



**UPMC**  
SORBONNE UNIVERSITÉS

Astronomie, Astrophysique

Observer et comprendre l'Univers

Université inter-âges  
Paris-Sorbonne

Frédéric Daigne, Institut d'Astrophysique de Paris  
Université Pierre et Marie Curie  
Institut Universitaire de France

**Lundi 16 janvier 2012**

**9. Explosions et  
monstres cosmiques :  
suite & fin**

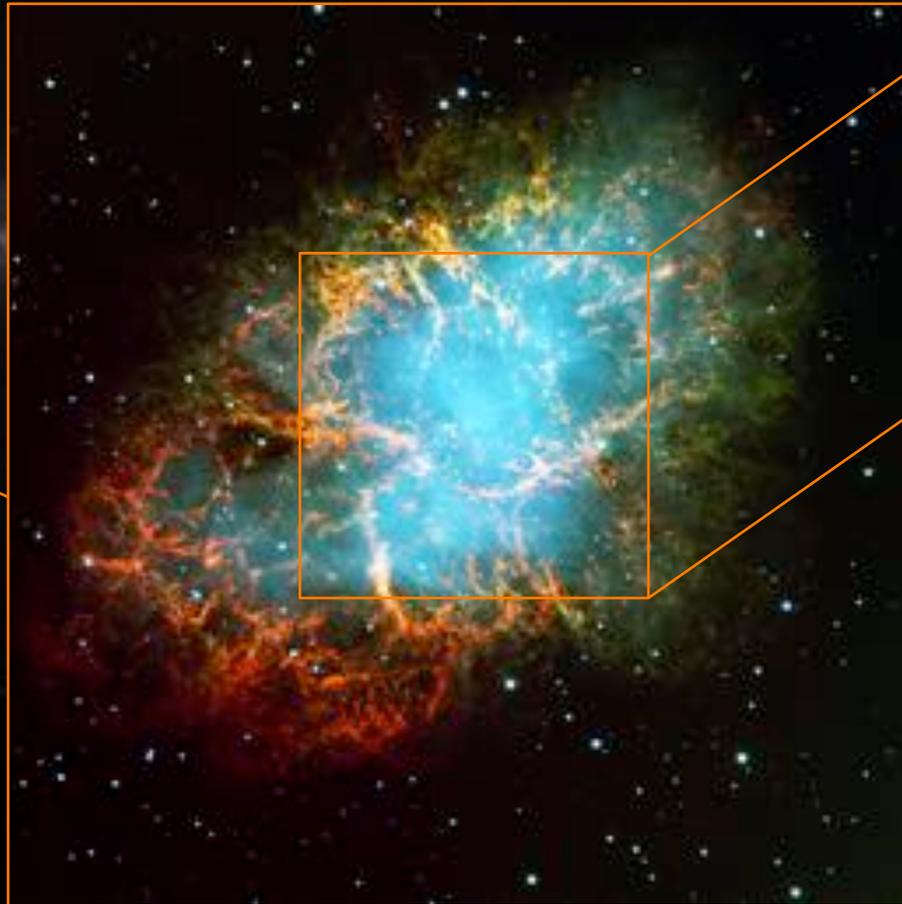
**La Voie Lactée  
et les galaxies proches**

# Explosions & monstres cosmiques: Supernovae, étoiles à neutrons, Trous noirs



# Explosions & monstres cosmiques: Supernovae, étoiles à neutrons, Trous noirs

La nébuleuse du Crabe  
à 6 300 années lumière (ESO-VLT)



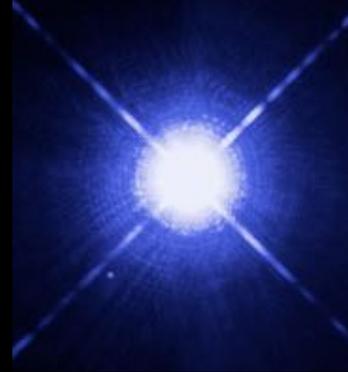
Rayons X (Chandra)

# Rappels du cours n°7

Les objets compacts apparaissent comme le stade final de l'évolution stellaire:

- Les étoiles jusqu'à  $\sim 8-9 M_{\text{Soleil}}$  deviennent des naines blanches

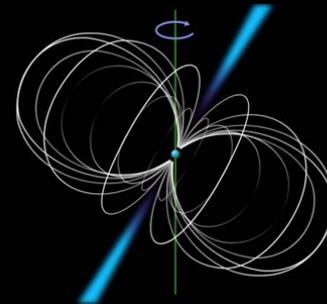
- Une étoile de la taille d'une planète !
- Naine blanche isolée : on observe le rayonnement thermique de la surface, comme pour une étoile « normale ».



- Les étoiles plus massives deviennent des étoiles à neutrons ou des trous noirs

- Étoiles à neutrons :

- Une étoile de la taille d'une grande ville !
- Étoile à neutrons isolée: rayonnement de surface très difficile à détecter



- Phénomène de pulsar (rotation rapide + champ magnétique intense)

- Objet compact + compagnon : phénomène d'accrétion

- Beaucoup d'énergie est libérée : sources brillantes
- Explosions thermonucléaires à la surface de l'objet compact : novae (naine blanche) et sursauts X (étoiles à neutrons)



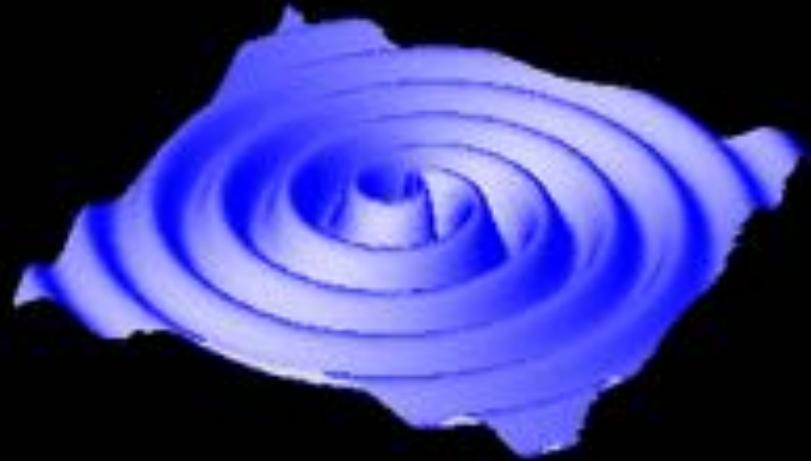
# Rappels du cours n°7

La destruction d'un objet compact est un phénomène extrêmement violent :

- Destruction thermonucléaire d'une naine blanche : supernova de type Ia (explosions très brillantes, utilisées en cosmologie)
- Coalescence de deux étoiles à neutrons: forte perturbation de l'espace-temps (sources attendues d'ondes gravitationnelles)



Une SN Ia dans la galaxie NGC 5584 (VLT)



La naissance des étoiles à neutrons à la fin de la vie d'une étoile massive s'accompagne aussi d'une explosion très violente : une supernova de type II.

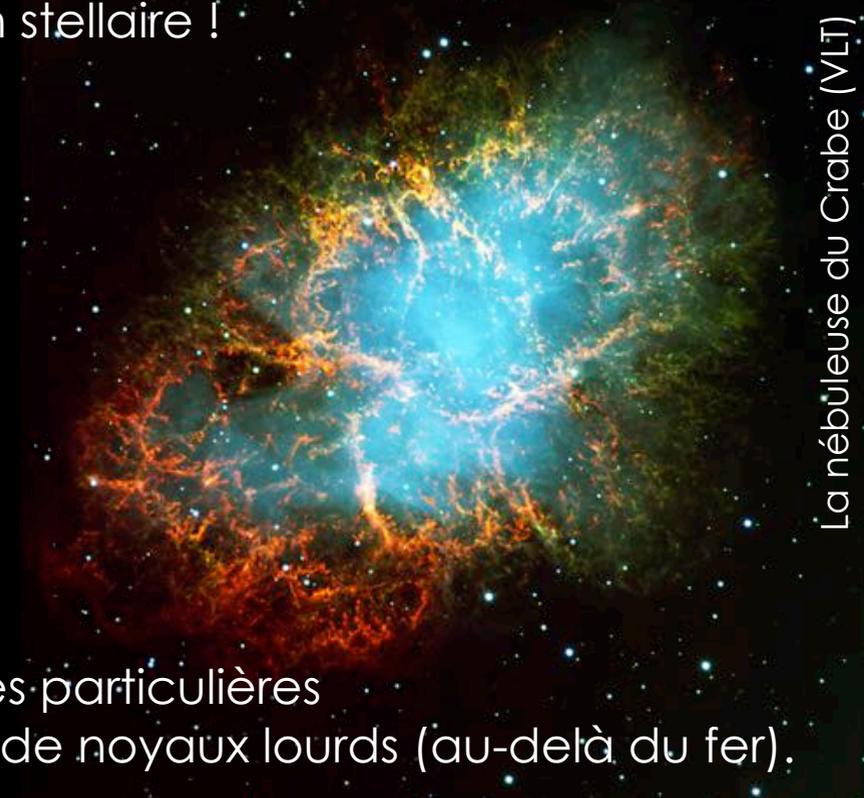
# Rappels du cours n°7

Les supernovae sont parmi les événements astronomiques les plus spectaculaires

- Supernovae « historiques » (cf. cours n°7)
- Le terme « nova » est inventé par Tycho Brahé pour SN 1572
- Le terme « supernova » est proposé par Baade & Zwicky en 1931 lorsqu'on comprend que certaines novae sont extragalactiques, et donc beaucoup plus lumineuses.
- SN1987A dans le grand nuage de Magellan : observation de neutrinos et validation du scénario général de l'évolution stellaire !

Le mécanisme théorique est compris dans les grandes lignes, mais les détails résistent : la physique mise en jeu est très complexe

- Le cœur de l'étoile massive qui s'effondre devient une étoile à neutrons
- Le reste de l'étoile est éjecté à grande vitesse dans le milieu interstellaire
- Nucléosynthèse explosive : les conditions très particulières dans les supernovae permettent la synthèse de noyaux lourds (au-delà du fer).

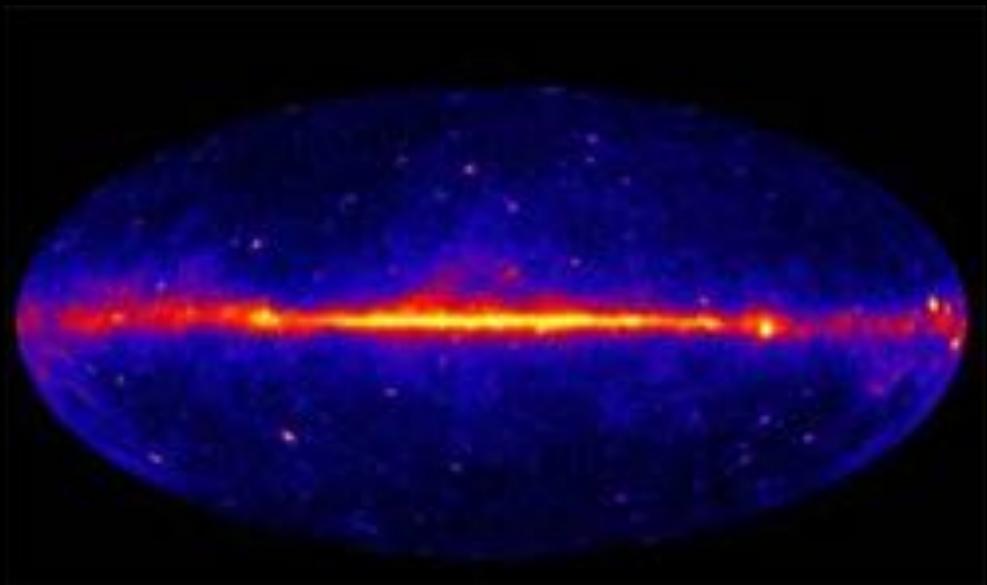
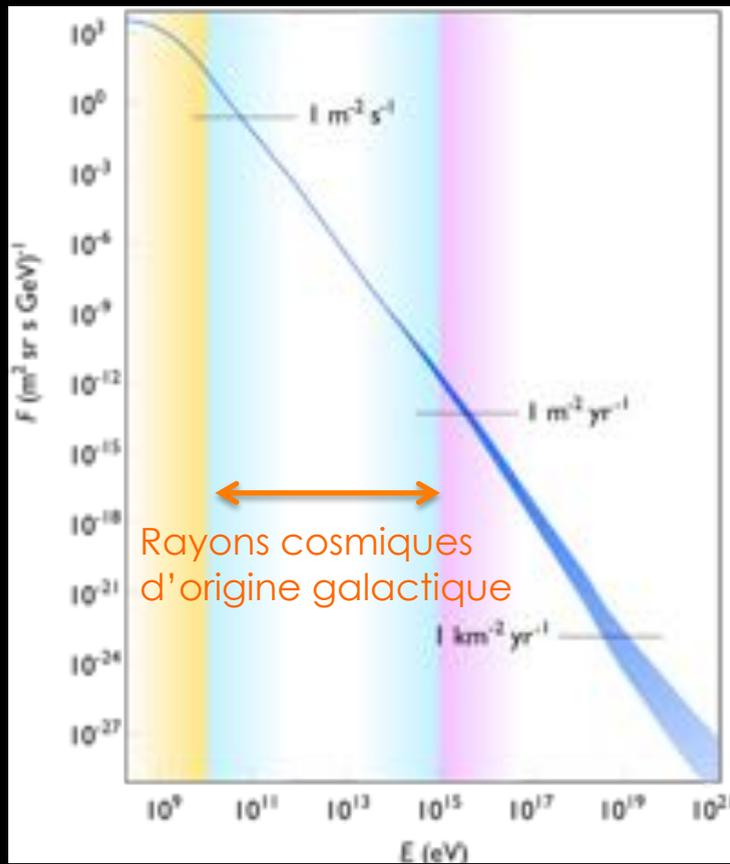


La nébuleuse du Crabe (VLT)

# Le rayonnement cosmique

Nous savons depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle que la Terre est bombardée en permanence par des particules chargées (noyaux) de grande énergie : le rayonnement cosmique.

- L'origine cosmique a été démontrée par les mesures en ballon de V. Hess
- La majorité de ce rayonnement est d'origine galactique. Ces particules sont sans doute accélérées dans les restes de supernovae (suggestion de Baade & Zwicky en 1934 – mécanisme d'accélération proposé par Fermi en 1949)



Le ciel gamma observé par Fermi : l'émission diffuse de la Galaxie est due à l'interaction du rayonnement cosmique et du milieu interstellaire (cf. cours n°8)

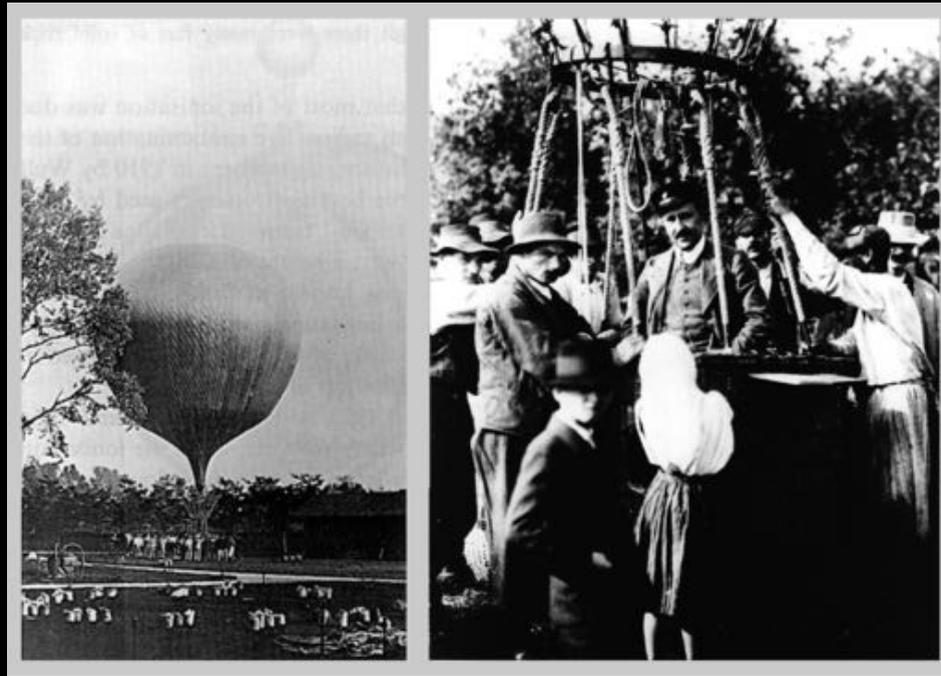
# Les prix Nobel de l'astrophysique...

Prix Nobel de Physique 1936 :



« for his discovery of cosmic radiation »

(même année : Carl David Anderson "for his discovery of the positron" )

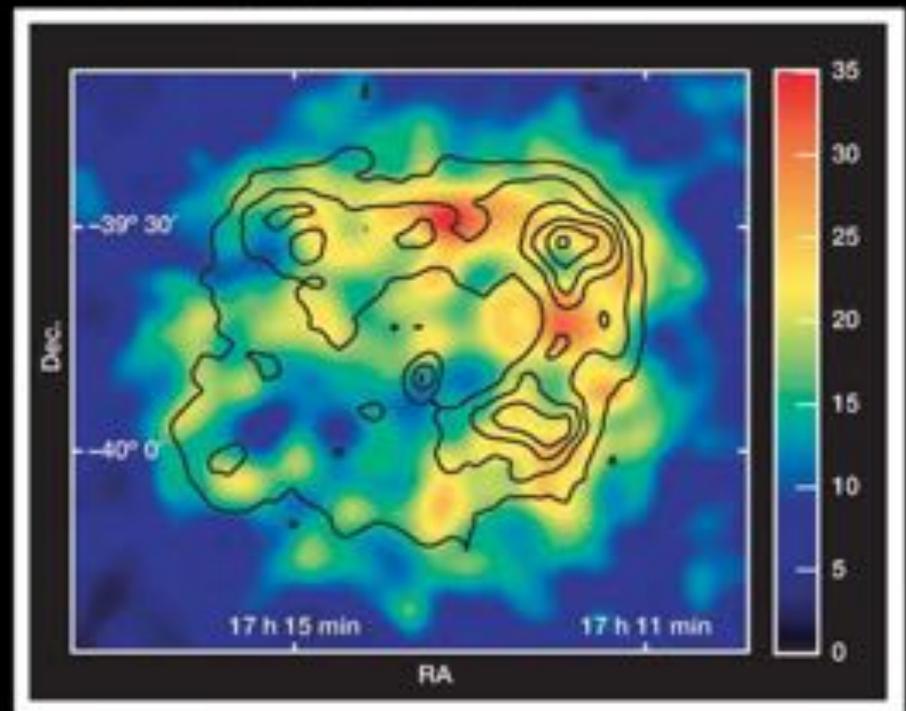
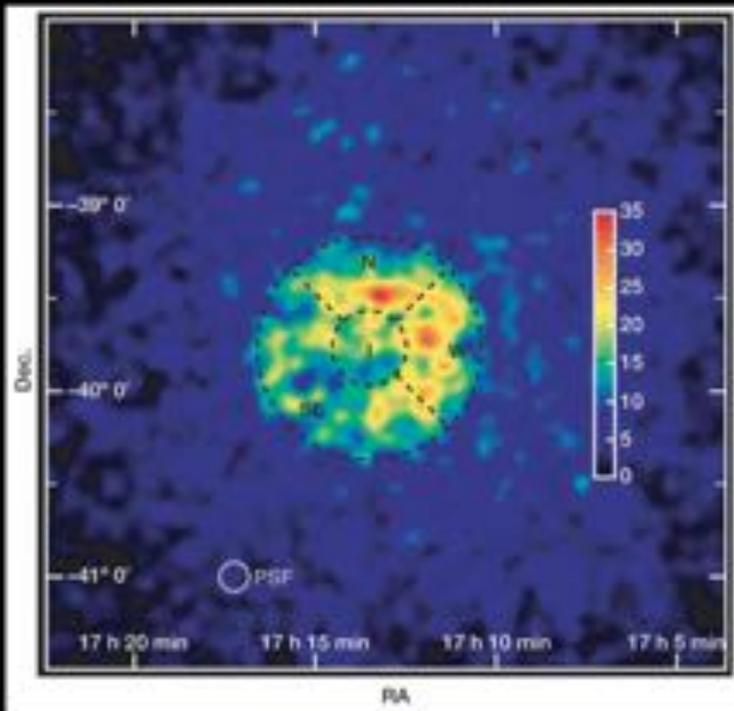


Victor Franz Hess

# Le rayonnement cosmique

Les rayons cosmiques galactiques sont très certainement accélérés dans les restes de supernovae. Cependant, la démonstration observationnelle de cette origine reste difficile

**Un reste de supernova jeune (RX J1713.7-3946) :**  
émission au TeV détectée par HESS  
(des particules de très haute énergie sont accélérées dans les SNRs).



