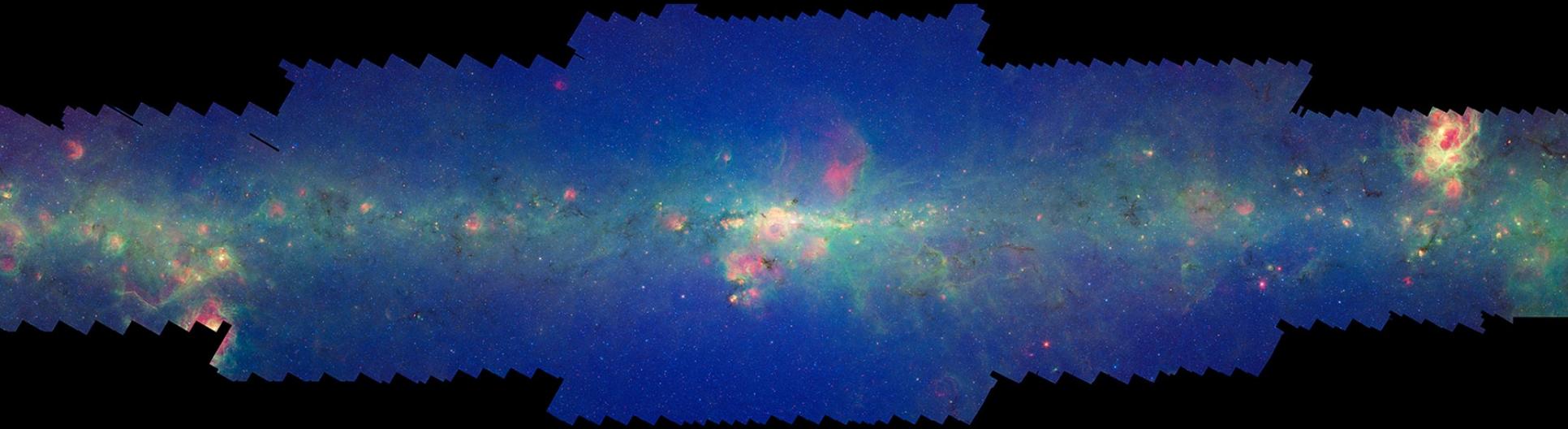
Voie lactée dans le visible



La voie lactee dans le visible



Voie lactee dans l'infrarouge



Basses énergies

Continu radio: électrons accélérés par champs magnétique

Hydrogene atomique (raie à 21cm)

Radio: gaz chaud et ionise

Hydrogene moleculaire : gaz froid, site de formation stellaire (cf. les bras spiraux)

IR: MIS rechauffe => region de formation stellaire

IR moyen: molecules complexes du milieu interstellaire

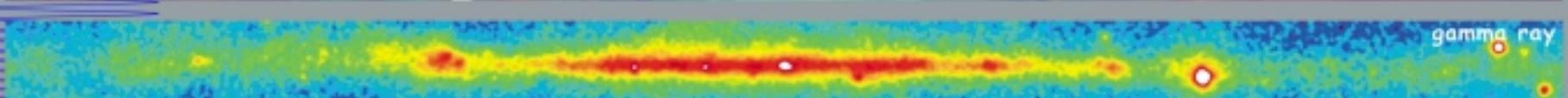
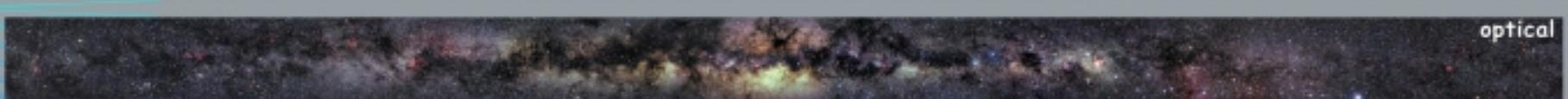
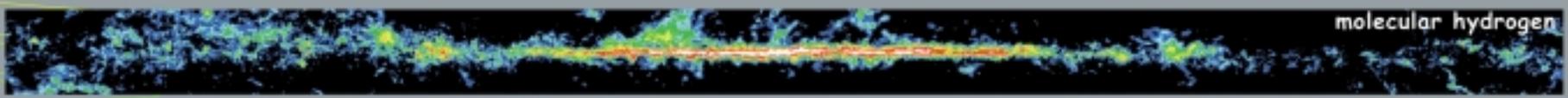
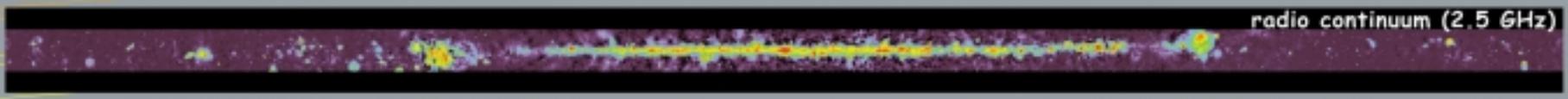
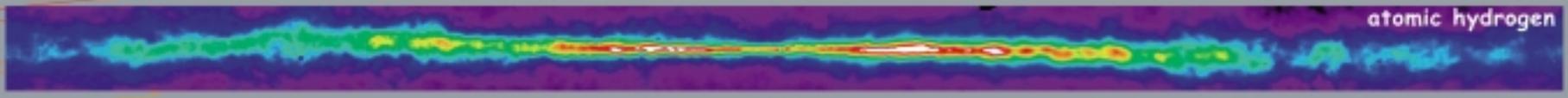
IR proche: etoiles (type K), peu d'absorption

Optique: etoiles (couleurs differentes), absorbtion: gaz, poussieres

Rayons X: gaz chaud (emission), gaz froid (absorbptions)

Rayons gamma: rayons cosmiques, pulsars

Hautes énergies



<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



Multiwavelength Milky Way

Basses énergies

radio continuum (408 MHz)

atomic hydrogen

radio continuum (2.5 GHz)

molecular hydrogen

infrared

mid-infrared

near infrared

optical

x-ray

gamma ray

Hautes énergies

<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



Multiwavelength Milky Way

Continu radio: électrons accélérés par champs magnétique

radio continuum (408 MHz)

Hydrogene atomique (raie à 21cm)

atomic hydrogen

Radio: gaz chaud et ionise

radio continuum (2.5 GHz)

Hydrogene moleculaire : gaz froid, site de formation stellaire (cf. les bras spiraux)

molecular hydrogen

IR: MIS rechauffe => region de formation stellaire

infrared

IR moyen: molecules complexes du milieu interstellaire

mid-infrared

IR proche: etoiles (type K), peu d'absorption

near infrared

Optique: etoiles (couleurs differentes), absorption: gaz, poussieres

optical

Rayons X: gaz chaud (emission), gaz froid (absorbptions)

x-ray

Rayons gamma: rayons cosmiques, pulsars

gamma ray



Multiwavelength Milky Way

Continu radio: électrons accélérés par champs magnétique

radio continuum (408 MHz)

Hydrogene atomique (raie à 21cm)

atomic hydrogen

Radio: gaz chaud et ionise

radio continuum (2.5 GHz)

Hydrogene moleculaire : gaz froid, site de formation stellaire (cf. les bras spiraux)

molecular hydrogen

IR: MIS rechauffe => region de formation stellaire

infrared

IR moyen: molecules complexes du milieu interstellaire

mid-infrared

IR proche: etoiles (type K), peu d'absorption

near infrared

Optique: etoiles (couleurs differentes), absorption: gaz, poussieres

optical

Rayons X: gaz chaud (emission), gaz froid (absorbptions)

x-ray

Rayons gamma: rayons cosmiques, pulsars

gamma ray



Multiwavelength Milky Way

Introduction

D'un point de vue historique

Mythologie grecque: voie lactée = lait de Héra qui nourrissait Héraclès

1610: Galilée comprend que cet aspect laiteux provient de l'accumulation de millions d'étoiles

→ distribution des étoiles plus étendue dans les directions de la bande

Définition originale: **trace dans le ciel du disque** d'étoiles, de gaz et de poussières (disque galactique) dans lequel est situé le système solaire



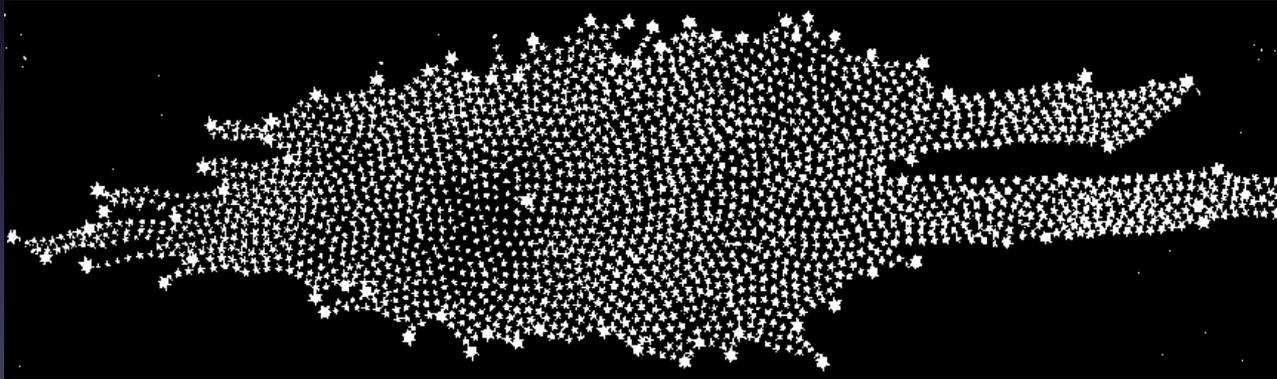
Panorama à 360° de la Voie Lactée du point de vue terrestre

Définition générale: **Voie Lactée = notre galaxie**

1785: William Herschel en déduit la forme par comptage d'étoiles

Mais: → distance des étoiles inconnues

→ système solaire supposé près du centre



Notre galaxie vue par Herschel

1930: Robert Jules Trumpler étudie l'effet de la poussière interstellaire (extinction) et permet d'obtenir l'image actuelle de la Voie Lactée

Fiche d'identité de la Voie Lactée

Appelée aussi la *Galaxie* (*Galaxias* en Grec = *voie de lait*)

Contenu: 100 milliards d'étoiles + poussières et gaz

Masse visible: $\sim 100 \cdot 10^9 M_{\odot}$

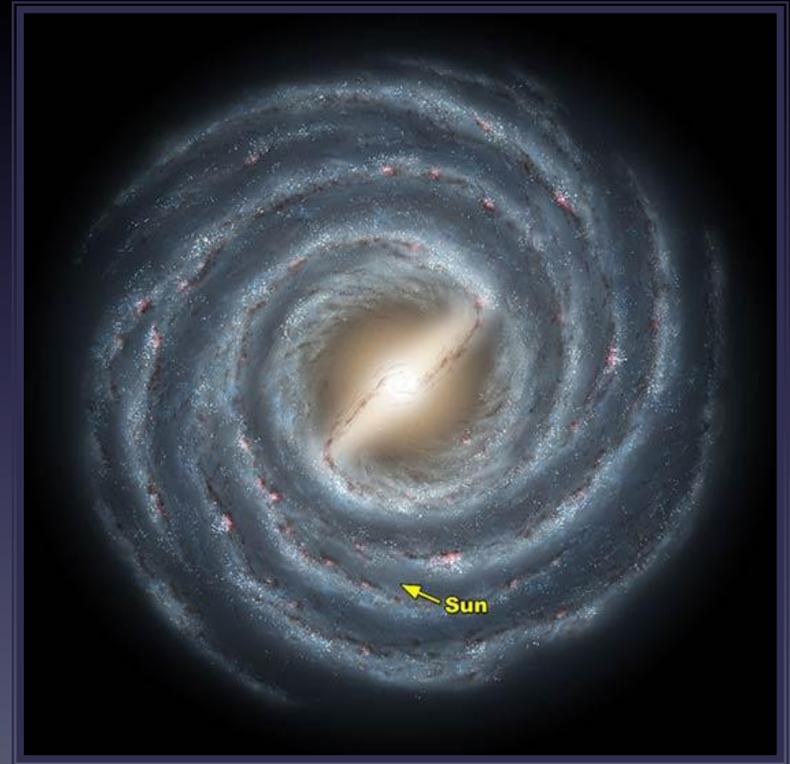
Type: spirale barrée

Diamètre: $\sim 100\,000$ AL

Centre: dans la direction de la constellation du Sagittaire

Rotation: différentielle

Le Soleil: situé à $26\,000$ AL du centre galactique, $p \approx 220 \cdot 10^6$ ans



Position du Soleil dans la Voie Lactée

Fiche d'identité de la Voie Lactée

Appelée aussi la *Galaxie* (*Galaxias* en Grec = *voie de lait*)

Contenu: 100 milliards d'étoiles + poussières et gaz

Masse visible: $\sim 100 \cdot 10^9 M_{\odot}$

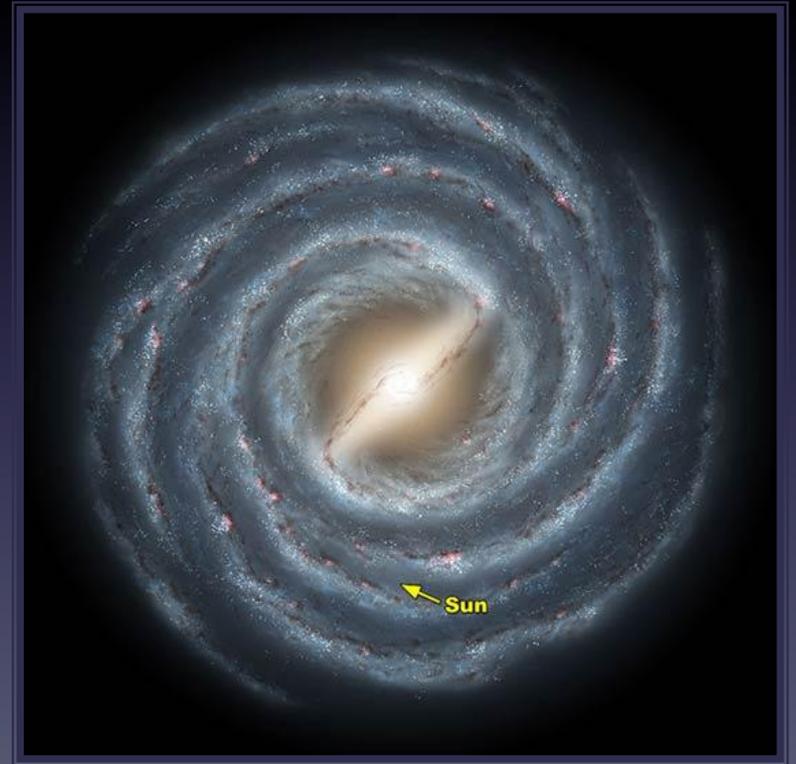
Type: spirale barrée

Diamètre: $\sim 100\,000$ AL

Centre: dans la direction de la constellation du Sagittaire

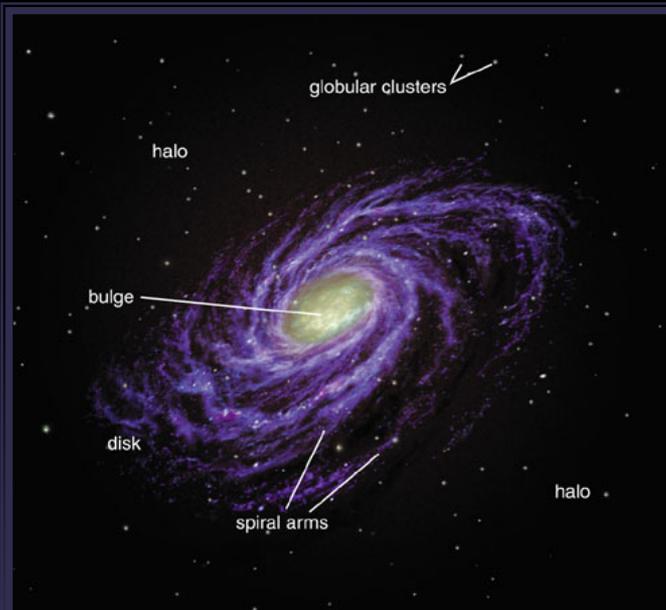
Rotation: différentielle

Le Soleil: situé à 26 000 AL du centre galactique, $p \approx 220 \cdot 10^6$ ans (a déjà fait ~ 20 tours)



Position du Soleil dans la Voie Lactée

Composition



Bulbe galactique

- centre galactique

Disque galactique

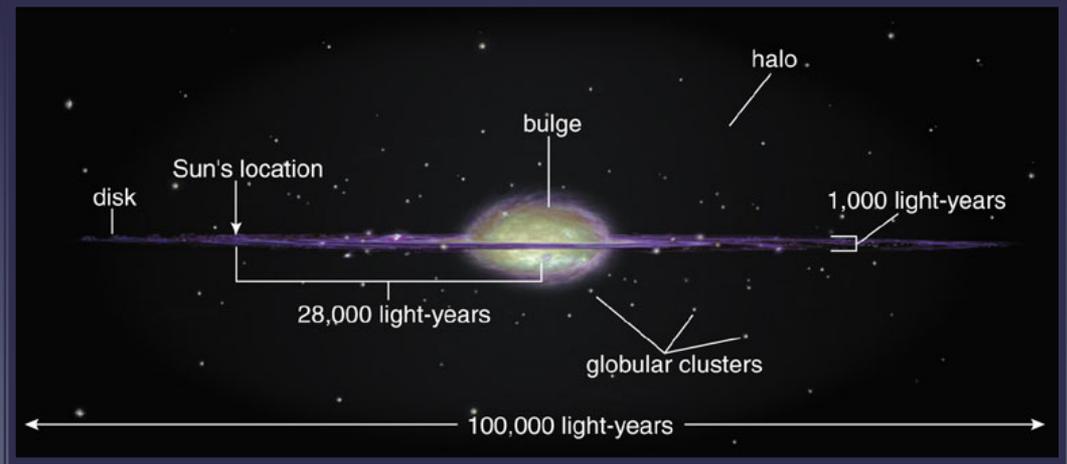
- disques fin et épais
- amas ouverts

Halo galactique

- amas globulaires
- galaxies naines

Bras spiraux et barre

Halo de matière sombre



Le bulbe galactique

Renflement central de $d = 7000$ AL

Contient 5% matière visible de la VL

Composé d'étoiles vieilles (Pop II)

Observations difficiles à cause de la poussière dans le plan galactique



Dans la direction du Sagittaire

Centre galactique

Au cœur du bulbe: centre galactique dans la direction du Sagittaire

Zone densément peuplée d'étoiles

Le disque galactique

Contient 90 % de la matière visible de la Galaxie

Structure plate de diamètre = 70 000 AL, divisé en 3 régions:

