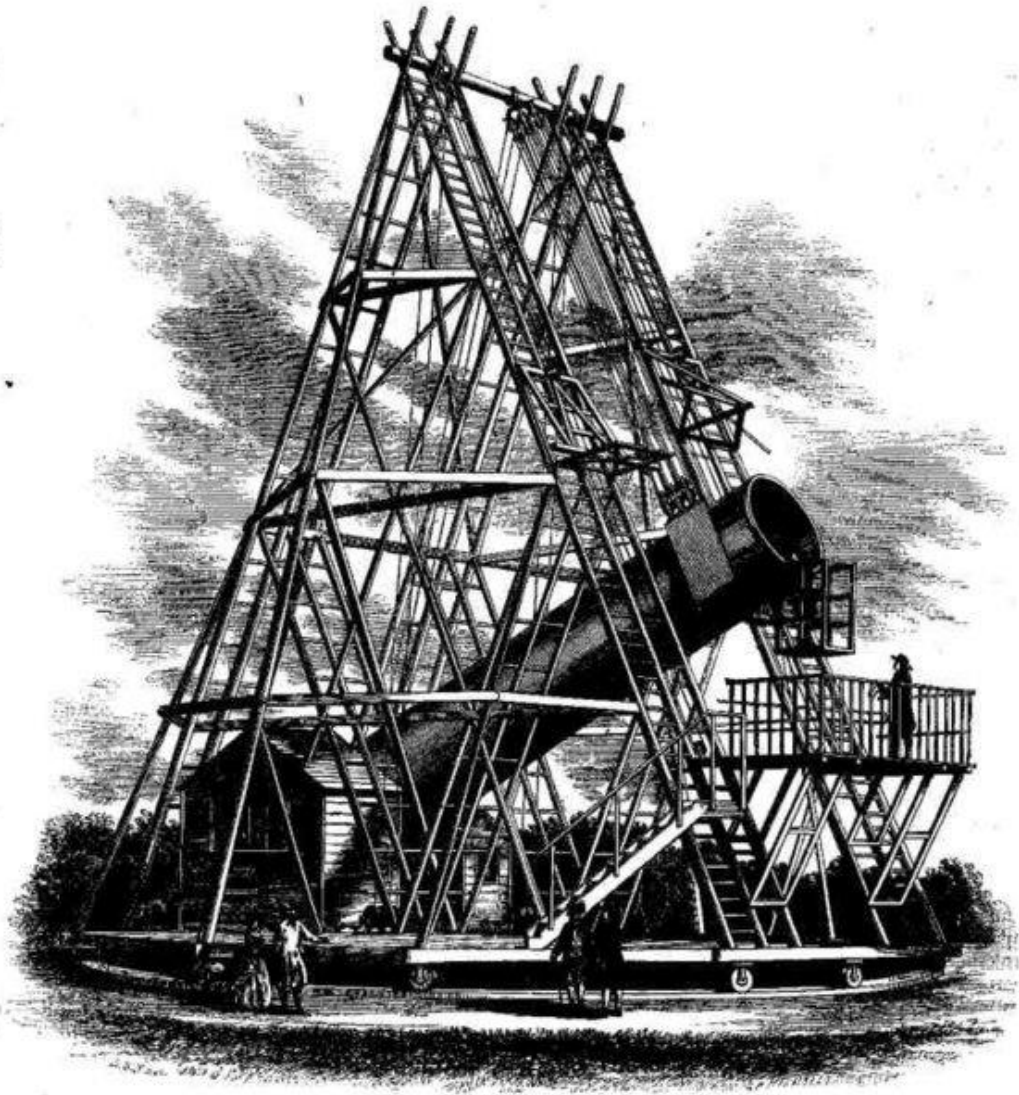


# Chapitre 9

## La Voie Lactée et les galaxies

# La Voie Lactée



- **Galilée** (17<sup>ième</sup> siècle)  
découvre que la Voie Lactée  
est composée d'étoiles
- **Herschel** (18<sup>ième</sup> siècle)  
observe le voisinage solaire  
avec son télescope de 1,25 m à  
miroir en bronze
- **Lord Rosse** (19<sup>ième</sup> siècle)  
observe les premières galaxies  
avec son télescope de 1,8m de  
diamètre

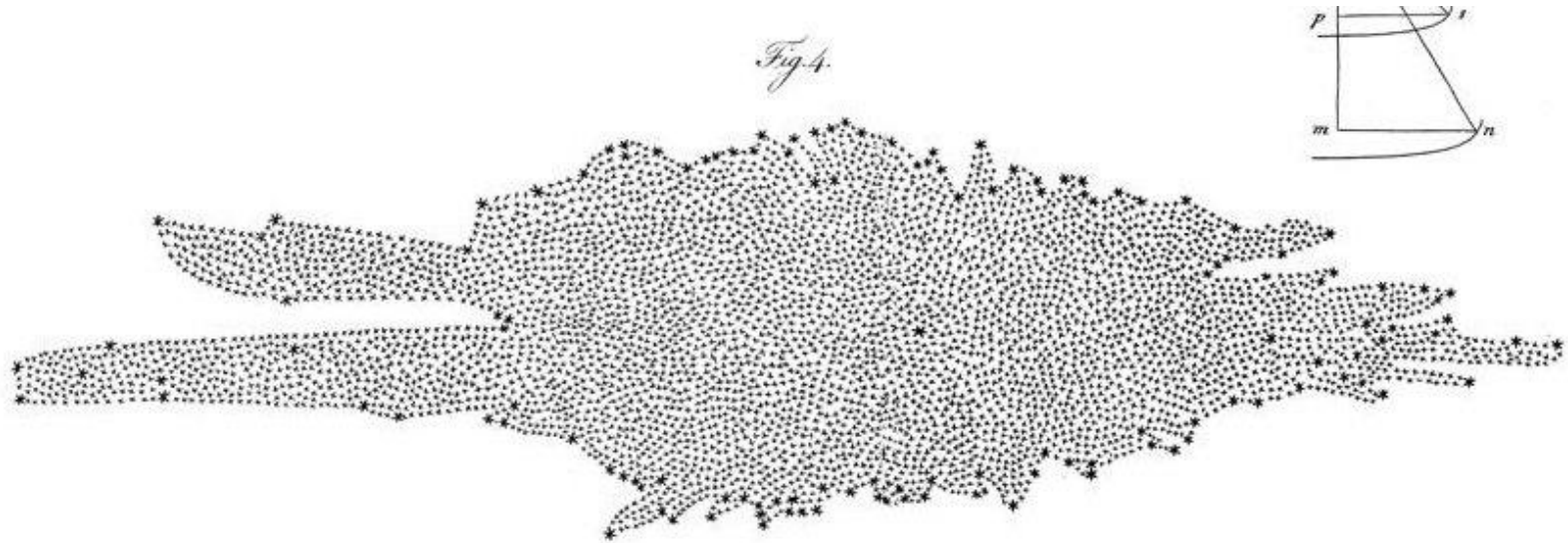
Télescope de Herschel

# La Voie Lactée

- Tentative par **Herschel** de reconstituer la forme de la Voie Lactée mais est gêné par l'absorption par le milieu interstellaire.
- **Jacobus Kapteyn** donne une première estimation de la taille de la Voie Lactée (18<sup>ième</sup>)
- En 1920, **Harlow Shapley** donne notre position dans le disque galactique en utilisant des comptages d'étoiles sur des plaques photos et en mesurant des parallaxes. Il mesure aussi la **distance au centre galactique** en calculant la distance qui nous sépare des amas globulaires du halo galactique.
- Découverte de l'émission radio du centre Galactique par **Karl Jansky** en 1933

# La Voie Lactée

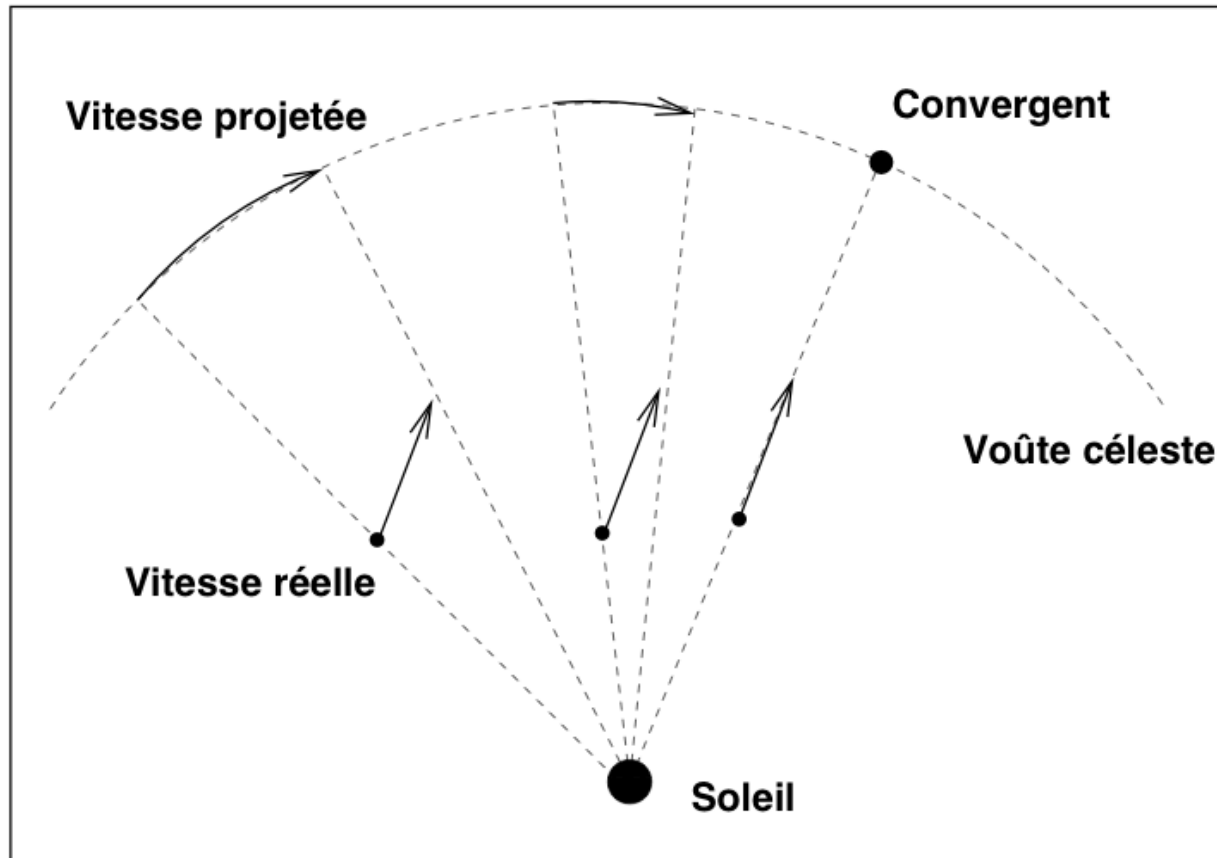
Tentative par **Herschel** de reconstituer la forme de la Voie Lactée par des comptages d'étoiles dans diverses directions



# Distances dans la Voie Lactée

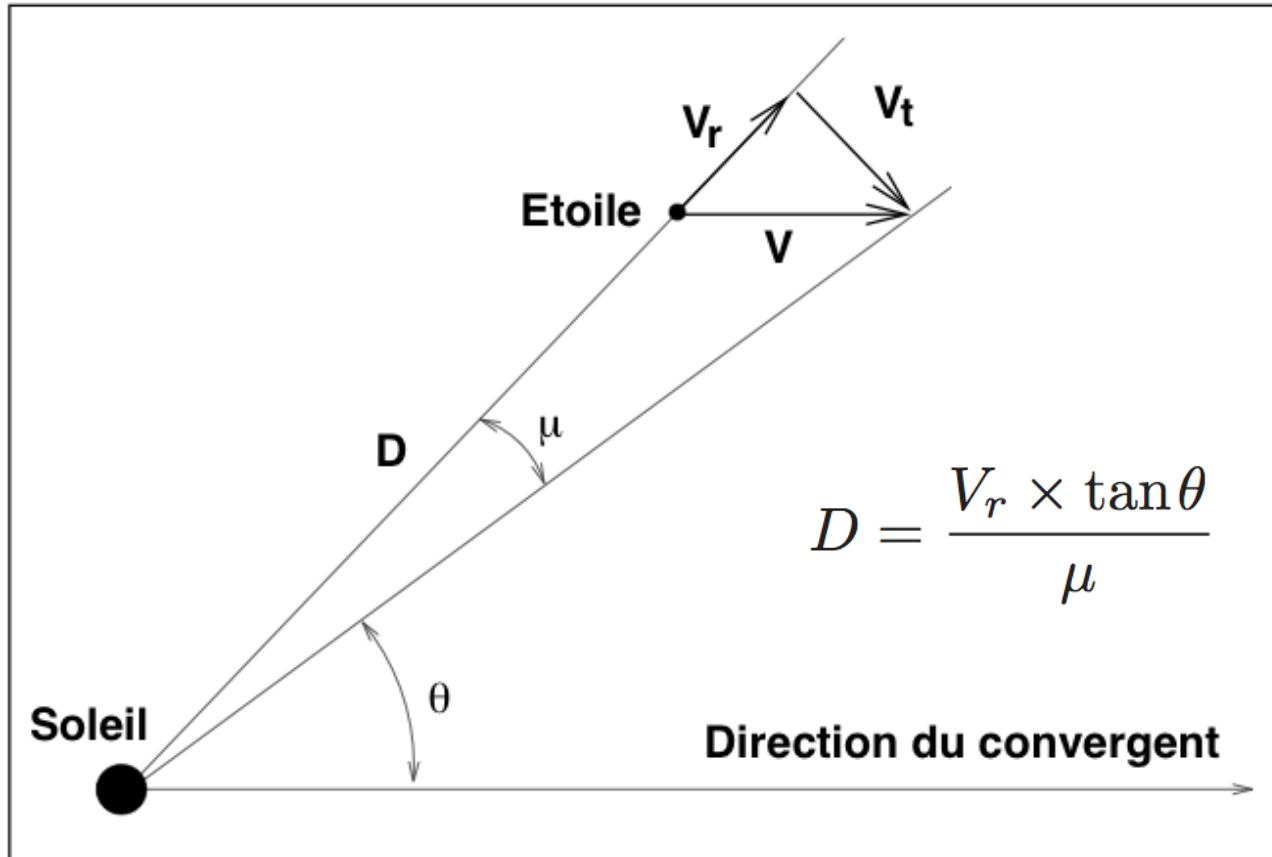
# Mesure des distances

Méthode des « courants d'étoiles » (uniquement pour des amas)



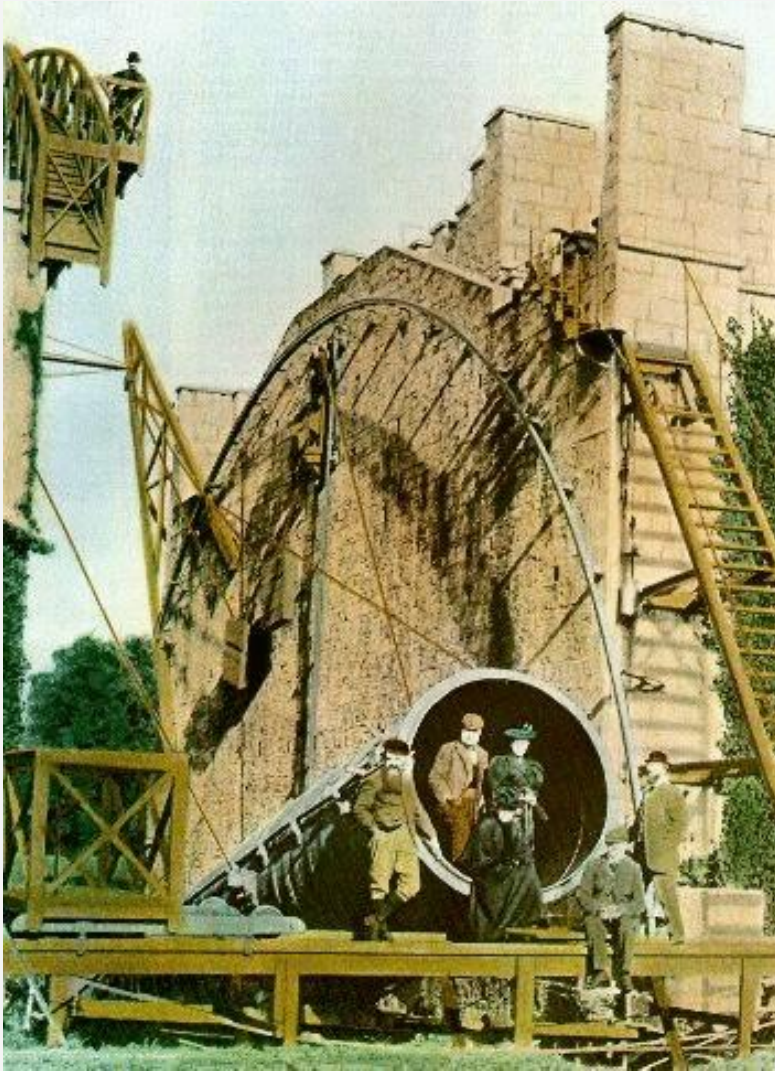
# Mesure des distances

Méthode des « courants d'étoiles »