# Le rayonnement cosmique

- Les rayons cosmiques sont à l'origine de la synthèse des éléments légers Li, Be et B dans le milieu interstellaire : nucléosynthèse spallative.
  - Mécanisme : les noyaux très énergétiques du rayonnement cosmique viennent casser des noyaux (Carbone par exemple) présents dans le milieu interstellaire. Les fragments forment Li, Be et B.
  - Les étoiles sont donc de manière directe ou indirecte à l'origine de la synthèse de la majorité des éléments chimiques :
    - Nucléosynthèse stellaire (du carbone au fer)
    - Nucléosynthèse explosive (noyaux lourds, il y a d'autres mécanismes aussi associées aux étoiles dans certaines phases très particulières)
    - Nucléosynthèse spallative (noyaux légers LiBeB)
- Restent les deux éléments les plus simples, H & He, qui sont produits lors de la nucléosynthèse primordiale (➔ cours n°11).

# Les trous noirs

- Les étoiles à neutrons ont une masse maximum (valeur exacte difficile à calculer : 2 à 3  $M_{\text{Soleil}}$ ).
- Objets encore plus denses: rien ne peut s'opposer à la gravité, on forme un trou noir.
- Concept de trou noir : Mitchell & Laplace au XVIII<sup>ème</sup> siècle (cadre Newtonien)

«un corps dont le champ de gravité est si intense que même la lumière ne peut s'en échapper»

- Les trous noirs sont prédits par la relativité générale :

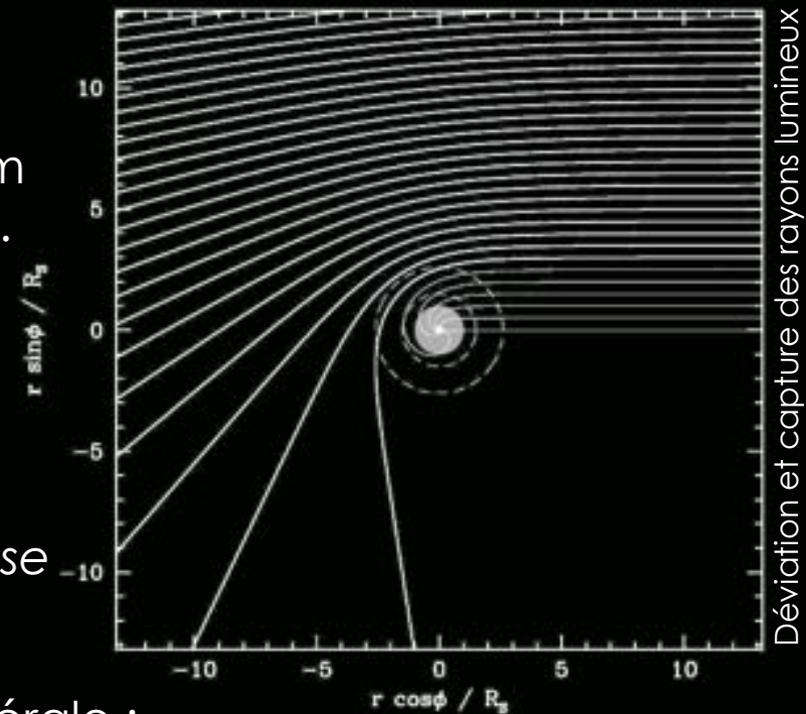
- solution de Schwarzschild en 1915 (trou noir sans rotation)
- solution de Kerr en 1963 (avec rotation)

- Les trous noirs astrophysiques ont été pressentis dès les années 1930 :

« the star apparently has to go on radiating and radiating and contracting and contracting until, I suppose, it gets down to a few kilometers radius when gravity becomes strong enough to hold radiation and the star can at last find peace [...] I think there should be a law of Nature to prevent the star from behaving in this absurd way » (Eddington, 1930).

- Années 1950-1960-1970 : les trous noirs sont surtout une curiosité théorique

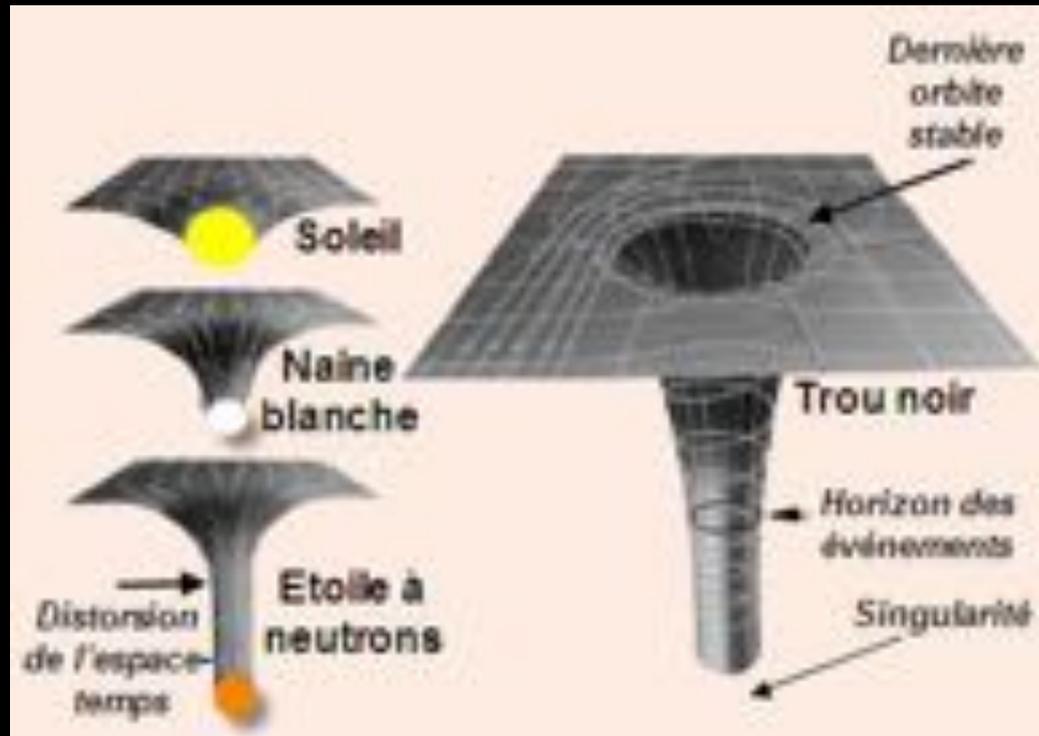
- Début de l'astronomie X (cf. cours n°7) : les trous noirs deviennent (de manière indirecte) observables lorsqu'ils sont accrétants (comme les étoiles à neutrons).



# Les trous noirs

Les trous noirs sont les plus exotiques des objets compacts

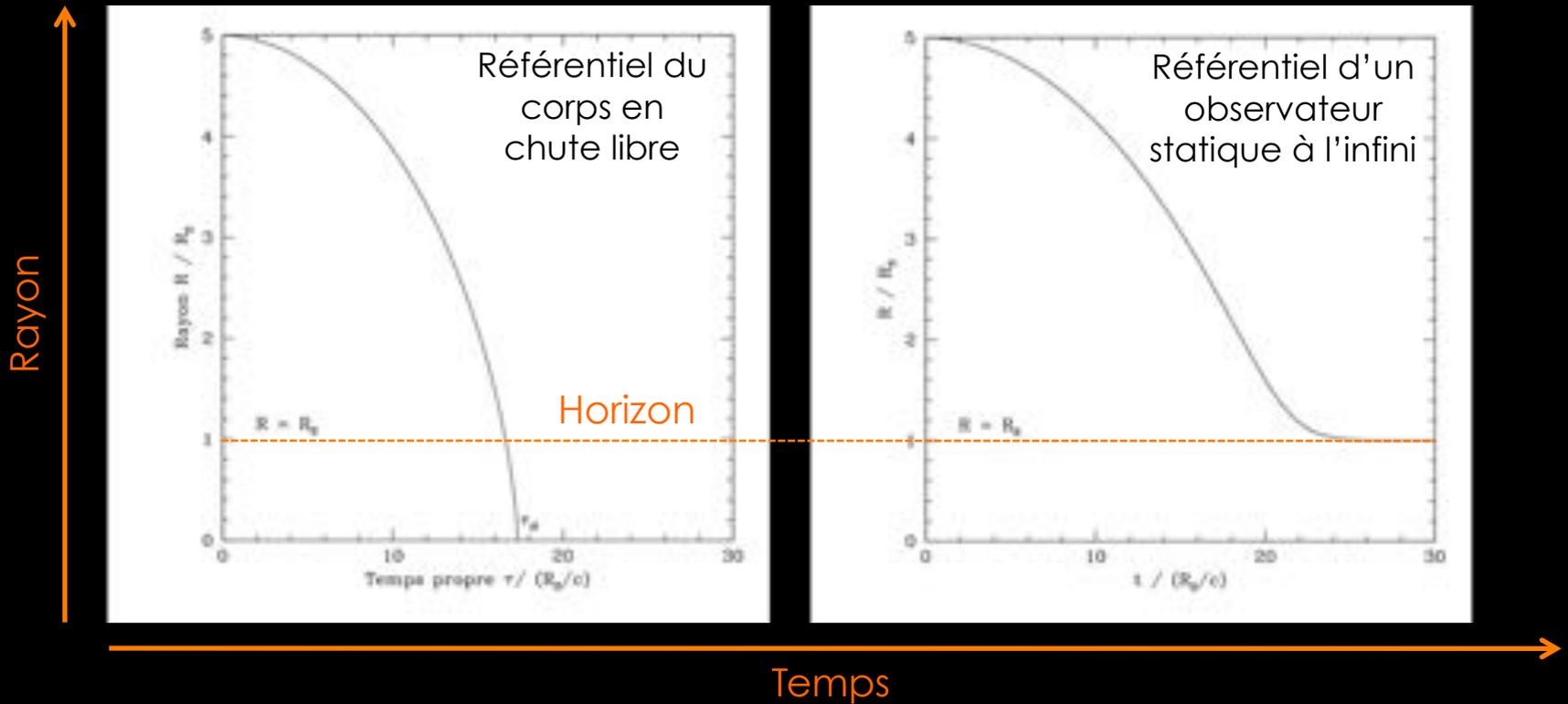
- Toute la masse est concentrée au centre, virtuellement en un point (la mécanique quantique laisse pressentir que la masse est concentrée en un volume très petit mais fini)
- Le trou noir est séparé du reste de l'Univers par un horizon (même la lumière ne peut le traverser : il n'y a aucun échange d'information possible)
- La taille de l'horizon est proportionnelle à la masse : 9 km pour  $3 M_{\text{Soleil}}$
- Le trou noir ne rayonne pas (en fait, il rayonne un peu à cause de la mécanique quantique, mais ce rayonnement, découvert par Hawking en 1974, est inobservable pour les trous noirs astrophysiques)



# Les trous noirs

Les trous noirs sont les plus exotiques des objets compacts

- La gravité autour du trou noir est tellement forte que l'espace et le temps ne se comportent pas de manière très intuitive...
- Les effets de marée sont encore plus violents que pour une étoile à neutrons
- Chute libre sur un trou noir :

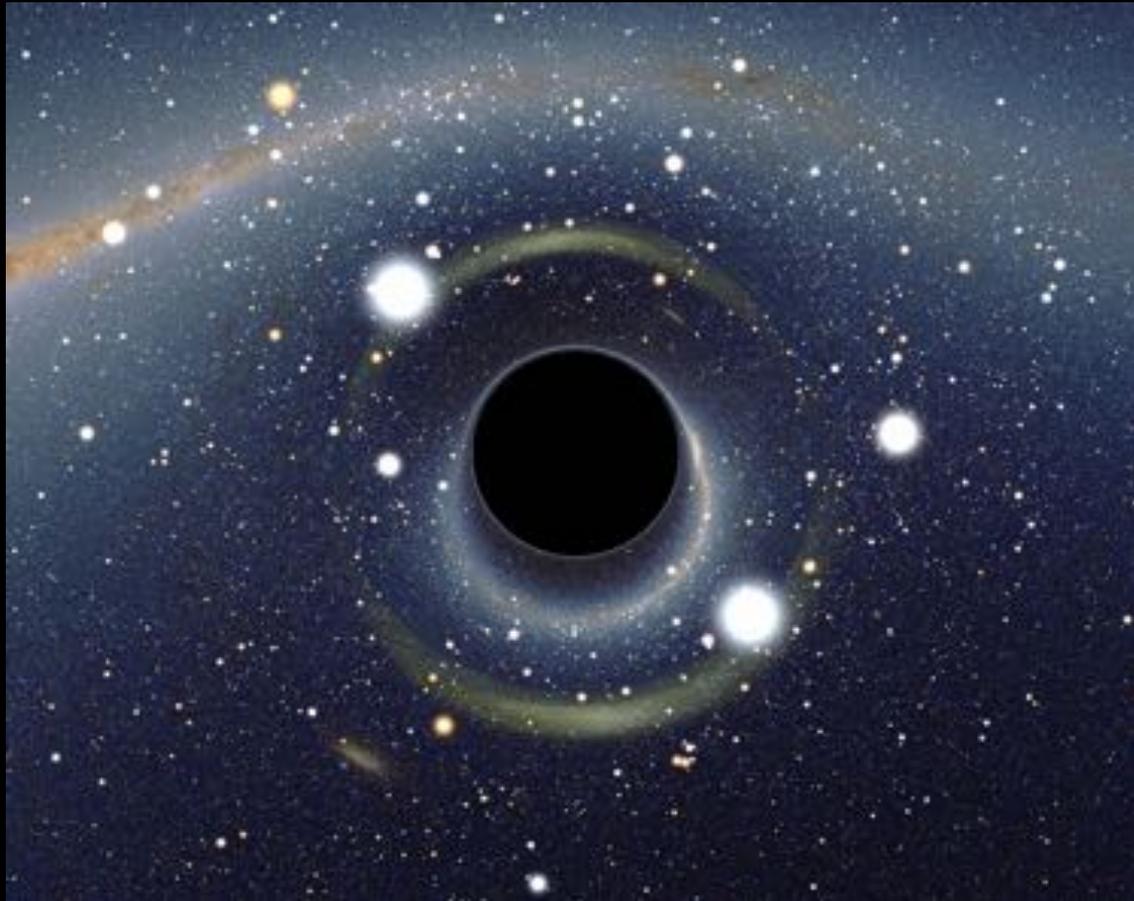


Le corps qui tombe franchit l'horizon sans rien sentir et plonge dans le trou noir qu'il atteint en une durée finie. Un observateur immobile à l'infini ne le voit par contre jamais franchir l'horizon...

# Les trous noirs

Les trous noirs sont les plus exotiques des objets compacts

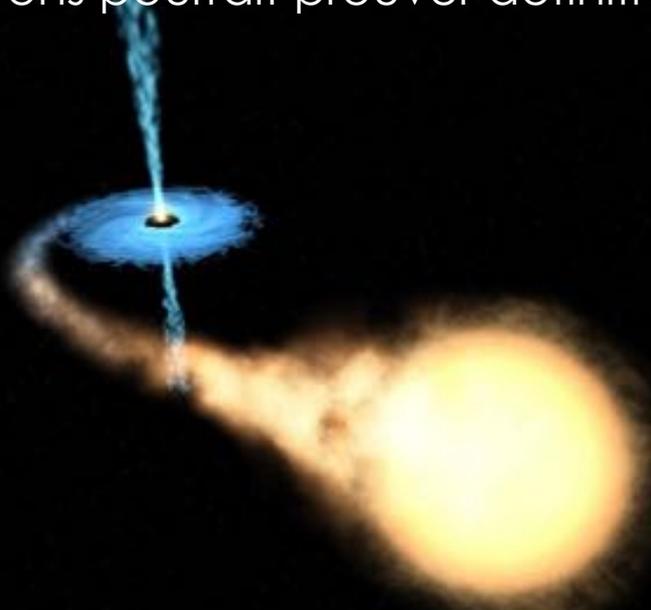
- Simulation numérique de la déformation de l'espace autour d'un trou noir (Riuazelo, IAP). L'observateur est supposé situé à neuf fois le rayon du trou noir. Le trou noir est placé dans la direction du grand nuage de Magellan.



# Les trous noirs

Les trous noirs sont les plus exotiques des objets compacts

- Les étoiles les plus massives s'effondrent en trous noirs de masse stellaire
- Les trous noirs accrétants sont – comme pour les étoiles à neutrons – des sources très brillantes (en rayons X). Dans certains cas, le système éjecte de la matière à des vitesses proches de la vitesse de la lumière (microquasar).
- L'observation des binaires X prouve indirectement l'existence des trous noirs. Par exemple, l'objet central de Cygnus-X1 a une masse de  $8,7 M_{\text{soleil}}$ , très supérieure à la masse maximum d'une étoile à neutrons.
- Le signal d'ondes gravitationnelles lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons pourrait prouver définitivement la formation d'un trou noir.



Vue d'artiste d'une binaire X de type « microquasar »

Cygnus X1 (Chandra)

# Résumé du cours n°7

Les objets compacts (naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs) sont le produit ultime de l'évolution stellaire. Ce sont des objets aux propriétés très exotiques : leur description physique fait intervenir la mécanique quantique (matière ultra-dense) et la relativité générale (champ gravitationnel intense).

Ils offrent des laboratoires uniques pour tester la physique en régime extrême.

A l'exception des naines blanches, on ne peut facilement détecter le rayonnement direct des objets compacts. Par contre, on détecte facilement les objets compacts qui accrètent la matière d'un compagnon, car l'énergie libérée est colossale.

Dans le cas des étoiles à neutrons, un phénomène supplémentaire les rend aisément détectables : le mécanisme de pulsar.

Les supernovae sont parmi les phénomènes astronomiques les plus brillants et les plus spectaculaires : les supernovae de type Ia sont des explosions thermonucléaires de naines blanches, les autres sont des explosions d'étoiles massives suite à l'effondrement du cœur en étoile à neutrons.

Les sursauts gamma apparaissent comme un cas extrême d'explosion stellaire : de la matière est éjectée à une vitesse très proche de celle de la lumière.

Les explosions les plus brillantes peuvent être utilisées pour explorer l'Univers lointain et faire de la cosmologie (→ cours n°10 et 11).

# La Voie Lactée

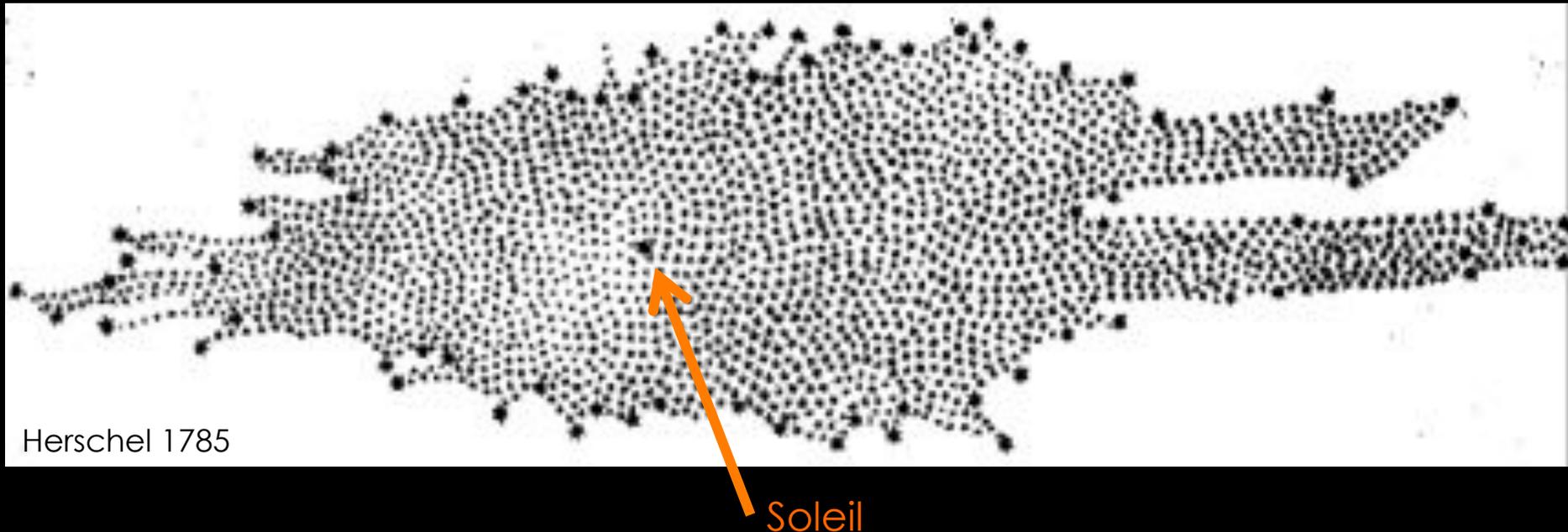
La Voie Lactée, notre Galaxie, a une forme de disque et contient quelques centaines de milliards d'étoiles, dont le Soleil.