1. Le disque mince

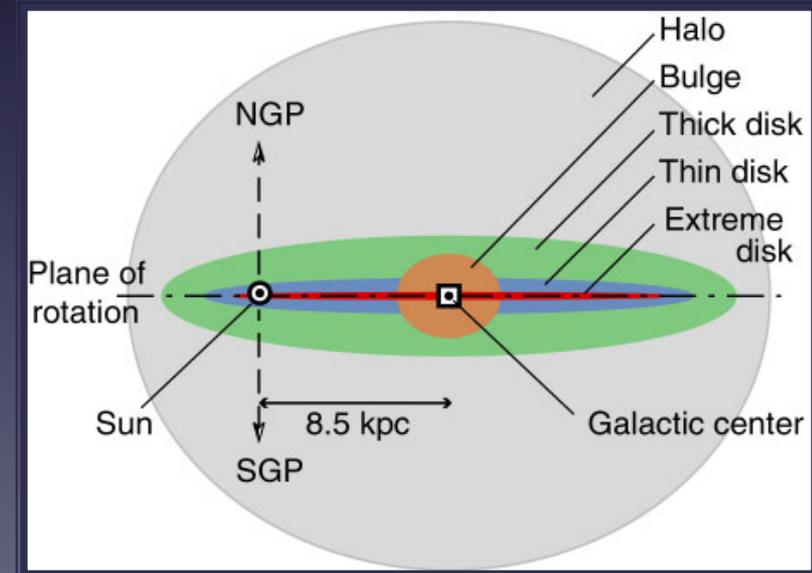
Etoiles jeunes souvent assemblées en amas ouvert

Épaisseur = 2000 AL

Sur 200 AL d'épaisseur: nuages moléculaires géants et poussières

2. Le disque épais

= dispersion progressive des étoiles du disque fin



Le halo galactique

Aussi appelé « sphéroïde », beaucoup – dense que le bulbe

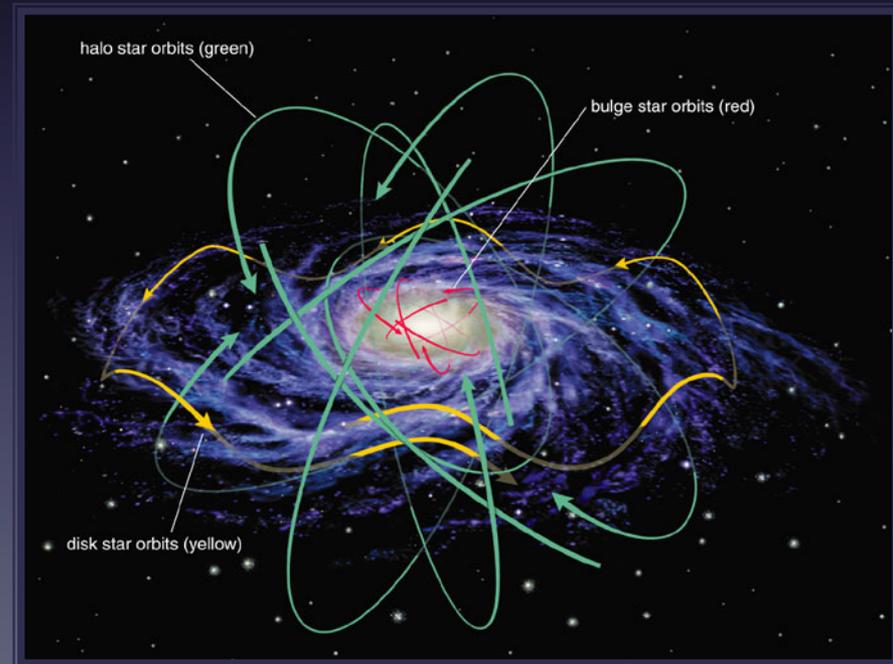
Contient 5 % de la matière visible de la VL

Composé des étoiles les + vieilles de la Galaxie (Pop II)

Ces étoiles ont des orbites hautement inclinées sur le plan galactique

Contient également: amas globulaires et galaxies naines

Exemples d'orbites d'étoiles du halo



Les amas globulaires

= ensemble d'étoiles liées gravitationnellement

Formés tôt dans l'histoire de la VL

Parmi les + vieux objets de l'Univers

Contenu: $\sim 10^5$ d'étoiles vieilles (Pop II)

Distribution: sphérique

Taille: ~ 100 AL de diamètre

Quantité: il en existe environ 200

Proportion: 1% des étoiles du halo



*Amas globulaire M80,
situé à 28 000 AL du Soleil*

Les galaxies naines

Le halo renferme 2 galaxies naines sphéroïdales: Naine du Sagittaire et Naine du Grand Chien

Ces galaxies sont sur le point de traverser le disque

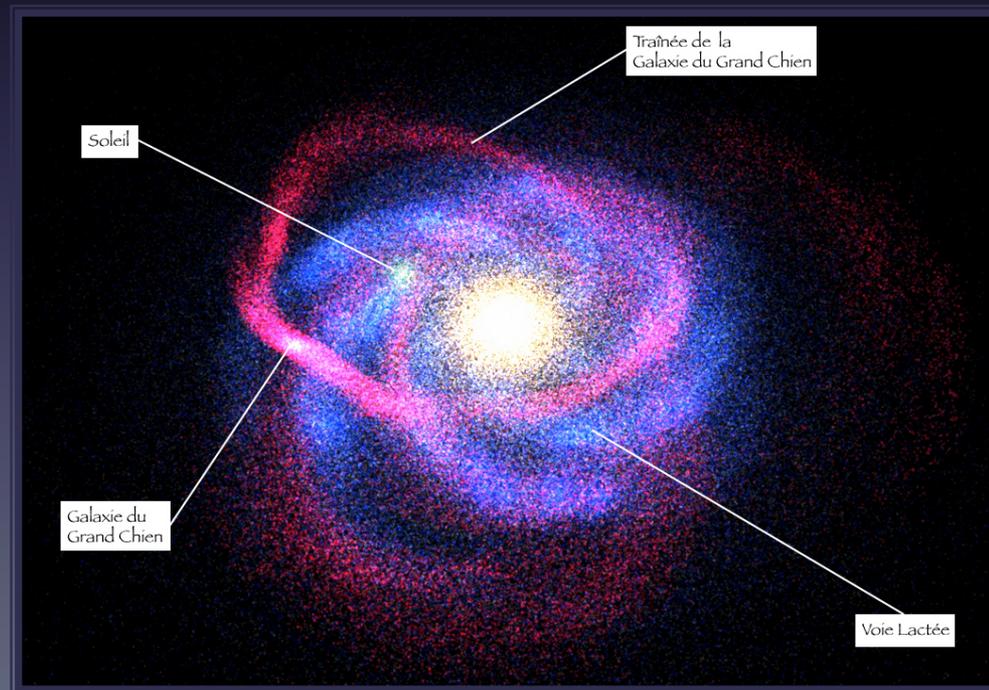
Ces objets ont été « absorbés » (cannibalisme) par notre galaxie qui les a attirés gravitationnellement

⇒ dislocation progressive

⇒ perte de matière le long de leur trajectoire dans le halo:

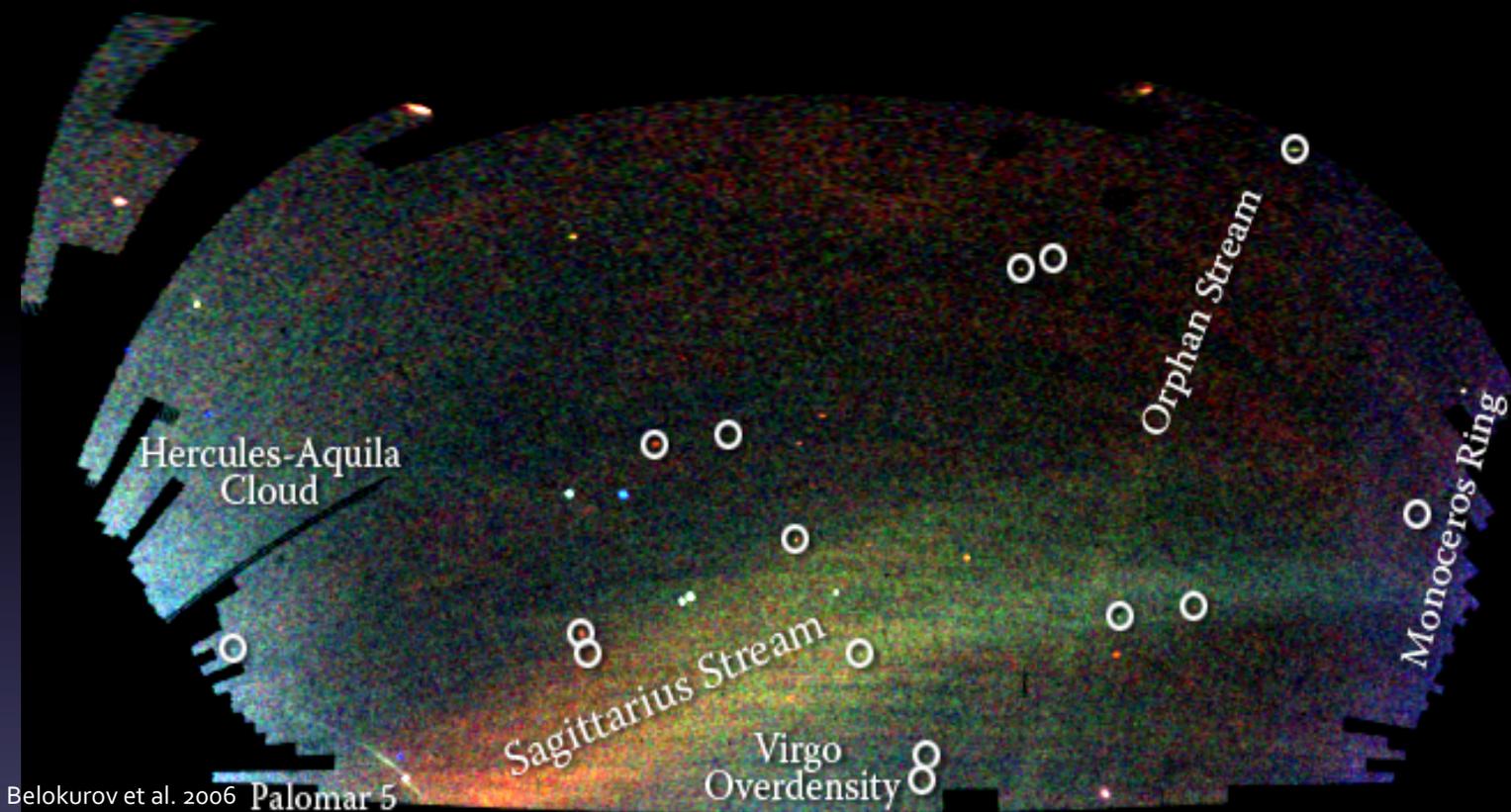
« courants fantômes »

Trace du passage de la galaxie du Grand Chien dans le halo



Evolution of the Sagittarius Dwarf Spheroidal Galaxy in the Halo of the Milky Way

David R. Law
(Dunlap Institute, Univ. of Toronto)



Belokurov et al. 2006 Palomar 5



Belokurov et al. 2006

2 bras spiraux identifiés en 1951 par William Morgan

Puis 2 autres identifiés en 1976 par Yvon & Yvonne Georgelin

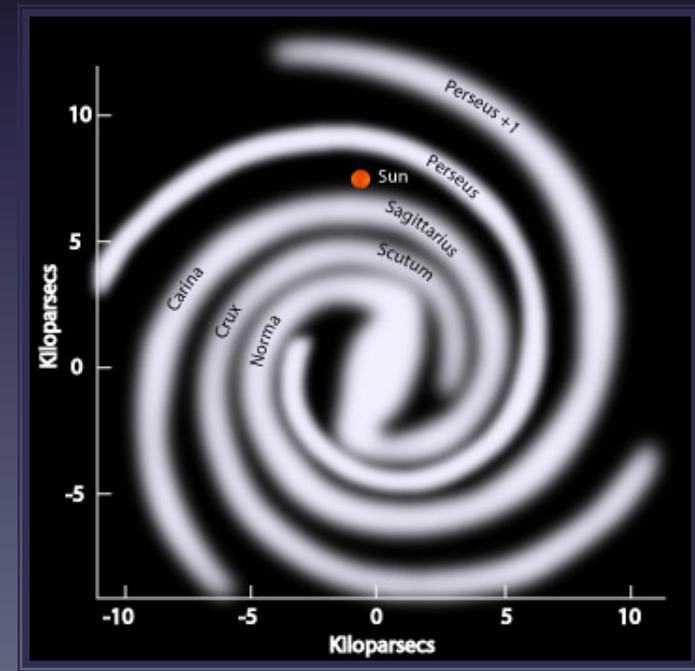
On pense également qu'il existe une barre à un rayon $\approx 10\ 000$ AL

⇒ cette barre donnerait naissance aux 2 bras spiraux principaux:

- bras interne de *Norma*
- bras spiral majeur *Sagittaire-Carène*

Ceux-ci se scinderaient en $r \approx 20\ 000$ AL pour donner naissance aux:

- bras externe de *Persée*
- bras intermédiaire *Ecu-Croix*



Remarques

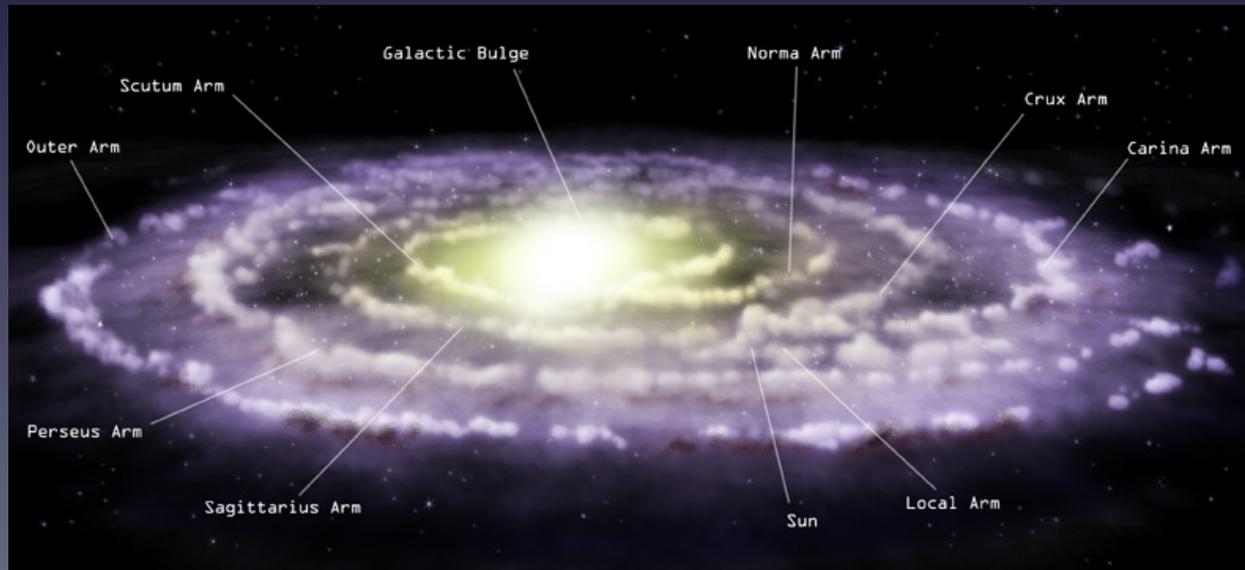
Les bras spiraux \neq continus

Voilà pourquoi ils possèdent plusieurs noms selon les constellations dans lesquelles on les observe le mieux

Structure principale à 4 bras mais il peut exister une structure + fine

Soleil situé aux abords d'un bras appelé le « bras local d'*Orion* »

Ce bras = excroissance du bras *Sagittaire-Carène*



Comment savons-nous que notre galaxie est une spirale?

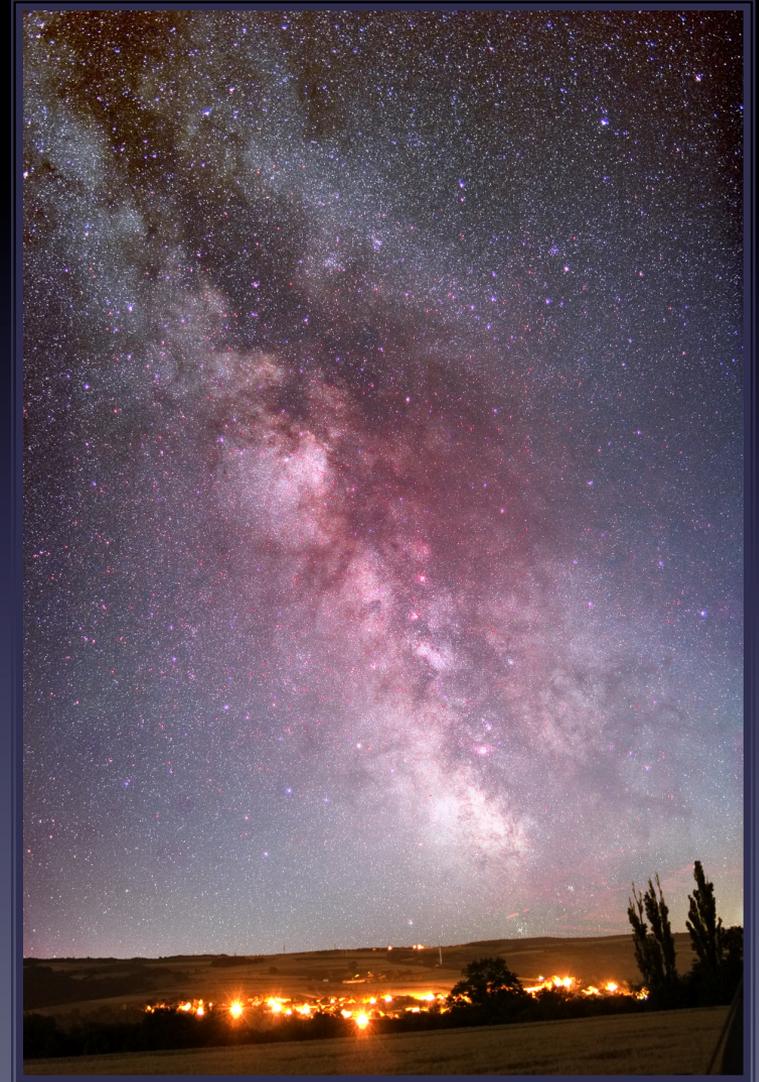
Il existe beaucoup d'autres galaxies spirales

→ observation de ces spirales: étude de leurs caractéristiques

→ bras spiraux constitués essentiellement d'étoiles bleues (O et B) et de nébuleuses brillantes (régions HII) \Leftrightarrow « traceurs »

→ distribution 3D de ses objets dans notre Galaxie

→ mise en évidence des bras spiraux



Pourquoi y a-t-il des traceurs dans les bras spiraux ?