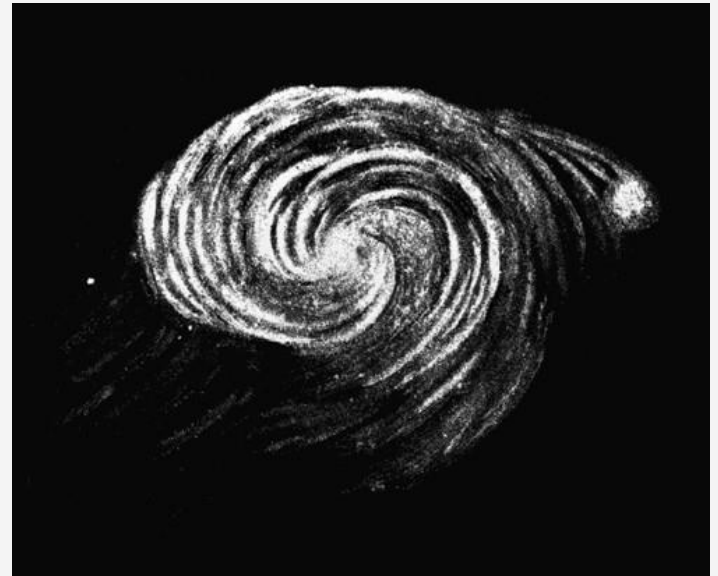
$\mu = V_t / D$       Vitesse angulaire des étoiles sur le plan du ciel

# La Voie Lactée



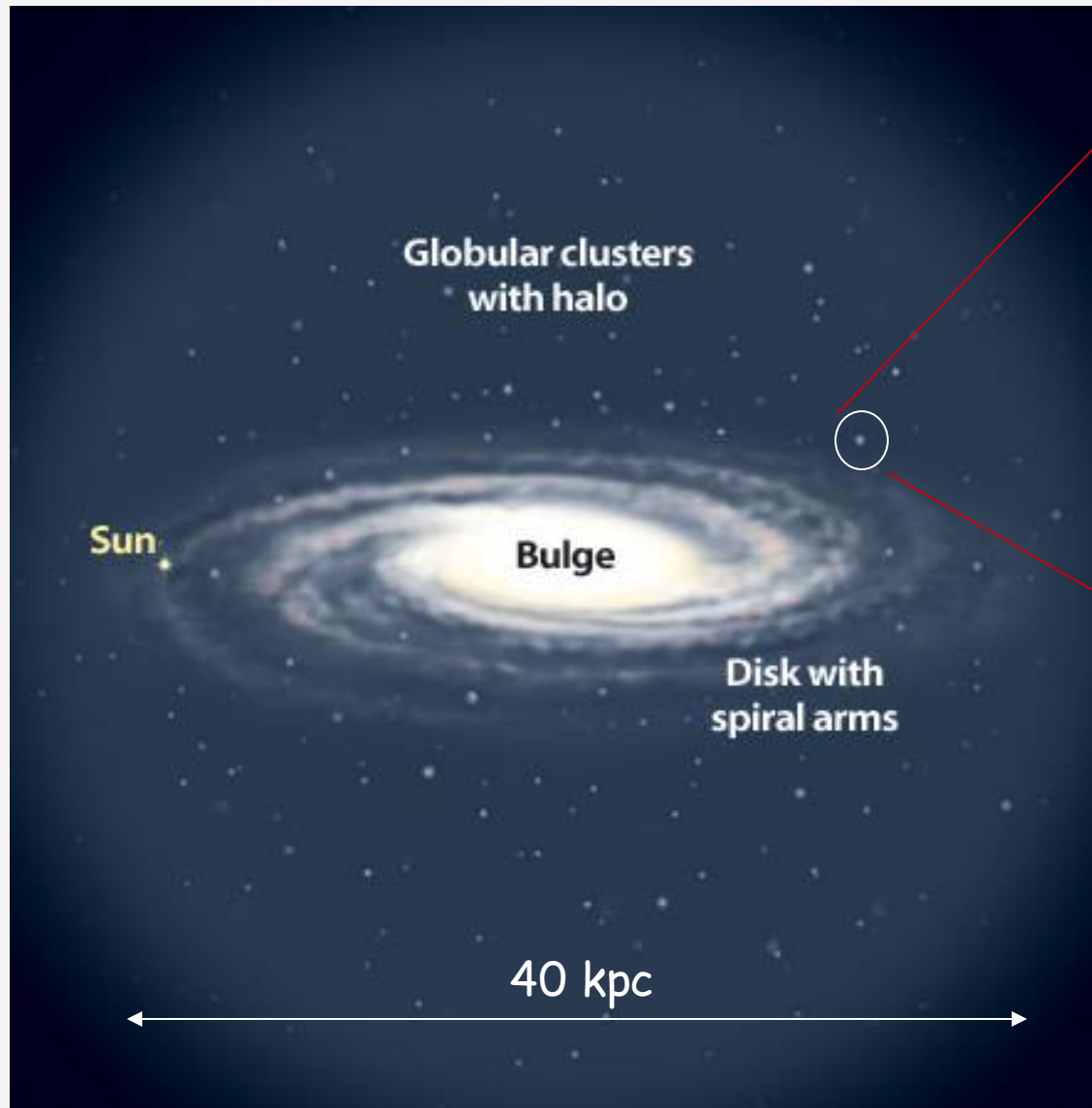
Télescope de Lord Rosse

- **Lord Rosse** (19<sup>ième</sup> siècle) observe les premières galaxies avec son télescope de 1,8m de diamètre



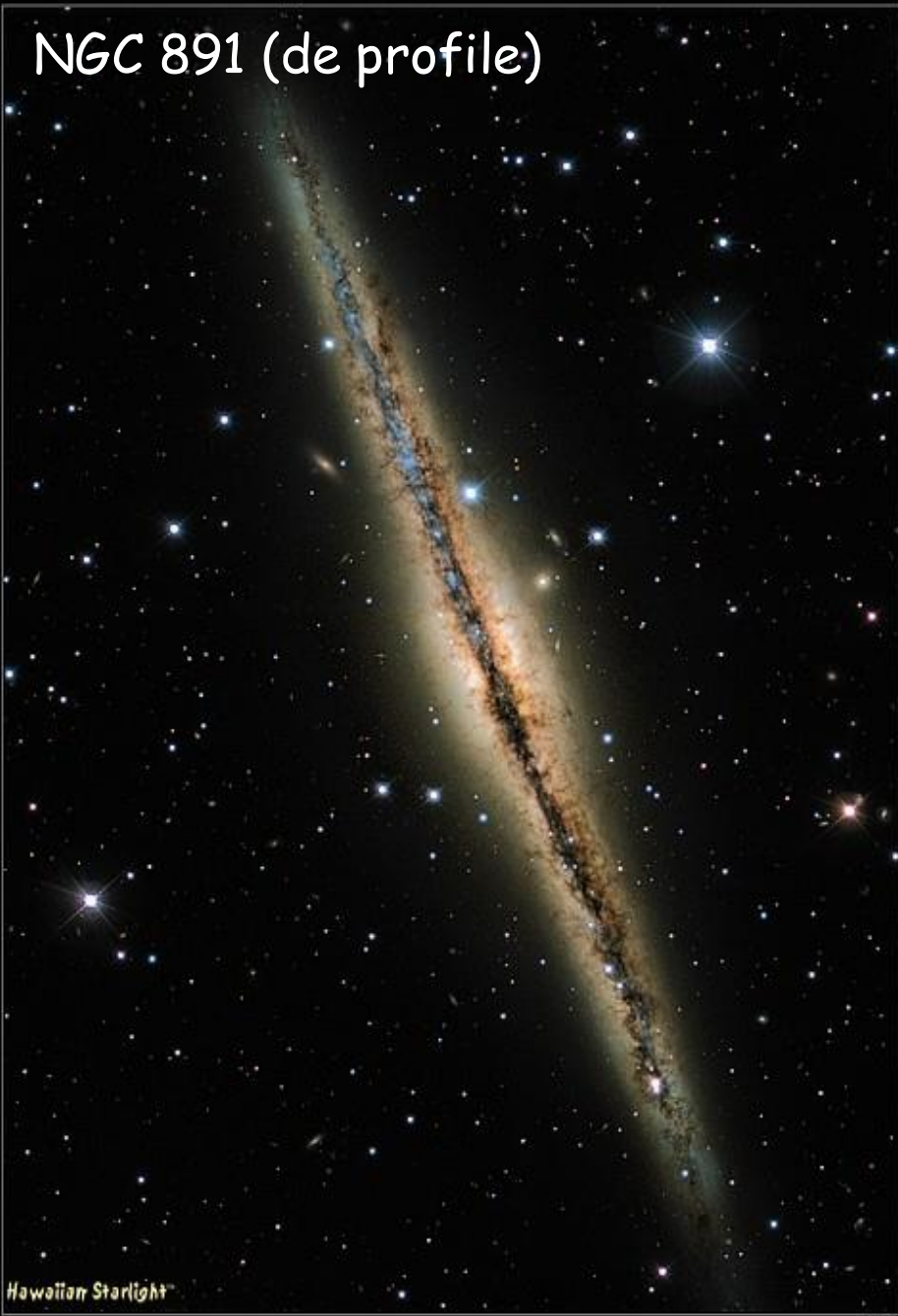
Dessin de la galaxie M51 observée par Rosse, décrite comme « nébuleuse spirale »

# La Voie Lactée



- **Disque** en rotation avec formation d'étoiles
- **Bulbe** d'étoiles vieilles
- **Halo** composé d'amas globulaires vieux
- Halo de matière sombre
- Quelques galaxies satellites

# NGC 891 (de profile)



Hawaiian Starlight

Edge-On Spiral  
Galaxy NGC 891

NGC 891 is a spiral galaxy seen edge-on and located 10 million light years away from our galaxy. It is extremely rich in dust which is the source of the galaxy's dark appearance. NGC 891 is a member of the Local Group and is located in the constellation of Pegasus. NGC 891 is a member of the Local Group and is located in the constellation of Pegasus. NGC 891 is a member of the Local Group and is located in the constellation of Pegasus.

CFH CANADA FRANCE HAWAII TELESCOPE coelum

# NGC 1232 (de face)



The Magnificent Spiral Galaxy NGC 1232 (VLT/FORS)

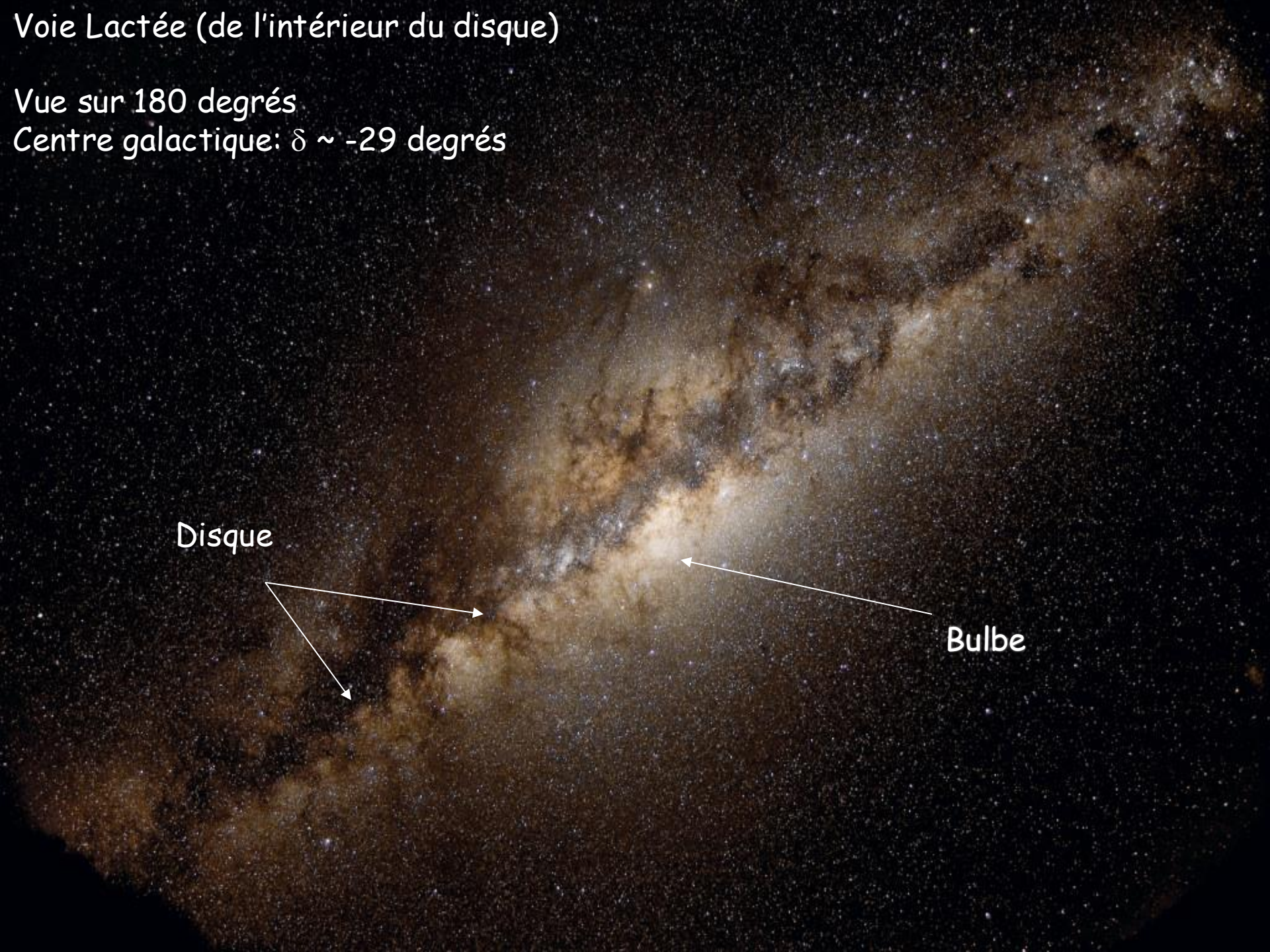
ESO European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere

ESO. Astronomy made in Europe

Voie Lactée (de l'intérieur du disque)

Vue sur 180 degrés

Centre galactique:  $\delta \sim -29$  degrés



# La Voie Lactée

Coordonnées galactiques:

l longitude

b latitude

$b = +90^\circ$

$b = 0^\circ$

« nuages » de Magellan



$b = -90^\circ$

PHOTOGRAPHIC MAGNITUDES

LINC OBSERVATORY

WASH. STATE U.  
PULASKI, WASH.

# La Voie Lactée: le disque

- Forme de la distribution de lumière du disque

$$L(r) = L_0 \exp(-r/h)$$

où  $h$  donne l'échelle de hauteur du disque.

Etoiles de **population I (jeunes)**

- Existence de 3 composantes du fait des orbites des étoiles, qui ne sont pas exactement coplanaires  $\rightarrow$  pression dynamique
- Disque mince jeune  $h = 100$  pc,  $M \sim 6 \times 10^{10} M_{\odot}$   
Gaz moléculaire, Soleil ( $R_0 = 8,5$  kpc), étoiles jeunes
- Disque mince vieux  $h = 325$  pc,  
Etoiles plus vieilles
- Disque épais  $h = 1500$  pc,  $M \sim 3 \times 10^9 M_{\odot}$   
2% de la masse du disque
- Rapport  $M/L \sim 3$

# La Voie Lactée: le bulbe

- Forme de la distribution de lumière du bulbe

$$L(r) = L_0 \exp [(-r/r_e)^{1/4} - 1]$$

où  $r_e$  donne l'échelle du disque.