La Voie Lactée en Infrarouge : on voit les « petites » étoiles  
(DIRBE 1.25, 2.2, 3.5 mm)

# La Voie Lactée

- La Voie Lactée apparaît comme une bande lumineuse blanchâtre dans le ciel.
- Galilée en 1610 découvre qu'elle est constituée d'un grand nombre d'étoiles.
- On propose assez vite une structure en forme de disque, on met généralement le Soleil au centre... (Wright 1750, Kant 1755, ...)
- En l'absence de mesure de distances des étoiles, reconstruire la structure se révèle très délicat.
- Première tentative « sérieuse » : William Herschel en 1785, à partir de comptage d'étoiles dans les différentes directions du ciel.



# La Voie Lactée

La deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> voit deux progrès majeurs :

- Mesurer la distance d'une étoile devient envisageable (parallaxe, Bessel, 1838)
- La qualité des instruments s'améliore : on découvre des nébuleuses spirales (exemple: Andromède) et d'autres à la forme plus elliptique...
- Un nouveau débat fait jour : l'Univers n'est-il qu'une seule grande Galaxie, ou la Voie Lactée est-elle une galaxie parmi de très nombreuses autres galaxies ?

C'est le *grand débat* des années 1920.



H. Shapley (1885-1972)



H. Curtis (1872-1942)

Arguments complexes : les mesures de distance d'étoiles lointaines en sont à leur balbutiements...

Plusieurs questions centrales : forme de la Voie Lactée, place du Soleil, ...

Shapley est le premier à déterminer que la Voie Lactée est un disque d'environ 100 000 a.l. de rayon et que le Soleil est loin du centre.

« Les nébuleuse spirales sont dans la Voie Lactée »      « Les nébuleuses spirales sont d'autres voies lactées »

# Une Galaxie, des galaxies ?

La génération suivante tranche le débat, grâce aux premiers grands télescopes.

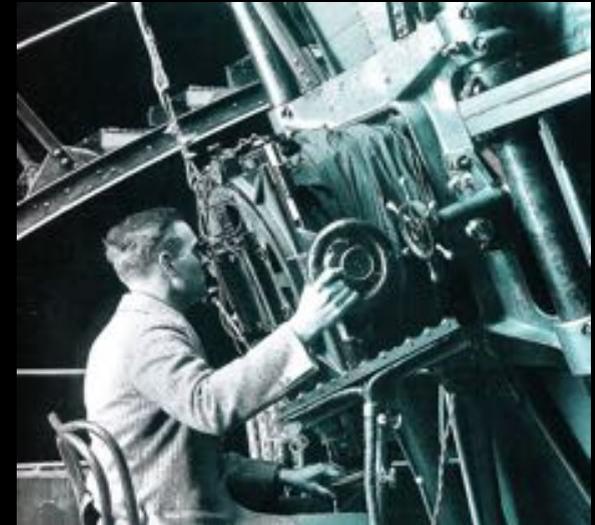
- Slipher, 1914 : mesure de la vitesse de certaines nébuleuses par effet Doppler (décalage vers le rouge) : vitesses trop élevées pour appartenir à la Voie Lactée.
  - Leawitt, 1910-1920 : mise au point d'une méthode de mesure de distance fondée sur les propriétés d'étoiles variables très lumineuses : les céphéides.
  - Hubble, 1920-1930 (télescope Hooker, Mont Wilson, diamètre 2,5m)
    - observation de céphéides dans des nébuleuses spirales (Andromède, ...).
    - distances énormes : plusieurs millions d'années lumière !
- Le débat est tranché : ces nébuleuses spirales sont d'autres structures semblables à la Voie Lactée, d'autres galaxies.



Vesto M. Slipher (1875-1969)



Henrietta S. Leawitt (1868-1921)



Edwin P. Hubble (1889-1953)

# La place du Soleil ?

Au centre... du volume observé uniquement !

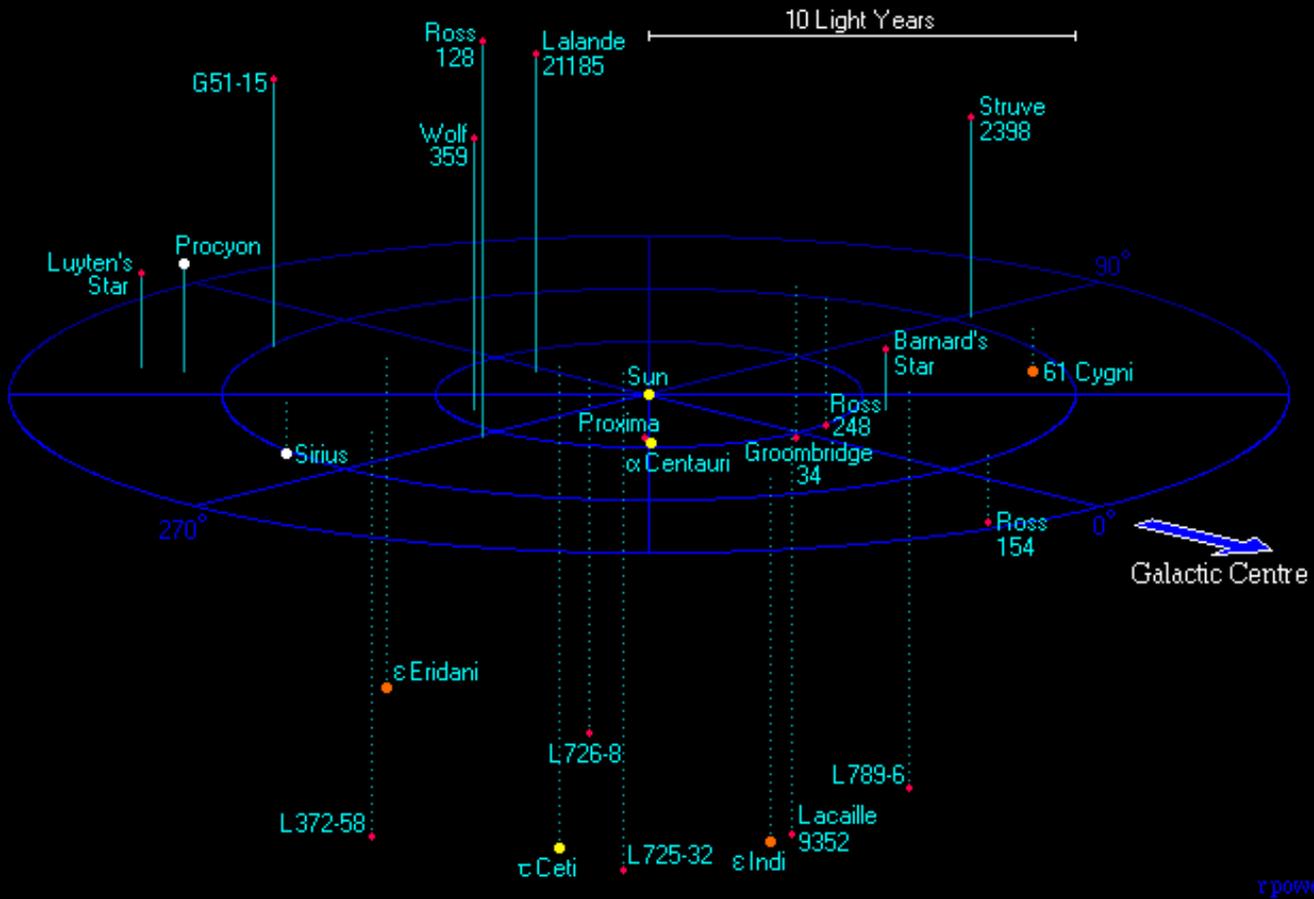


Schéma tiré de l'Atlas de l'Univers de R. Powell :  
<http://www.atlasoftheuniverse.com/>

12,5 années lumière : les étoiles les plus proches

# La place du Soleil ?

Au centre... du volume observé uniquement !

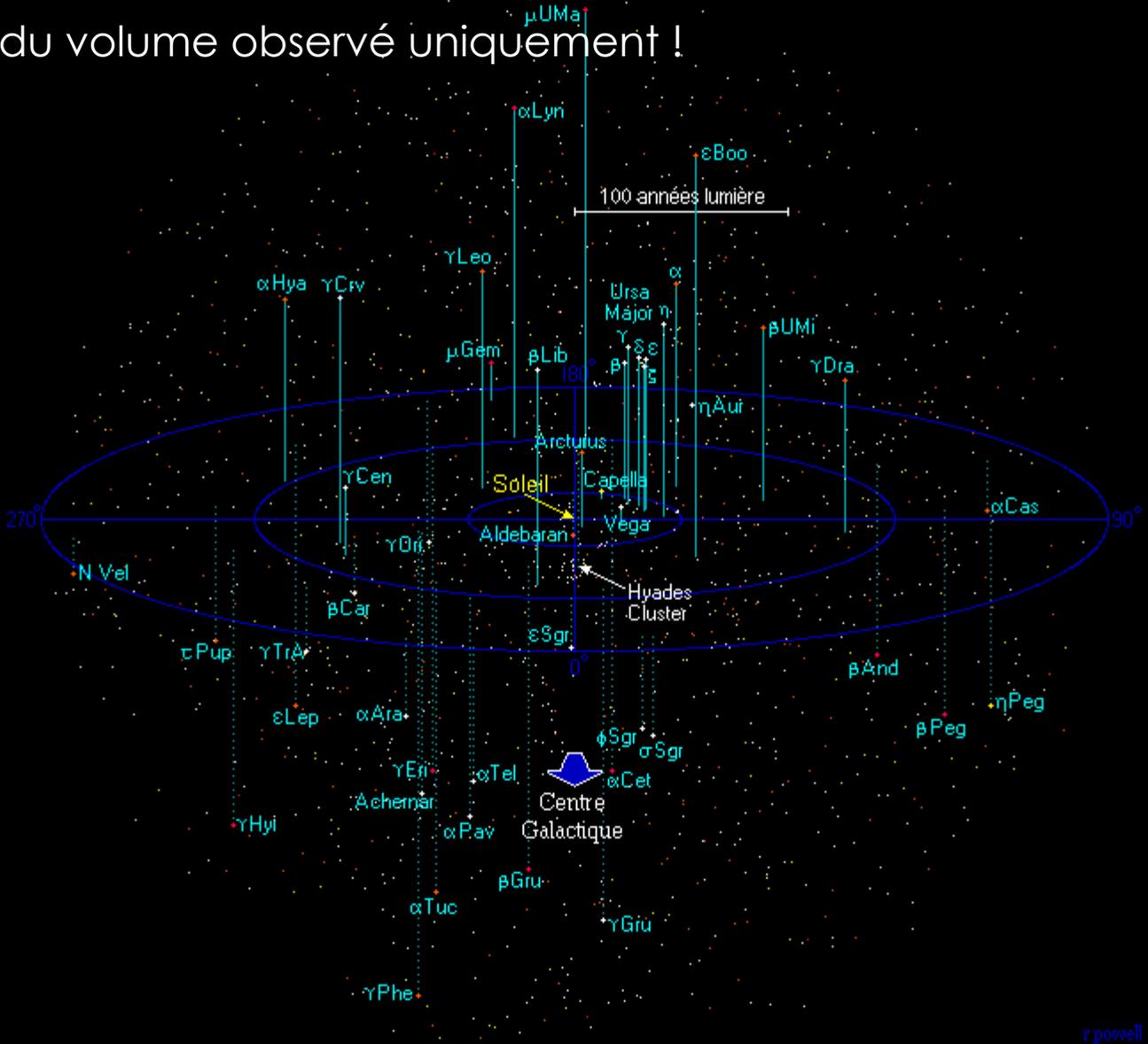


Schéma tiré de l'Atlas de l'Univers de R. Powell :  
<http://www.atlasoftheuniverse.com/>

250 années lumière : le voisinage du Soleil, plusieurs 100 000 étoiles

r powell

# La place du Soleil ?

Au centre... du volume observé uniquement !

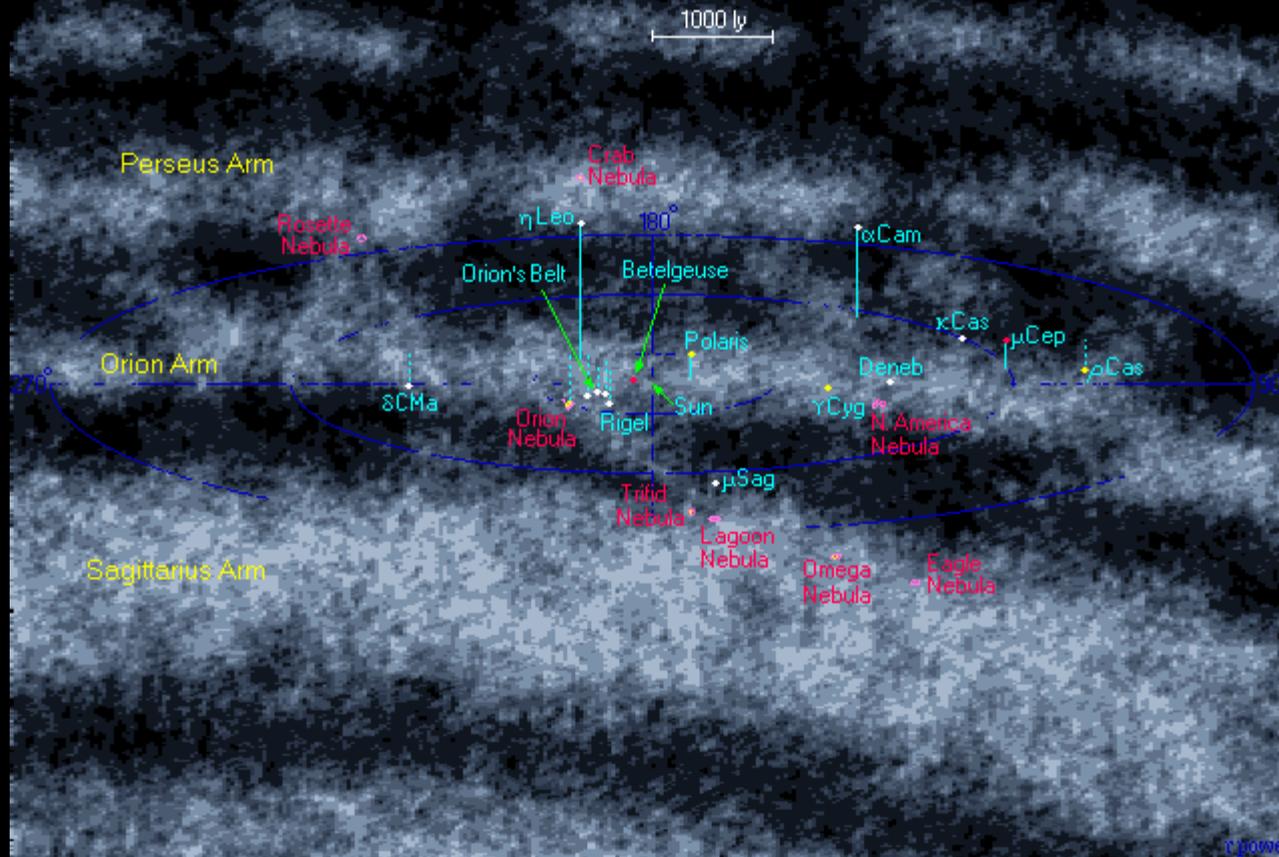
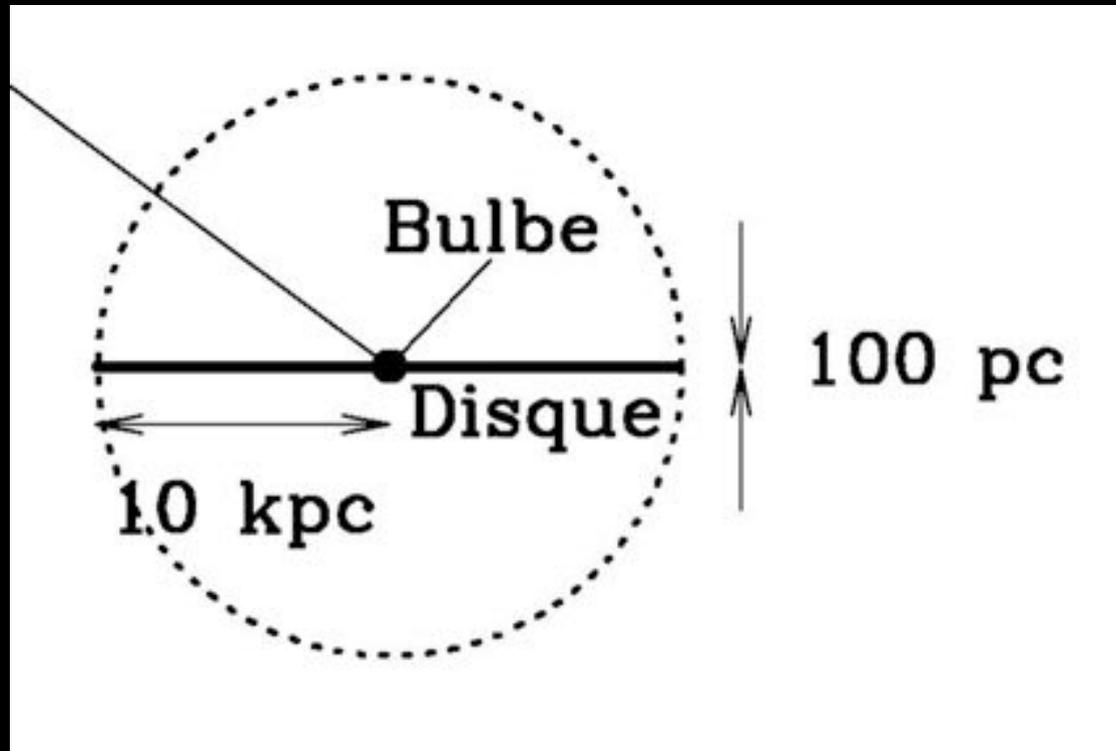


Schéma tiré de l'Atlas de l'Univers de R. Powell :  
<http://www.atlasoftheuniverse.com/>

5000 années lumière : le bras d'Orion

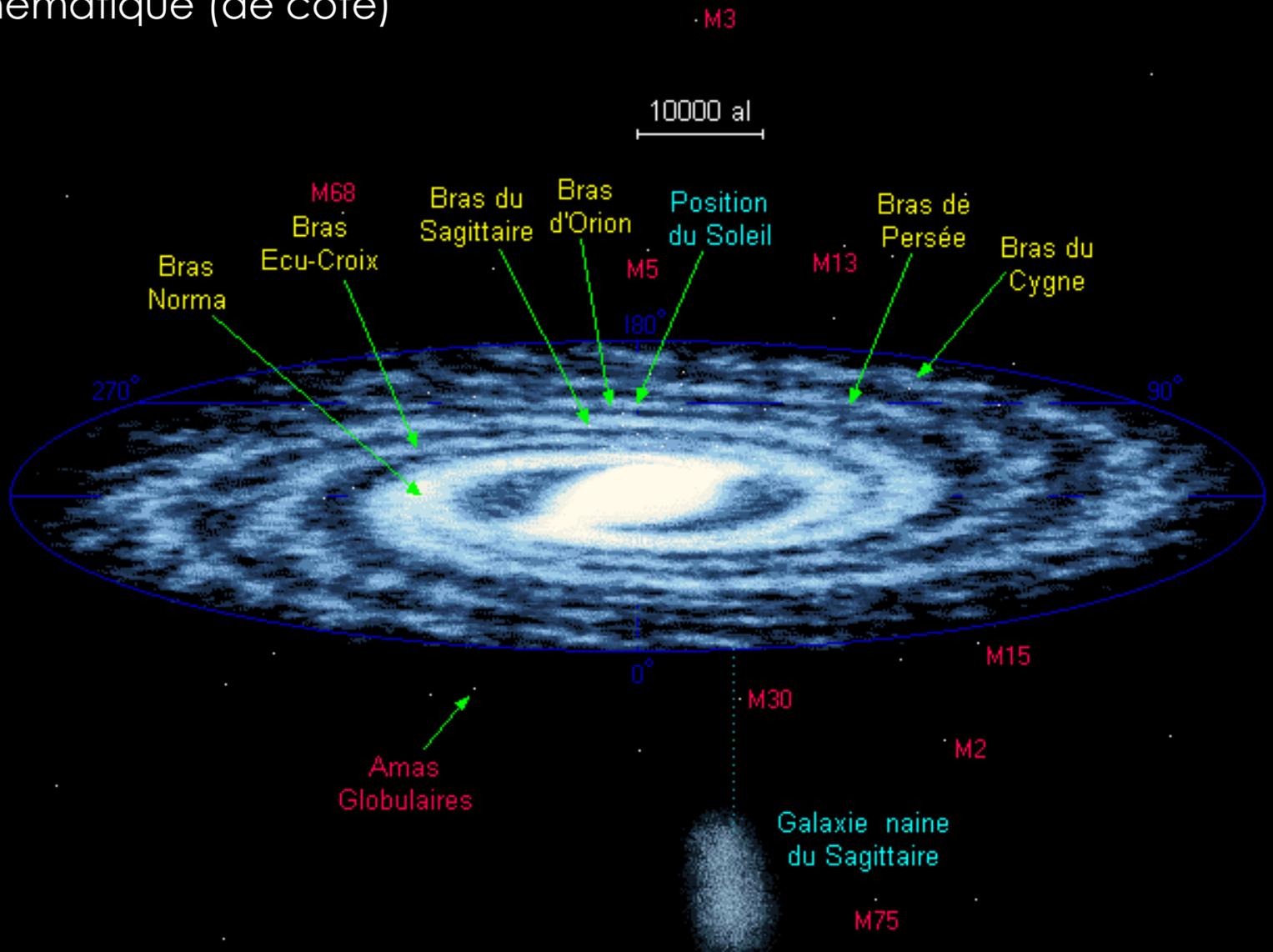
# La Voie Lactée

- Le disque est très mince et contient des étoiles et du gaz (milieu interstellaire)
- Au centre de la Galaxie, une région très riche en étoiles : le bulbe
- En périphérie de la Galaxie, des vieilles étoiles en groupes : les amas globulaires
- Les amas globulaires sont à peu près répartis dans un halo sphérique.