→ En général, les étoiles ne tournent pas à la même vitesse que les bras spiraux (le Soleil a déjà traversé plusieurs fois des bras spiraux)

→ Soit une zone de matière qui « traverse » l'onde d'un bras:

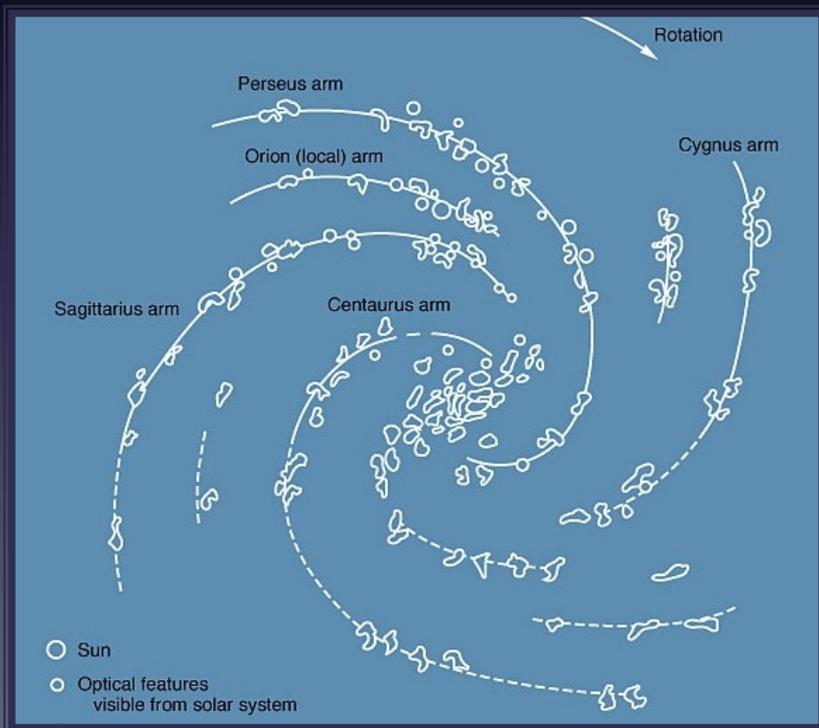
⇒ effondrement de nuages moléculaires

⇒ naissance d'étoiles de tous types spectraux dont O et B (les + brillantes, évolution rapide)

⇒ **apparition des traceurs**

→ Zone « quitte » l'onde : étoiles O et B déjà en fin de vie

⇒ **disparition des traceurs**



Formation de la galaxie

Etoiles vieilles (Pop II) : halo + bulbe

Etoiles jeunes (Pop I) : disque

Le disque s'est formé + tard que le halo et le bulbe

Nuage diffus de matière

Gravitation

Effondrement
+
Conservation du moment cinétique

Rotation de + en + rapide du nuage autour d'un axe particulier

Création du disque

Stop effondrement grâce à la vitesse
⇒ Orbite circulaire

Aplatissement

Rotation la + rapide dans le plan équatorial

Moment cinétique non nul

Matière située de part et d'autre du plan continue à s'effondrer

Soit une étoile déjà formée lors du début de l'effondrement et dont l'orbite est suffisamment inclinée sur le plan:

- étoile bcp + dense que la matière qui s'accumule dans le disque
- elle passe au travers de celui-ci sans que son orbite soit modifiée

Soit une nuage diffus de matière interstellaire:

- quand il traverse le disque, il subit un amortissement jusqu'à l'annulation de sa composante de vitesse perpendiculaire au disque
- il se joint donc à la matière du disque

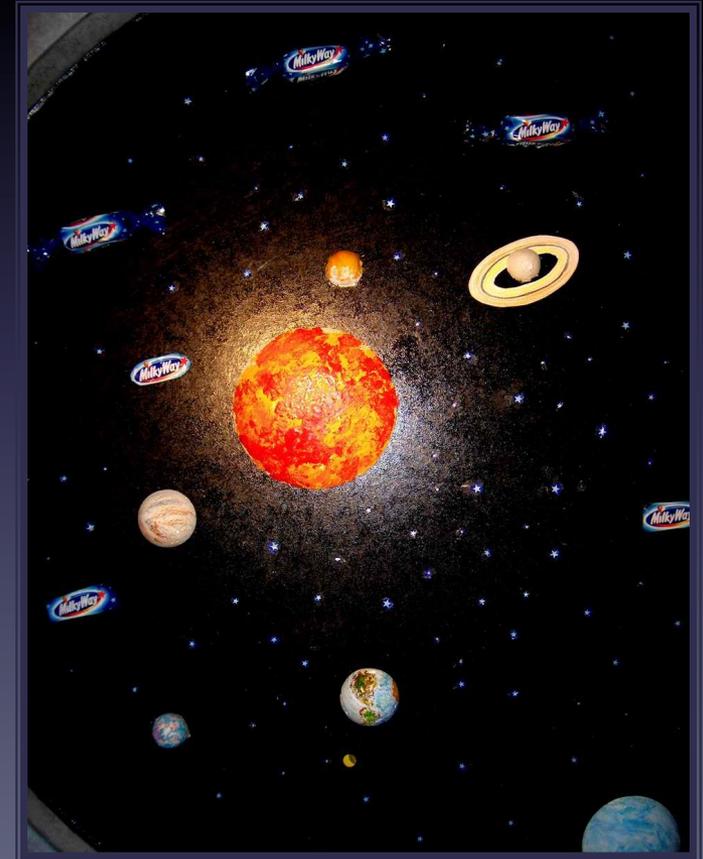
Formation

Quand la densité du disque est suffisante, l'effondrement de nuages à l'origine de la naissance d'étoiles est alors possible

⇒ au cours des milliards d'années suivants:
le nombre d'étoiles dans le disque ↗

Les orbites circulaires de ces étoiles suivent le mouvement de la matière qui en est à l'origine

Les étoiles les plus vieilles sont donc celles formées hors du disque, on les retrouve dans le bulbe et dans le halo



Années 70 : rotation des galaxies

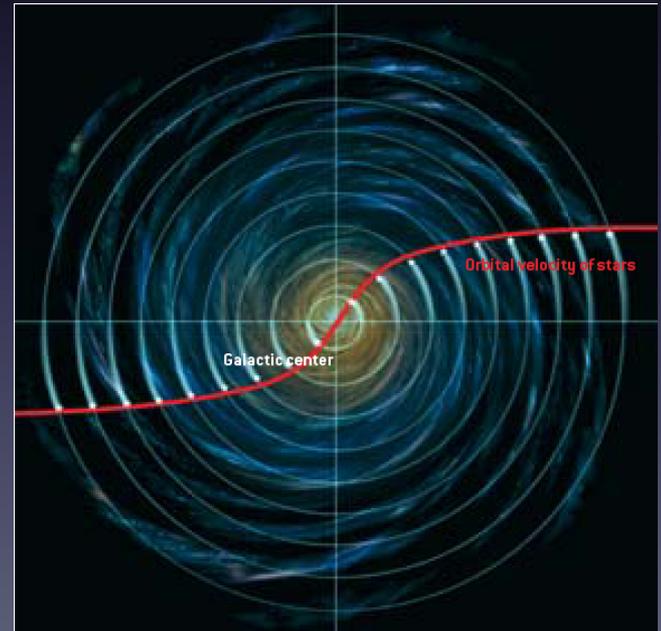
Les galaxies spirales, comme notre Voie Lactée, sont en rotation.

Surprise !

La vitesse de rotation ne diminue pas quand on s'éloigne du cœur, mais reste pratiquement constante.



La matière doit s'étendre bien au-delà de la partie visible de la galaxie.

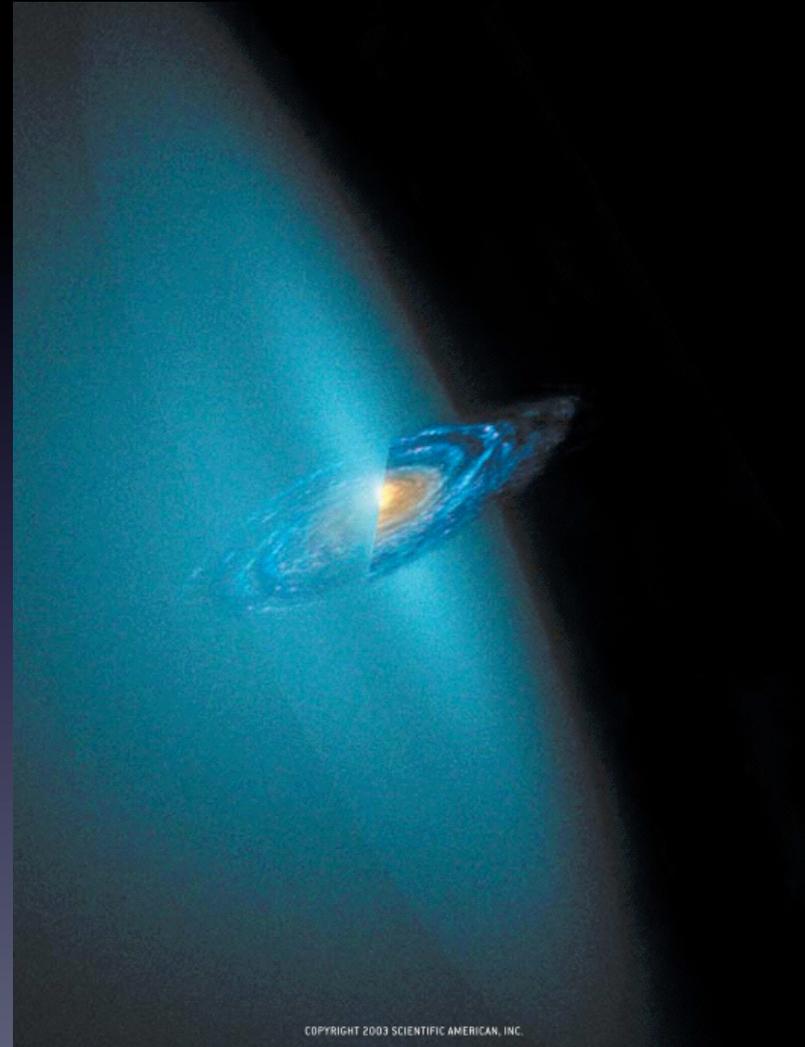


Matière cachée galactique

Elle pourrait s'étendre sur un rayon 5 fois supérieur au rayon observable de la galaxie.

Mais de quoi est-elle constituée :

- gaz ?
- étoiles sombres ?
- particules exotiques ?



Le halo de matière sombre (Dark Matter = DM)

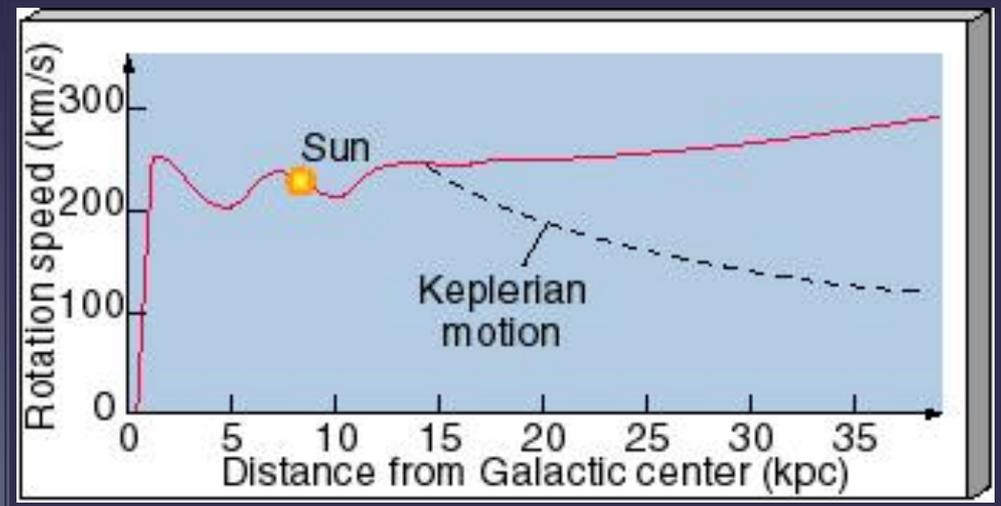
La courbe de rotation de la Voie Lactée est plate (non Képlérienne):

⇒ Il manque de la matière lumineuse pour en rendre compte

⇒ Introduction de la matière sombre composée de:

✓ MACHOs (MAssive Compact Halo Object) : gaz froid, naines blanches, naines brunes, trous noirs, ... → pas assez nombreux!!!

✓ En +: particules exotiques non encore détectées comme les WIMPs (Weakly Interacting Massive Particle), ...

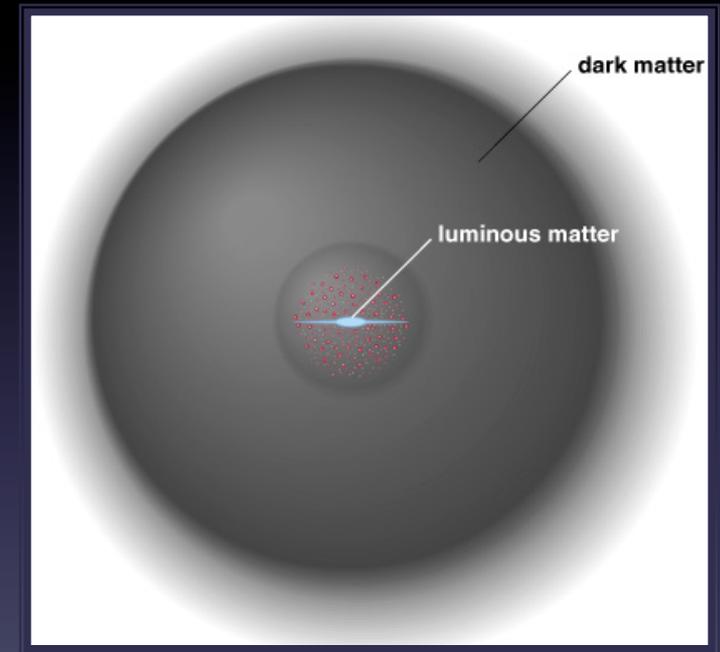


Masse totale de la Voie Lactée
calculée via influences
gravitationnelles

⇒ $500 \cdot 10^9 M_{\odot}$ dont 1/5 lumineuse

⇒ le reste: gigantesque halo
sphérique de DM (diamètre \approx
600 000 AL)

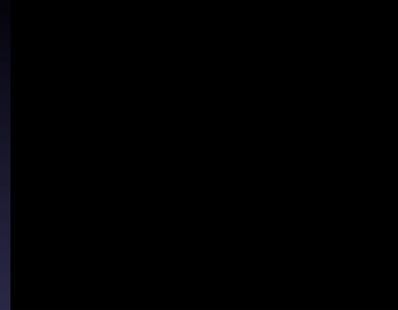
La DM semble également exister à
l'échelle des amas de galaxies ainsi
qu'à des échelles supérieures



*Halo sombre d'une
galaxie spirale*

Matière noire, qu'est-ce que ça veut dire ?

- La matière que l'on ne voit pas, qui n'émet pas de lumière !
- ... mais que l'on détecte quand même par ses effets gravitationnels.



Matière sombre...



Matière
pas sombre...
Seulement 1% !

Galaxies voisines

Les galaxies naines

Les + proches: Petit Nuage de Magellan (SMC, $r_{\text{orbite}} \sim 200\,000$ AL)
et le Grand Nuage de Magellan (LMC, $r_{\text{orbite}} \sim 170\,000$ AL)

- ✓ en orbite autour de la Voie Lactée
- ✓ = petites galaxies de forme irrégulière dont $M \sim 0.01 M_{\text{VL}}$
- ✓ découvertes en 1519 par l'Européen Magellan lors d'un voyage autour du monde
⇒ nuages diffus dans l'hémisphère austral
- ✓ reliées à la Galaxie par des filaments de matière ⇒ cannibalisme par la VL ?