Etoiles de **population II (vieilles)**

- $r_e$  : **rayon effectif** (contient la moitié de la lumière)
- $r_e \sim 700$  pc pour la Voie Lactée
- $L_0$  est la luminosité centrale du bulbe
- $M \sim 10^{10} M_\odot$  < disque
- Etoiles plus vieilles que dans le disque. Orbites « aléatoires »
- Rapport  $M/L \sim 3$

# La Voie Lactée: le halo

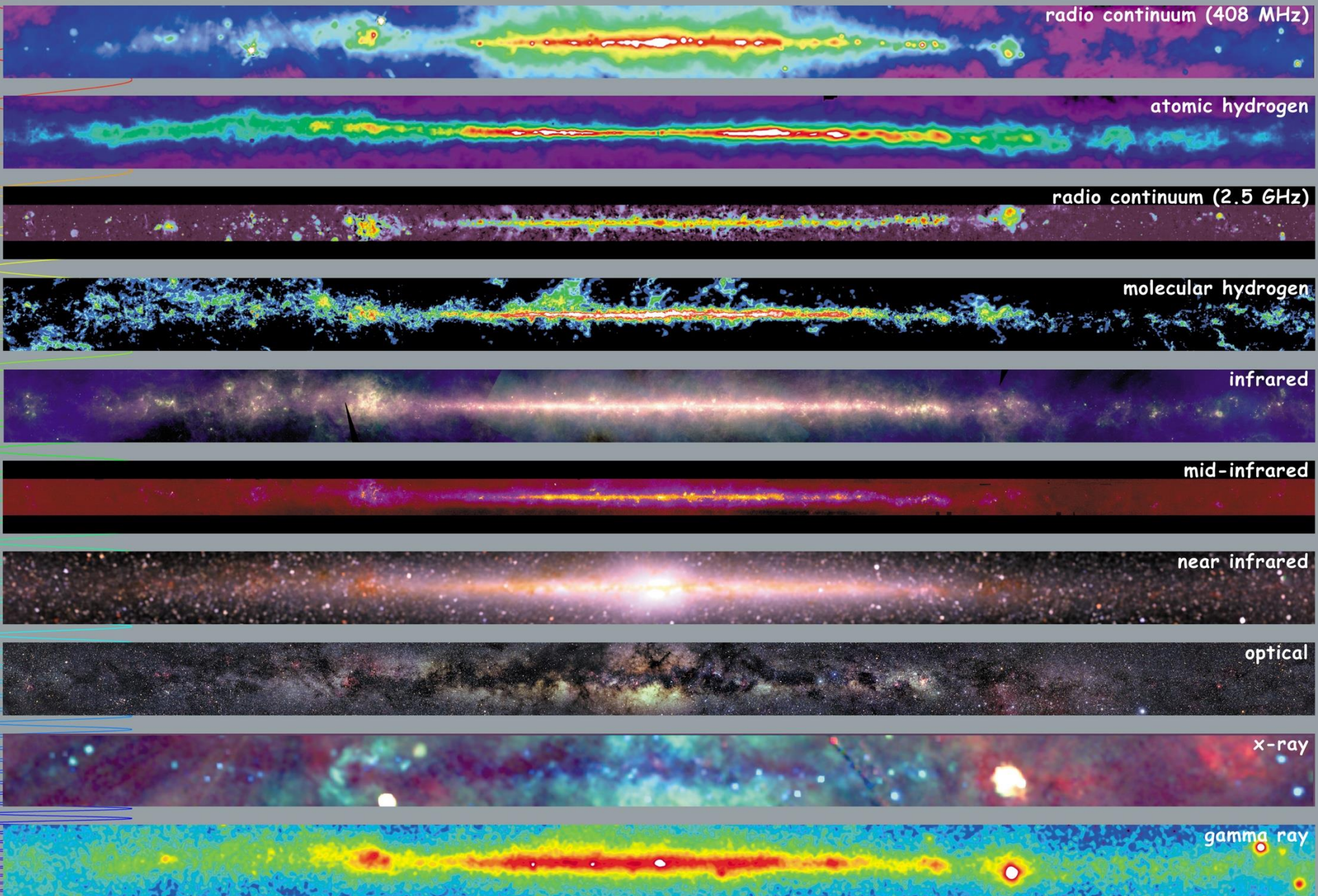
- Forme de la distribution de lumière du halo: mal connue

$$L(r) = r^{-\alpha} ?$$

loi de puissance

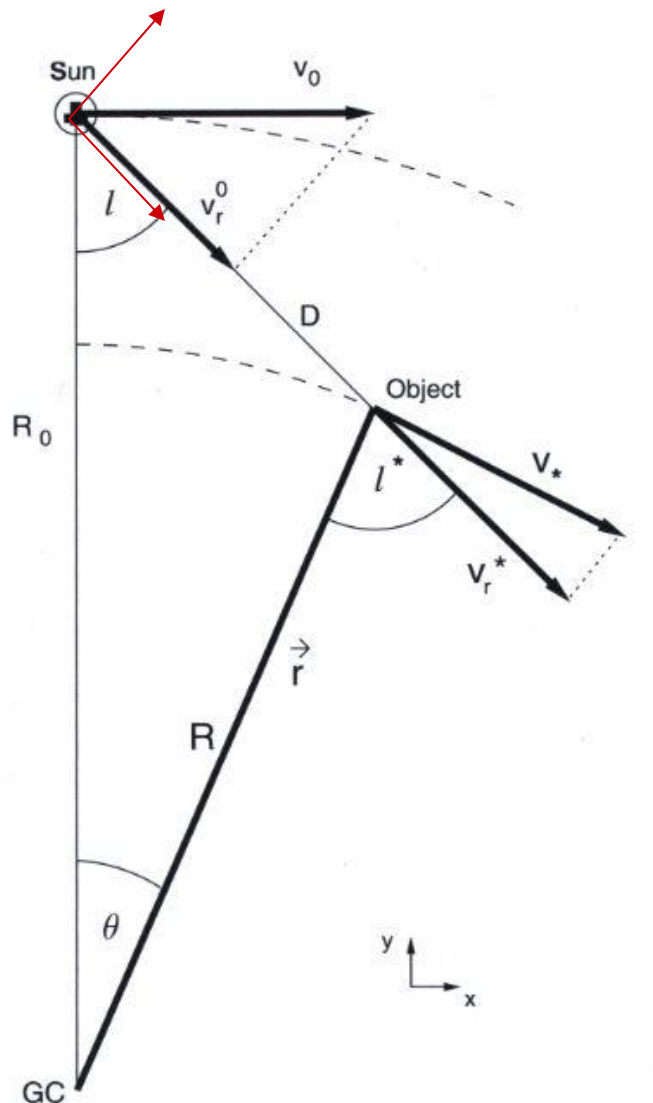
- $r_e \sim 50\text{-}60$  kpc (halo visible)
- Halo visible composé d'environ 150-200 amas globulaires
- Halo sombre qui s'étend plus loin que le halo visible
- $M \sim 5,8 \times 10^{11} M_{\odot}$   
c'est-à-dire plus de 10 x masse du disque ou du bulbe

# La Voie Lactée: vue multi-longueurs d'onde



# **Dynamique de la Voie Lactée**

# Rotation du disque



Disque en rotation:

$$V_0 = \omega_0 R_0 \quad (\text{Soleil})$$

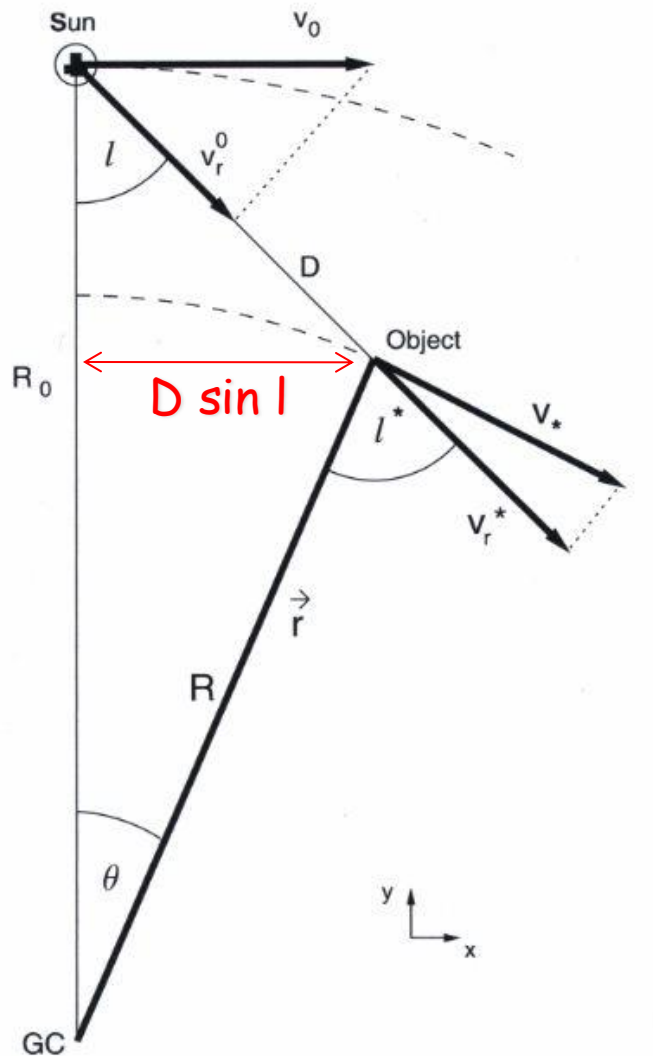
$$V = \omega R \quad (\text{Objet})$$

On cherche les vitesses **radiale** et **tangentielle** de l'objet **par rapport au Soleil** en fonction de la longitude Galactique,  $l$

Si la rotation est purement rigide  
alors  $\omega_0 = \omega$

Pour le calcul on suppose  $\omega = \omega(R)$

# Rotation du disque



En coordonnées cartésiennes:

$$\vec{r} = R \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix}, \quad v(\vec{r}) = V \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix}$$

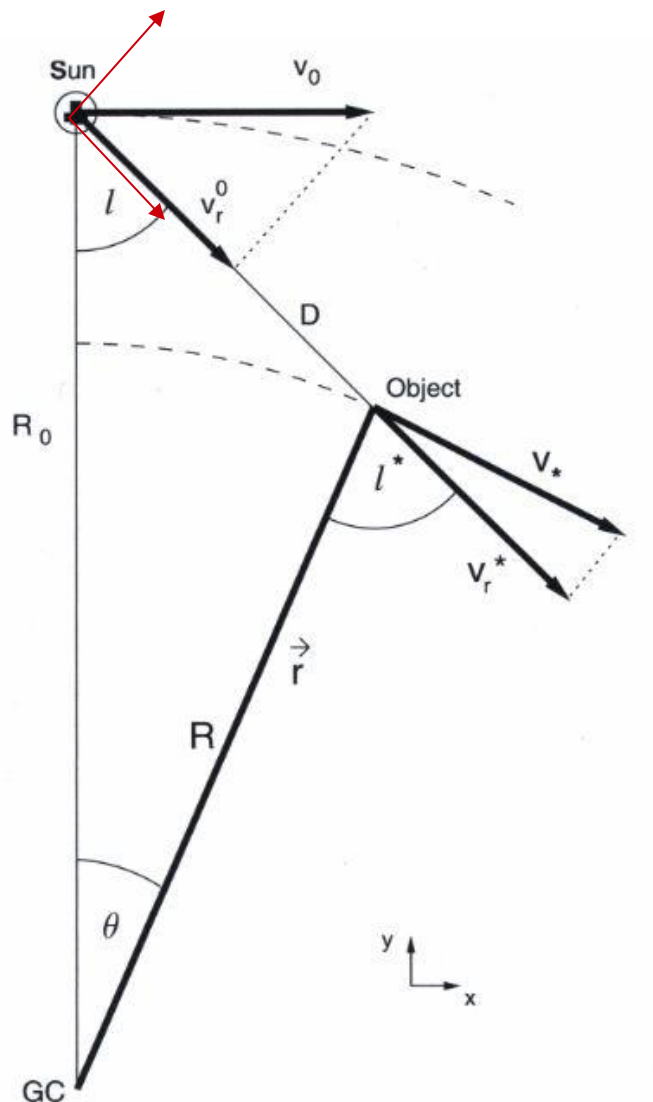
$$\vec{r} = \begin{pmatrix} D \sin l \\ R_0 - D \cos l \end{pmatrix}$$

En identifiant:

$$\sin \theta = (D/R) \sin l$$

$$\cos \theta = (R_0/R) - (D/R) \cos l$$

# Rotation du disque



En coordonnées cartésiennes:

$$\vec{v} - \vec{v}_{\odot} = \begin{pmatrix} R_0(\omega - \omega_0) - \omega D \cos l \\ -D \omega \sin l \end{pmatrix}$$

En projetant sur les vecteur unitaires liés au soleil:

$$v_r = (\vec{v} - \vec{v}_{\odot}) \cdot \begin{pmatrix} \sin l \\ -\cos l \end{pmatrix} = (\omega - \omega_0) R_0 \sin l$$

$$v_t = (\vec{v} - \vec{v}_{\odot}) \cdot \begin{pmatrix} \cos l \\ \sin l \end{pmatrix} = (\omega - \omega_0) R_0 \cos l - \omega D$$

# Rotation du disque

Dans le voisinage solaire,  $\omega \sim \omega_0$  et les vitesses s'expriment en fonction des **constantes de Oort, A et B**:

$$v_r = A D \sin 2l$$

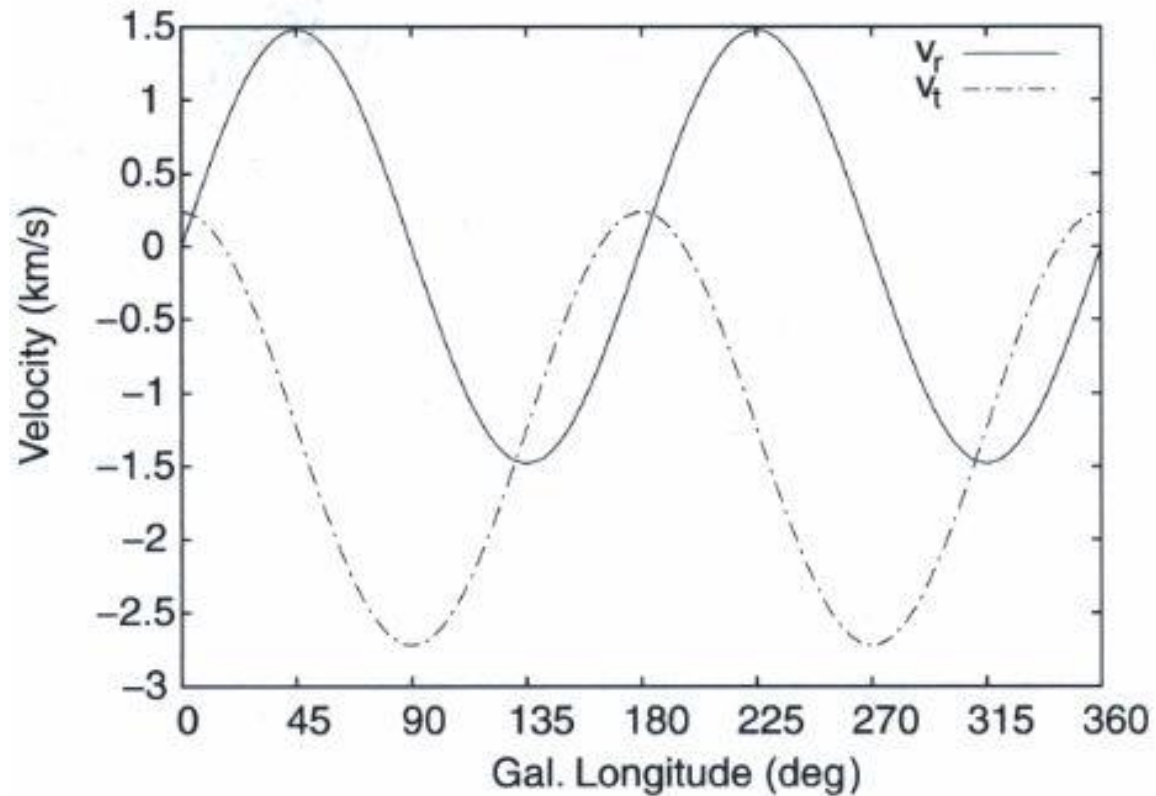
$$v_t = A D \cos 2l + B D$$

$$A = -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{dV}{dR} \right)_{R_0} - \frac{V_0}{R_0} \right]$$

$$B = -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{dV}{dR} \right)_{R_0} + \frac{V_0}{R_0} \right]$$