# La Voie Lactée : structure spirale

Vue schématique (de côté)



Rotation différentielle :  
Structure spirale :

Lindblad & Oort 1927  
années 1950

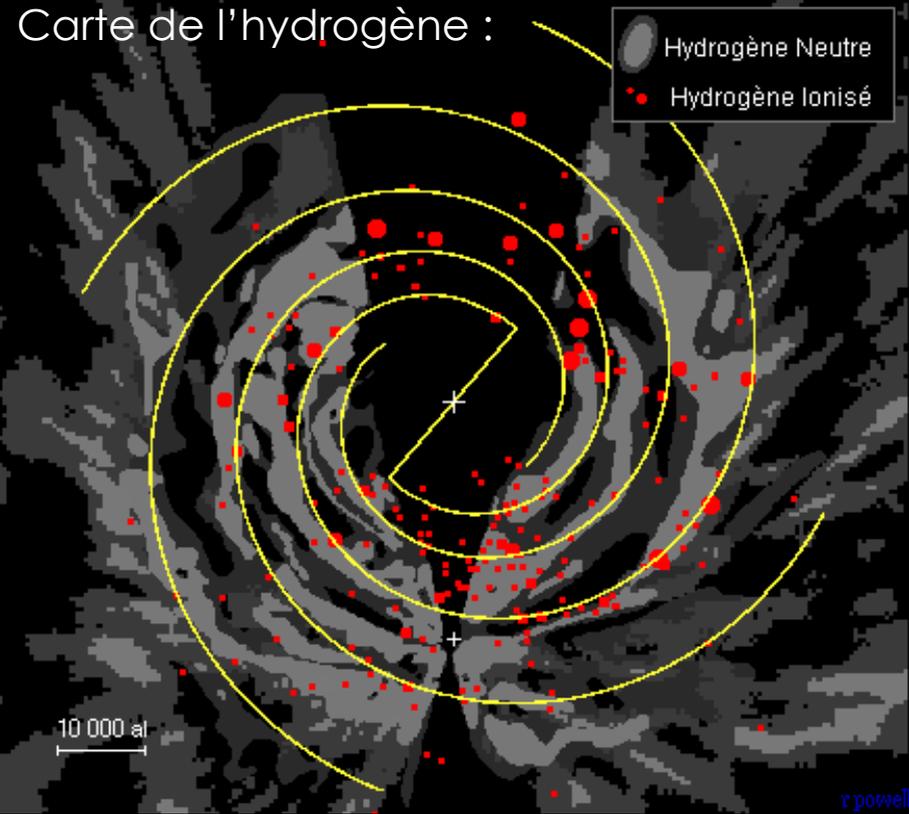
r powell

Schéma tiré de l'Atlas de l'Univers de R. Powell :  
<http://www.atlasoftheuniverse.com/>

# La Voie Lactée : structure spirale

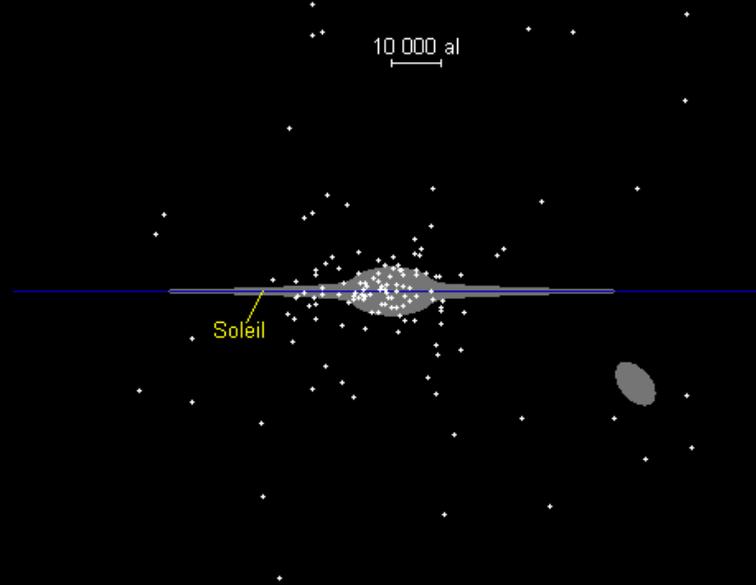
La structure du gaz dans le disque de la Voie Lactée est reconstituée à partir des observations de l'hydrogène neutre (en radio : raie à 21 cm, cf. cours n°8) et de l'hydrogène ionisé (en radio, ou dans le visible s'il n'est pas absorbé). La structure spirale est associée à des ondes de densité dans le disque.

Schéma tiré de l'Atlas de l'Univers de R. Powell : <http://www.atlasoftheuniverse.com/>



# La Voie Lactée : amas globulaires

Les amas globulaires (groupes d'étoiles âgées) sont répartis dans un halo à peu près sphérique autour du disque galactique.

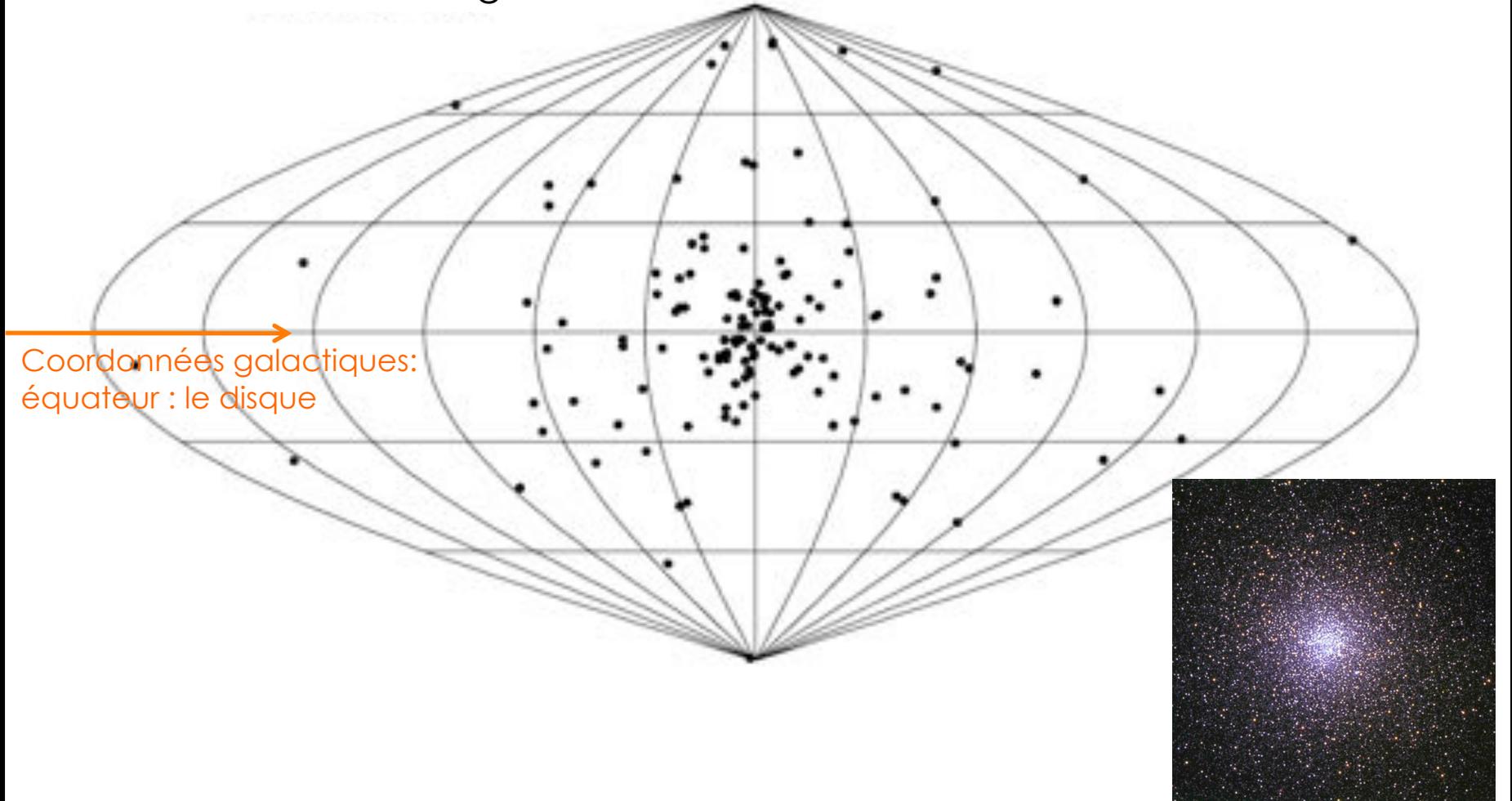


Vue schématique (de profil)

# La place du Soleil dans la Galaxie

La carte du ciel des amas globulaires a permis à Shapley d'estimer la place du Soleil dans la Voie Lactée (valeur moderne : distance de 26 000 a.l. du centre).

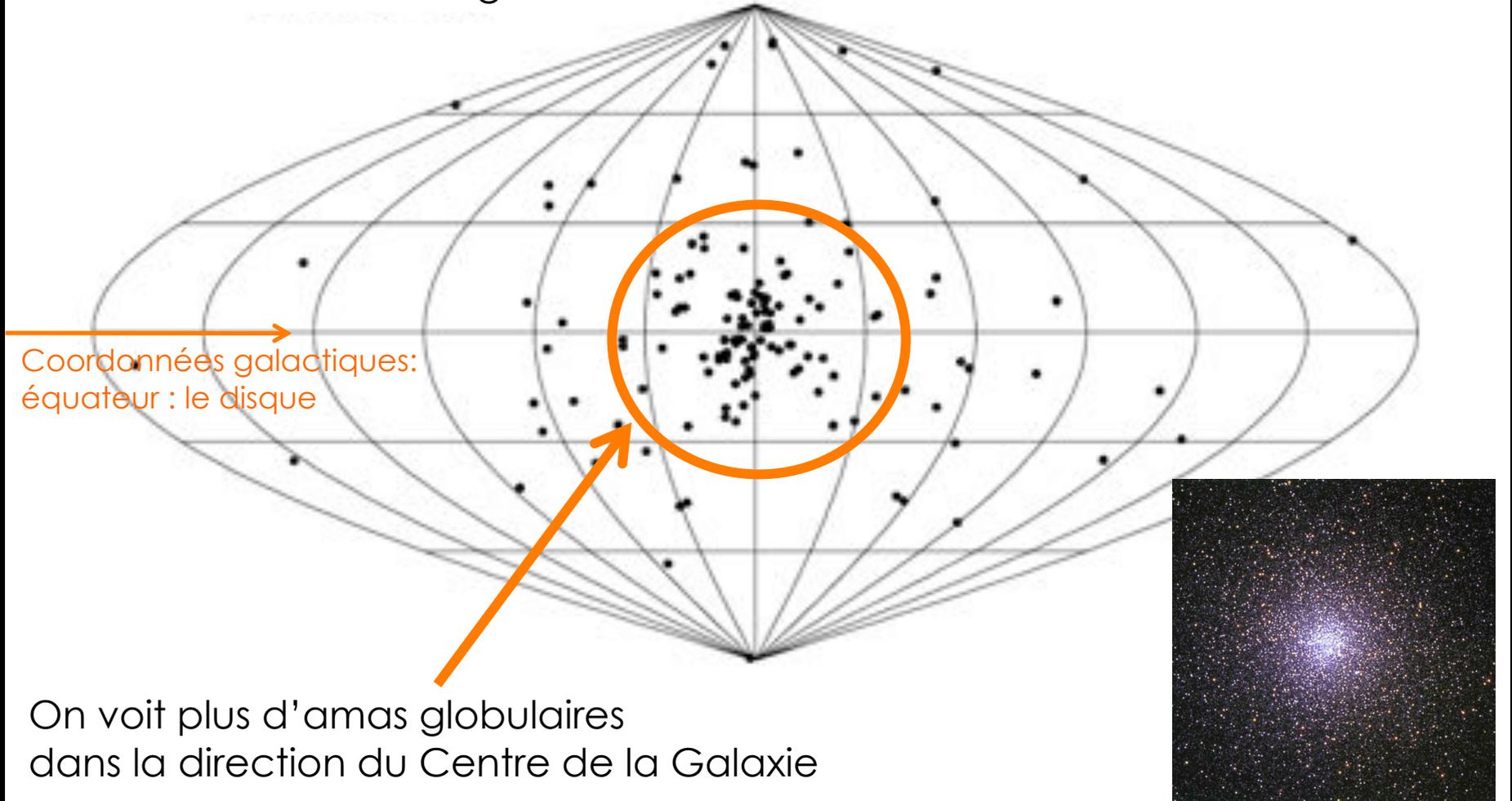
Carte du ciel des amas globulaires



# La place du Soleil dans la Galaxie

La carte du ciel des amas globulaires a permis à Shapley d'estimer la place du Soleil dans la Voie Lactée (valeur moderne : distance de 26 000 a.l. du centre).

Carte du ciel des amas globulaires



# La Voie Lactée

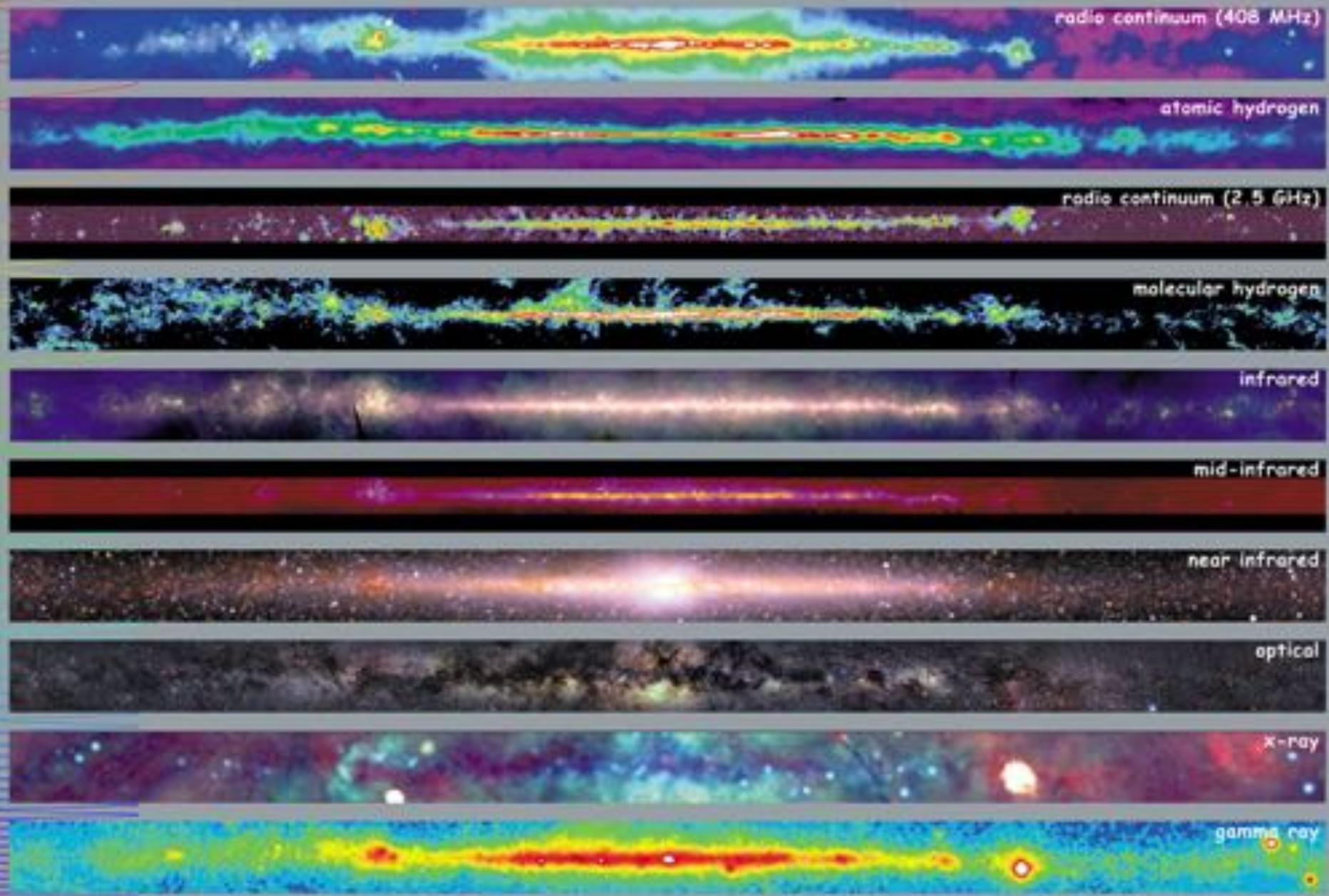
A partir de la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, une vision beaucoup plus précise de la Galaxie (structure, composition) a pu être obtenue grâce aux progrès des instruments et en particulier au début de l'astronomie multi-longueurs d'onde.

La Galaxie contient :

- des étoiles (~ 100 milliards)
- du gaz (le milieu interstellaire) : densité moyenne = 1 particule par  $\text{cm}^3$  ! (principalement H et He, mais aussi métaux, et quelques molécules !)
- des poussières
- de la lumière
- un champ magnétique
- des particules chargées très énergétiques (le rayonnement cosmique)
- un trou noir supermassif au centre
- un halo de matière noire ...

Toutes ces composantes interagissent entre elles : un système très complexe (cf. cours n°8).