LMC



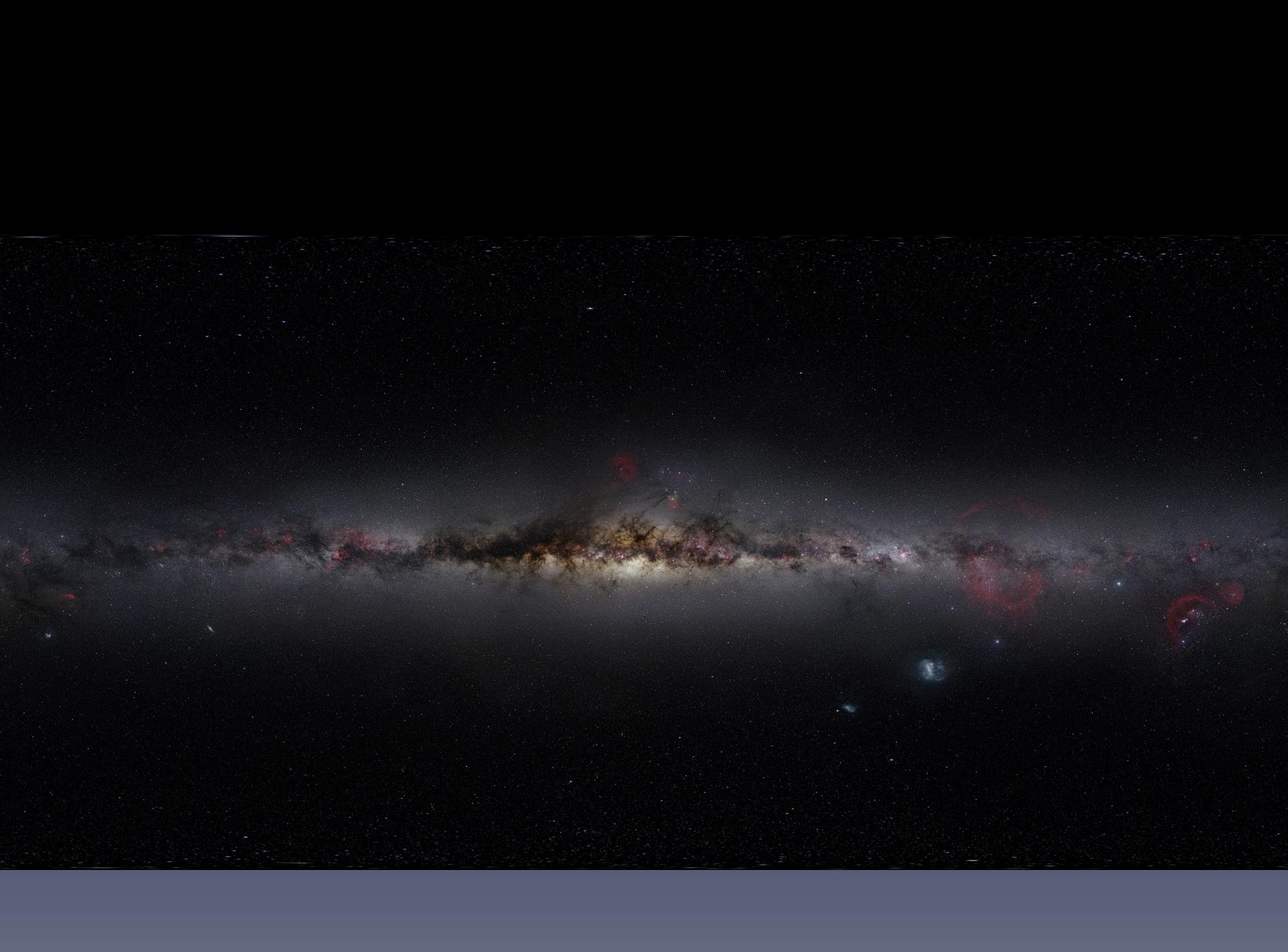
LMC, SMC, Milkyway

stack of 7 images 90 seconds ISO 6400, Canon 650D,

Sigma 8-16mm 1:4.5-5.6 HSM / F=10mm f/5.0

19.08.2012 23:42 / 7 km south of San Pedro de Atacama, Chile





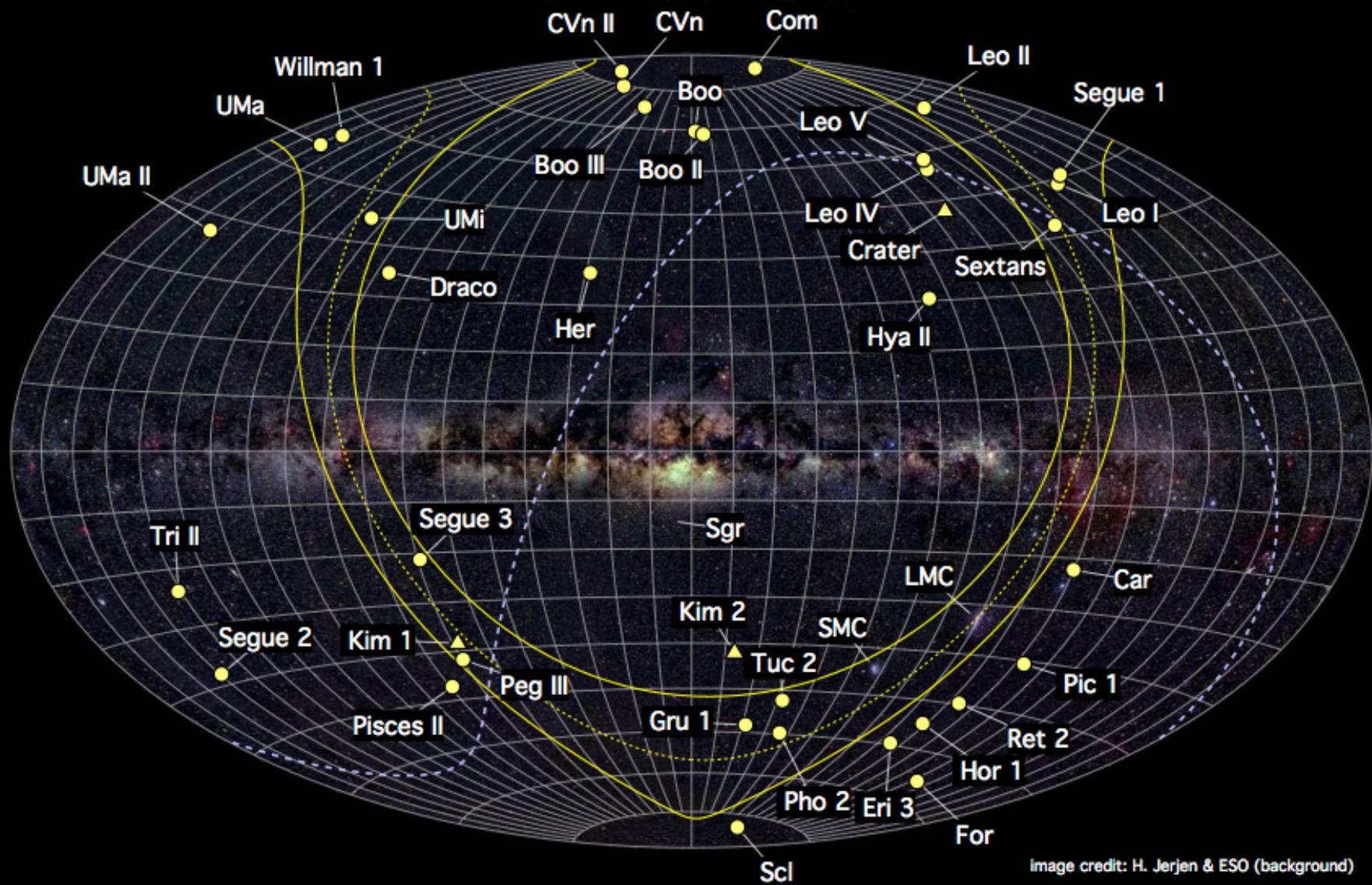


image credit: H. Jerjen & ESO (background)

Il en existe beaucoup d'autres (au moins une vingtaine)

Exemples:

- Fornax (Fourneau), Sculpteur et Sextant: sphéroïdales
- Dragon, Carène, Petite Ourse: irrégulières

Mais difficiles à détecter car:

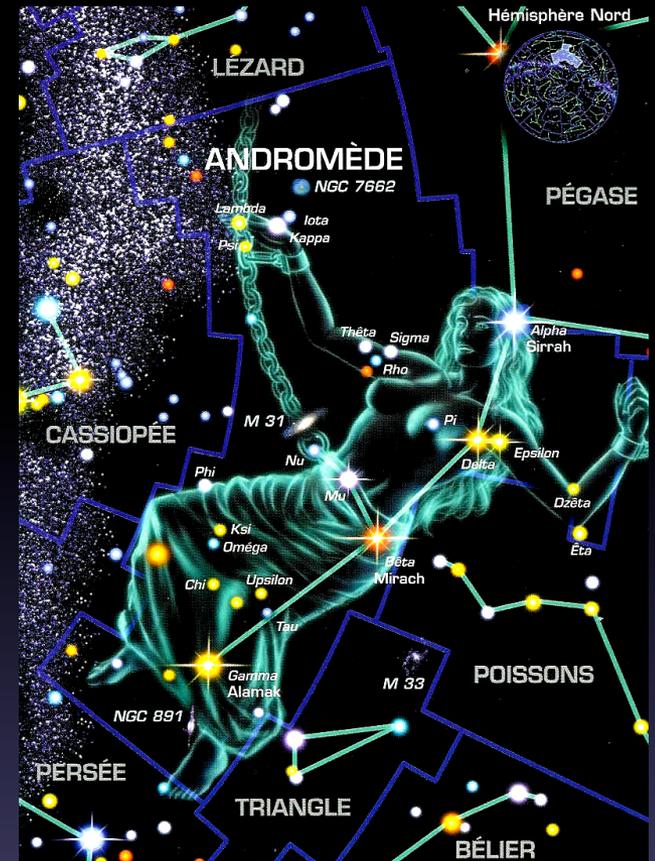
- poussières galactiques dans les directions du disque
- certaines galaxies: faible brillance de surface (= galaxies très diffuses et peu lumineuses)

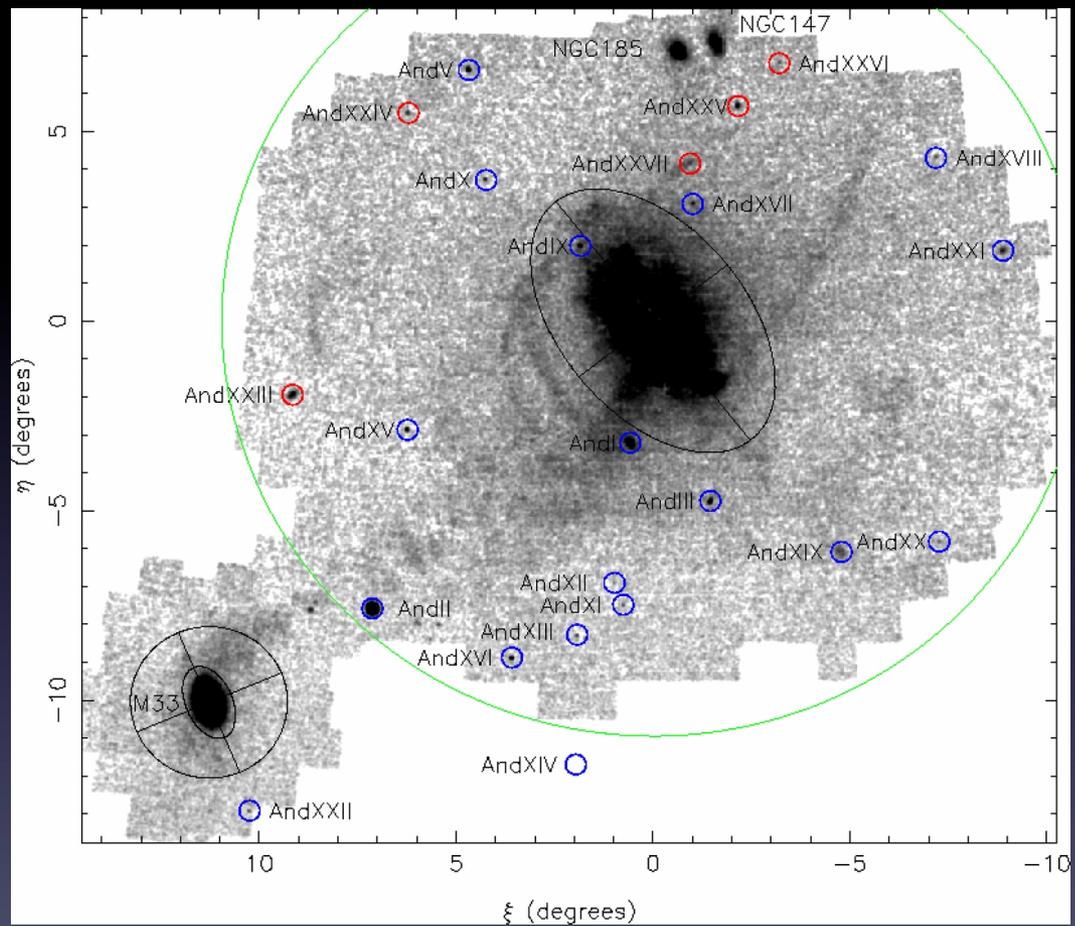
Remarque: ces galaxies satellites déforment le disque galactique par effet de marée

Galaxie d'Andromède

- aussi appelée M31 ou encore NGC 224
- spirale géante (de masse comparable à celle de la Voie Lactée)
- distance = $2,5 \cdot 10^6$ AL
- observée pour la première fois en 905 par un astronome arabe, Al Soufi, qui la décrit comme un « petit nuage »
- possède également un cortège de galaxies naines satellites
- à proximité: galaxie du Triangle (M33), spirale moyenne

Galaxie du Triangle







- la taille d'Andromède sur le ciel est comparable à 5 fois le rayon angulaire de la lune
- mais à cause de sa faible brillance de surface seul le bulbe est observable à l'œil nu (dans l'hémisphère nord)
- il s'agit de l'un des rares objets extragalactiques à être observable à l'œil nu (de très bonnes conditions d'observation sont indispensables)

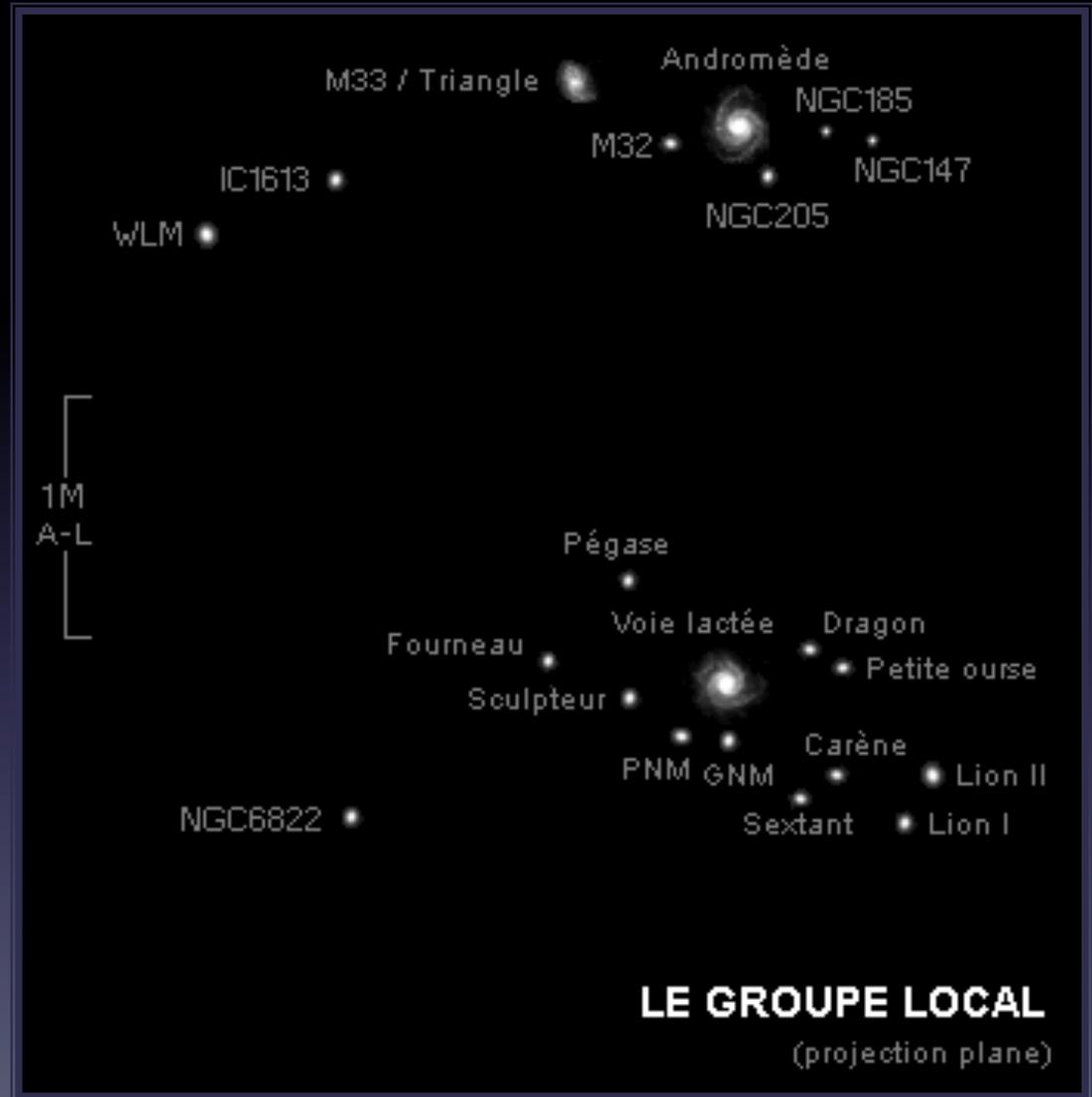
*Comparaison entre la Pleine Lune
et une image profonde d'Andromède*

Le Groupe Local

Il s'agit d'un regroupement d'une trentaine de galaxies liées

gravitationnellement, dans un volume de diamètre $\approx 4 \cdot 10^6$ AL

Il comprend la Voie Lactée + satellites et Andromède + satellites

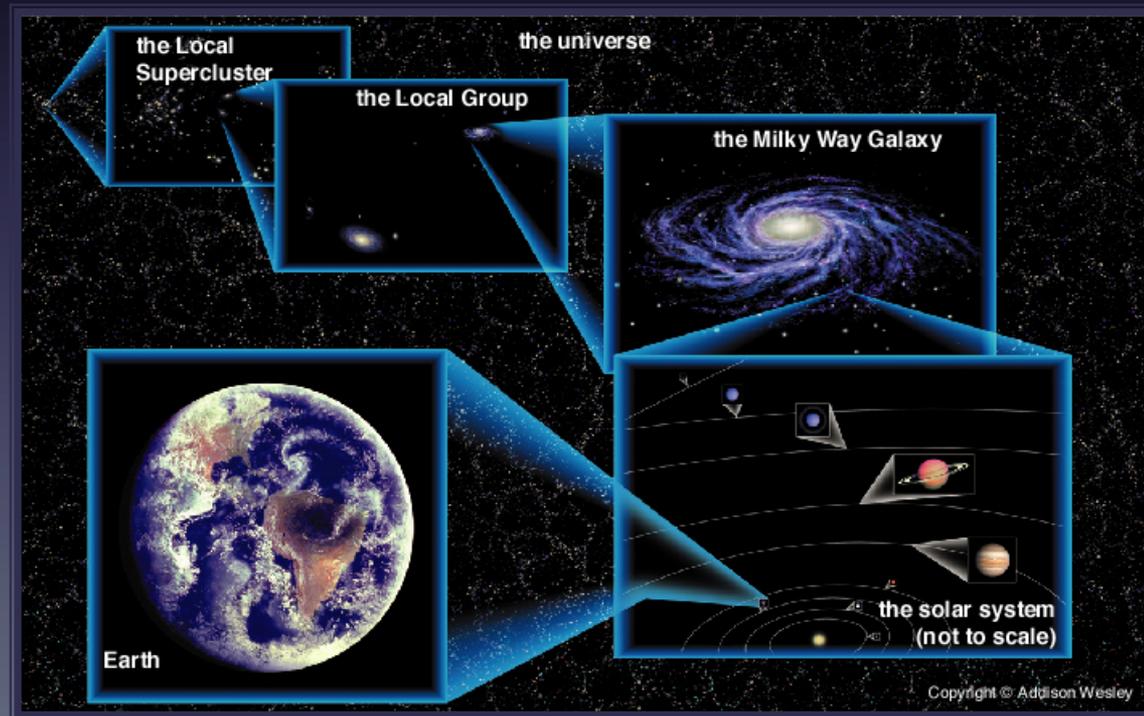


⇒ les galaxies s'assemblent donc en **amas** (ex: *l'Amas du Sculpteur* situé à 10 millions d'AL du *Groupe Local*)

⇒ à cette échelle: distribution non-homogène et non-isotrope

⇒ le *Groupe Local* et *l'Amas du Sculpteur* orbitent autour d'un amas plus densément peuplé, *l'amas de la Vierge* (contient 2000 galaxies dont 100 de $M \geq M_{VL}$)

⇒ les amas s'assemblent eux-mêmes en **superamas**: le *Groupe Local* fait partie du *Superamas Local* ou *Superamas de la Vierge*



Avenir ?

Que va devenir la Voie Lactée ?