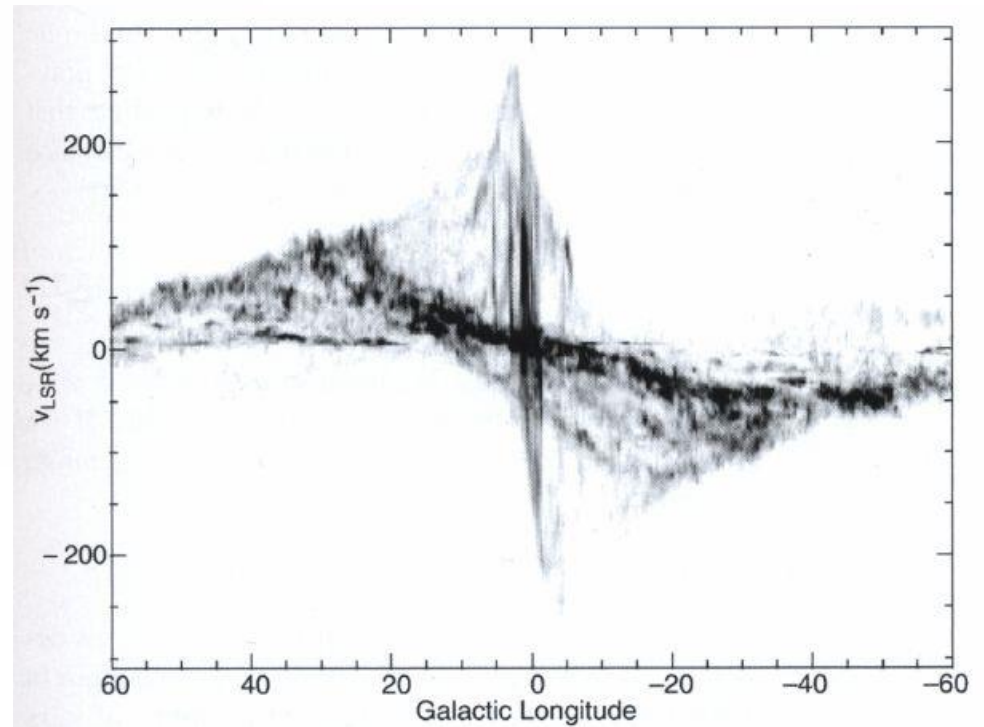
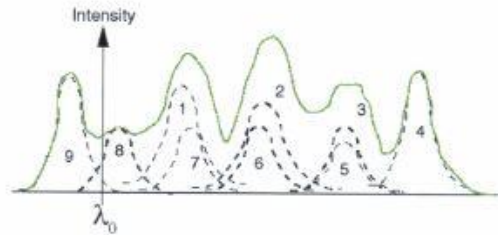
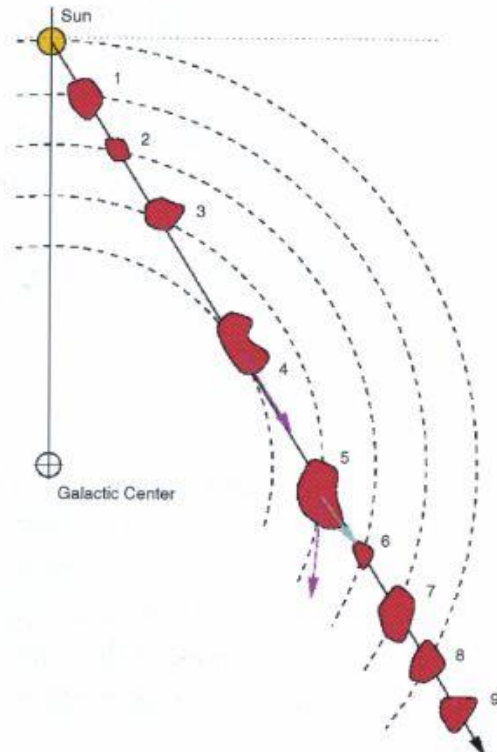
# Rotation du disque

Le mouvement observé confirme l'hypothèse de **rotation non-rigide**



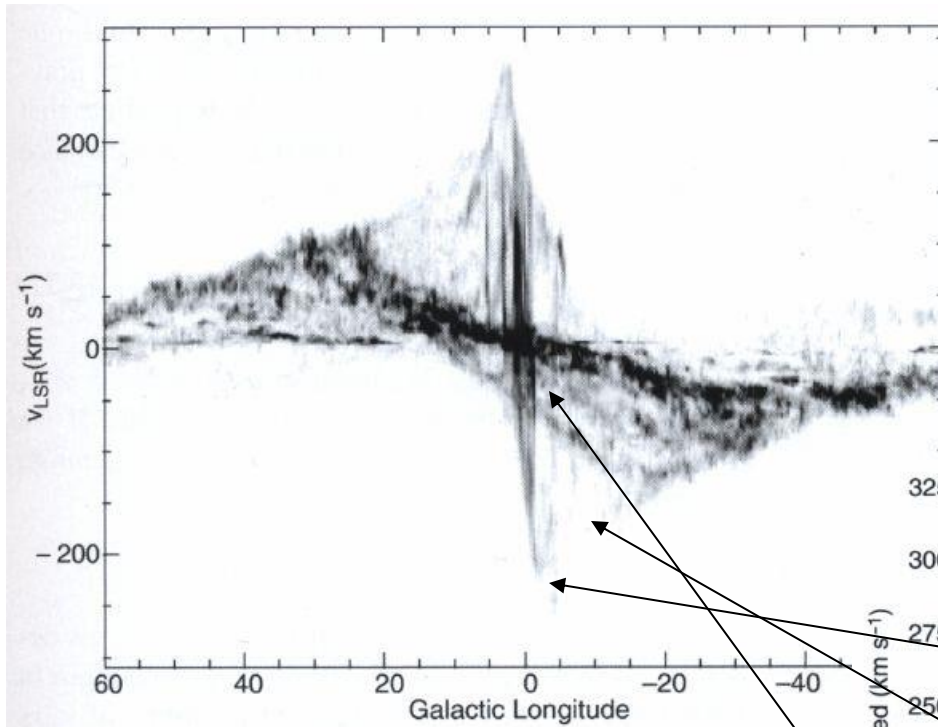
# Rotation du disque

## Méthode du point tangent

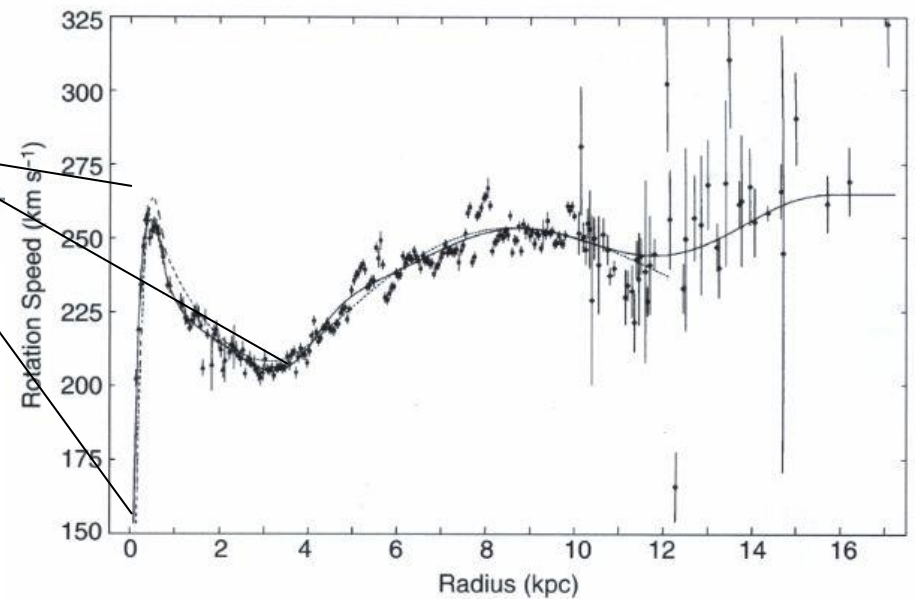


# Rotation du disque

Courbe de rotation HI



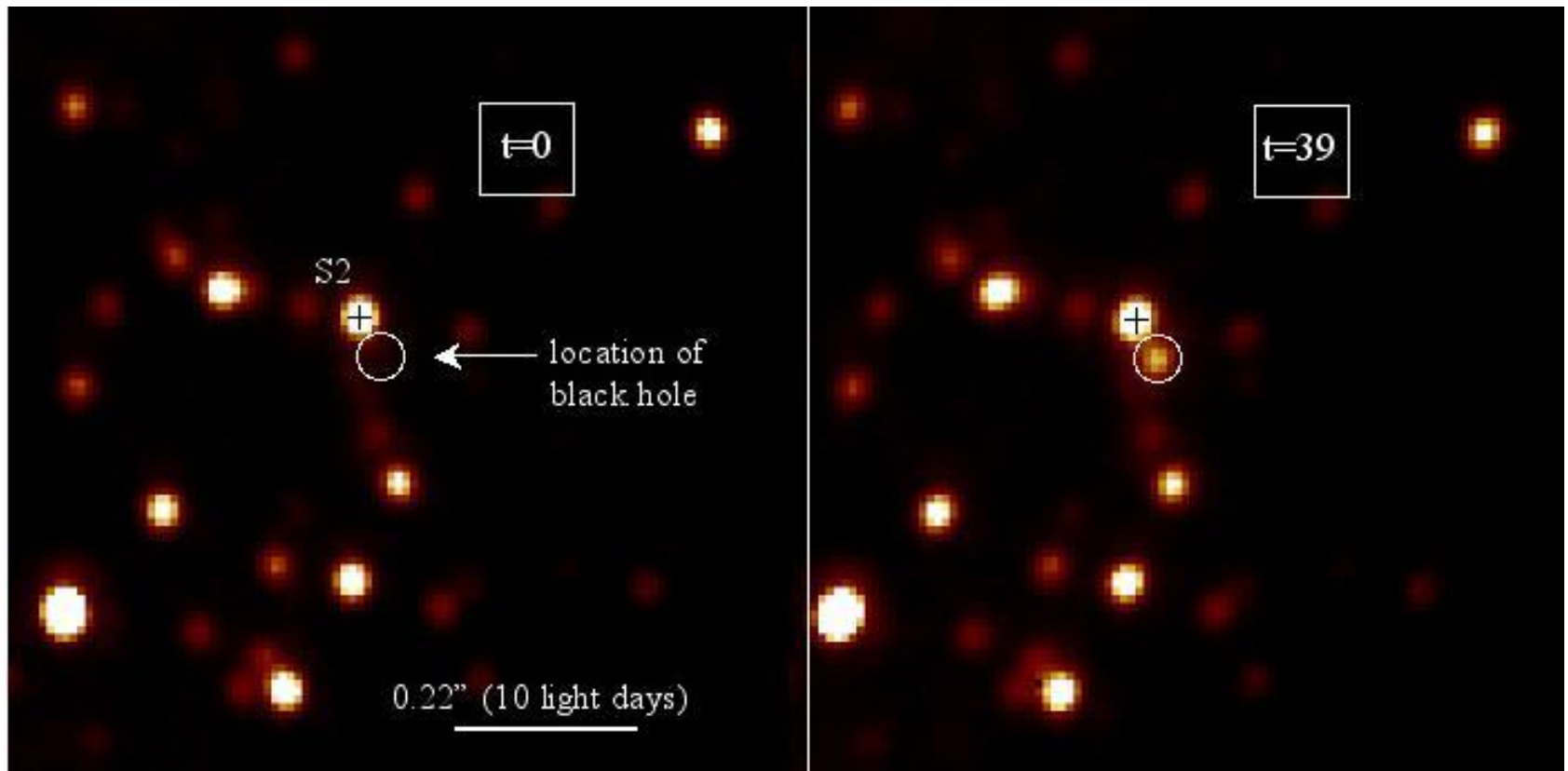
Courbe de rotation HI (1D)



**Le trou noir central**

# Le trou noir central

Mise en évidence par détection de flashes lumineux.



# Le trou noir central

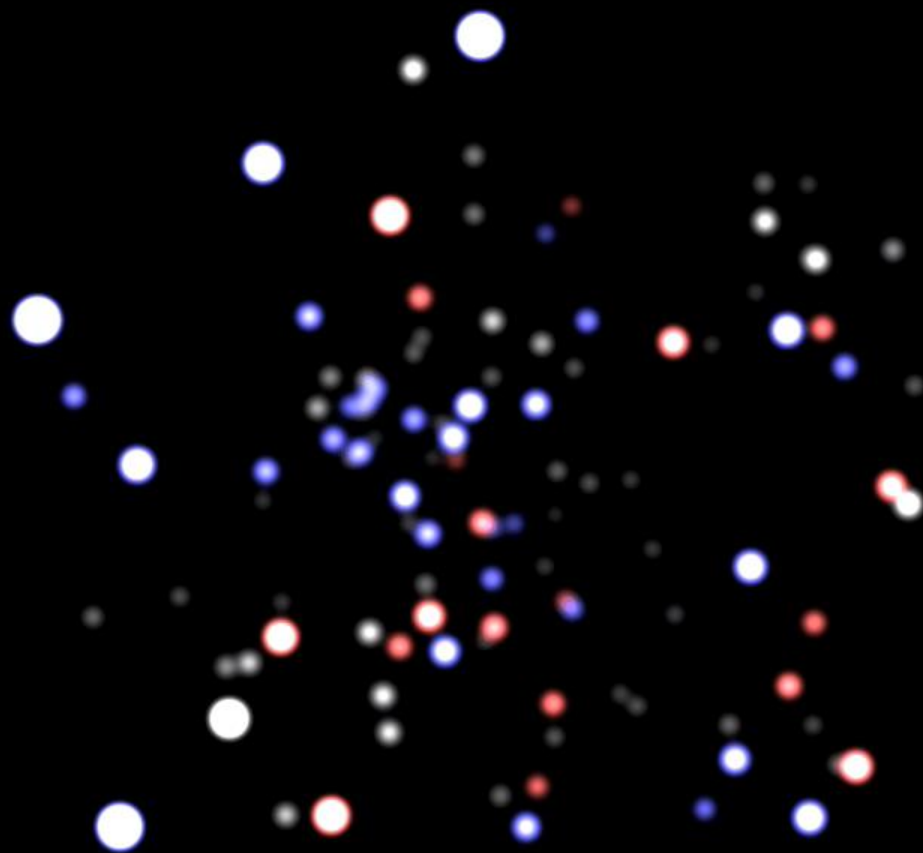


Mise en évidence par mesure  
des paramètres orbitaux  
d'étoiles orbitant le centre de  
la Voie Lactée.