En particulier le cycle de la matière entre les étoiles et le milieu interstellaire s'accompagne d'un enrichissement chimique progressif de la Galaxie.



http://www.nasa.gov/images/content/111111main\_milkyway\_300pr.jpg

La Voie Lactée à toutes les longueurs d'onde  
(poster NASA)

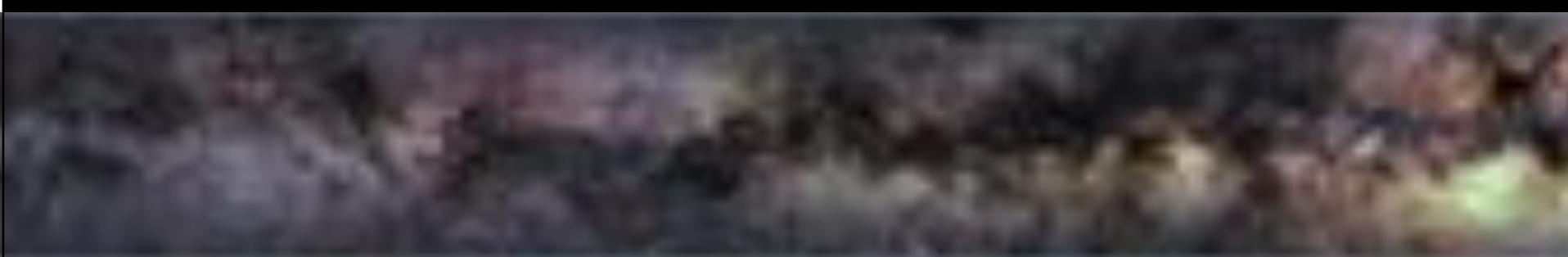
**Proche infrarouge** [ instrument DIRBE à bord du satellite COBE (-1.25 , 2.2 et 3.5 microns) ]

- On voit des étoiles plus petites et moins chaudes que le soleil (la majorité des étoiles).
- Ces étoiles sont principalement dans le disque et le bulbe (au centre)
- Les poussières interstellaires n'absorbent pas la lumière à cette longueur d'onde.



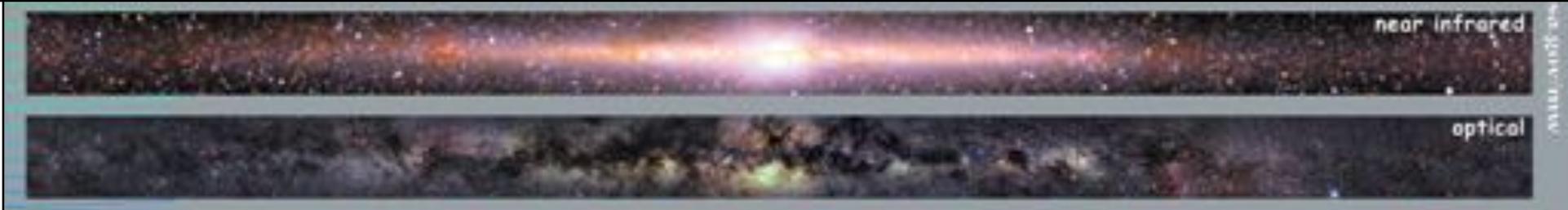
**Optique** : [ mosaïque constituées à partir d'images de plusieurs observatoires (nord/sud) ]  
[ Image dans le rouge (0.6 micron) ]

- On voit des étoiles de type solaire.
- Une grande partie de la lumière est interceptée par la poussière interstellaire.

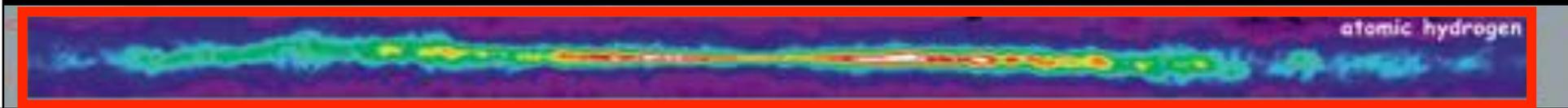


**Infrarouge** : [ satellite IRAS à 12, 60 et 100 microns ]

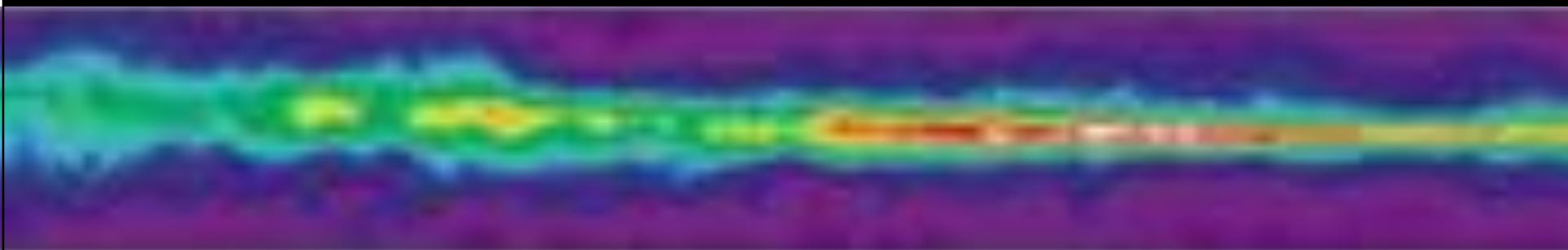
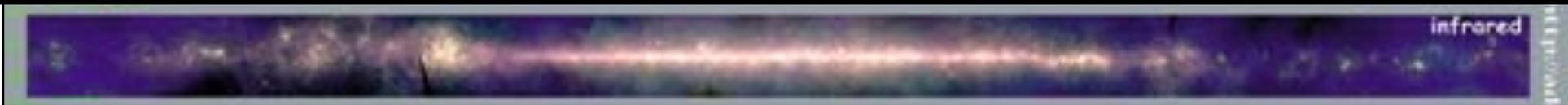
- On voit la poussière interstellaire responsable de l'absorption dans l'optique.
- Cette poussière rayonne car elle est chauffée par la lumière des étoiles.



**Radio** : [ raie à 21 cm de l'hydrogène atomique (radiotélescopes au sol) ]

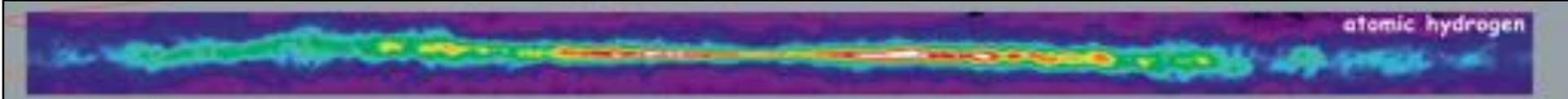


- On voit le gaz d'hydrogène neutre
- Cet hydrogène trace la structure à grande échelle du milieu interstellaire

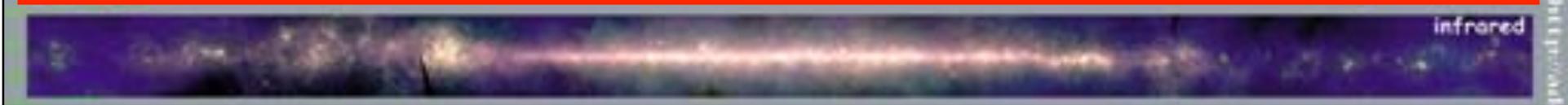


**Millimétrique** : [ raie à 115 GHz (2.6 mm) de la molécule CO : radiotélescopes au sol ]

- On trace le gaz moléculaire contenant la molécule simple CO



- Le rapport CO / H<sub>2</sub> est à peu près constant : on trace donc ainsi la molécule H<sub>2</sub>, qui est la plus abondante (puisque H est l'élément le plus abondant).

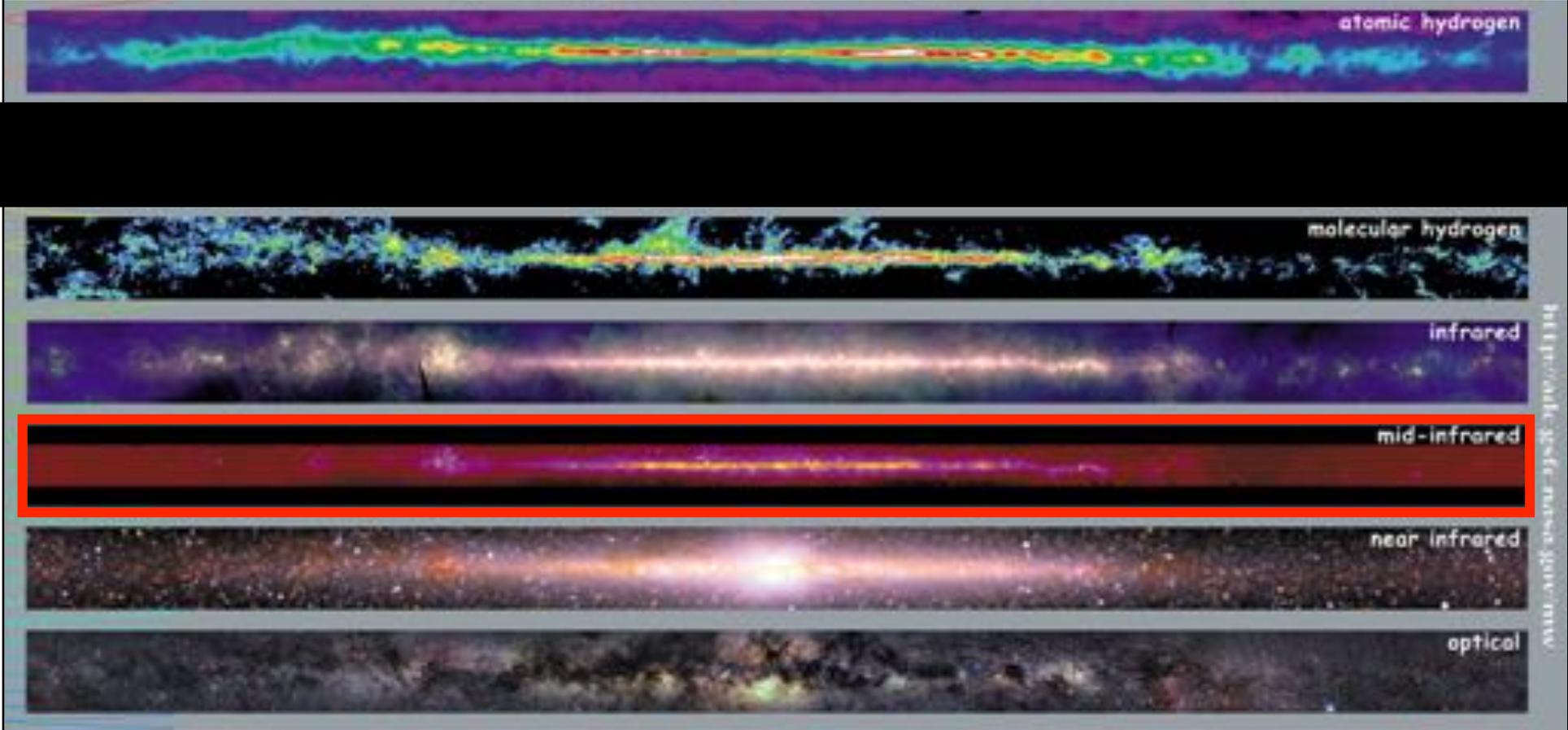


- On trace ainsi les nuages denses et froids : on constate que le disque devient plus fin que pour l'hydrogène neutre.

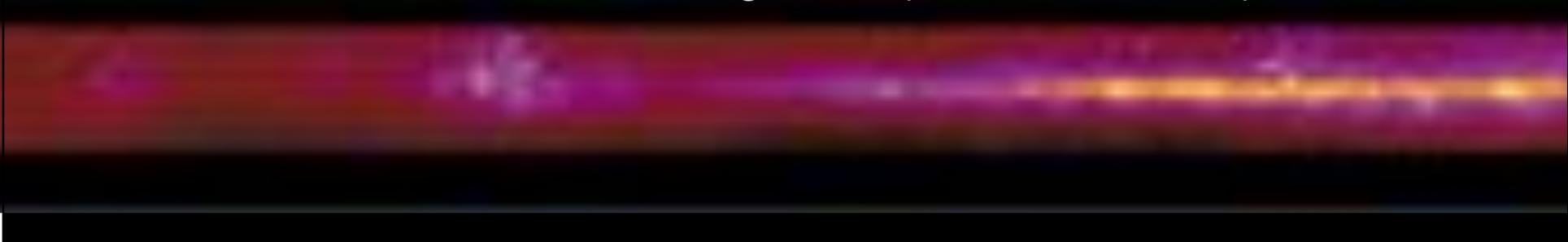


**Infrarouge moyen** : [ instrument SPIRIT III à bord du satellite MSX (6.8 et 10.8 microns) ]

- On observe l'émission de molécules complexes : les PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons)

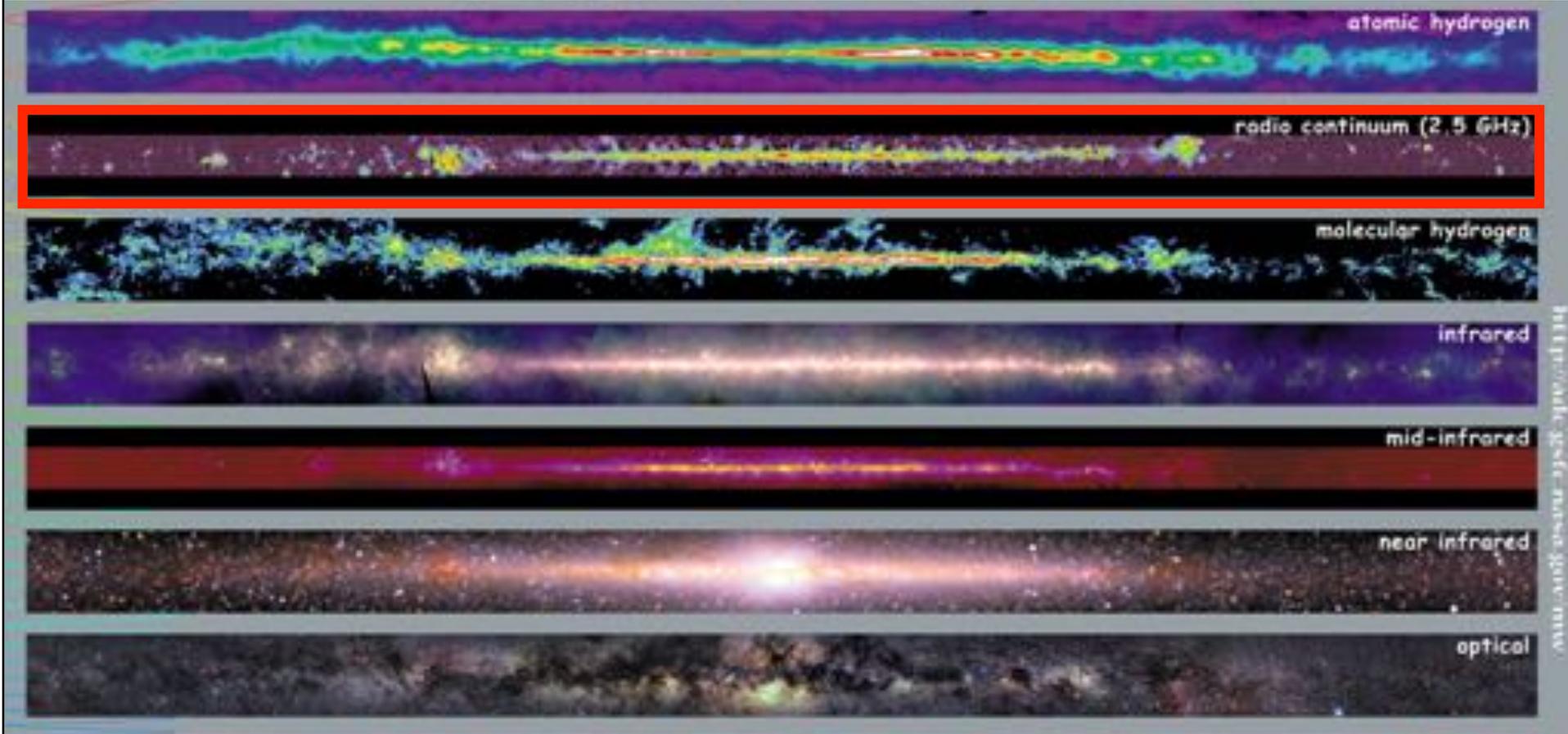


- Ces molécules se forment dans les régions les plus denses et les plus froides.



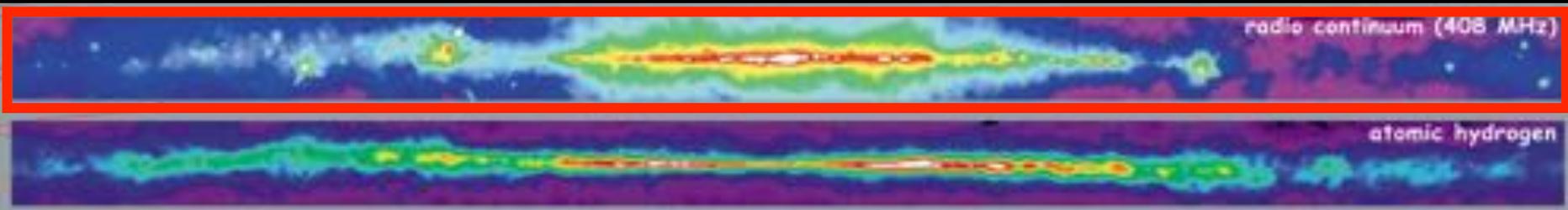
Radio : [ émission à 2.5 GHz (12cm) : radiotélescopes au sol ]

- On observe le rayonnement d'électrons très énergétiques



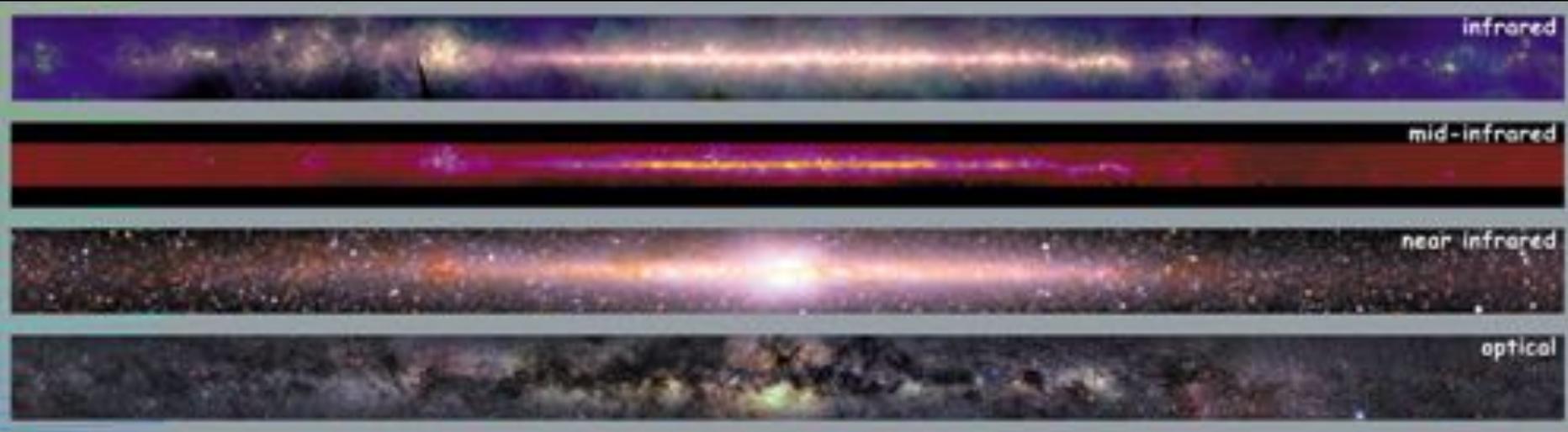
- Ces électrons sont associés à des régions chaudes et ionisées autour des étoiles.





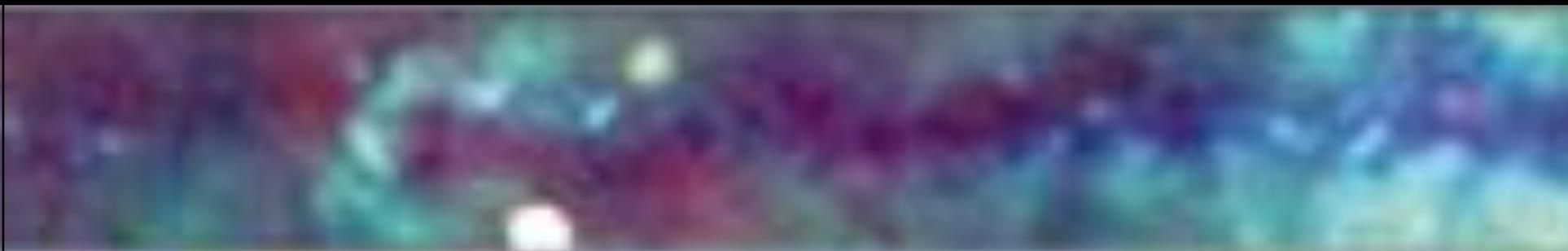
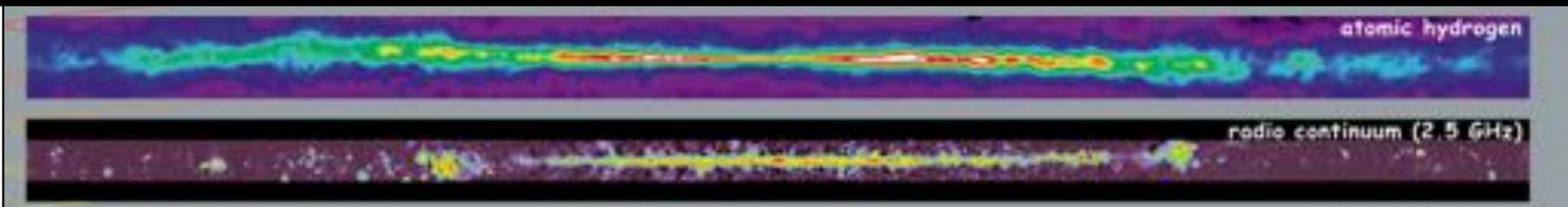
Radio : [ émission à 408 MHz (74cm) : radiotélescopes au sol ]

- On observe le rayonnement d'électrons très énergétiques
- Ces électrons sont accélérés dans les restes de supernovae.