Contrairement aux autres galaxies (les satellites nains à part),
Andromède est la seule galaxie à se rapprocher de la nôtre (blueshift)

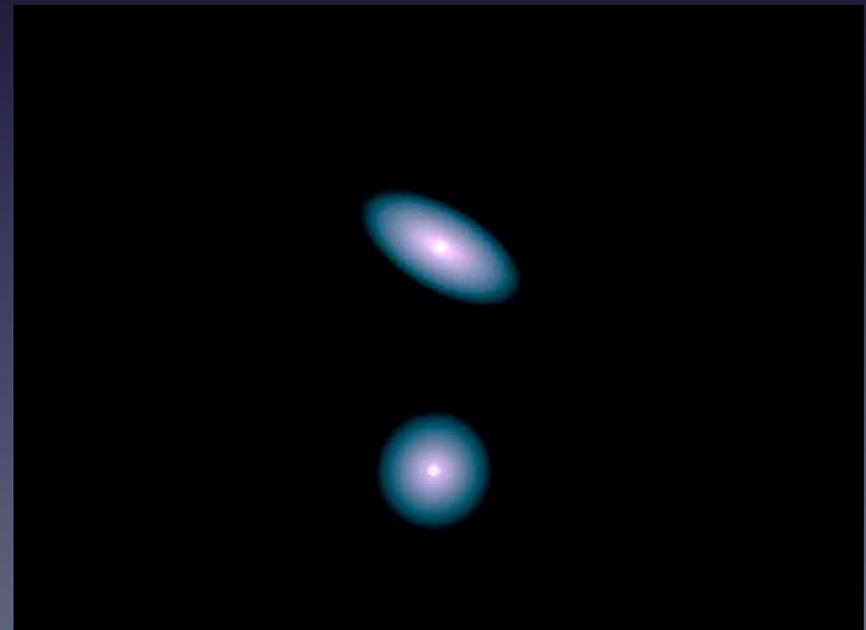
⇒ dans $\sim 3 \cdot 10^9$ d'années: **collision** entre Andromède et la Voie Lactée

⇒ « *cannibalisme* »: les 2 galaxies
ne formeront plus qu'une galaxie

⇒ collisions entre étoiles peu
probables

⇒ mais rencontres de nuages de gaz
et de poussières

= nouvelles pouponnières d'étoiles



Interaction avec Andromède

La galaxie la plus massive du Groupe Local, comparable à la Voie Lactée, n'est qu'à 700 kpc
Elle se dirige vers nous à 300 km/s

Sur la base de sa vitesse radiale, le temps d'approche est de 2 Gyr

Mais sa vitesse tangentielle est inconnue

Bientôt des mouvements propres (avec le satellite européen GAIA)



Simulations de la rencontre avec M31

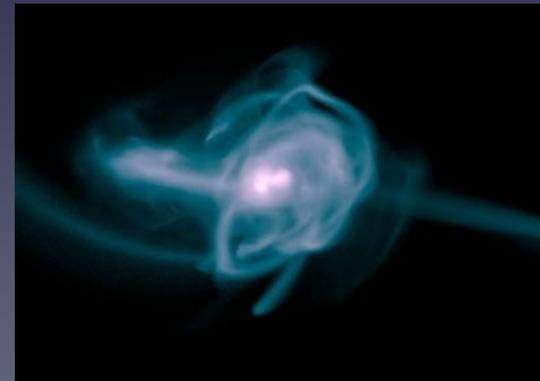


Dubinski 2000

Galaxies NGC 2207 and IC 2163



Hubble
Heritage



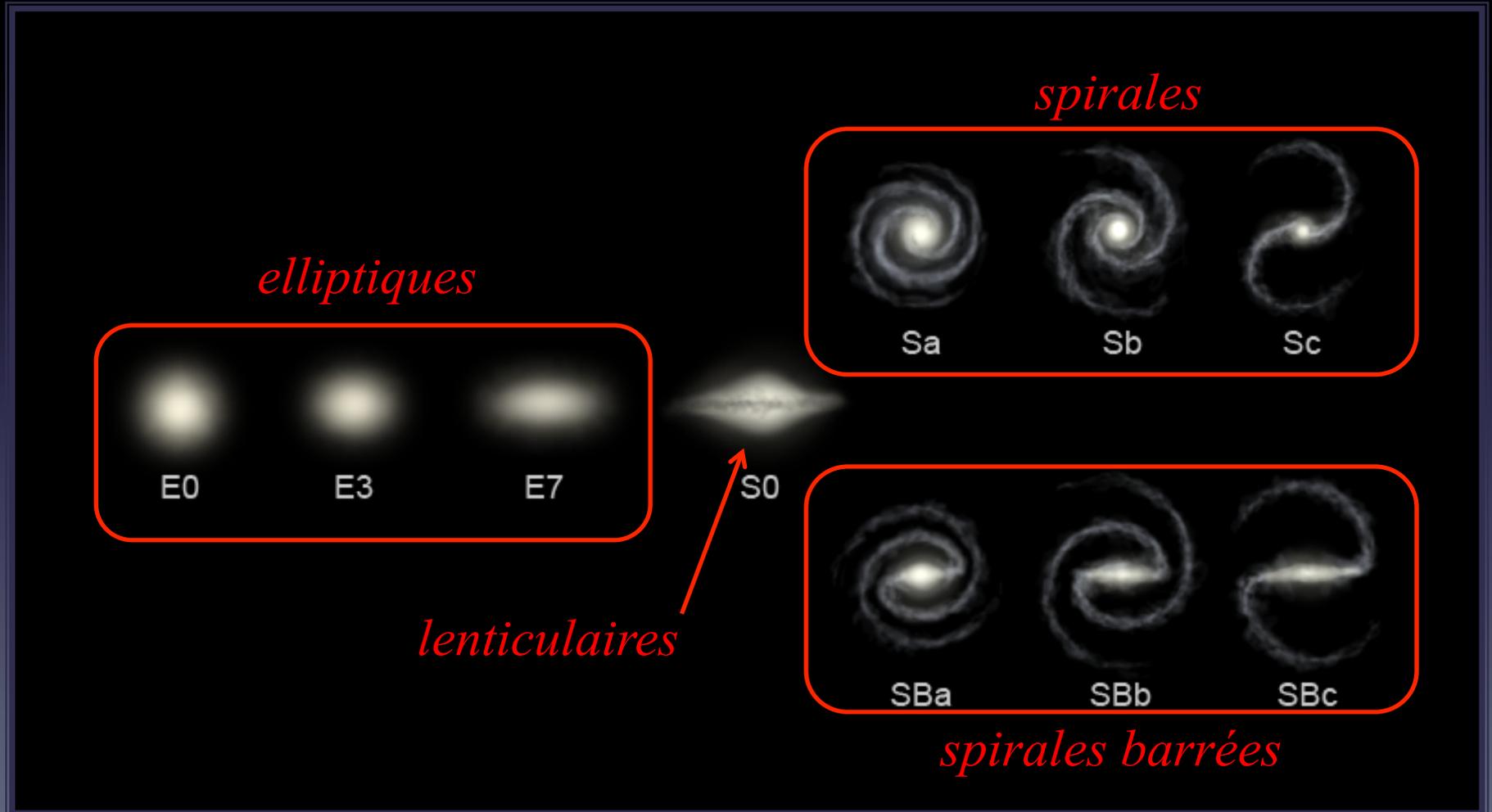


0.000 billion years



Type de galaxies

Classification : la **séquence de Hubble**



Galaxies elliptiques

Composition

- étoiles vieilles, peu de gaz
→ plus de formation d'étoiles
- parfois des bandes de poussière
(résidus de spirales absorbées ?)



Centaurus A



NGC 7049

Composition

1. Etoiles :

Type plus tardif → plus d'étoiles jeunes
→ plus d'étoiles massives
→ couleur plus bleue

(En accord avec
l'importance réduite
du bulbe, plus rouge et
contenant des étoiles
plus vieilles)



Galaxies spirales

2. Gaz :

Type plus tardif → plus grande proportion de gaz (nécessaire à la formation d'étoiles)

3. Poussières :

Masse des poussières ~1% masse du gaz

Si poussières chauffées par des étoiles jeunes → émission dans l'IR lointain (FIR) → surtout dans les spirales tardives



M 104 en fausses couleurs :

bleu = visible (HST)

rouge = FIR (Spitzer)

QUE CONTIENT UNE GALAXIE ?

- des étoiles
- du gaz neutre et/ou ionisé
- des poussières
- de la matière noire

En quoi diffèrent les divers types de galaxies ?

Les contenus en étoiles, gaz et poussières sont différents selon les types de galaxies

Les elliptiques contiennent très peu de gaz et de poussières et sont principalement constituées d'étoiles vieilles ; il ne s'y forme plus d'étoiles (il ne reste plus de gaz pour en former)

Les spiraux sont beaucoup plus riches en gaz et il continue à s'y former des étoiles dans le disque, en particulier dans les bras spiraux

Comment observe-t-on les étoiles dans les galaxies?

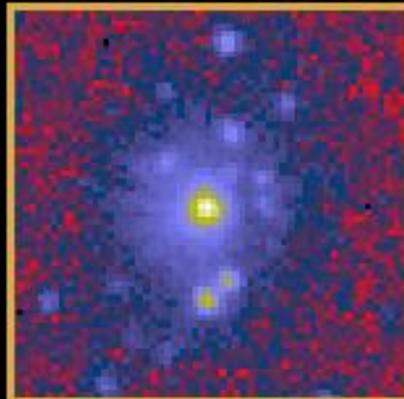
- Par l'imagerie dans différentes bandes, on peut voir que :
 - a) Les elliptiques et lenticulaires émettent plus de lumière dans le rouge que dans le bleu : elles sont riches en étoiles rouges, donc froides et vieilles ; tout le gaz a servi à former des étoiles, donc il n'en reste quasiment plus
 - b) Les disques et bras spiraux des galaxies spirales sont riches en gaz et il s'y forme encore des étoiles ; la présence d'étoiles jeunes donne donc aux bras spiraux une couleur bleue

M81 – Spiral Galaxy (Type Sb)

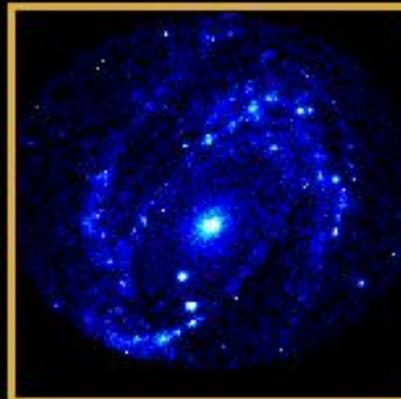
Distance: 12,000,000 light-years (3.7 Mpc)

Image Size = 14 x 14 arcmin

Visual Magnitude = 6.9



X-Ray: RCSAT



Ultraviolet: ASTRO-1



Visible: DSS



Visible: R. Gendler



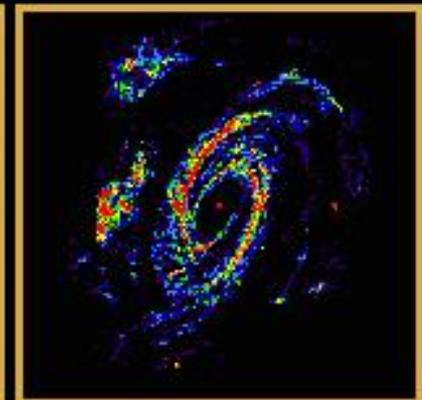
Near-Infrared: Spitzer



Mid-Infrared: Spitzer



Far-Infrared: Spitzer



Radio: VLA

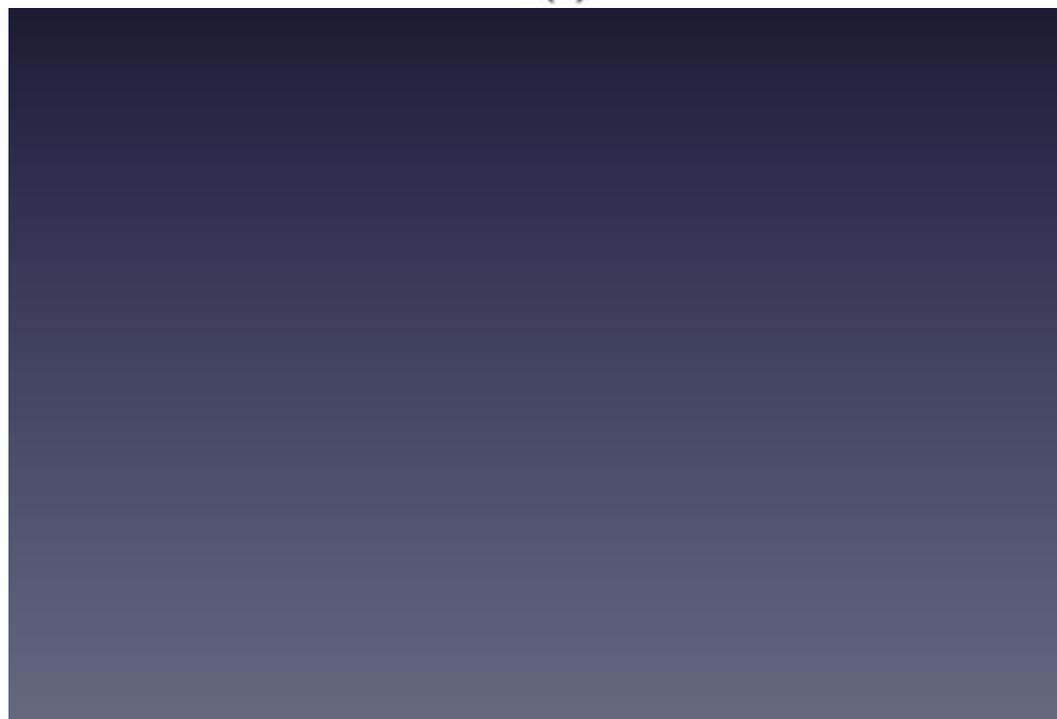
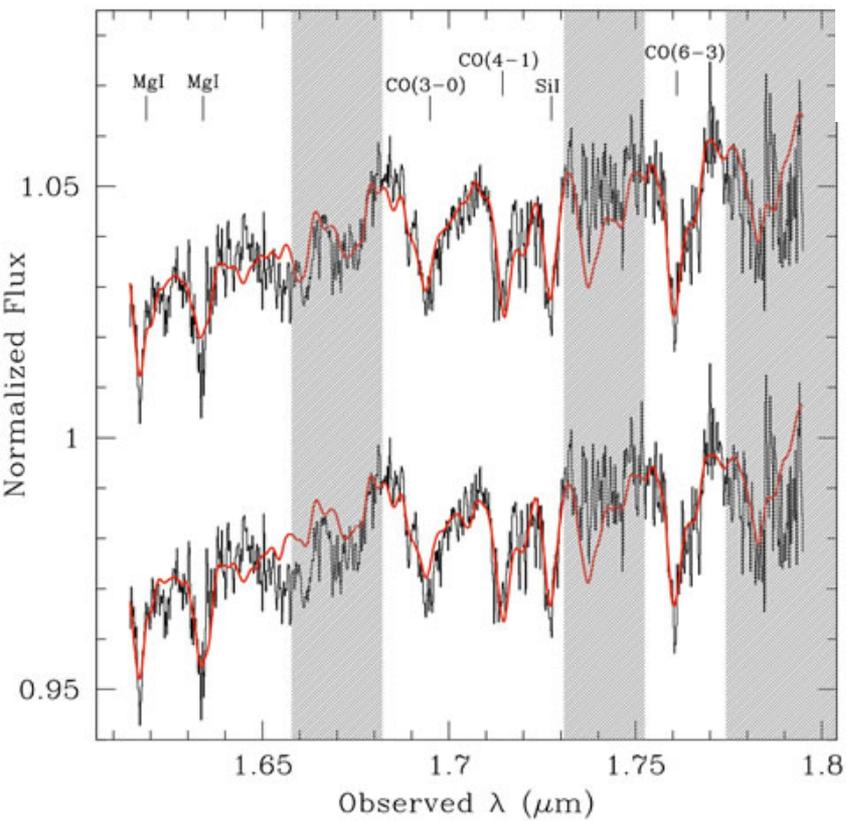
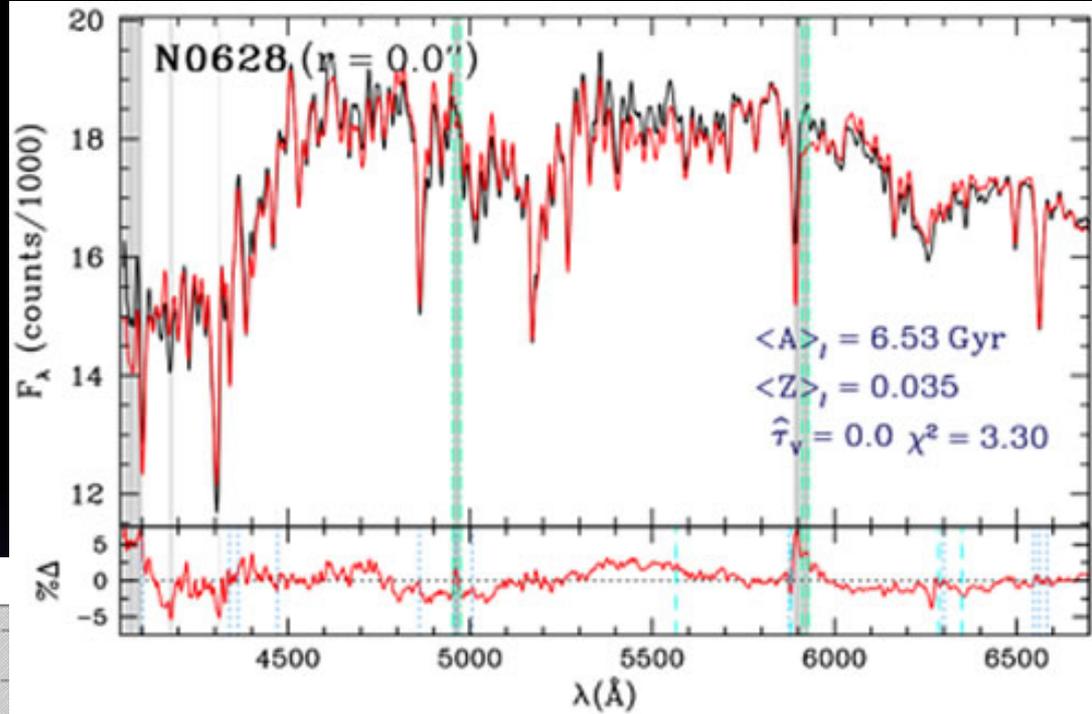
Comment observe-t-on les étoiles dans les galaxies?

- Par la spectroscopie :

a) On confirme les résultats ci-dessus de manière beaucoup plus fine

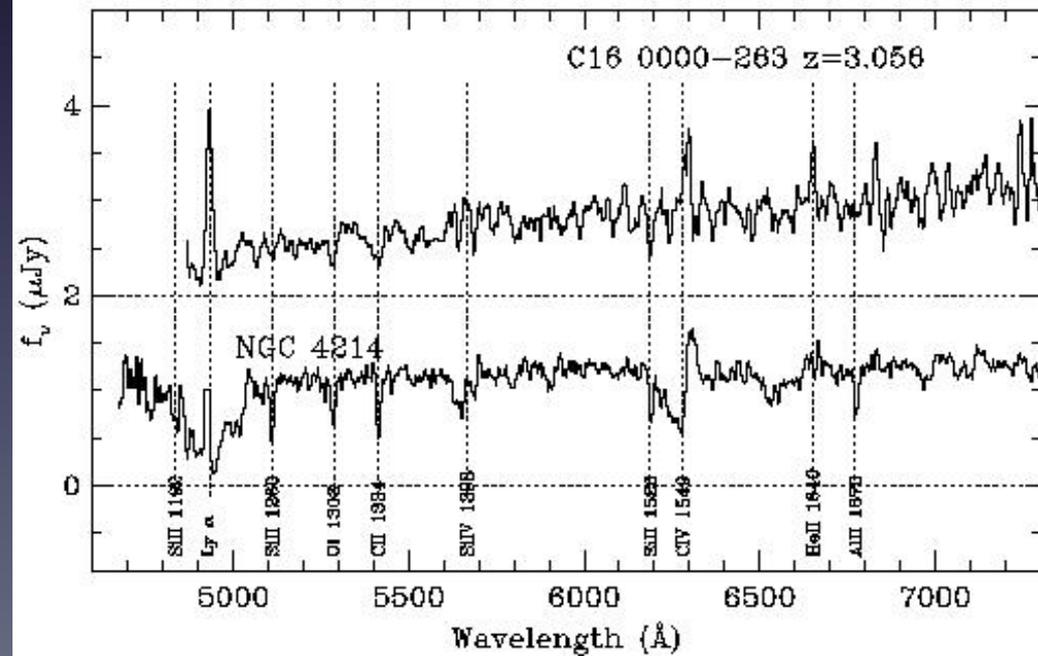
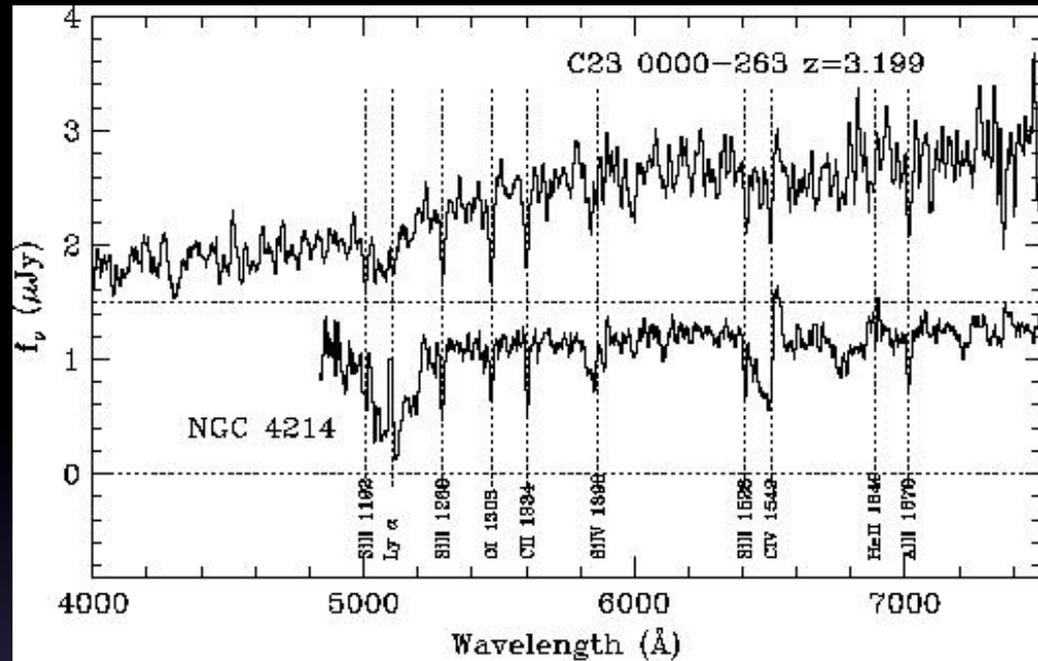
b) On peut estimer les proportions d'étoiles de chaque type en ajustant des modèles de populations stellaires

 âge, métallicité, dispersion de vitesses



Spectres de deux galaxies lointaines ($z=3$) ramenées à décalage spectral nul.