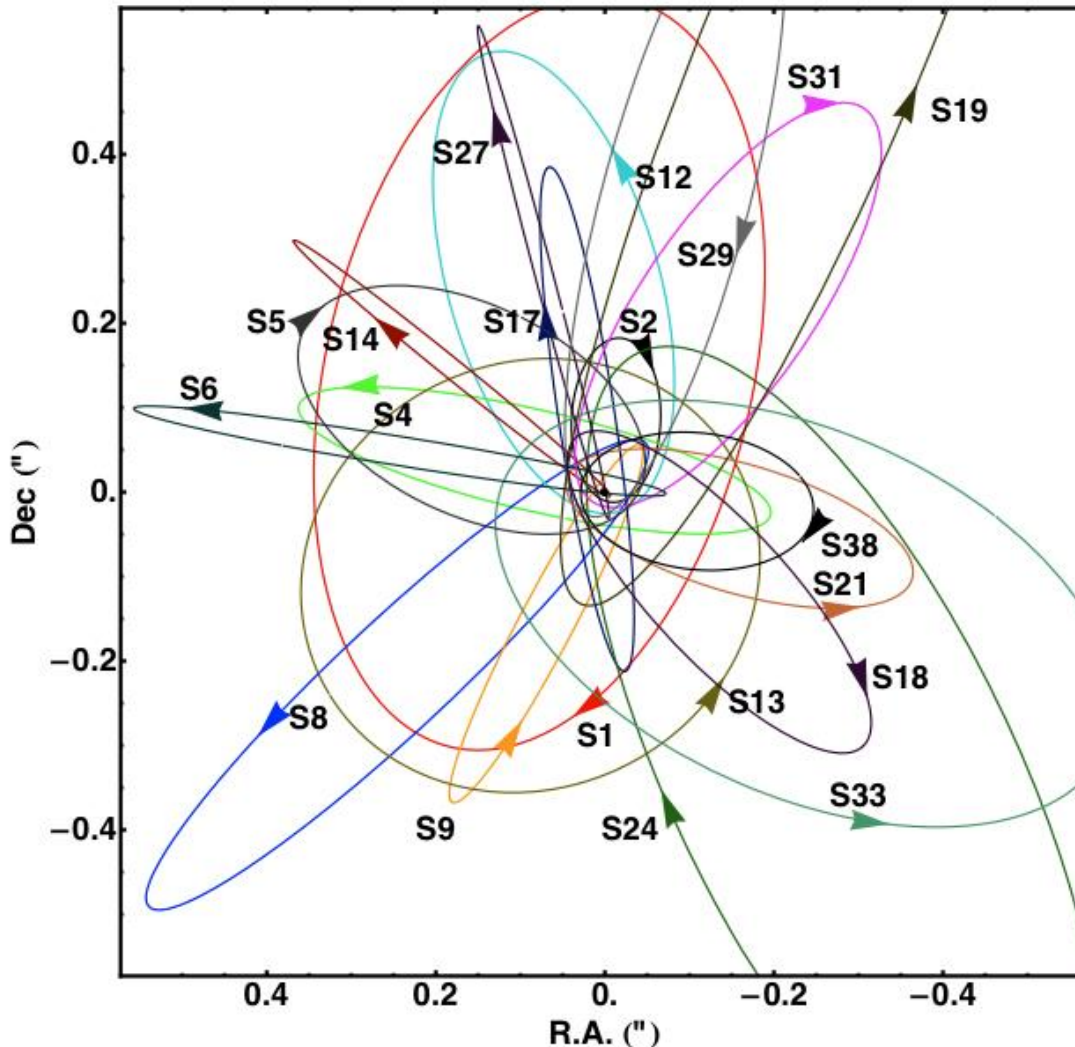
Périodes de quelques années

Masse du trou noir:  $3 \times 10^6 M_{\odot}$

Les étoiles ont du se former  
loin du trou noir (limite de  
Roche)



# 28 orbites stellaires dans le centre grâce à la mesure de vitesses radiales et tangentielles

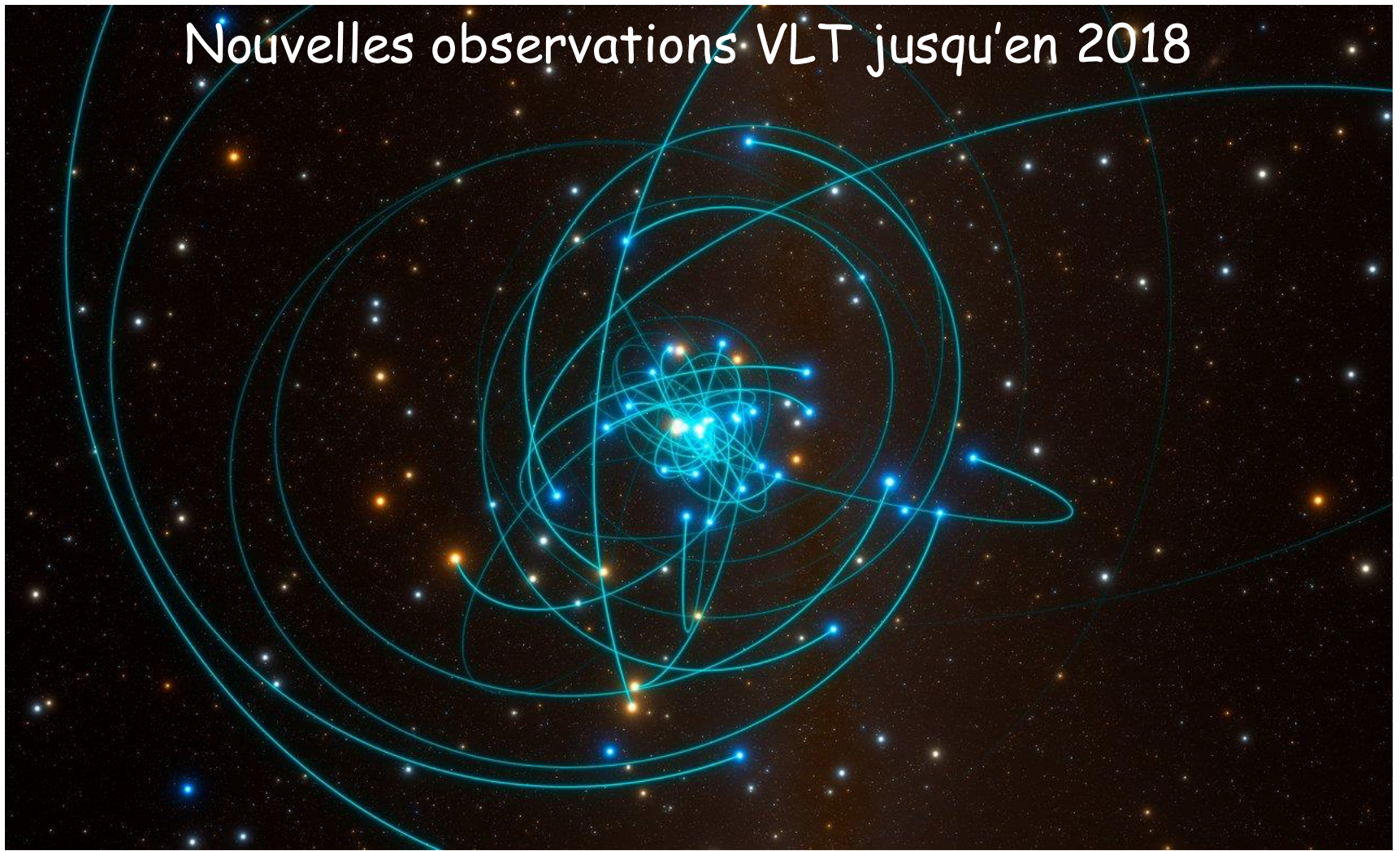


Distance au centre  
Galactique  
 $R_0 = 8.33 \pm 0.35$  kpc

Masse du trou noir  
central  
 $M = 3.95 \times 10^6 M_{\odot}$

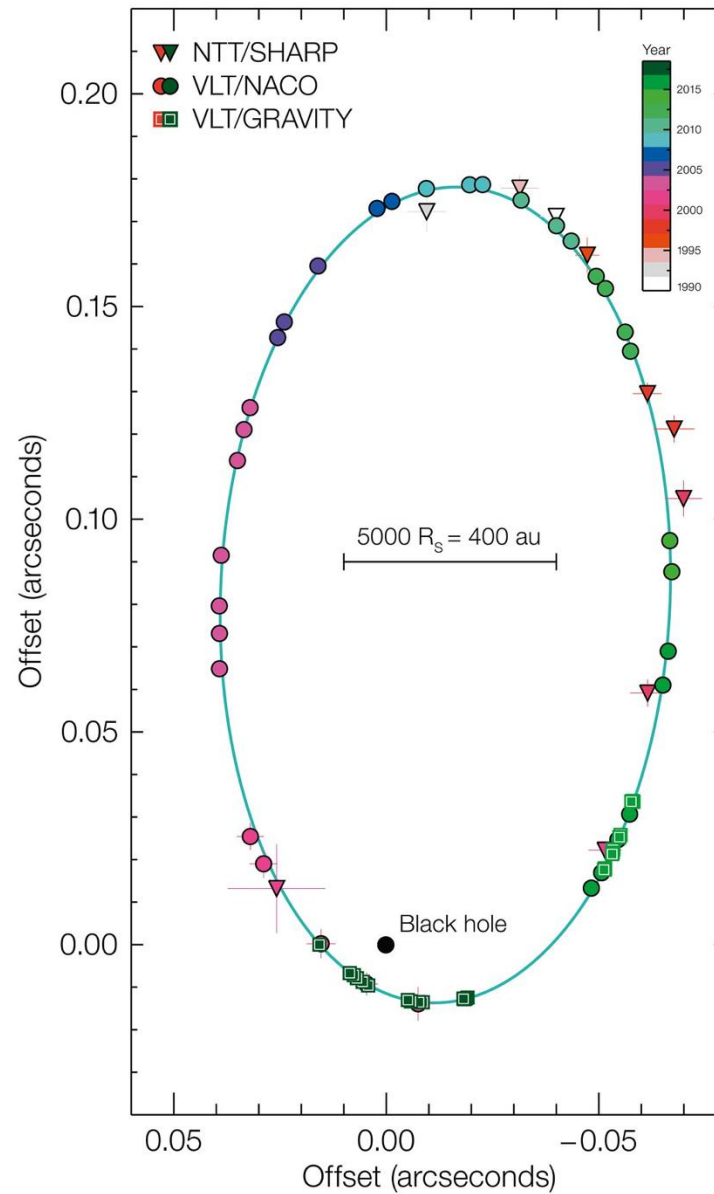


# Nouvelles observations VLT jusqu'en 2018

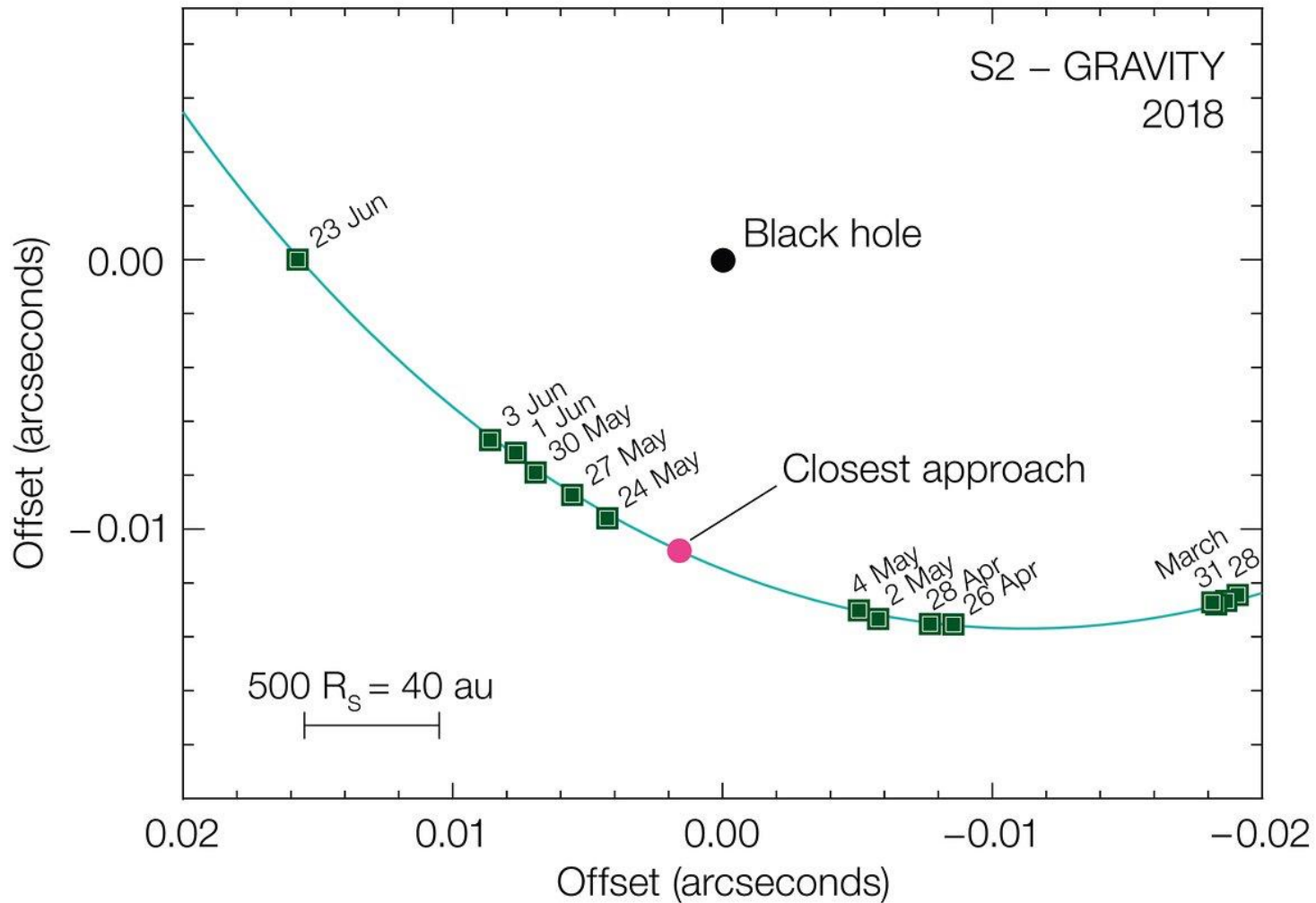


The highly elliptical, 16-year-period orbit of the star S2 around the massive black hole candidate Sgr A\* is a sensitive probe of the gravitational field in the Galactic centre. Near pericentre at  $120 \text{ AU} \approx 1400$  Schwarzschild radii, the star has an orbital speed of  $\approx 7650 \text{ km/s}$ , such that the first-order effects of Special and General Relativity have now become detectable with current capabilities. Over the past 26 years, we have monitored the radial velocity and motion on the sky of S2, mainly with the SINFONI and NACO adaptive optics instruments on the ESO Very Large Telescope, and since 2016 and leading up to the pericentre approach in May 2018, with the four-telescope interferometric beam-combiner instrument GRAVITY. From data up to and including pericentre, we robustly detect the combined gravitational redshift and relativistic transverse Doppler effect for S2 of  $z = \Delta\lambda/\lambda \approx 200 \text{ km/s}/c$  with different statistical analysis methods. When parameterising the post-Newtonian contribution from these effects by a factor  $f$ , with  $f = 0$  and  $f = 1$  corresponding to the Newtonian and general relativistic limits, respectively, we find from posterior fitting with different weighting schemes  $f = 0.90 \pm 0.09_{\text{stat}} \pm 0.15_{\text{sys}}$ . The S2 data are inconsistent with pure Newtonian dynamics.