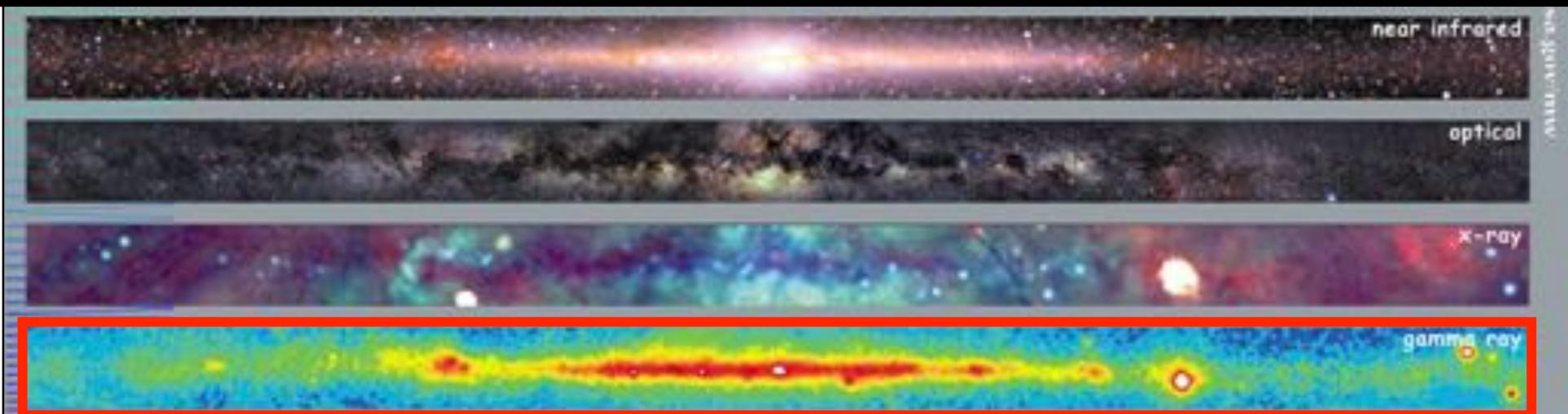
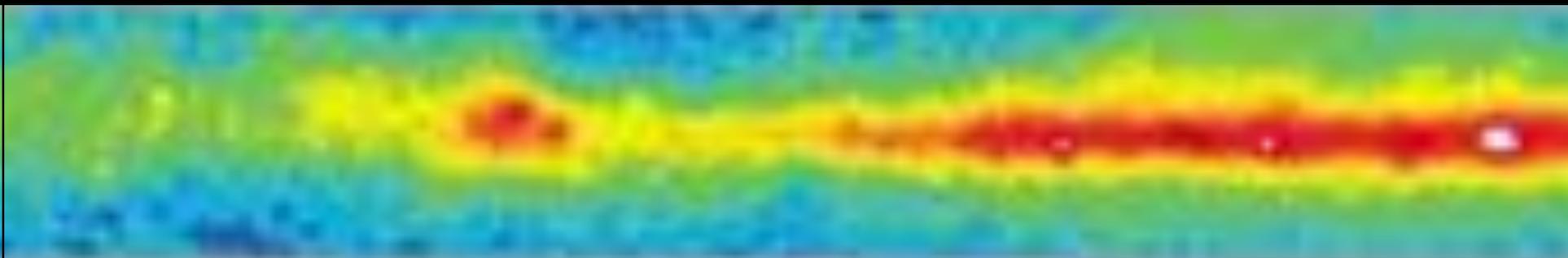
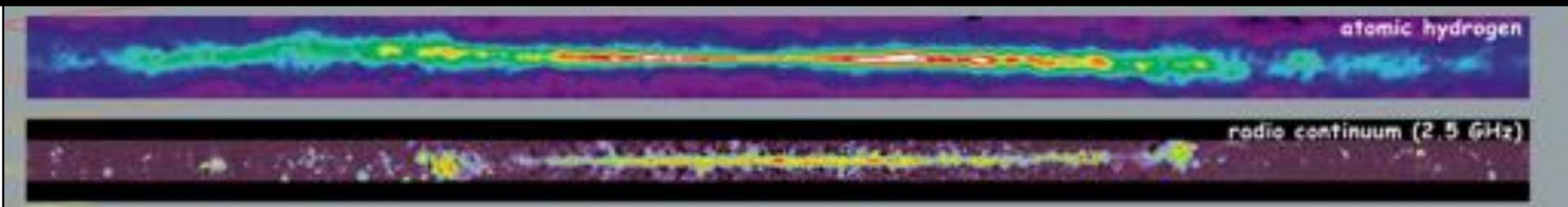
www.csiro.au/education/3-5/3-5crab/3-5crab.htm

Rayons X : [ instrument PSPC à bord du satellite ROSAT (0.25-1.5 keV / 0.83-4.9 nm) ]

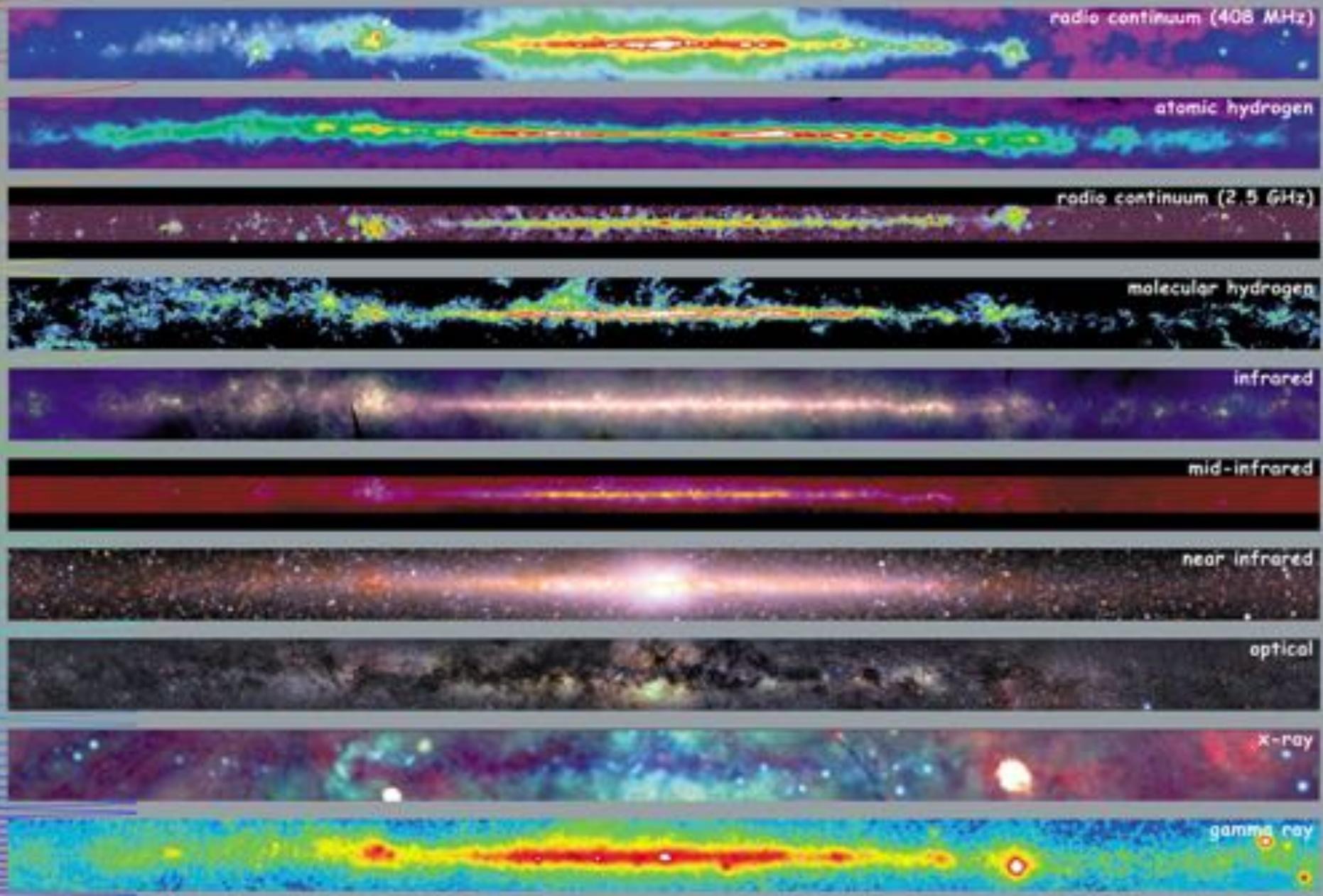


- Emission du gaz chaud
- Absorption par le gaz froid
- Des sources ponctuelles (objets compacts accrétants par exemple)

Rayons  $\gamma$  : [ instrument EGRET à bord du satellite CGRO ( $>300$  MeV /  $<4.1$  fm) ]



- Interaction entre les rayons cosmiques et le milieu interstellaire.
- Quelques sources ponctuelles.



www.astro.univ-paris1.fr/~spica/011111

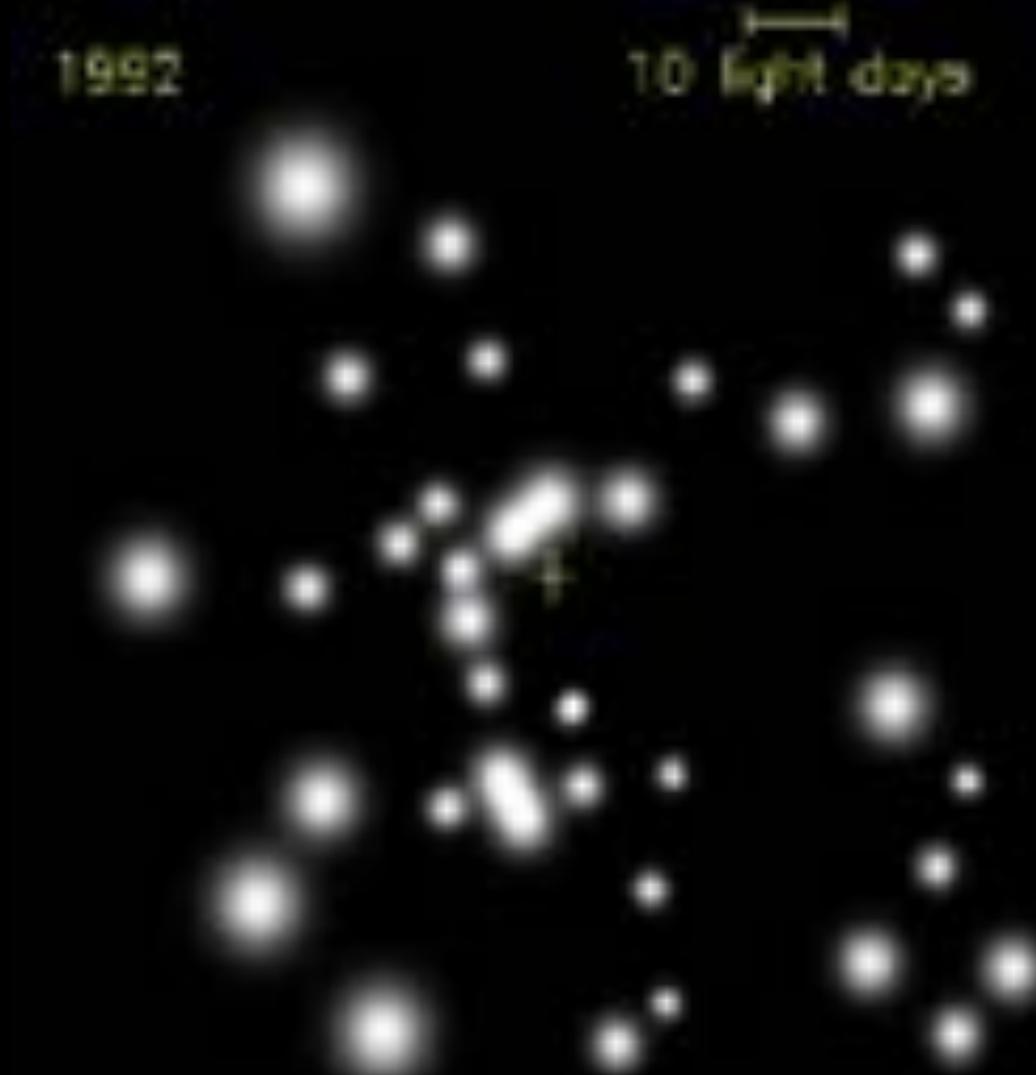
La Voie Lactée à toutes les longueurs d'onde :  
une vision cohérente d'un système complexe

# Un trou noir au Centre Galactique



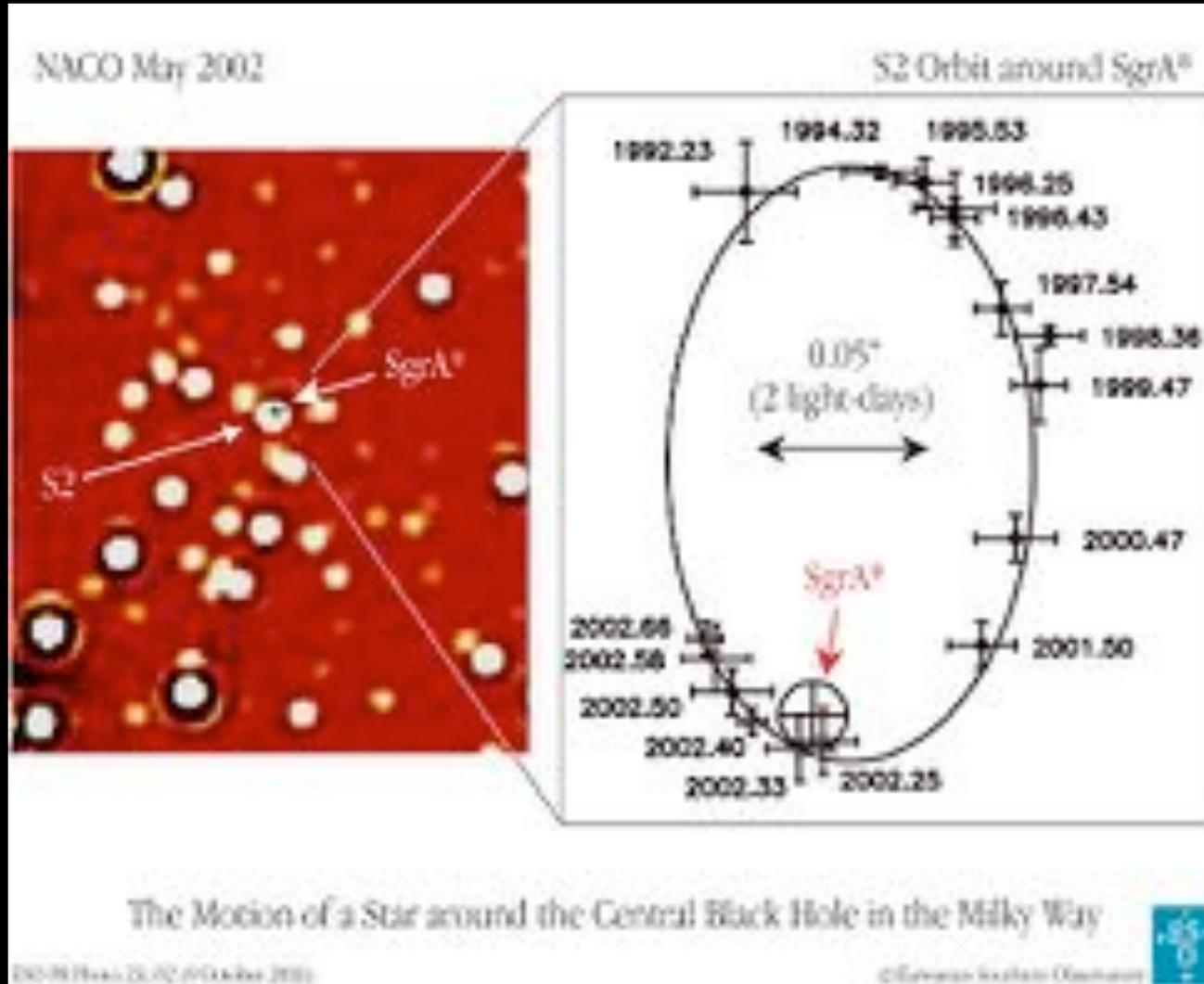
# Un trou noir au Centre Galactique

Le mouvement des étoiles près du Centre Galactique met en évidence la présence d'un trou noir supermassif (masse  $2.6 \pm 0.2$  millions de masses solaires).



# Un trou noir au Centre Galactique

Le mouvement des étoiles près du Centre Galactique met en évidence la présence d'un trou noir supermassif (masse  $2.6 \pm 0.2$  millions de masses solaires).



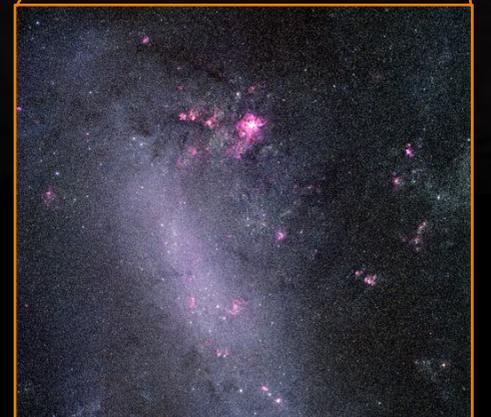
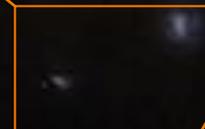
Encore une application des lois de Képler à la mesure de masse...

Il s'agit d'observation très délicates, obtenues grâce à l'optique adaptative.

# Les galaxies satellites de la Voie Lactée

Les nuages de Magellan, visibles de l'hémisphère sud, sont deux petites galaxies satellites de la Voie Lactée.

Les nuages de Magellan à 160 000 (LMC) et 190 000 (SMC) a.l.