Les spectres à $z=0$ (NGC 4214) et $z=3$ se ressemblent



Observation de l'hydrogène neutre (HI)

On observe le gaz neutre par la raie à 21 cm, raie de transition hyperfine à 21 cm (dans le domaine radio)

On peut cartographier la distribution du gaz neutre

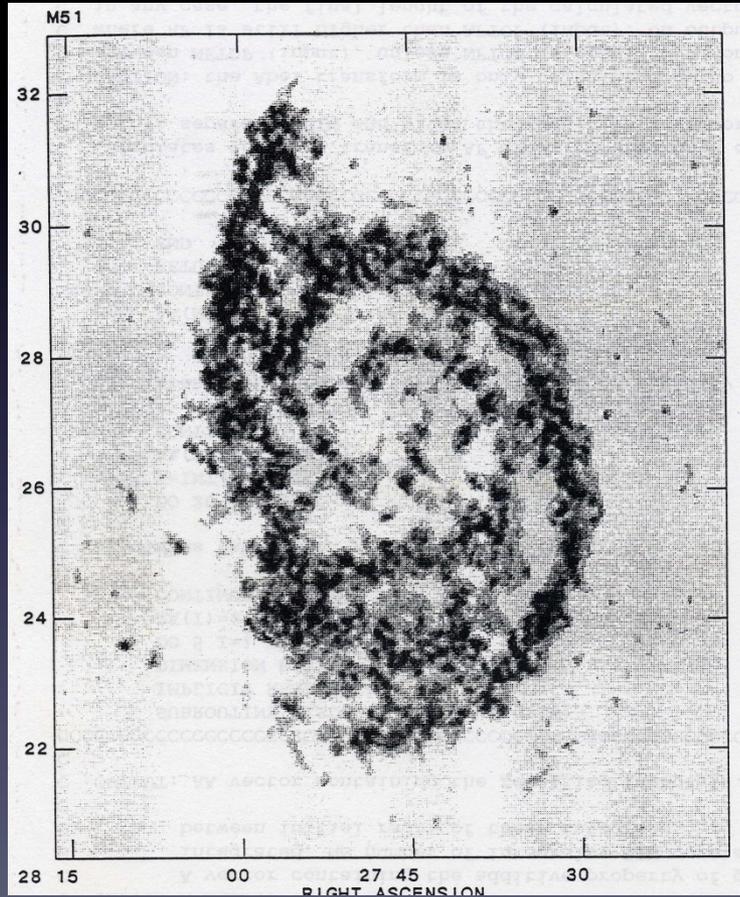
On peut estimer la masse totale de ce gaz HI pour une galaxie donnée

Il est beaucoup plus facile de détecter une spirale qu'une elliptique à 21 cm, parce que la quantité de gaz y est beaucoup plus grande

L'HYDROGÈNE NEUTRE (HI) dans M 51

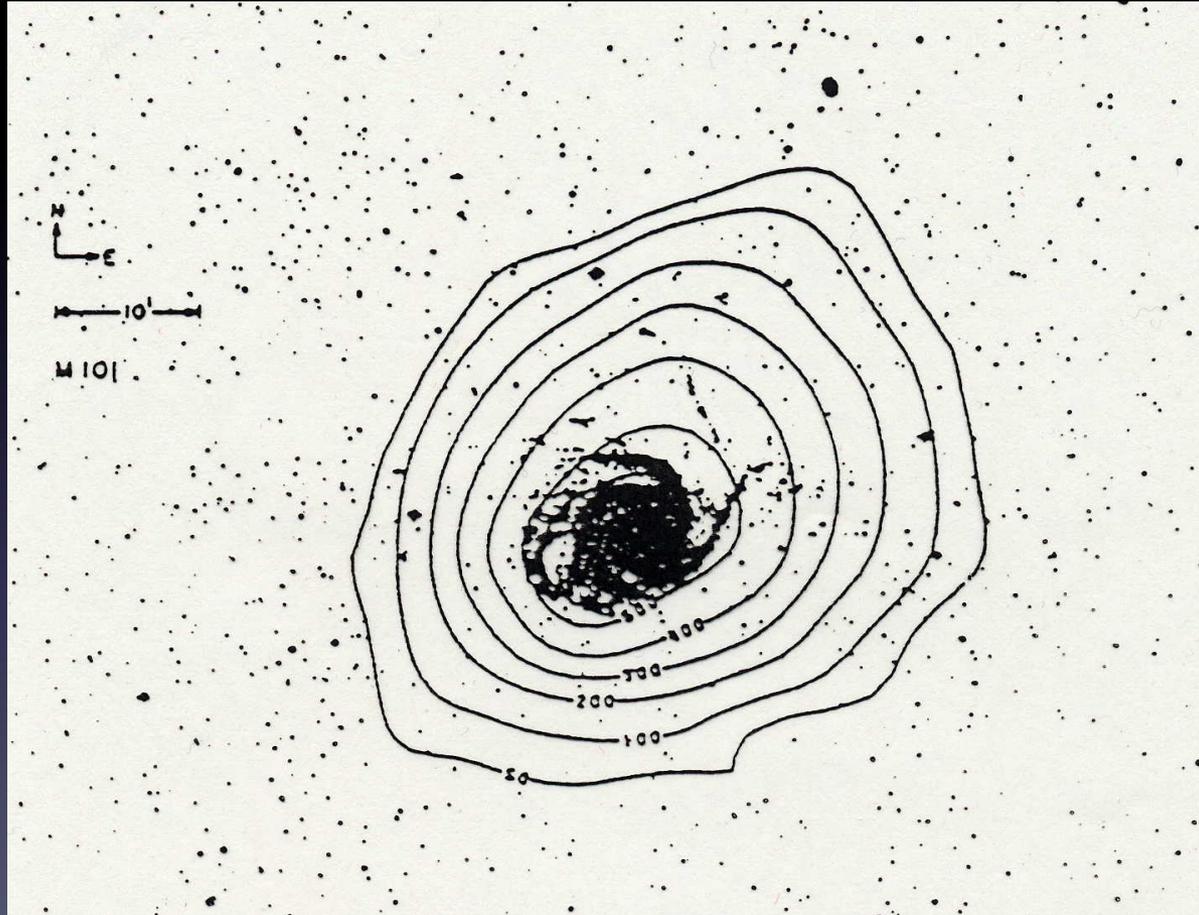
Image HI

Image optique



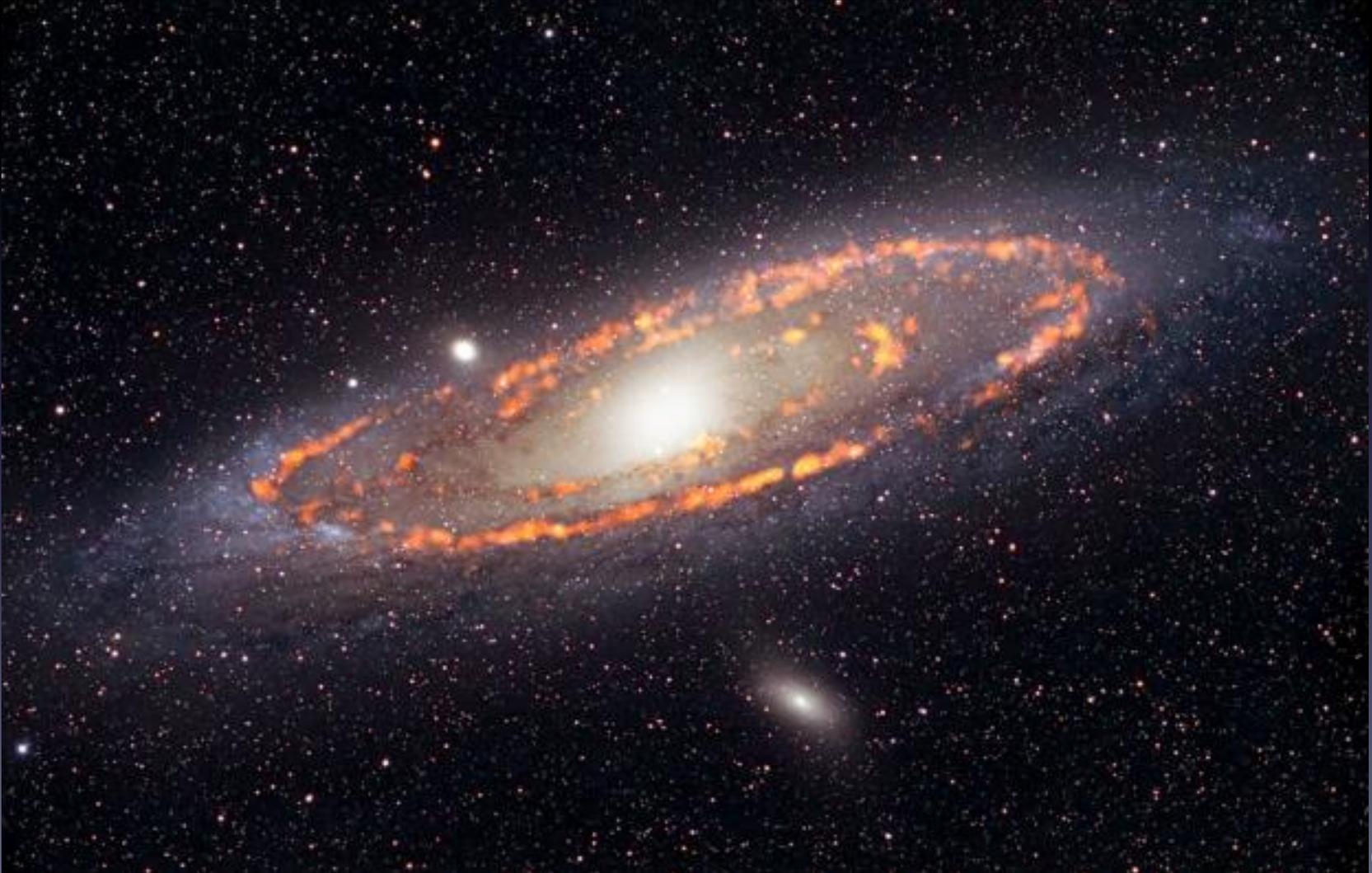
(Rots et al.)

L'HYDROGÈNE NEUTRE (HI) DANS M 101 (Sc) s'étend beaucoup plus loin que les étoiles



Isocontours à 21 cm de la galaxie spirale M 101
superposés sur l'image optique

Andromède en lumière visible (noir et blanc) et en CO (en orange)



Observation du gaz ionisé

On observe le gaz ionisé dans le domaine visible, ultraviolet ou infrarouge par ses raies d'émission

Les raies d'émission peuvent être détectées :

- en spectroscopie
- en imagerie à l'aide d'un filtre à bande passante étroite qui ne laisse passer que la lumière dont la longueur d'onde correspond à la raie

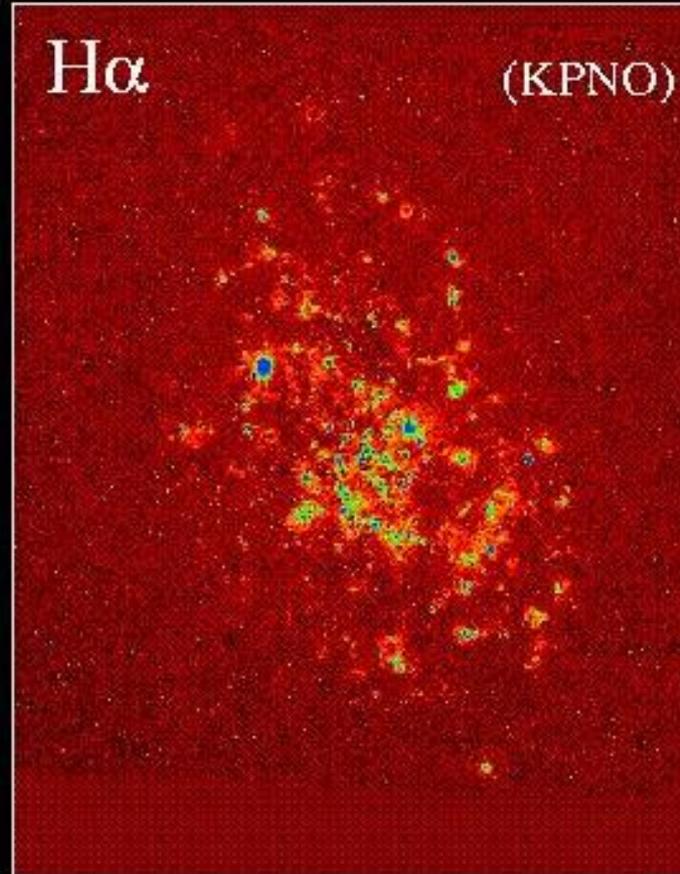
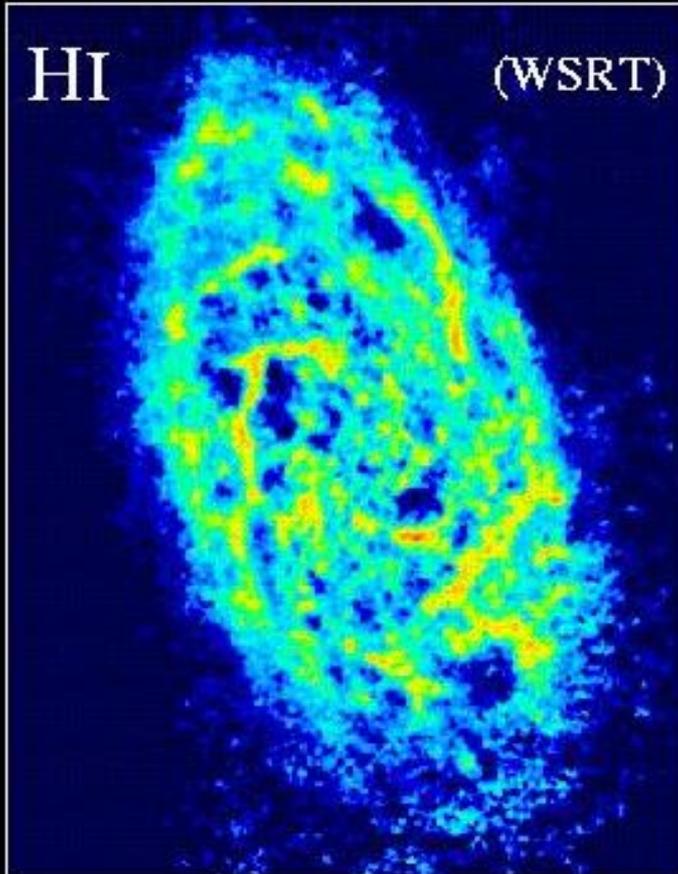
Il faut alors soustraire la contribution du rayonnement continu pour n'avoir plus que l'émission dans la raie

L'image dans le continu est obtenue avec un filtre n'incluant aucune raie d'émission (sinon on fait une correction)

Le gaz ionisé : H α

Comparaison HI / H α

M 33



Modes d'ionisation du gaz

- Le gaz peut être ionisé :
 - par le rayonnement ultraviolet émis par des étoiles chaudes (régions HII)
 - par le rayonnement ultraviolet émis par le noyau actif
 - par des ondes de choc (provoquées par ex. par des interactions de galaxies)
- Selon le type d'ionisation dominant, les rapports d'intensités des raies d'émission sont différents

Les poussières

Dans les images en lumière visible, on peut voir un obscurcissement de certaines régions dû aux poussières

Des images en lumière infrarouge permettent de mettre en évidence la distribution des poussières

On peut tracer les régions de formation d'étoiles grâce aux poussières, qui sont chauffées par le rayonnement des étoiles jeunes et réémettent en infrarouge (par exemple à $24\ \mu\text{m}$ – satellite Spitzer)

MESSIER 104

Type Sa

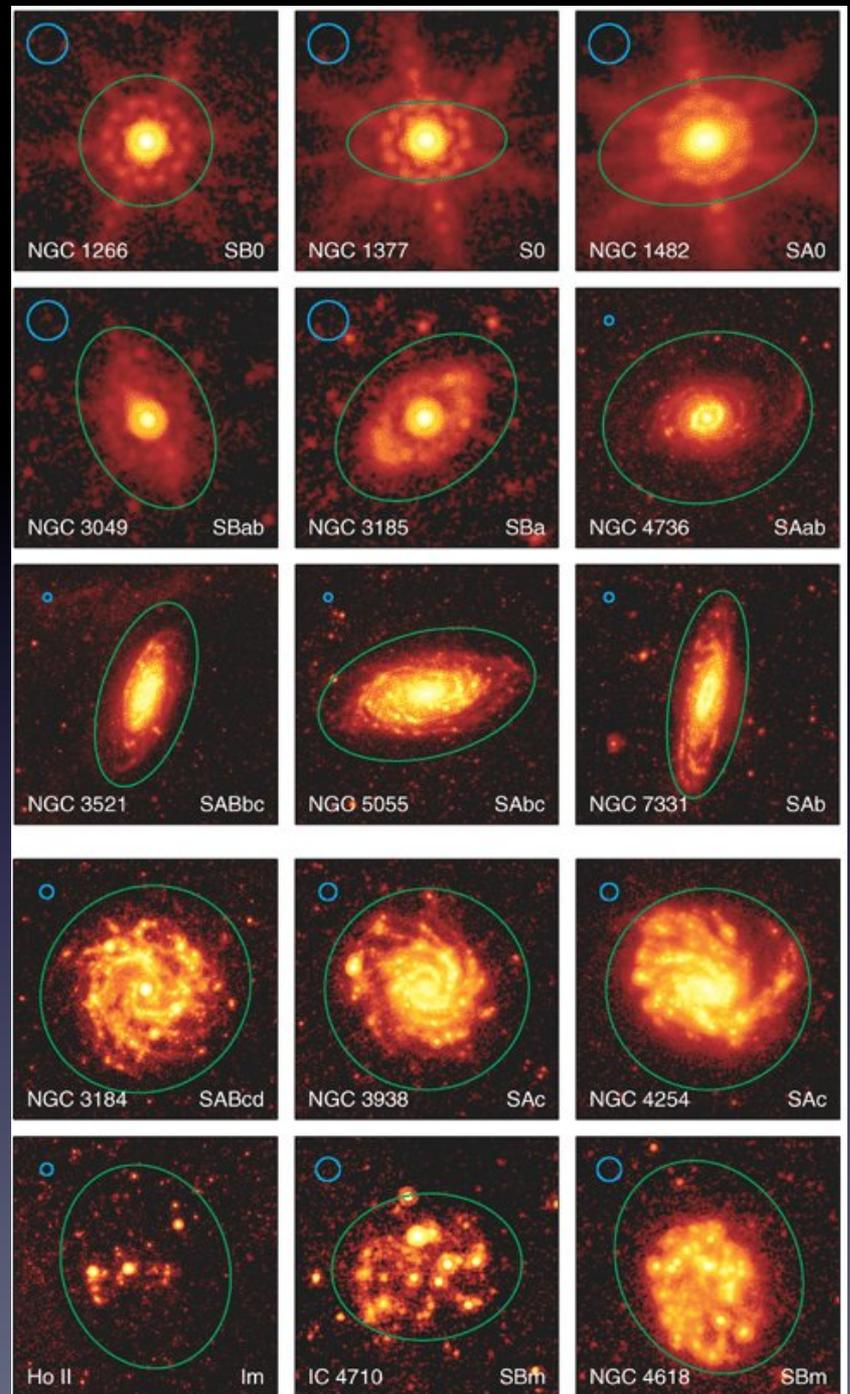


bande de
poussières

Galaxies de divers types
cartographiées à 24 μm
par Spitzer

Bendo et al. (2007)