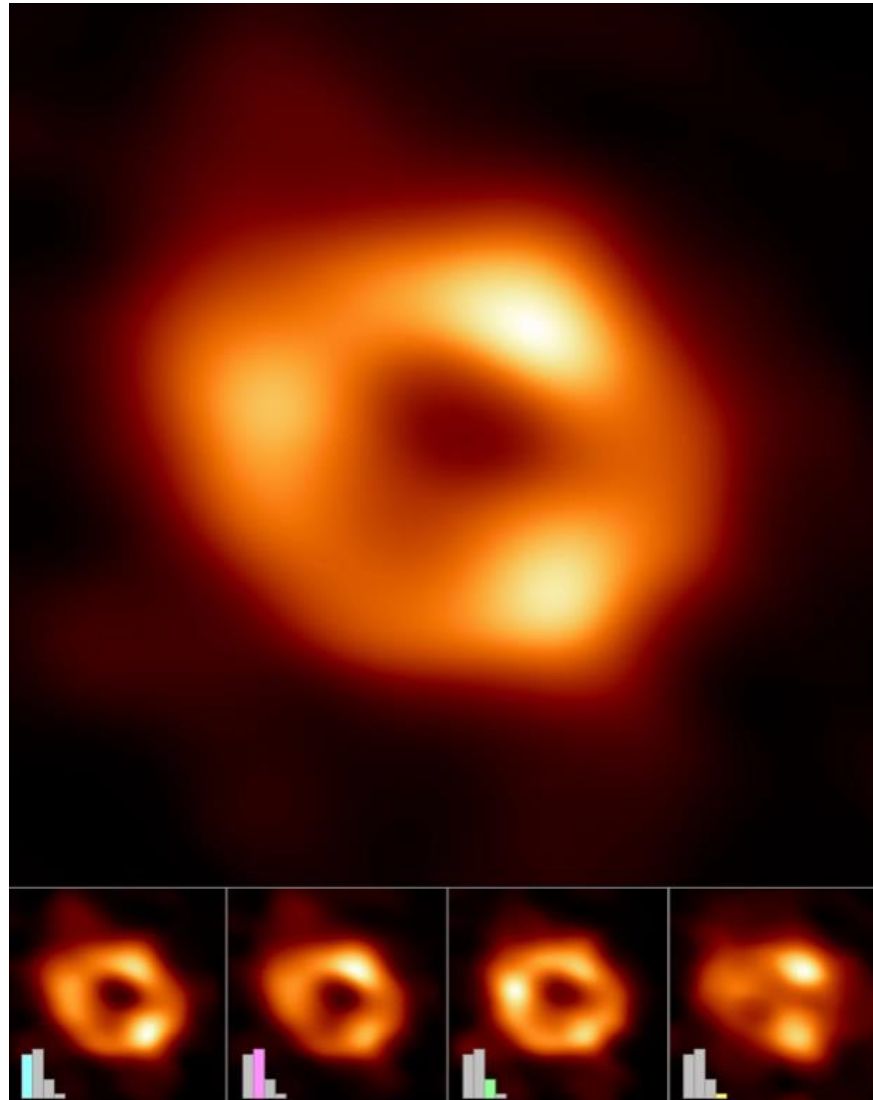
# Nouvelles observations VLT jusqu'en 2018

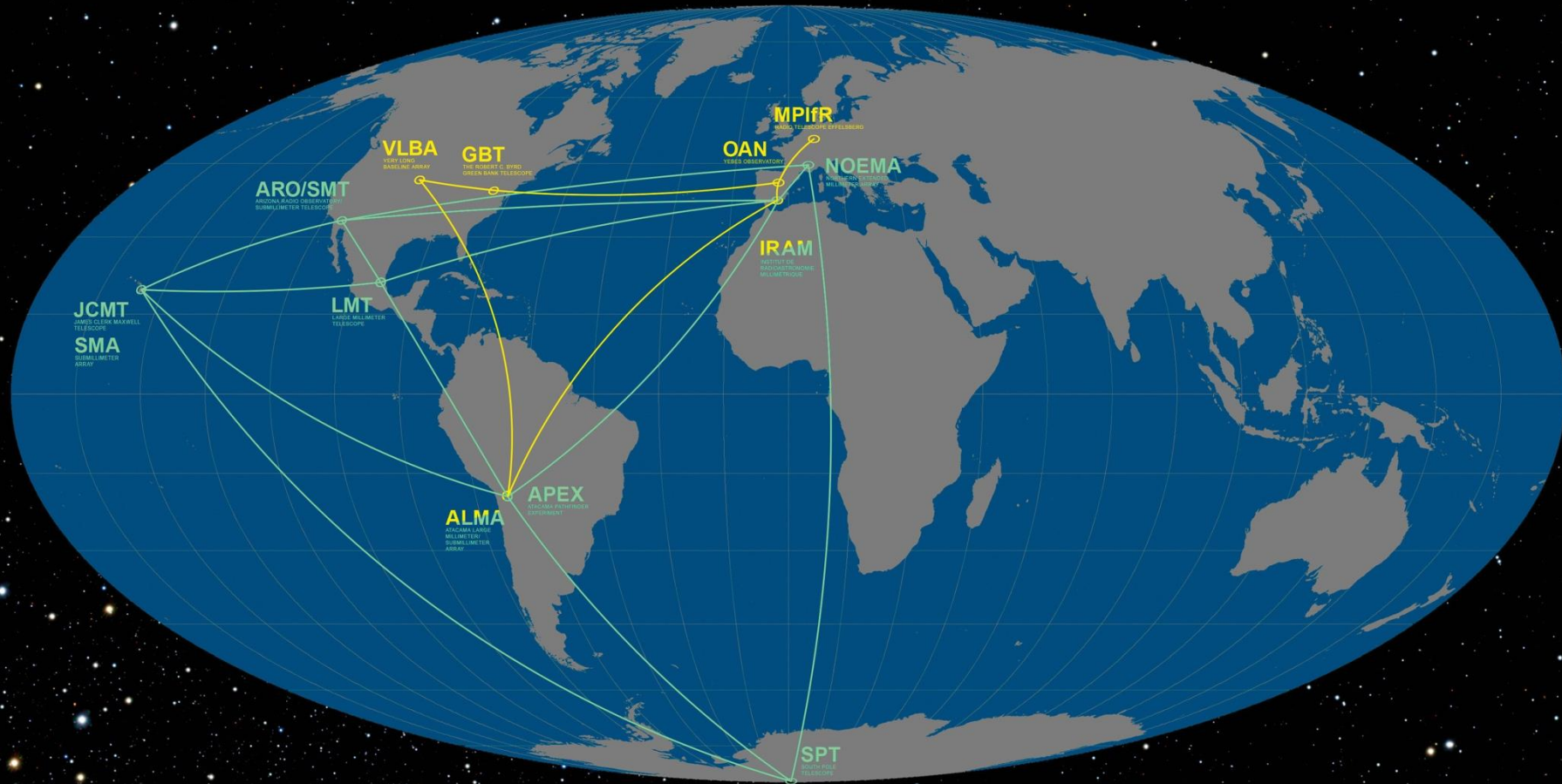


# Nouvelles observations VLT jusqu'en 2018



11 mai 2022: première image par «Event Horizon Telescope»





M87\*

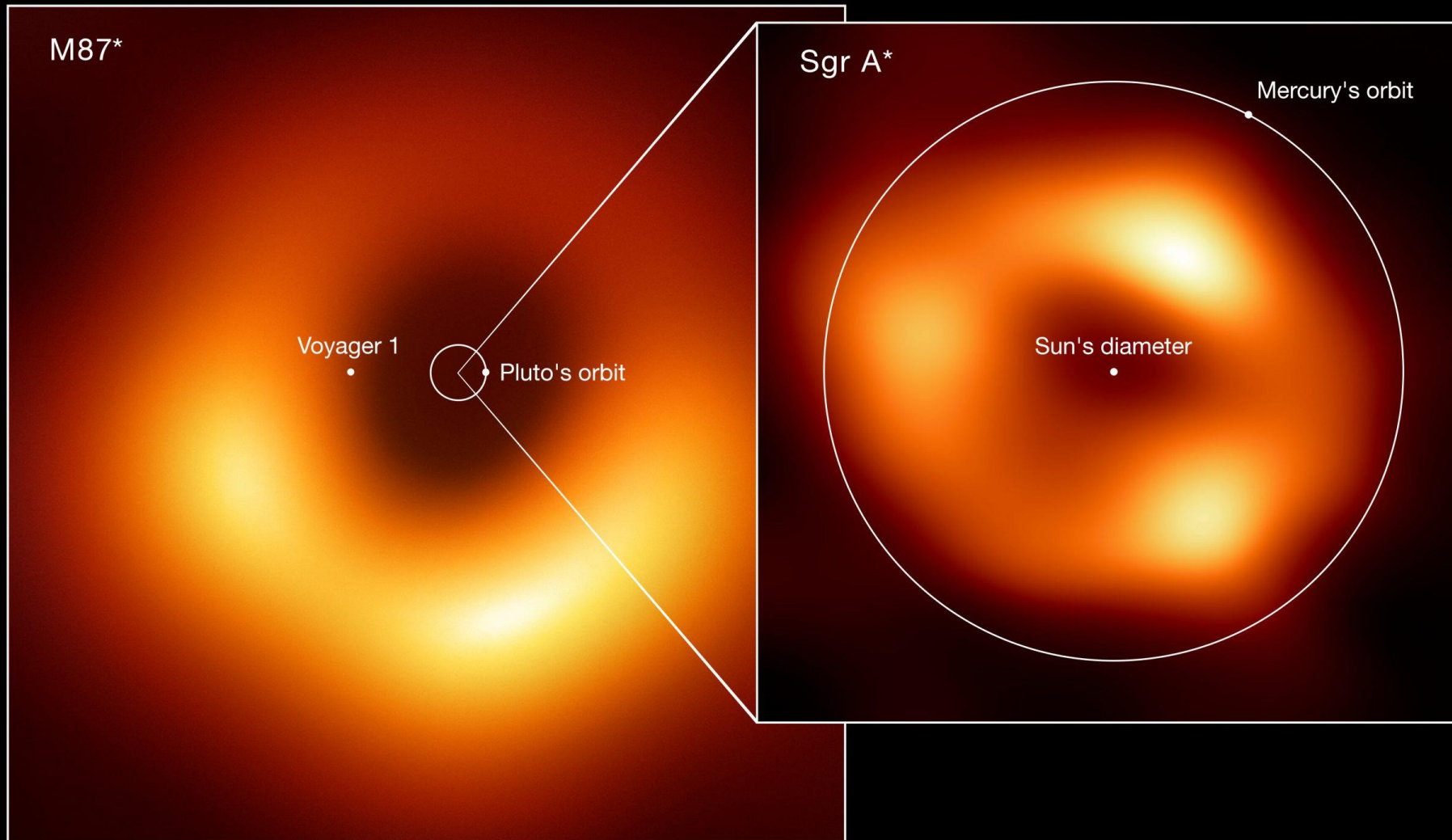
Voyager 1

Pluto's orbit

Sgr A\*

Mercury's orbit

Sun's diameter



# BLACK-HOLE IMAGE EVOLVES

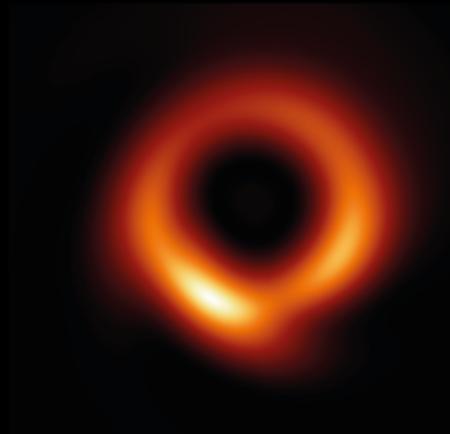
Various astronomy teams have analysed observation data of M87\* — the first black hole ever to be imaged — to create an evolving set of pictures of the abyss. Their studies are revealing details about the black hole and its environment.

**Event Horizon Telescope (EHT) image, 2019**



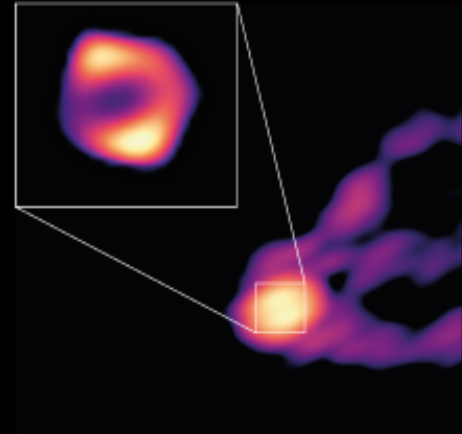
The EHT's first image of M87\* showed a ring of light bent around the black hole's gravitational field. But it was unclear where that glow came from: perhaps the black hole's spinning 'accretion disk' of matter or its poles, where its jets of matter are thought to originate.

**Refined EHT image, 2023**



A machine-learning algorithm applied to the EHT data generated a sharper image with a thinner ring and a darker disk at the centre.

**Global Millimetre VLBI Array (GMVA) image, 2023**



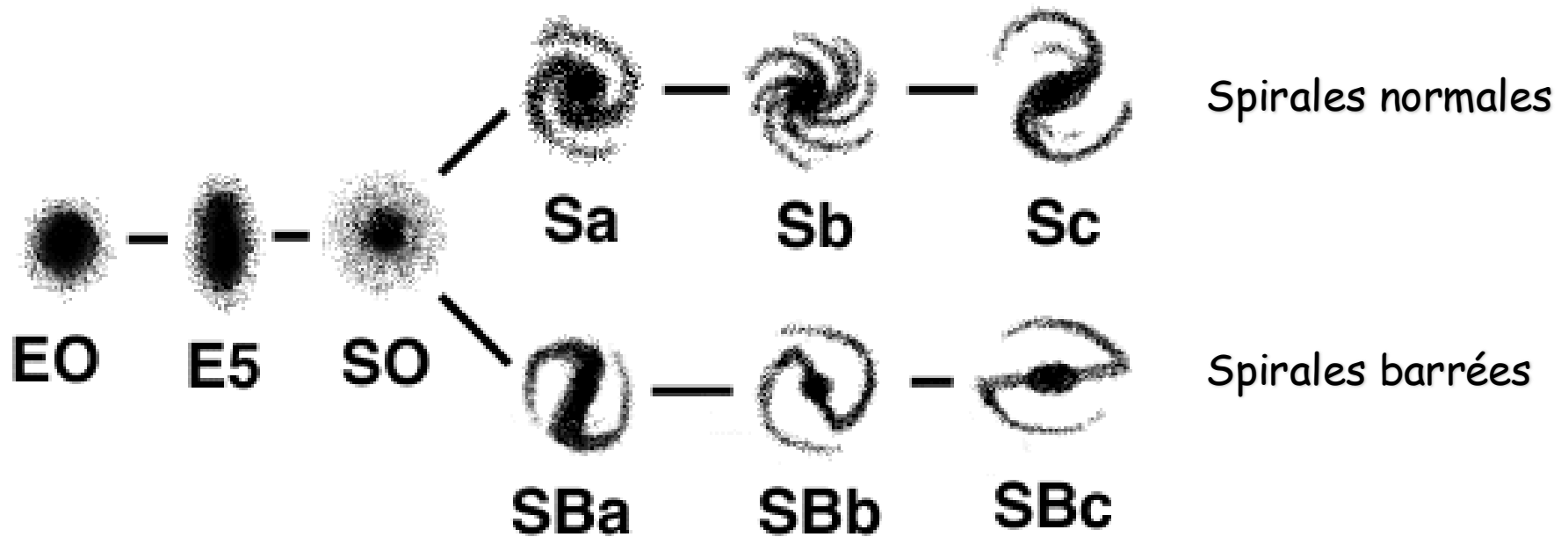
The latest image of M87\*, taken by a separate array called the GMVA, was blurrier than the original one — but it revealed the base of the jet emanating from the black hole's north pole. This suggests that the ring's light comes mainly from the jet.