(ESO-1m)

# Les galaxies satellites de la Voie Lactée

Plusieurs galaxies naines sont aussi satellites de la Voie Lactée

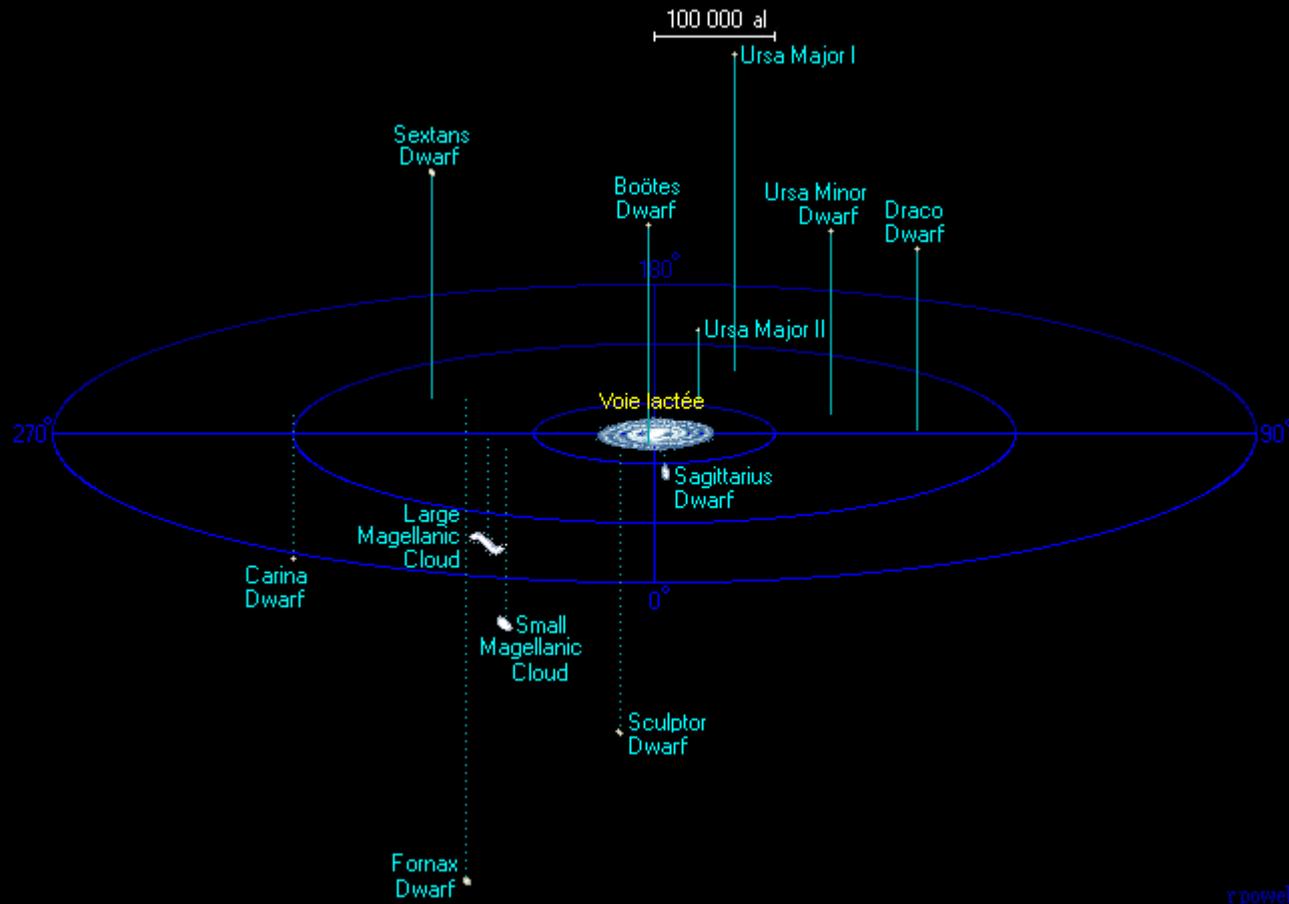


Schéma tiré de l'Atlas de l'Univers de R. Powell :  
<http://www.atlasoftheuniverse.com/>

r powell

Distance caractéristique : 500 000 années lumière

# Les galaxies proches

La Voie Lactée appartient à un groupe de galaxies appelé le groupe local. La galaxie d'Andromède en fait partie : une jumelle de la Voie Lactée.

La galaxie d'Andromède  
à 2,5 millions d'a.l.



(T-30 cm)

# Les galaxies proches

La Voie Lactée appartient à un groupe de galaxies appelé le groupe local.

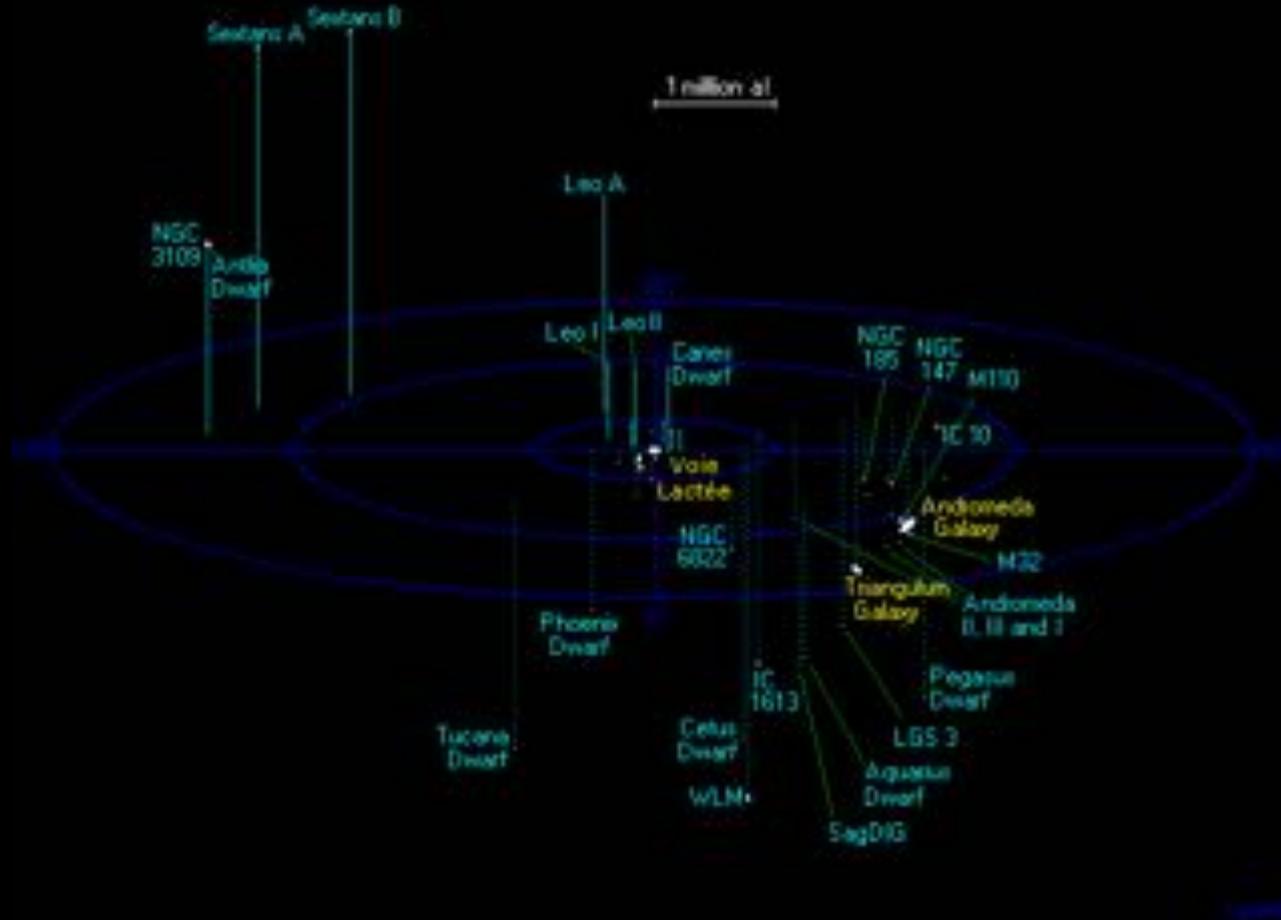


Schéma tiré de l'Atlas de l'Univers de R. Powell :  
<http://www.atlasoftheuniverse.com/>

Distance caractéristique : 5 millions d'années lumière

A des échelles plus élevées, d'autres structures se dessinent (amas de la Vierge, superamas de la Vierge, etc.) ➔ cours n°10

# Les galaxies proches

Quelques exemples de galaxies du groupe local

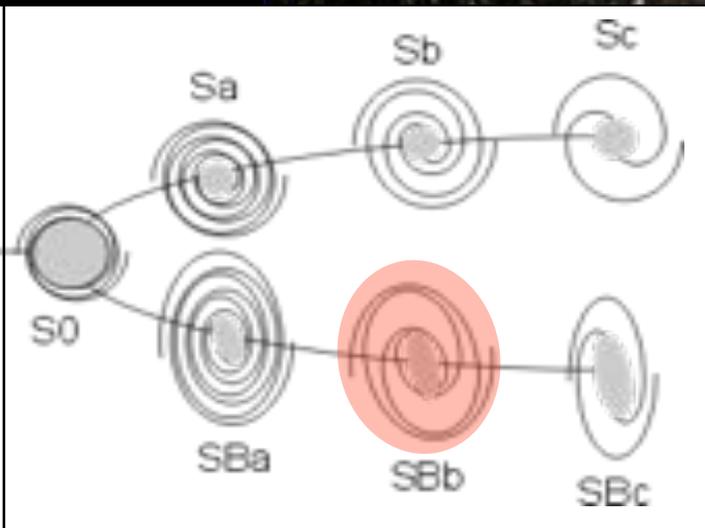


# La séquence de Hubble

Toutes les galaxies ne sont pas semblables à la Voie Lactée ou à Andromède. Leur morphologie correspond à des stades d'évolution différents.

La Voie Lactée :

Les galaxies spirales :

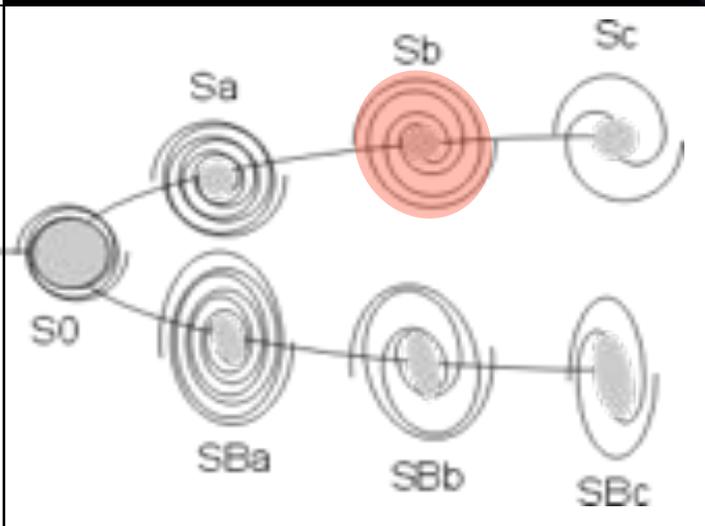


# La séquence de Hubble

Toutes les galaxies ne sont pas semblables à la Voie Lactée ou à Andromède. Leur morphologie correspond à des stades d'évolution différents.

La galaxie d'Andromède (M31)

Les galaxies spirales :

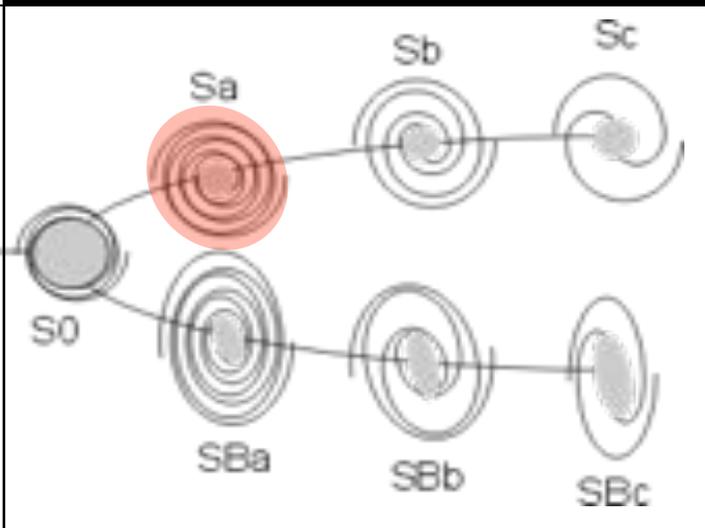


# La séquence de Hubble

Toutes les galaxies ne sont pas semblables à la Voie Lactée ou à Andromède. Leur morphologie correspond à des stades d'évolution différents.

La galaxie NGC 1232  
(image VLT)

Les galaxies spirales :



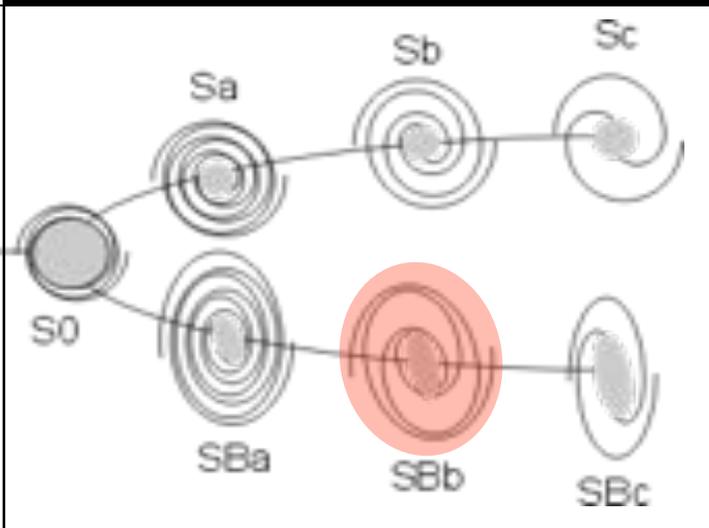
# La séquence de Hubble

Toutes les galaxies ne sont pas semblables à la Voie Lactée ou à Andromède. Leur morphologie correspond à des stades d'évolution différents.

La galaxie NGC 1365  
(image VLT)



Les galaxies spirales :

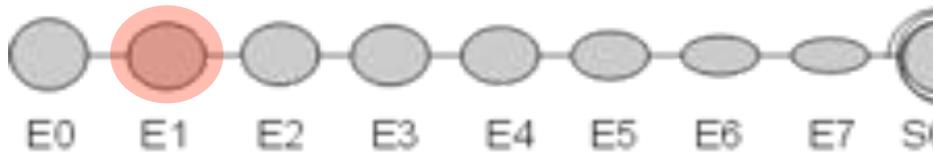


# La séquence de Hubble

Toutes les galaxies ne sont pas semblables à la Voie Lactée ou à Andromède. Leur morphologie correspond à des stades d'évolution différents.

La galaxie M87  
(anglo-australien obs.)

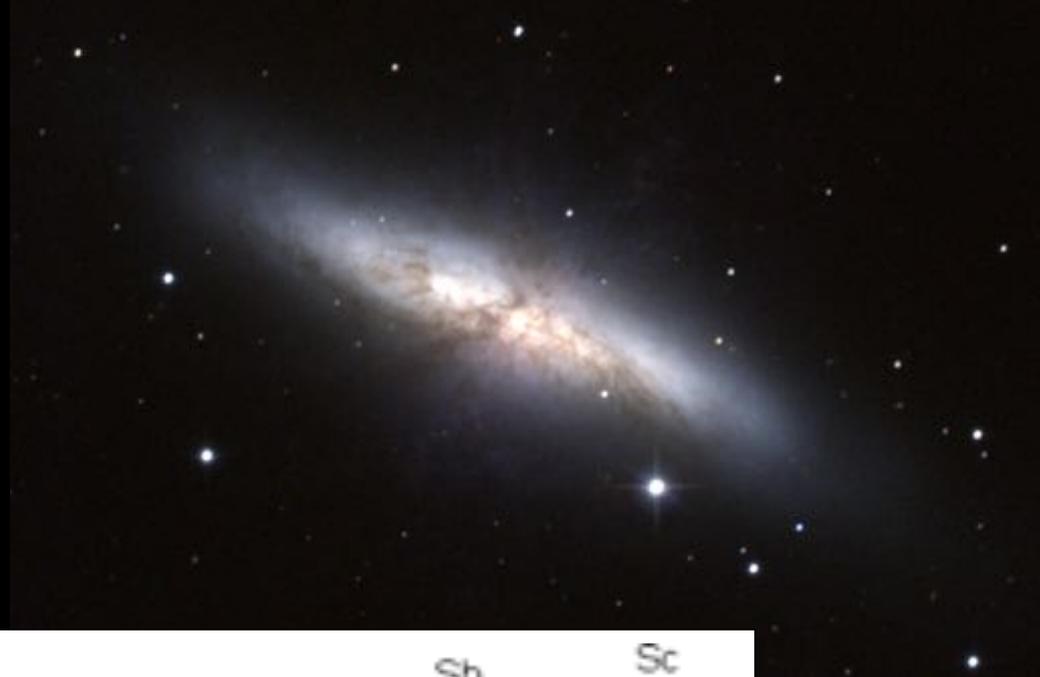
Les galaxies elliptiques :



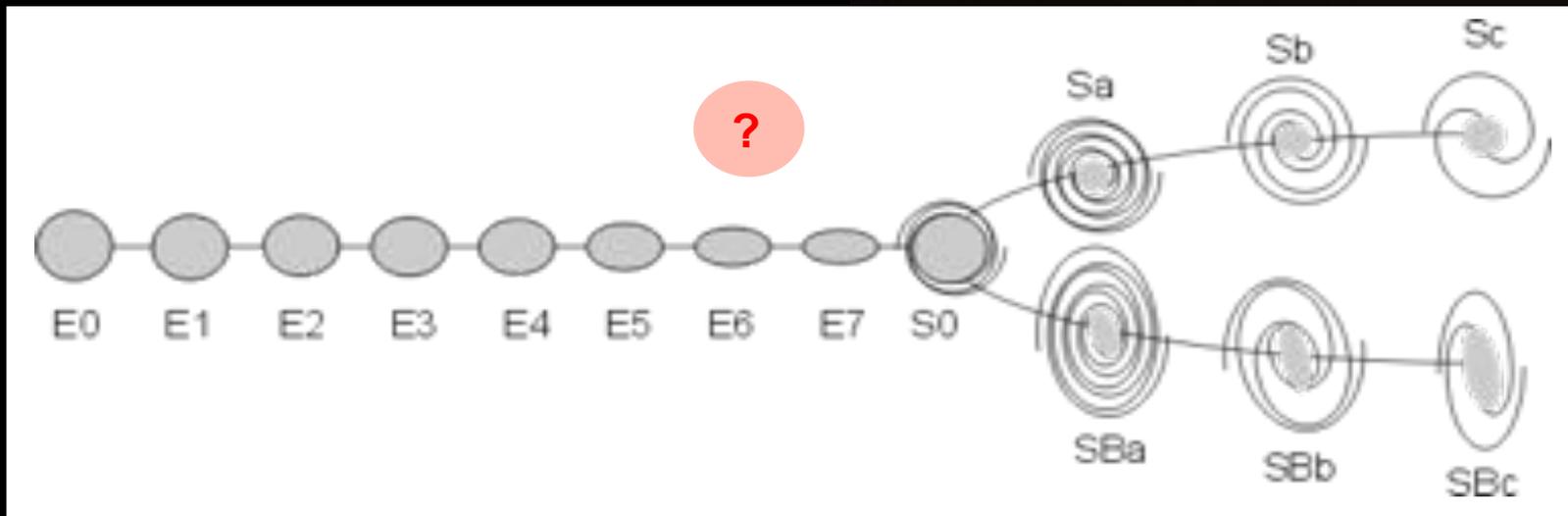
# La séquence de Hubble

Toutes les galaxies ne sont pas semblables à la Voie Lactée ou à Andromède. Leur morphologie correspond à des stades d'évolution différents.

La galaxie M82  
(galaxie du cigare)



Des galaxies irrégulières :



# Les galaxies

Toutes les galaxies montrent les mêmes composantes que la Voie Lactée (étoiles, gaz, ...). Les différences de morphologie et de couleur (les spirales sont plus bleues, les elliptiques plus rouges) indiquent des stades d'évolution différents.

- Les galaxies spirales ont beaucoup de gaz et montrent des étoiles jeunes. Ce sont des galaxies à un stade où a lieu de la formation d'étoiles.
- Les galaxies elliptiques n'ont presque plus de gaz et ne montrent que des étoiles vieilles : la formation d'étoiles s'est arrêtée.

De nombreux indices observationnels montrent qu'un trou noir supermassif est présent au centre de chaque galaxie.