MNRAS 380, 1313



Les poussières (suite)

Plus la longueur d'onde d'observation est grande, plus les poussières que l'on détecte sont froides
(corps noir)

Les poussières sont principalement constituées de silicates et de graphite (diamètre moyen de l'ordre de $0.5 \mu\text{m}$)

Les galaxies à noyau actif ou AGN (Active Galactic Nuclei)

- Définition : galaxies possédant en leur centre une région très brillante et très compacte
- Les AGN sont le siège de phénomènes énergétiques très intenses

Historique

- Première mention par Fath (1909) ?
- Slipher (1917) : raies d'émission intenses dans le spectre de NGC 1068
- Hubble (1926) : idem plus NGC 4051 et NGC 4151
- Seyfert (1943) : raies d'émission de haute excitation dans les spectres, raies de l'hydrogène souvent plus larges que les autres
- Woltjer (1959) : noyaux non résolus 1-100 pc et largeur des raies larges implique masse centrale $10^{10} M_{\text{solaire}}$ si matière gravitationnellement liée

Schmidt (1963) découvre le quasar 3C 273

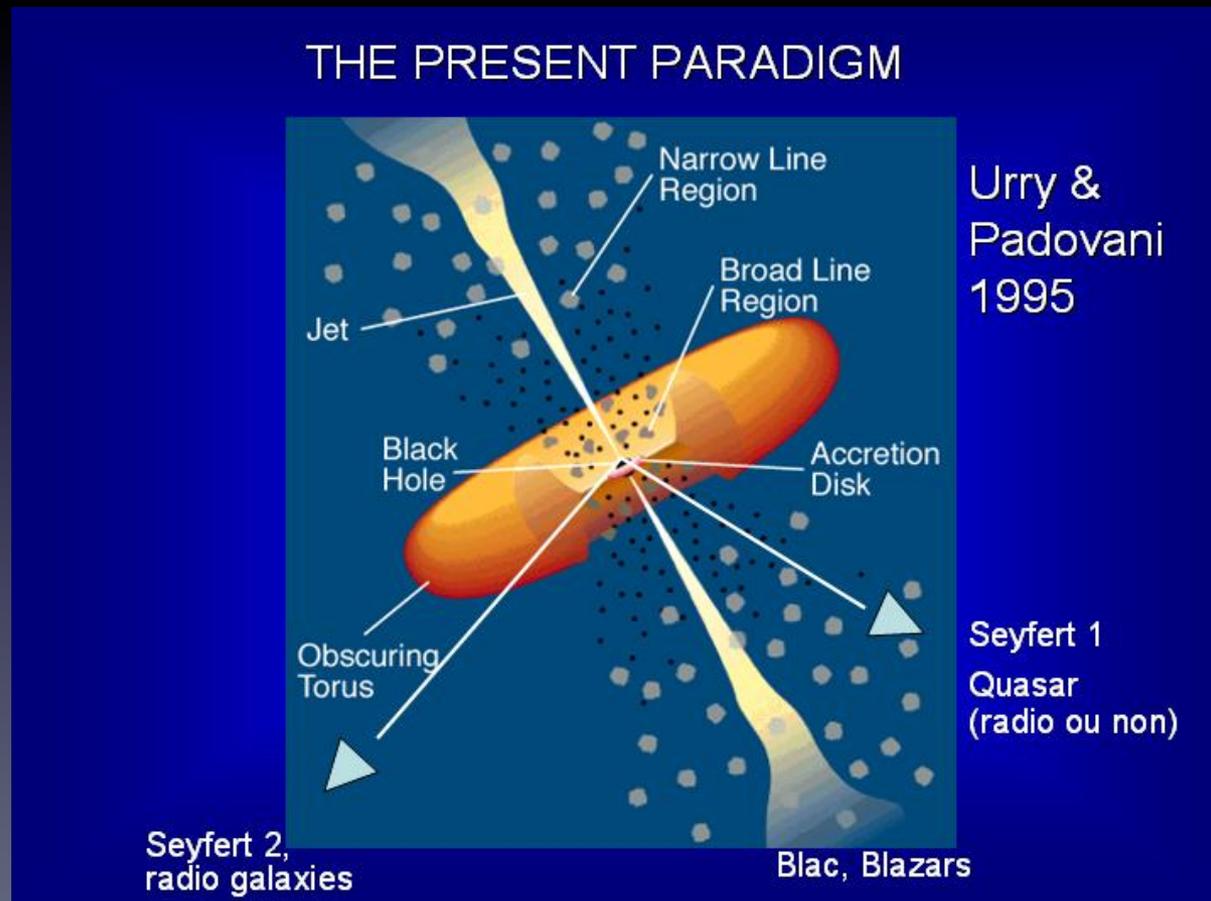
- aspect stellaire
- magnitude ~ 13
- raies de Balmer à $z=0.158$
- d'où magnitude absolue ~ -26.7 (environ 10 fois plus brillante que les galaxies les plus brillantes)

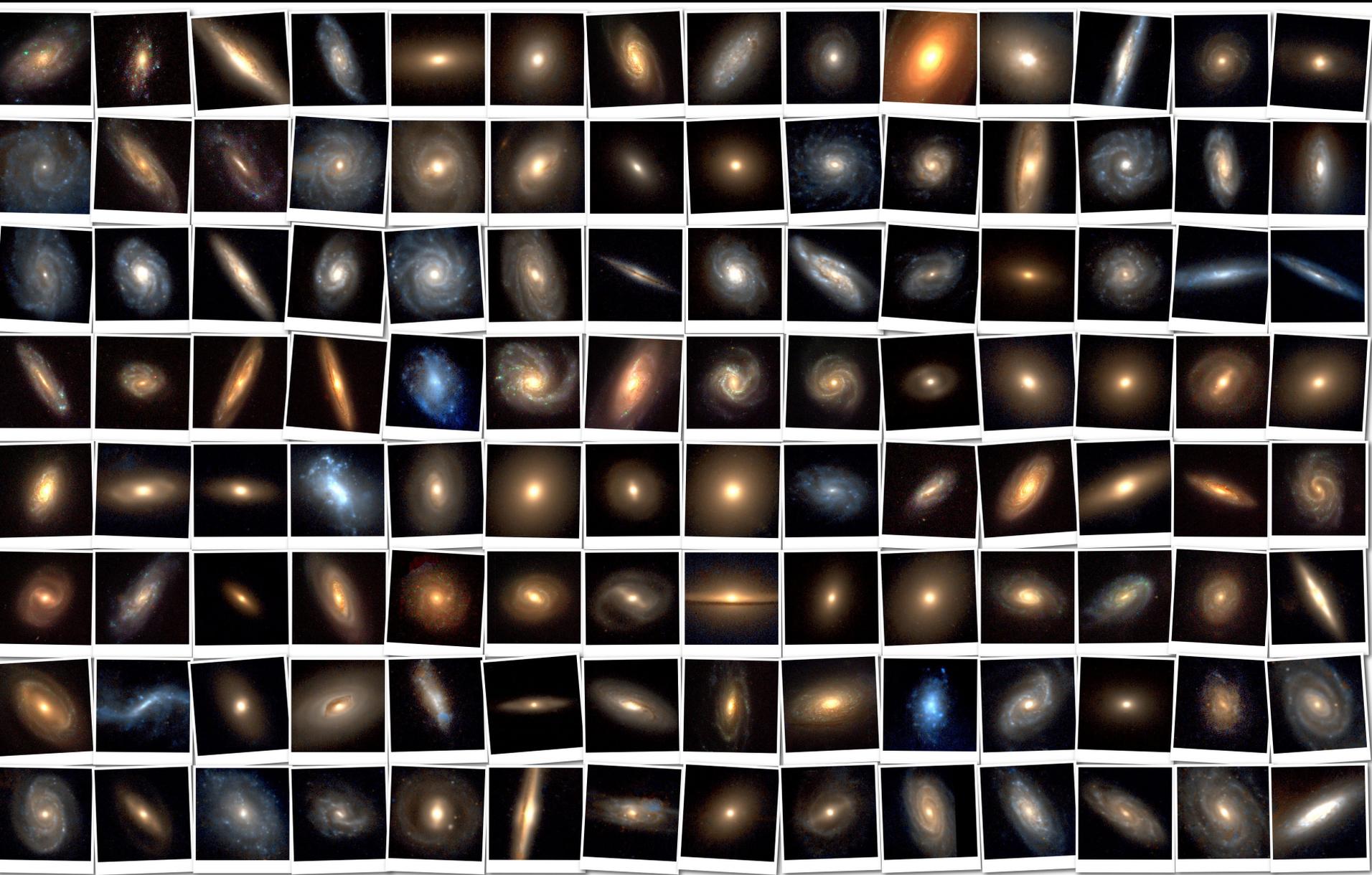
- Les quasars sont les régions centrales de galaxies

- Difficulté d'observer la galaxie sous-jacente

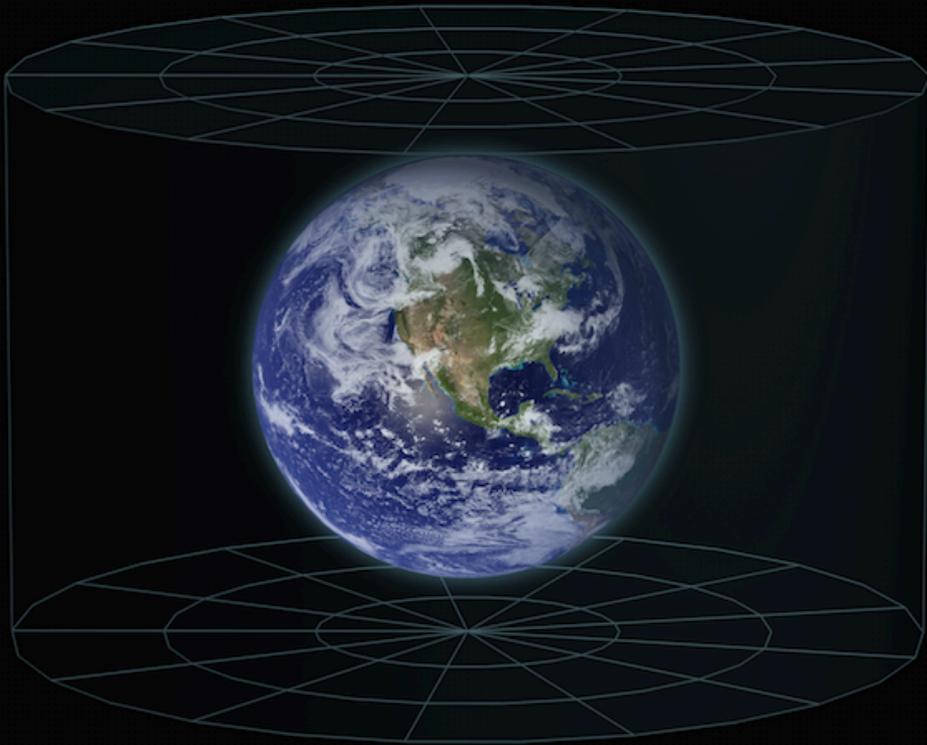
Le modèle « classique »