# Les galaxies

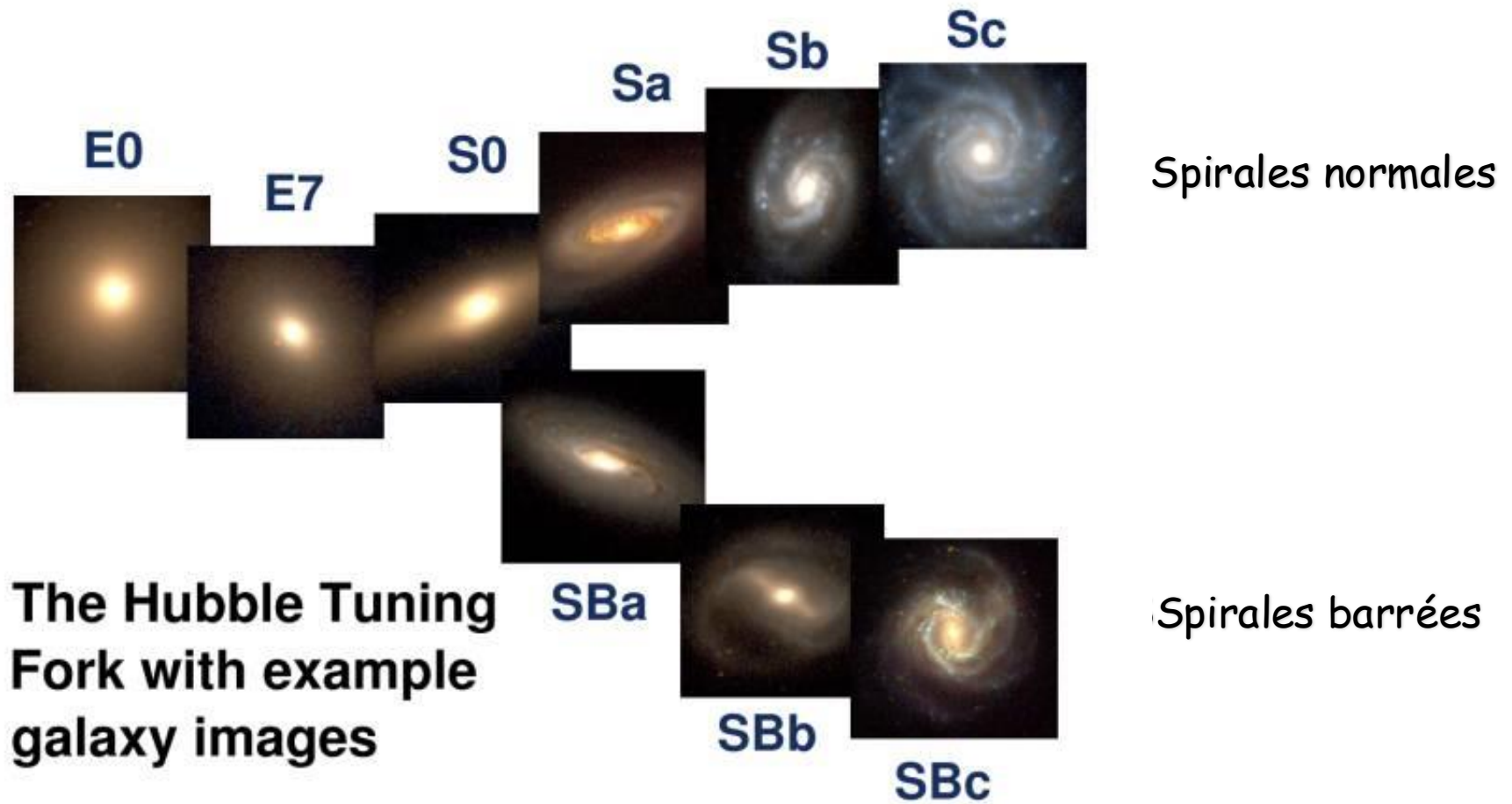
# Les galaxies

- Premières idées par Descartes et Wright (~ 1750)
- Seules galaxies visibles à l'œil nu: la grande galaxie d'Andromède et les nuages de Magellan
- Catalogue de **Charles Messier (1730-1817)**: 103 objets « flous » répertoriés pour ne pas les confondre avec des comètes.
- New General Catalogue par J. Dreyer (1852-1926), contenant 8000 objets fixes et flous/étendus. Pas de différence entre nébuleuses, galaxies, amas d'étoiles.
- 1923: **Edwin Hubble** démontre que certaines nébuleuses sont à des distances plus grandes que le diamètre de la Voie Lactée, grâce à la relation « période-luminosité » des Céphéides.

# Classification de Hubble



# Classification de Hubble



# Classification de Hubble

- Sous-classes des spirales qui dépendent de l'importance relative du bulbe et du disque
  - Sa: bulbe important
  - Sc: petit bulbe
- Sous-classes des Galaxies elliptiques qui dépendent de l'ellipticité  
 $e = 1 - b/a$  (  $\neq$  excentricité)
- Classe des « irrégulières », qui résultent en général de chocs et d'interactions

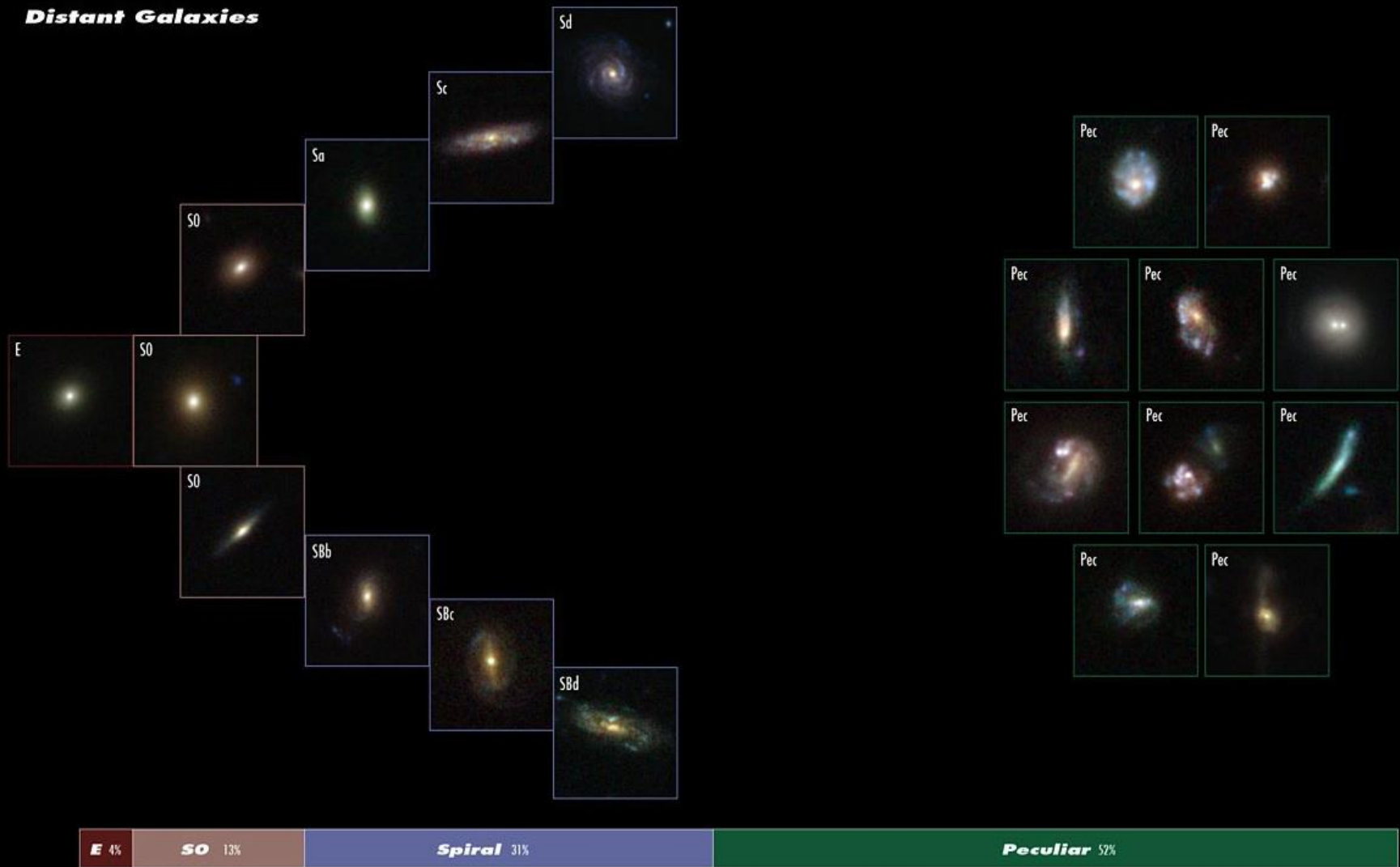
# Classification de Hubble (Univers local)

## Local Galaxies



10% de galaxies irrégulières

# Classification de Hubble (Univers lointain)



57% de galaxies irrégulières

# Exemples de galaxies

Messier 81, spirale Sb



Messier 81, spirale Sb



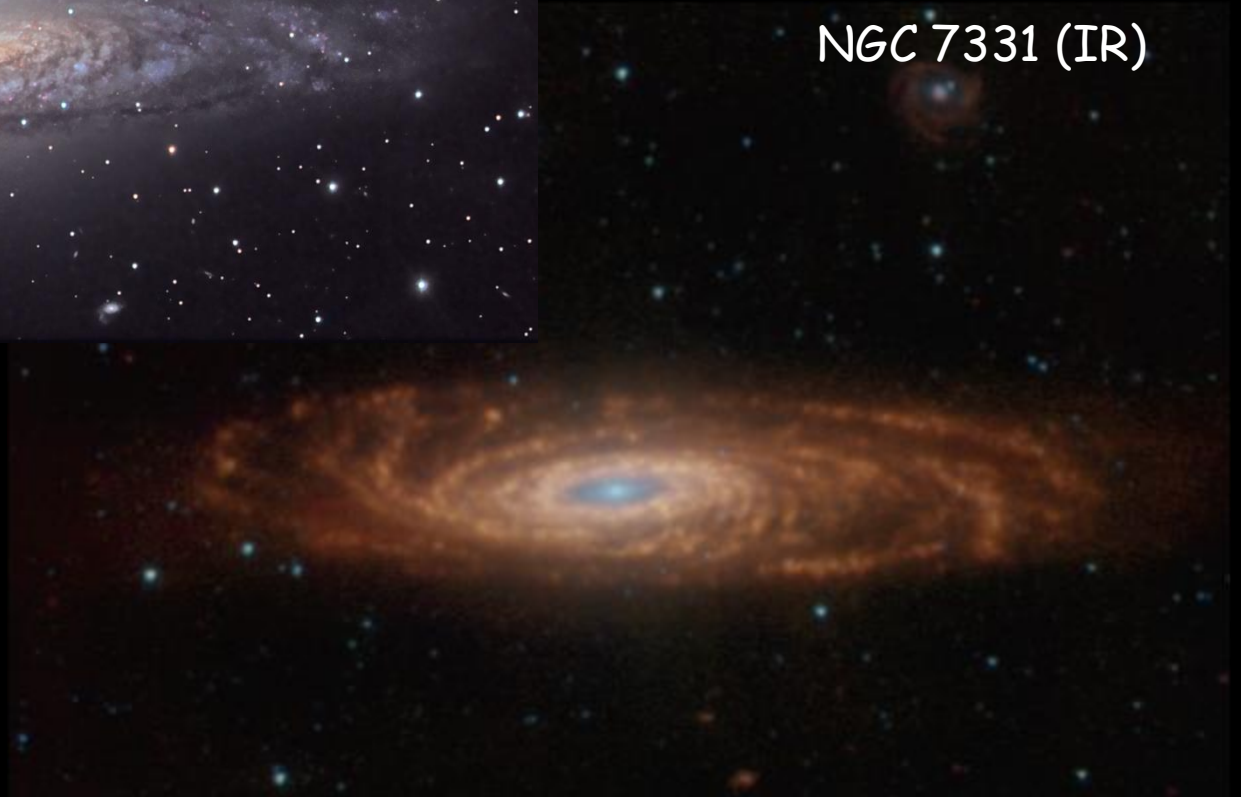
Vision infrarouge, où les poussières émettent  
un rayonnement de corps noir

# Vues comparées optique/IR

NGC 7331 (Sb, optique)



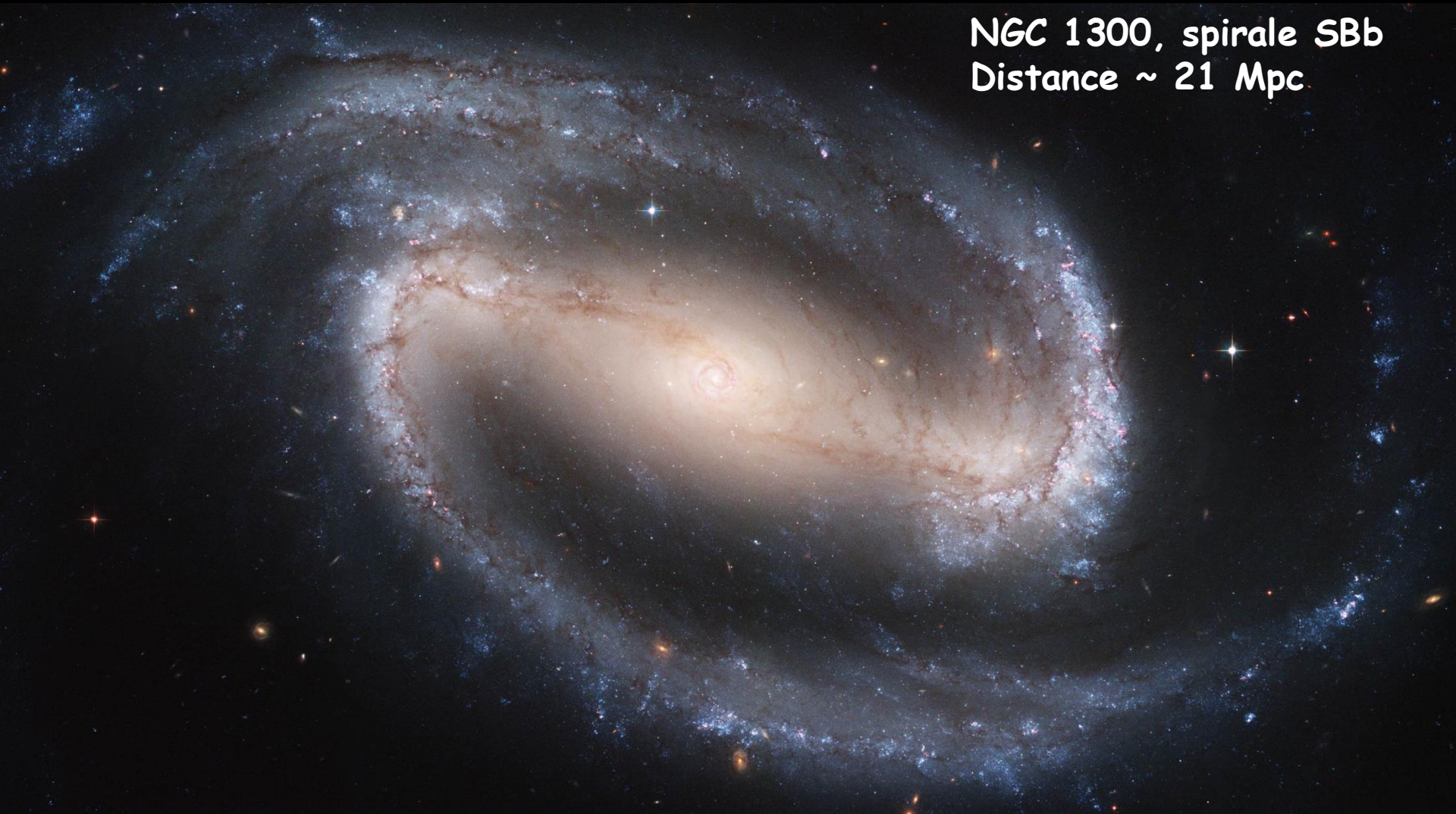
NGC 7331 (IR)