- Dans certaines galaxies, ce trou noir est très peu actif
- Dans d'autres galaxies, il est très actif – on parle de galaxie à noyau actif (système de trou noir accrétant avec éventuellement un jet, comme ce que l'on observe dans les systèmes avec un trou noir de masse stellaire)

# Des galaxies à noyaux actifs

Un exemple : M87

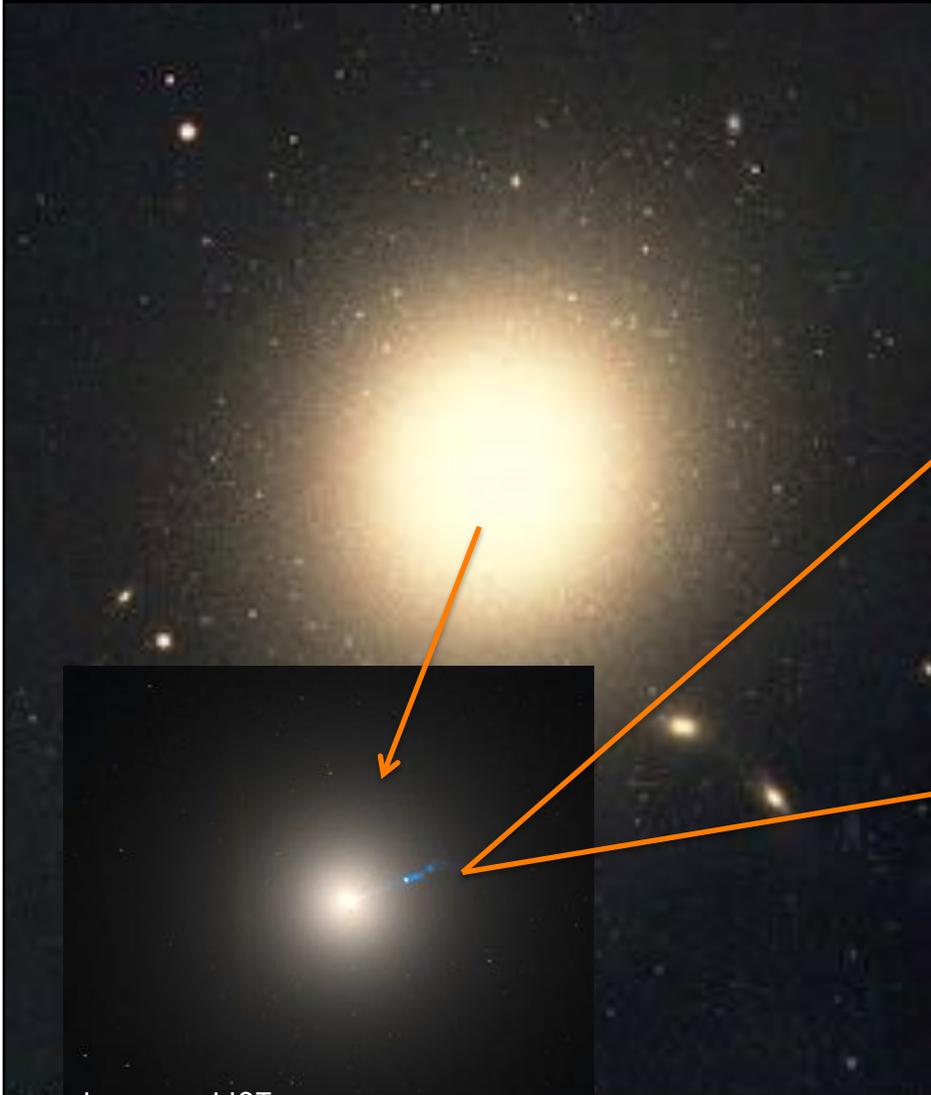
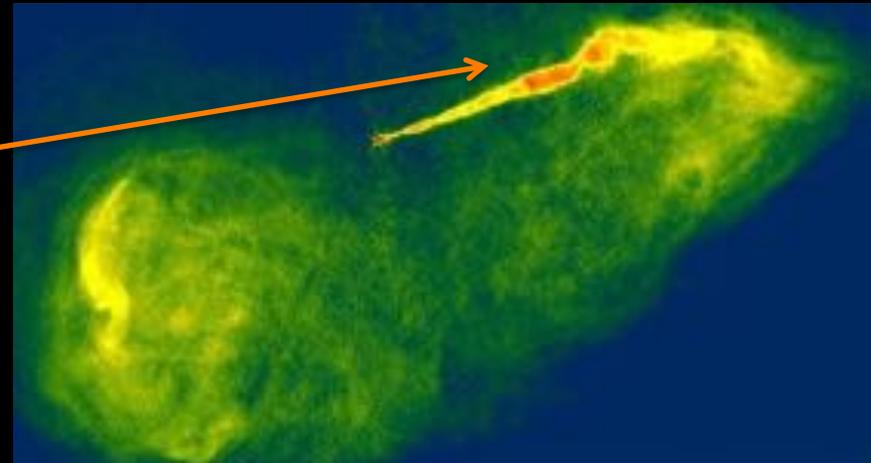


Image HST  
de la partie centrale



Image HST du jet

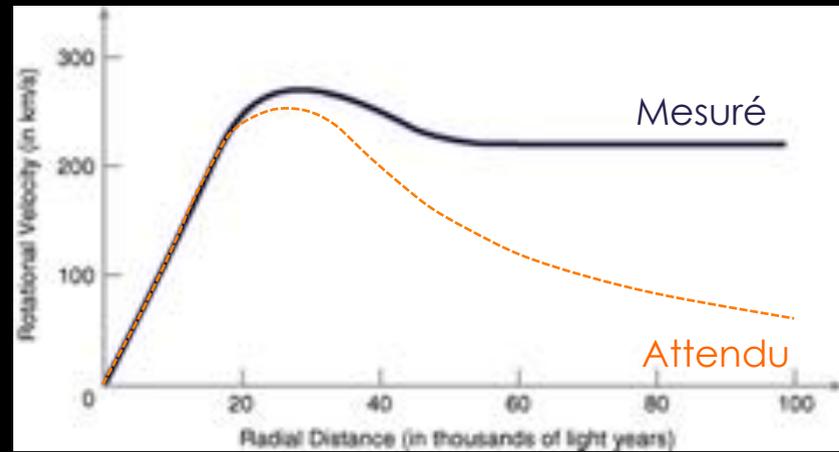
Image radio VLA) du jet et de son interaction  
avec le gaz de la galaxie



# La matière noire

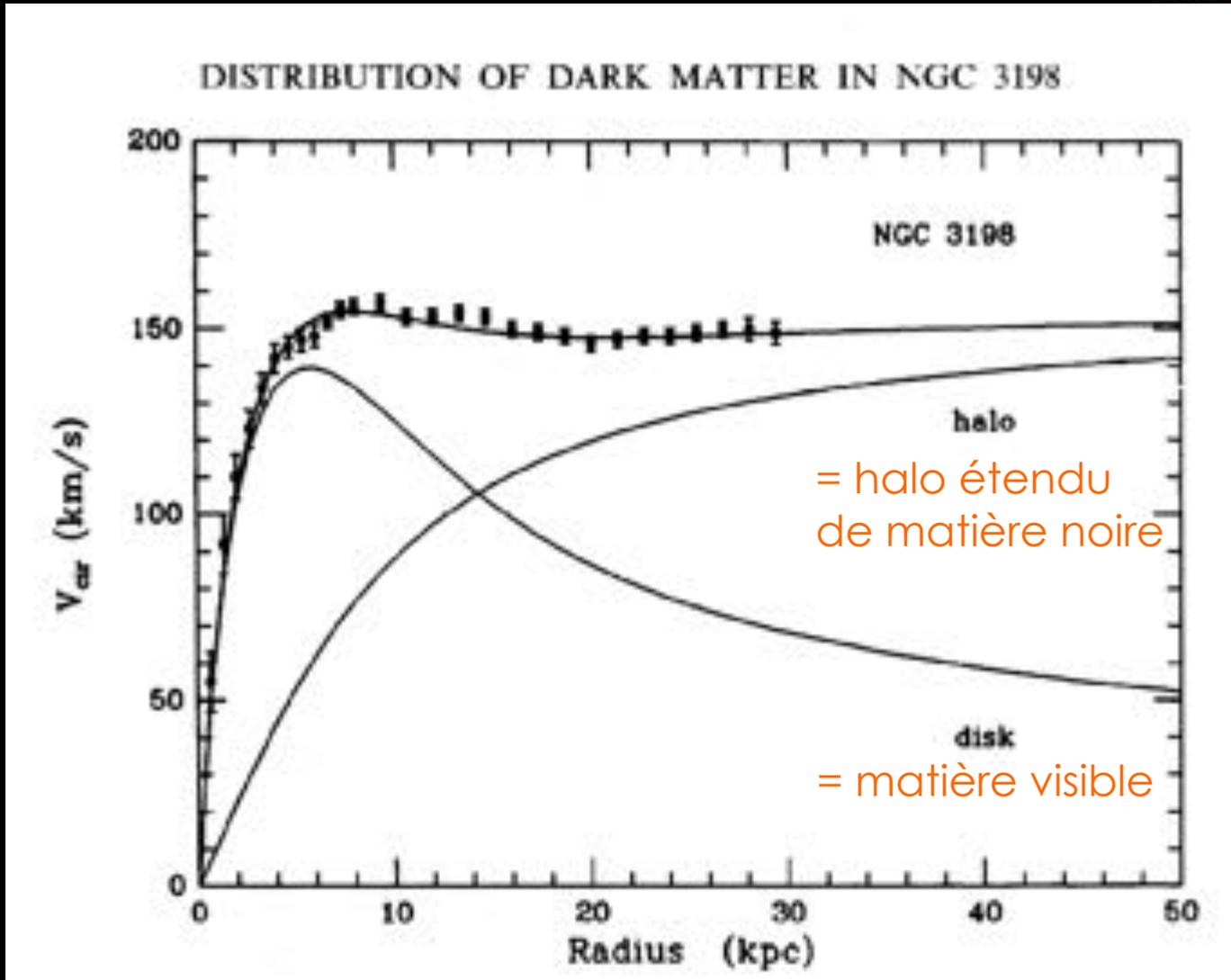
La matière noire a été mise en évidence pour la première fois dans les galaxies, à l'aide des courbes de rotation.

- On trace la vitesse des étoiles en fonction de leur distance au centre
- Lois de Kepler : on déduit la « masse qui fait tourner » (masse dite gravitationnelle)
- Observations : « la masse qu'on voit » (masse dite visible ou lumineuse)
- La masse gravitationnelle est très supérieure à la masse lumineuse : il y a donc une masse cachée, on l'appelle « matière noire »
- On peut montrer que la distribution de cette masse doit correspondre à un halo sphérique supérieur aux dimensions de la partie lumineuse de la galaxie
- La galaxie « lumineuse » que l'on voit apparaît donc en fait comme le sommet de l'iceberg...



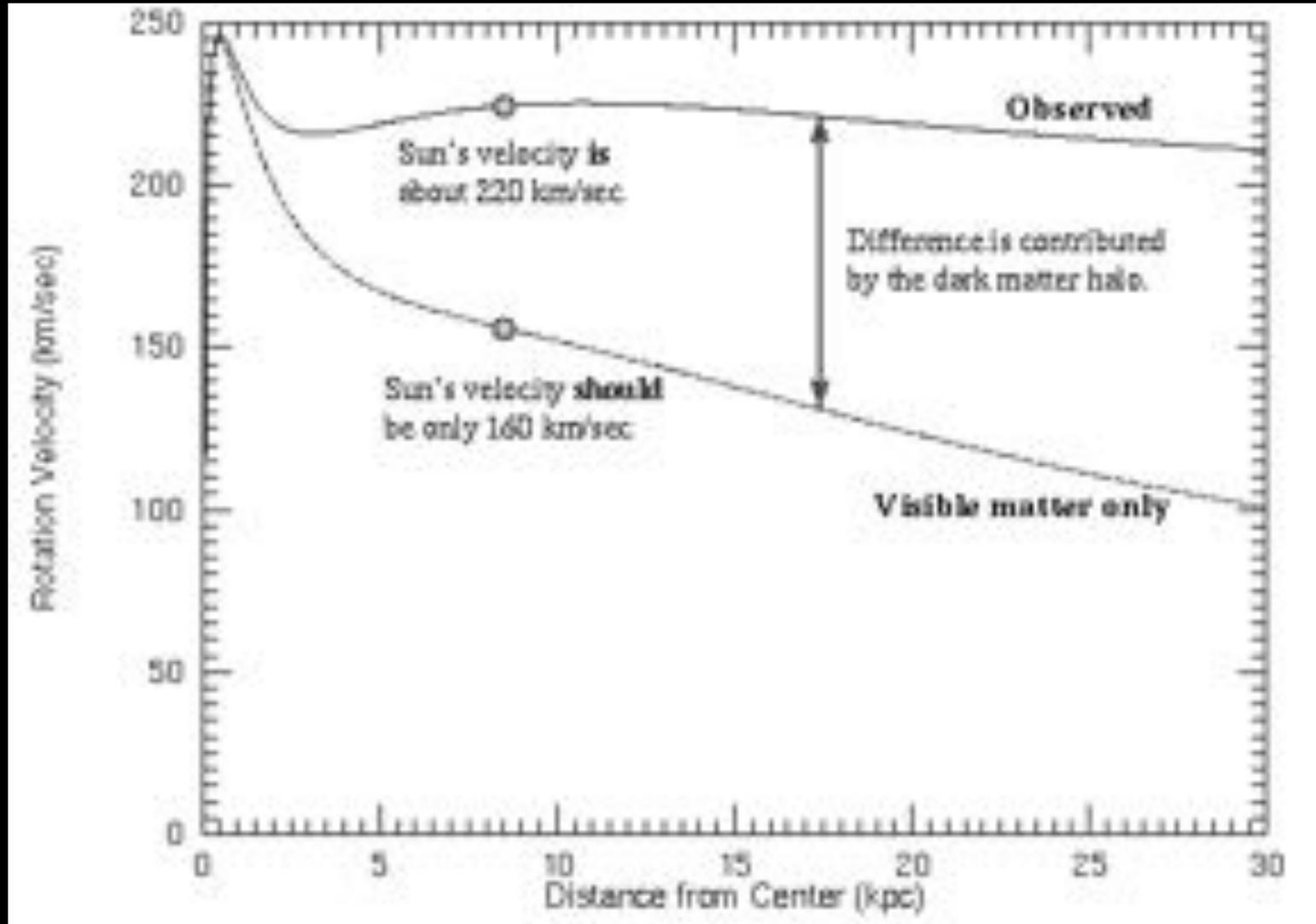
# Courbes de rotation

Exemple d'une galaxie spirale : NGC 3198



# Courbes de rotation

Exemple de la Voie Lactée



# La matière noire

- D'autres observations indépendantes seront présentées aux cours n°10 et n°11 qui confirment la présence d'une masse cachée dans l'Univers, ou d'un défaut des lois de la gravitation à grande échelle.
- L'interprétation physique de cette matière noire est un problème majeur de la cosmologie moderne (→ cours n°11).

# Résumé du cours n°9

Le Soleil appartient à un ensemble très vaste, constitué d'étoiles, de gaz, de poussières, de matière noire, ..., la Galaxie. Sa forme de disque la fait apparaître dans notre ciel sous la forme de la Voie Lactée. Elle est le siège d'un cycle complexe de la matière, de la formation des étoiles dans le milieu interstellaire jusqu'à la fin de vie de ces étoiles, qui rejettent alors une partie de leur matière. Ce cycle s'accompagne de l'enrichissement chimique progressif de la Galaxie. Le centre de la Galaxie comporte un trou noir supermassif actuellement inactif.

La Galaxie n'est pas unique. Des milliards d'autres galaxies, avec les mêmes composantes (étoiles, gaz, matière noire, trou noir supermassif central) existent dans l'Univers. Elles montrent cependant des différences de taille, de couleur, de morphologie, d'activité du trou noir, qui correspondent à des stades différents d'évolution. En particulier, les galaxies spirales en forme de disque, comme la Voie Lactée, sont des galaxies riches en gaz, qui forment des étoiles. Elles comportent des étoiles jeunes. Les galaxies elliptiques n'ont presque plus de gaz et ne forment plus d'étoiles : leurs étoiles sont toutes âgées.

La taille d'une galaxie se compte en dizaines de milliers d'a.l., la distance entre galaxies en millions d'a.l. La répartition spatiale des galaxies fait apparaître des structures à différentes échelles (groupes, amas, superamas).

La matière noire est mise en évidence dans les galaxies en constatant que les étoiles tournent trop vite par rapport à la masse « lumineuse » observée : il manque donc de la masse « non lumineuse », dite cachée ou noire.

# Prochains cours



Montage ESO de photographies prises au Chili (La Silla & Paranal) et aux Canaries (La Palma)

# Prochains cours

Cours n°10 – L'Univers lointain, par P. Boissé – Lundi 23 janvier

Cours n°11 – La cosmologie moderne: un Univers en évolution,  
par F. Daigne – Lundi 30 janvier

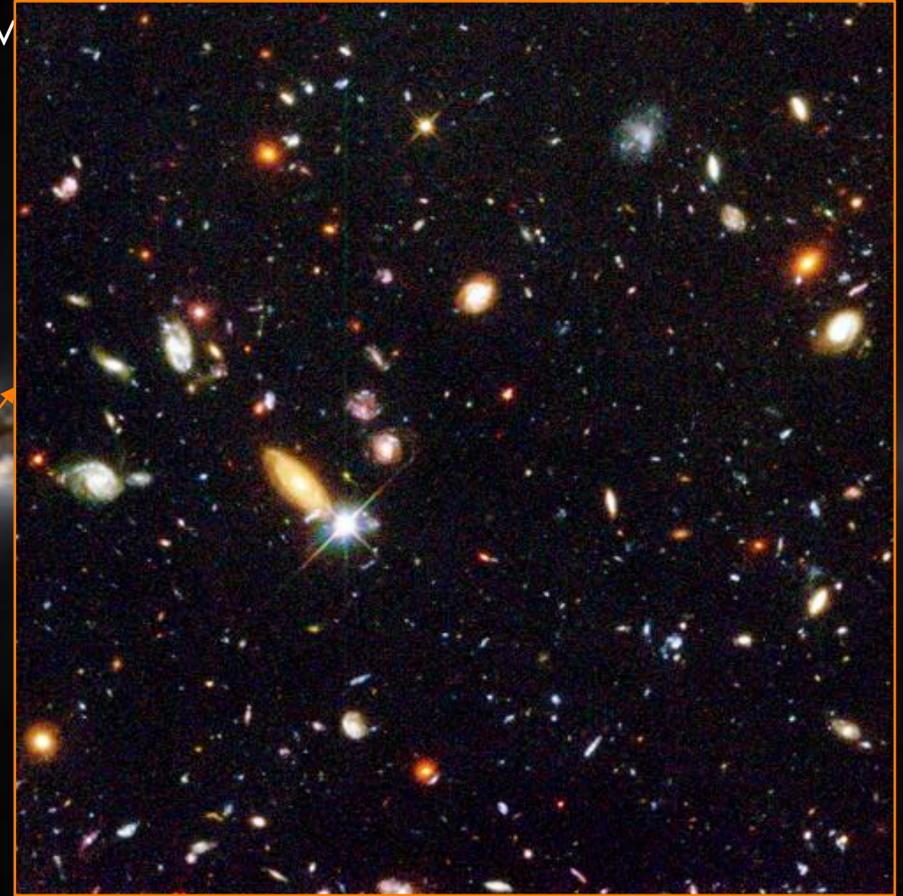


# Prochains cours

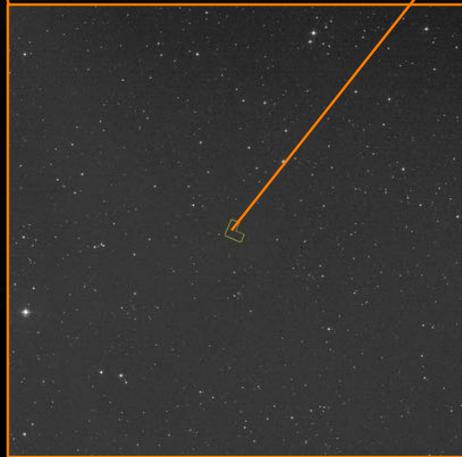
Cours n°10 – L'Univers lointain, par P. Boissé – Lundi 23 janvier

Cours n°11 – La cosmologie moderne: un Univers en évolution,  
par F. Daigne – Lundi 30 janvier

Grande ourse



Le ciel profond de Hubble  
Des milliers de galaxies jusqu'à  
quelques milliards d'années lumière  
(HST)



# Prochains cours

Construire la vision moderne de l'Univers

1. Introduction: qu'est ce que l'astrophysique
  2. Notre étoile, le Soleil
  3. De la lunette de Galilée  
aux télescopes spatiaux :  
l'observation en astronomie
  4. Panorama du système solaire
  5. A la recherche d'autres mondes,  
les exoplanètes
  6. Vie et mort des étoiles
  7. Explosions et monstres cosmiques :  
supernovae, étoiles à neutrons, trous noirs
  8. Les nuages interstellaires  
et la formation des étoiles
  9. La Voie Lactée et les galaxies proches
  10. L'Univers lointain
  11. La cosmologie moderne :  
un Univers en évolution
  12. Conclusion :  
les défis pour l'astrophysique contemporaine
- 

# Page web du cours

Les transparents + quelques liens + une courte bibliographie

[http://www.iap.fr/users/daigne/FD\\_IAP/UIA2011.html](http://www.iap.fr/users/daigne/FD_IAP/UIA2011.html)

Courriels :

Patrick Boissé :	boisse@iap.fr
Frédéric Daigne :	daigne@iap.fr