Trou noir supermassif (10^6 - $10^9 M_{\odot}$) au centre

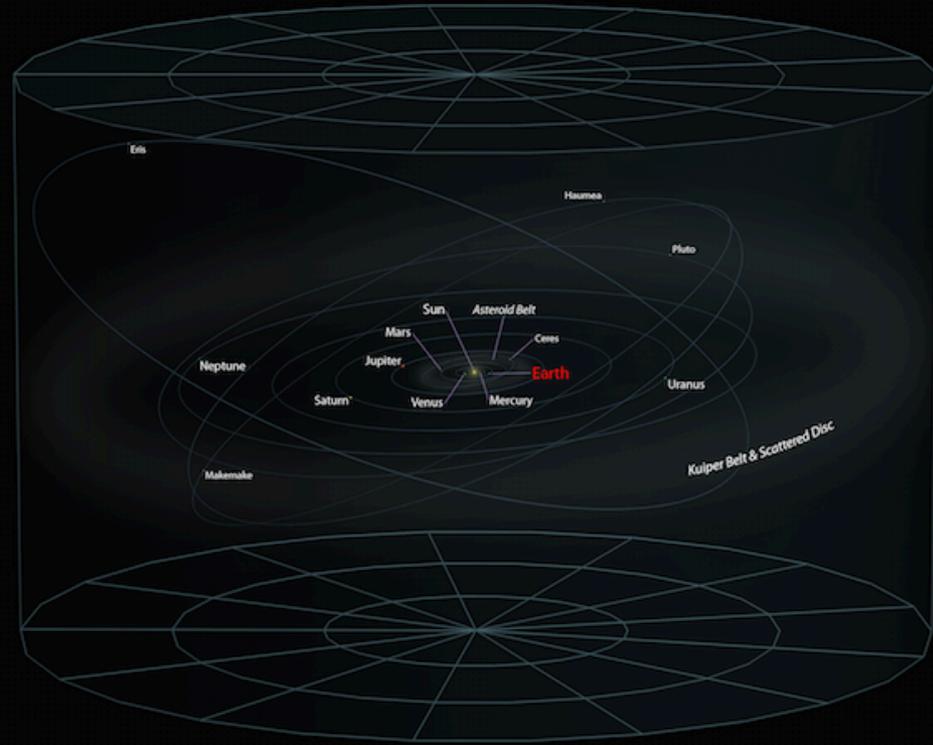




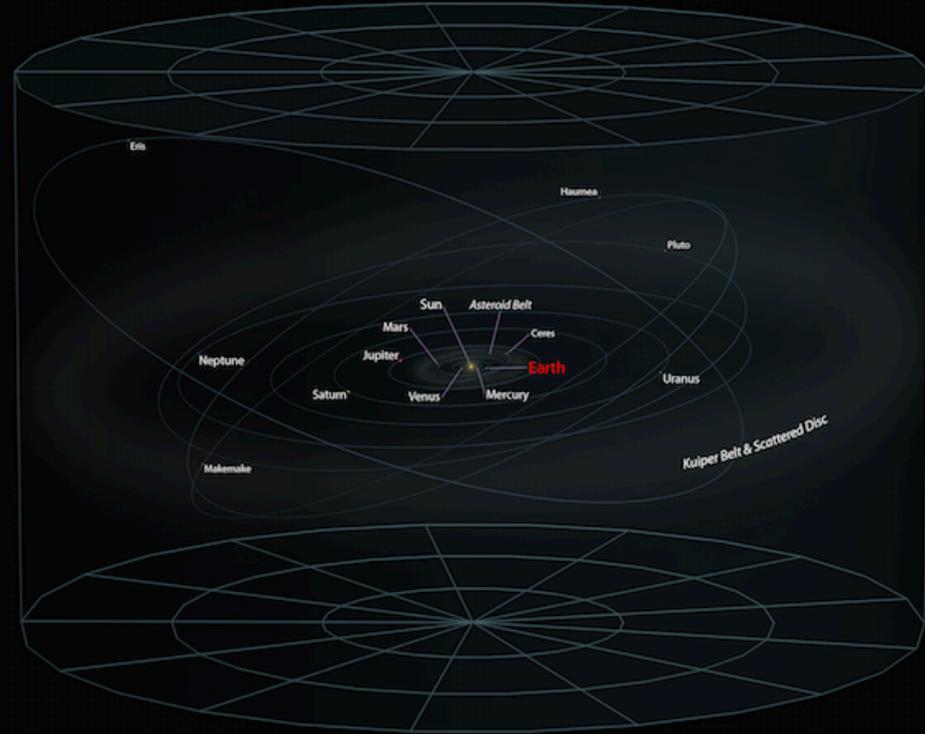
Earth



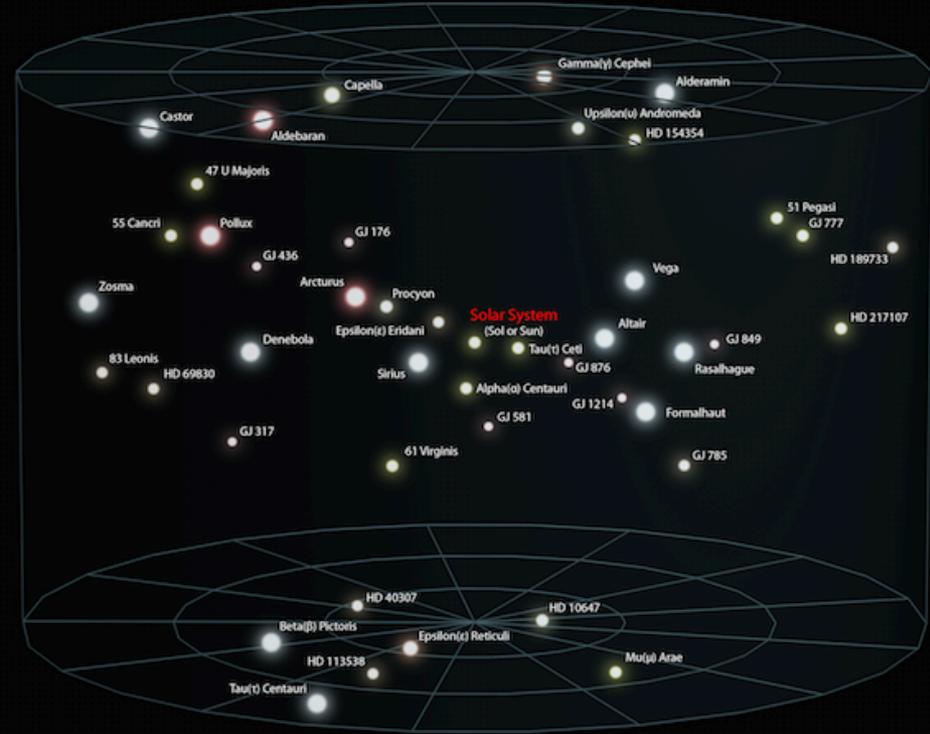
Solar System



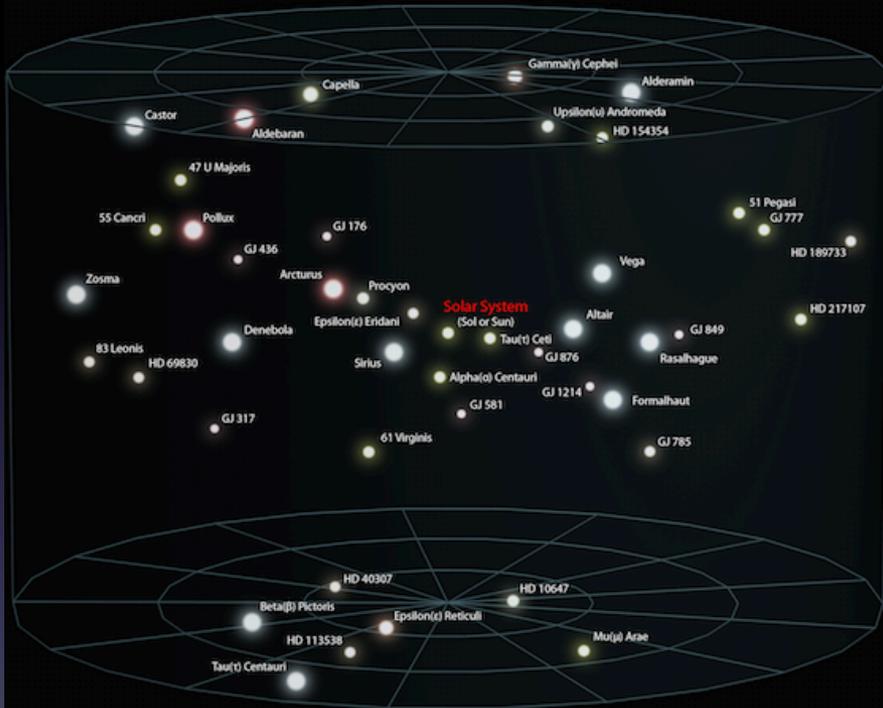
Solar System



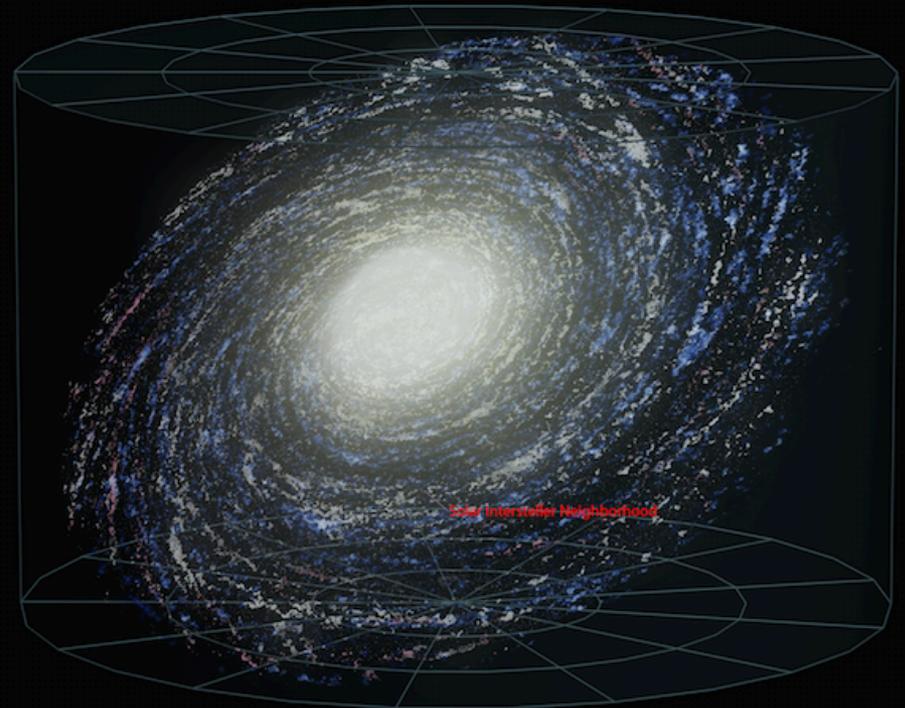
Solar Interstellar Neighborhood



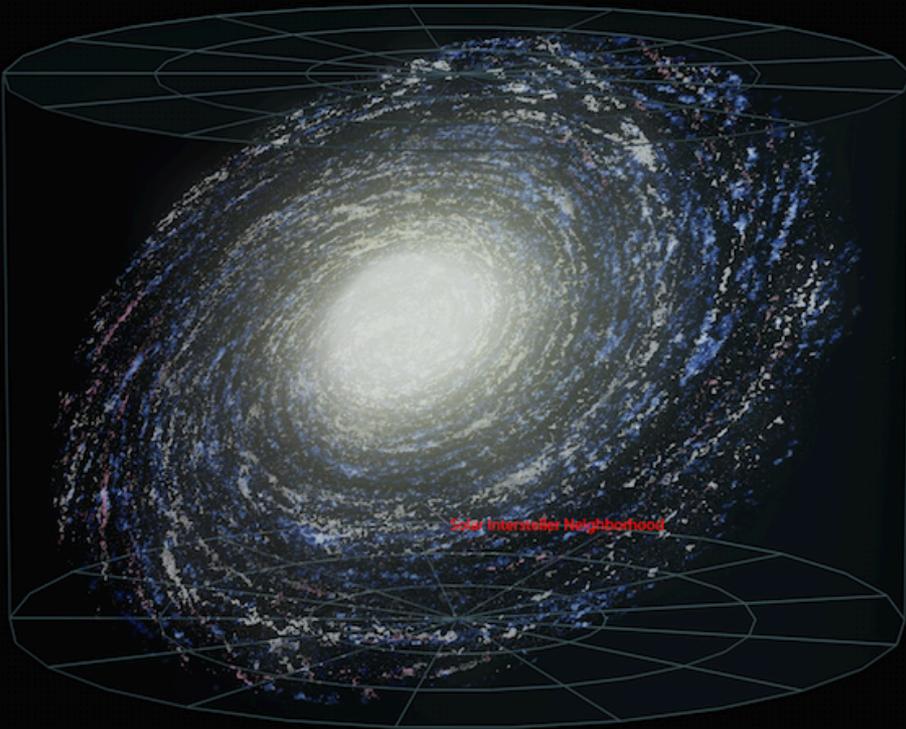
Solar Interstellar Neighborhood



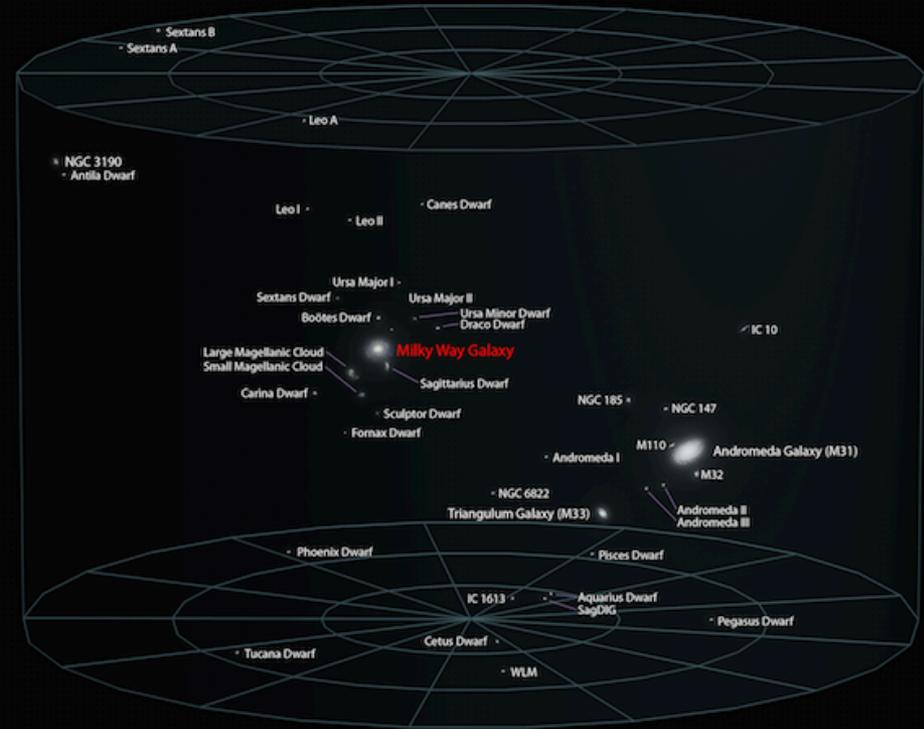
Milky Way Galaxy



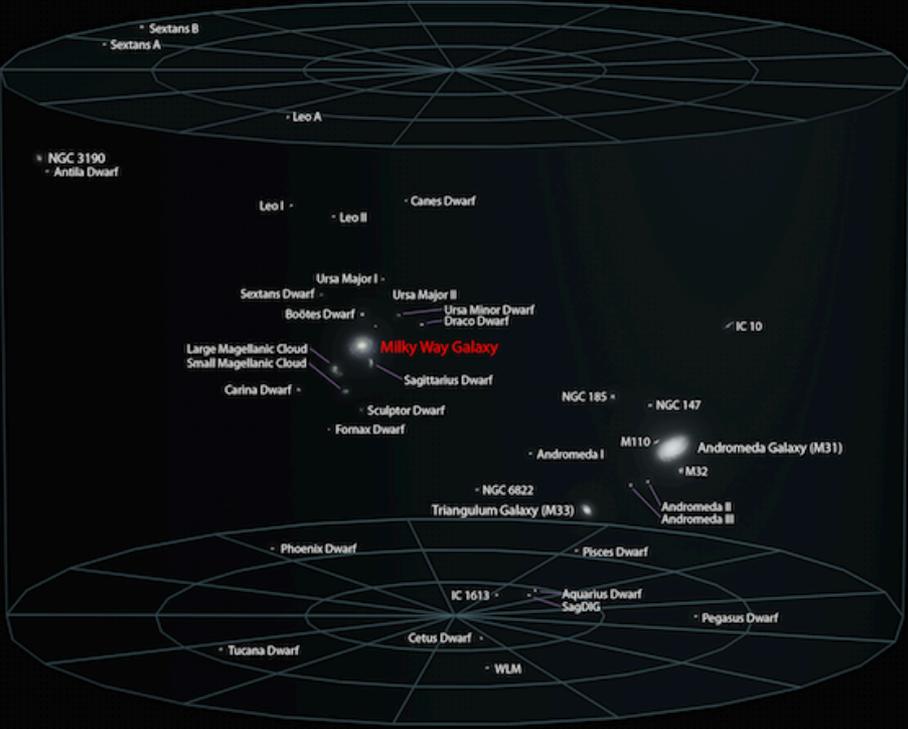
Milky Way Galaxy



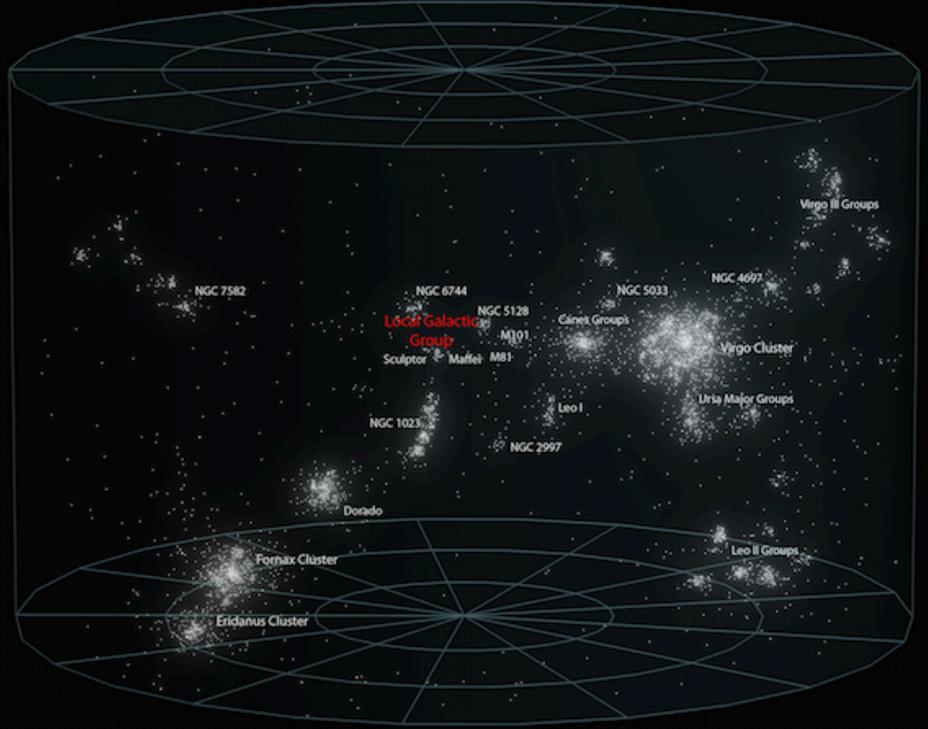
Local Galactic Group



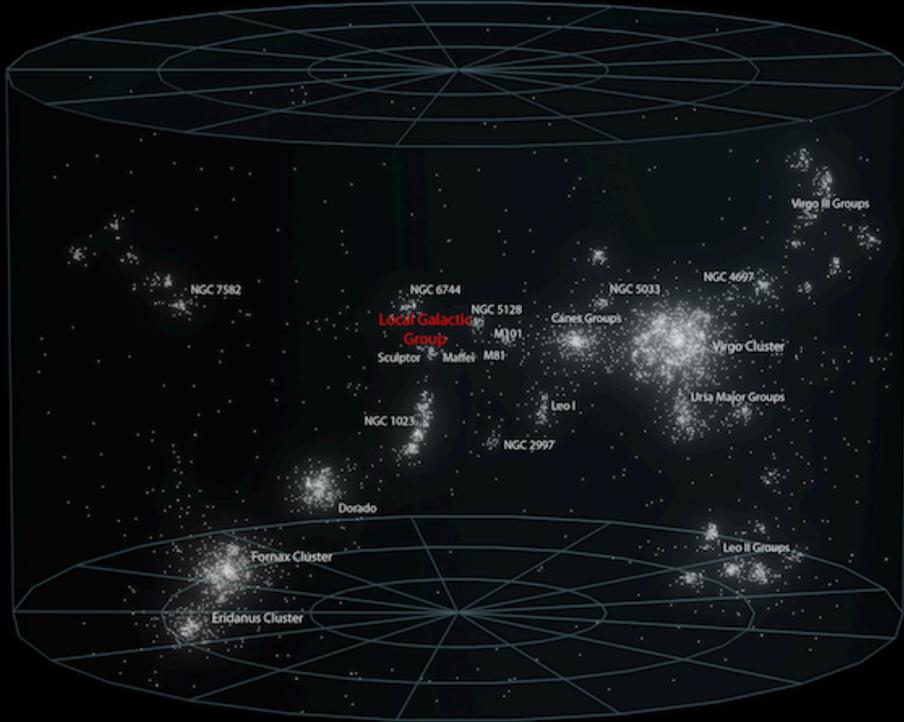
Local Galactic Group



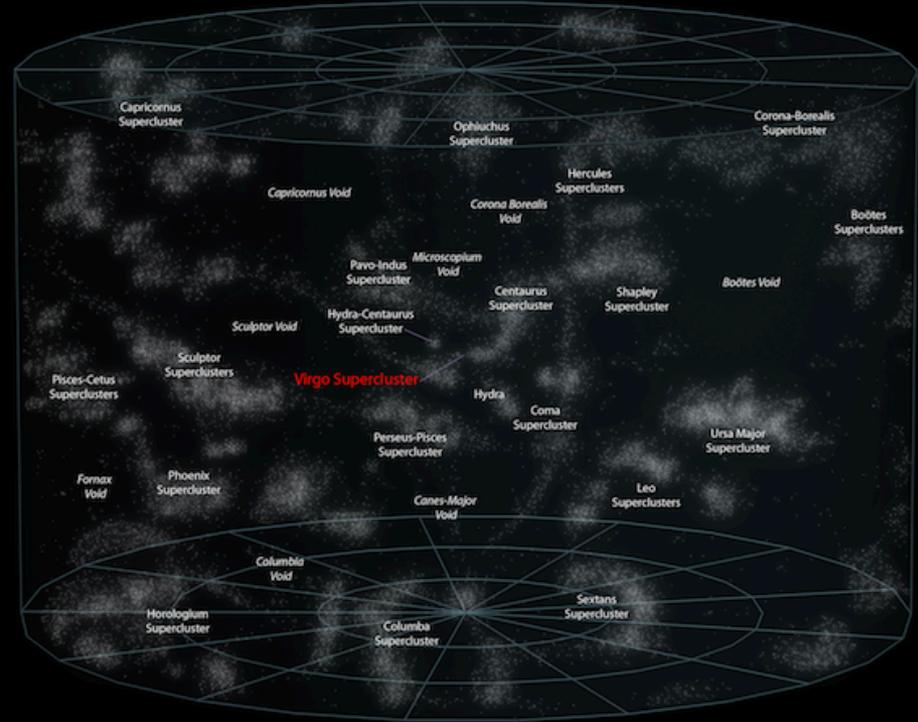
Virgo Supercluster



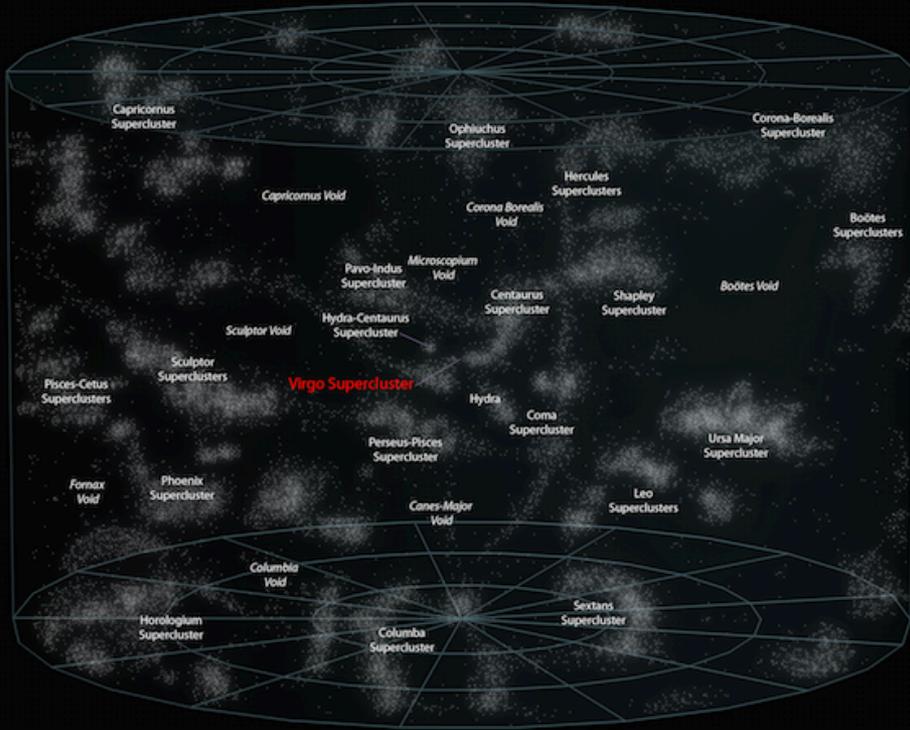
Virgo Supercluster



Local Superclusters



Local Superclusters



Observable Universe