Messier 104, spirale Sa



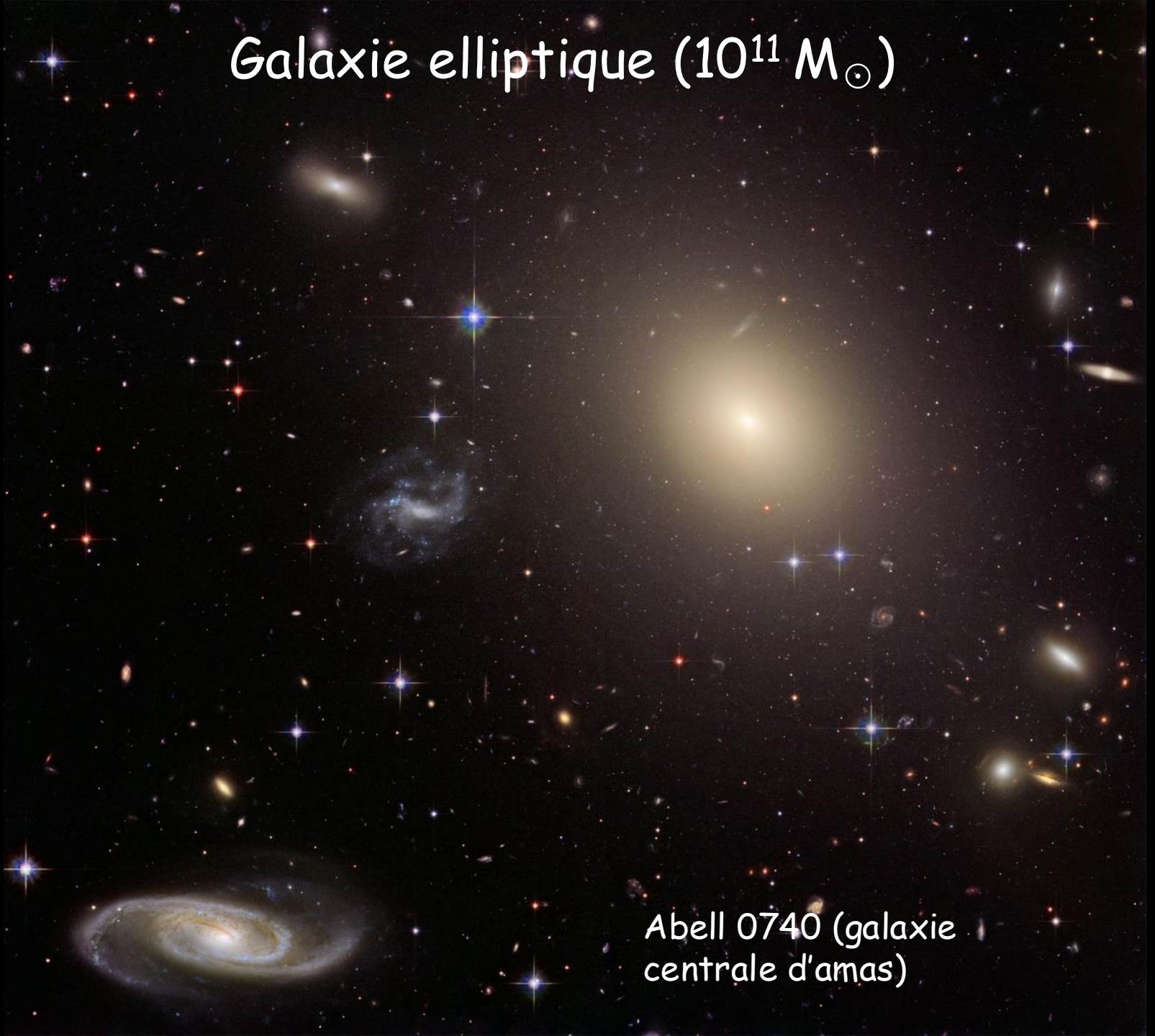
# Spirales barrée (image optique)



NGC 1300, spirale SBb  
Distance ~ 21 Mpc

Galaxie elliptique ( $10^{11} M_{\odot}$ )

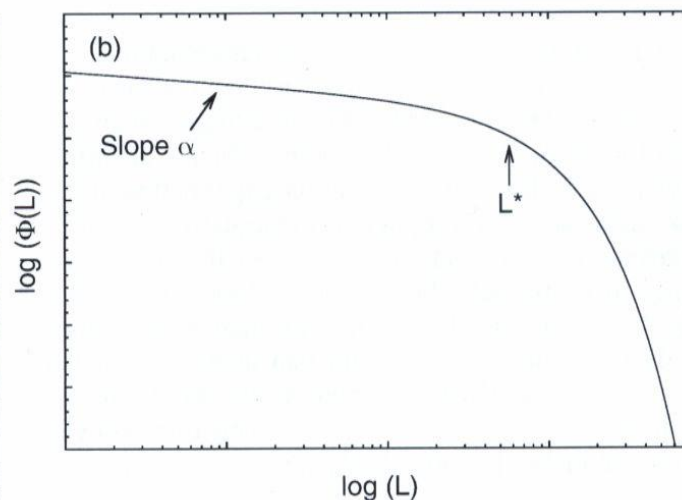
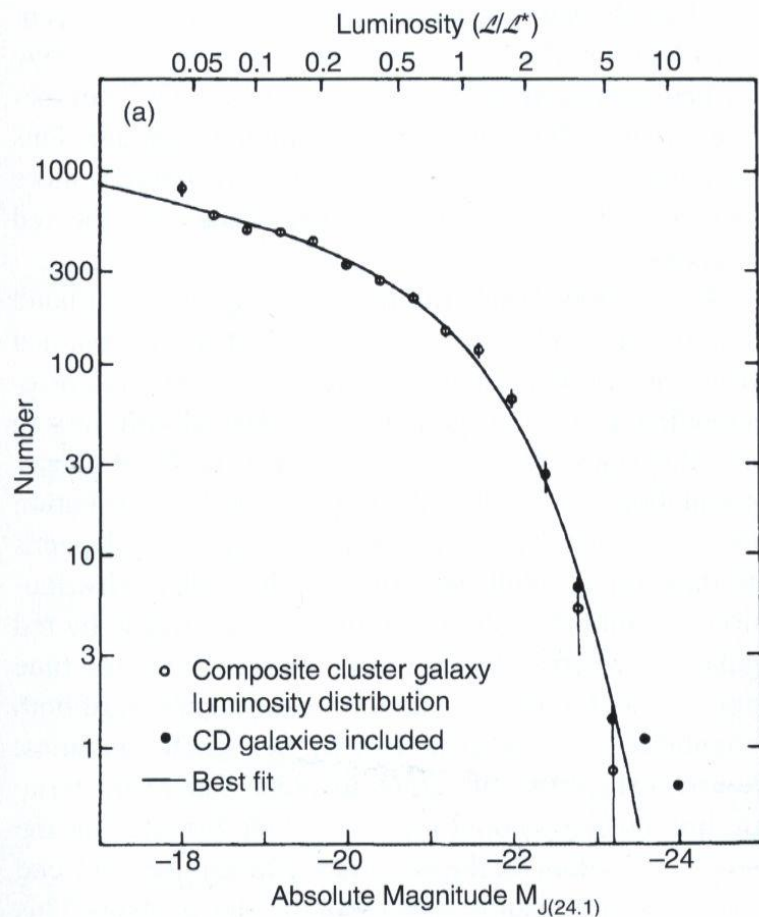
Abell 0740 (galaxie  
centrale d'amas)



Messier 82  
Type irrégulier



# Distribution des galaxies en magnitude: fonction de luminosité de Schechter



$$\Phi(L) = \left( \frac{K}{L_*} \right) \left( \frac{L}{L_*} \right)^\alpha \exp(-L/L_*)$$

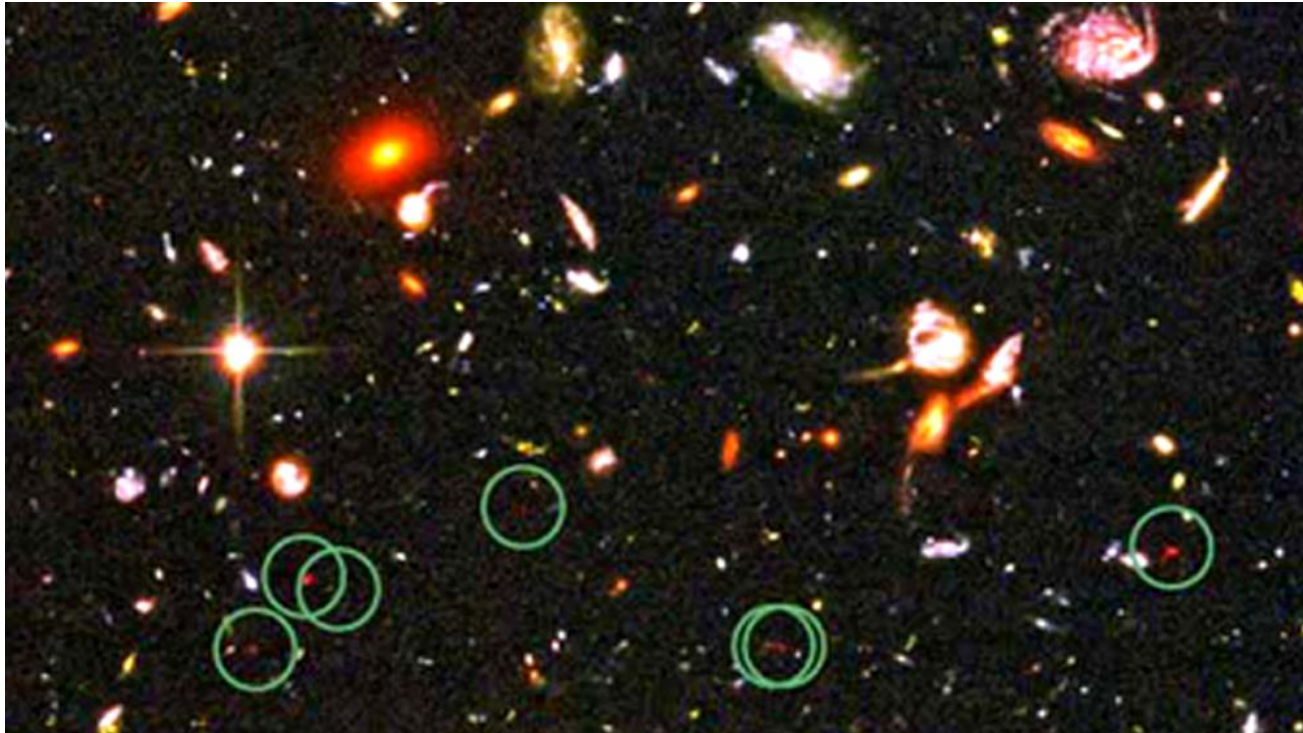
**Fig. 3.31.** Left panel: galaxy luminosity function as obtained from 13 clusters of galaxies. For the solid circles, cD galaxies have also been included. Upper panel: a schematic plot of the Schechter function

**Les galaxies les plus lointaines**

# Hubble Ultra Deep Field



# Hubble Ultra Deep Field

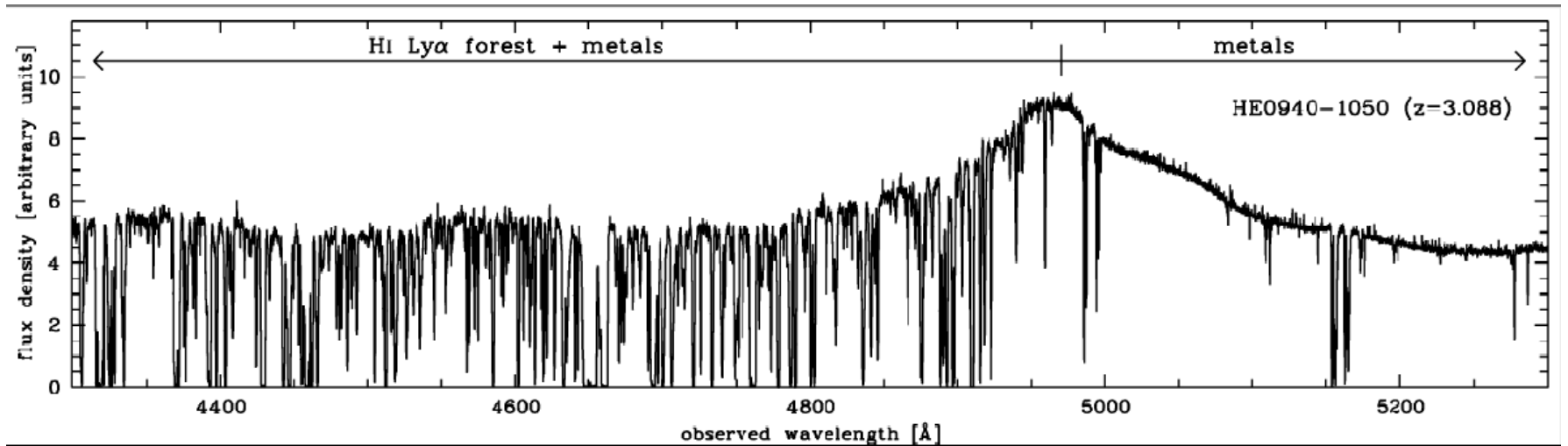


Recherche des galaxies lointaines par l'observations:

1- de la cassure « Lyman alpha » (lyman break à 912 Å, ou 13.6 eV)

2- de la raie Lyman alpha en émission (1216 Å, hydrogène neutre)

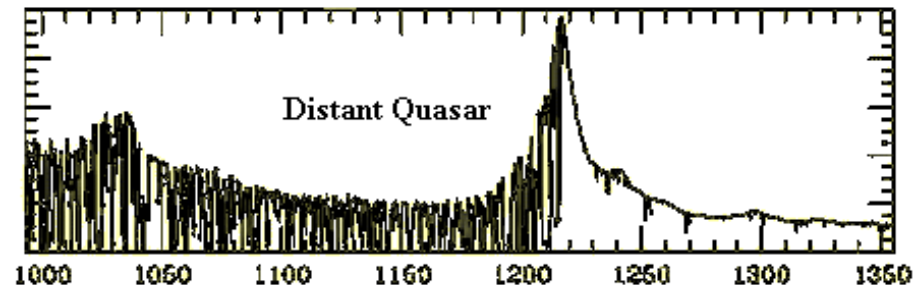
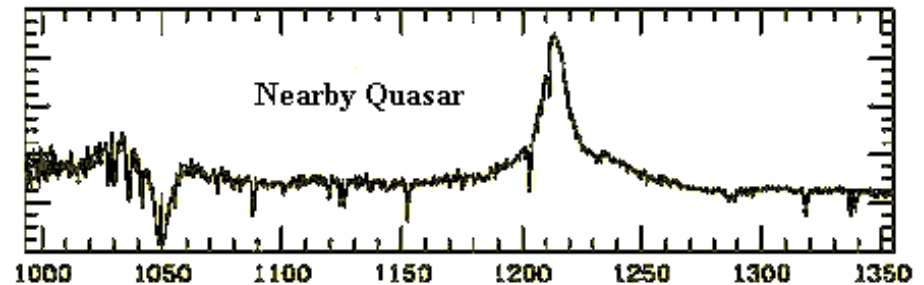
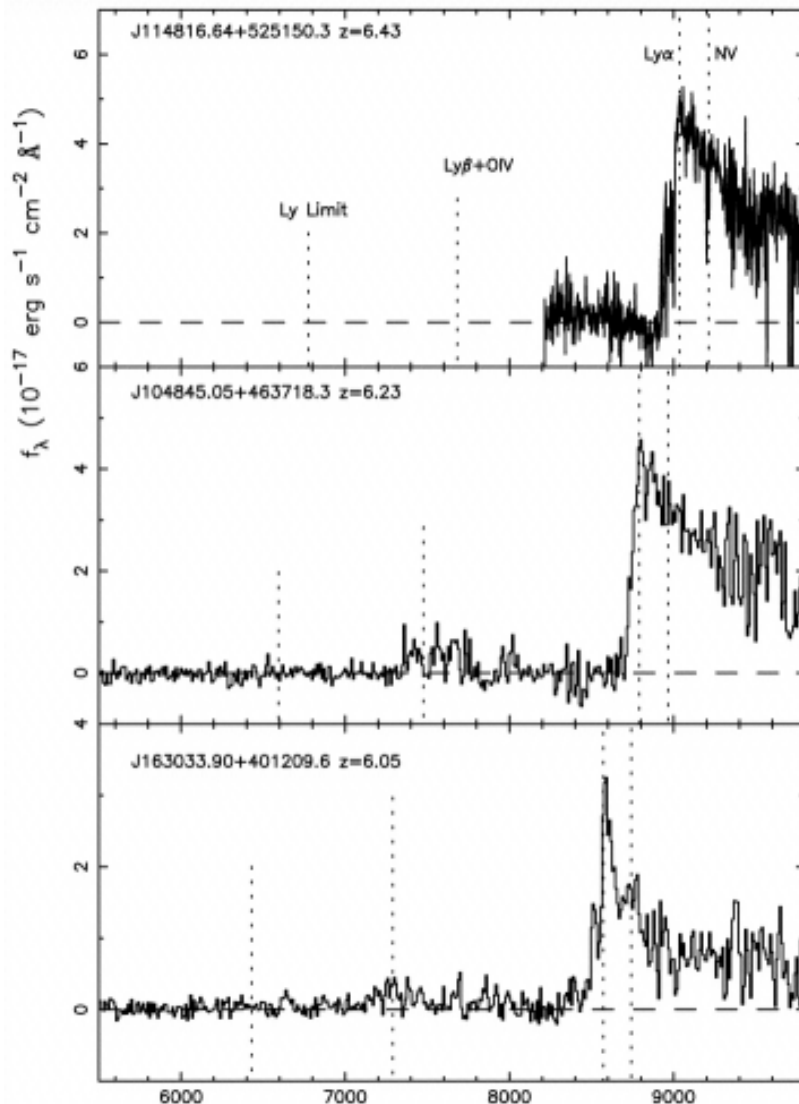
# Recherche par cassure Lyman alpha



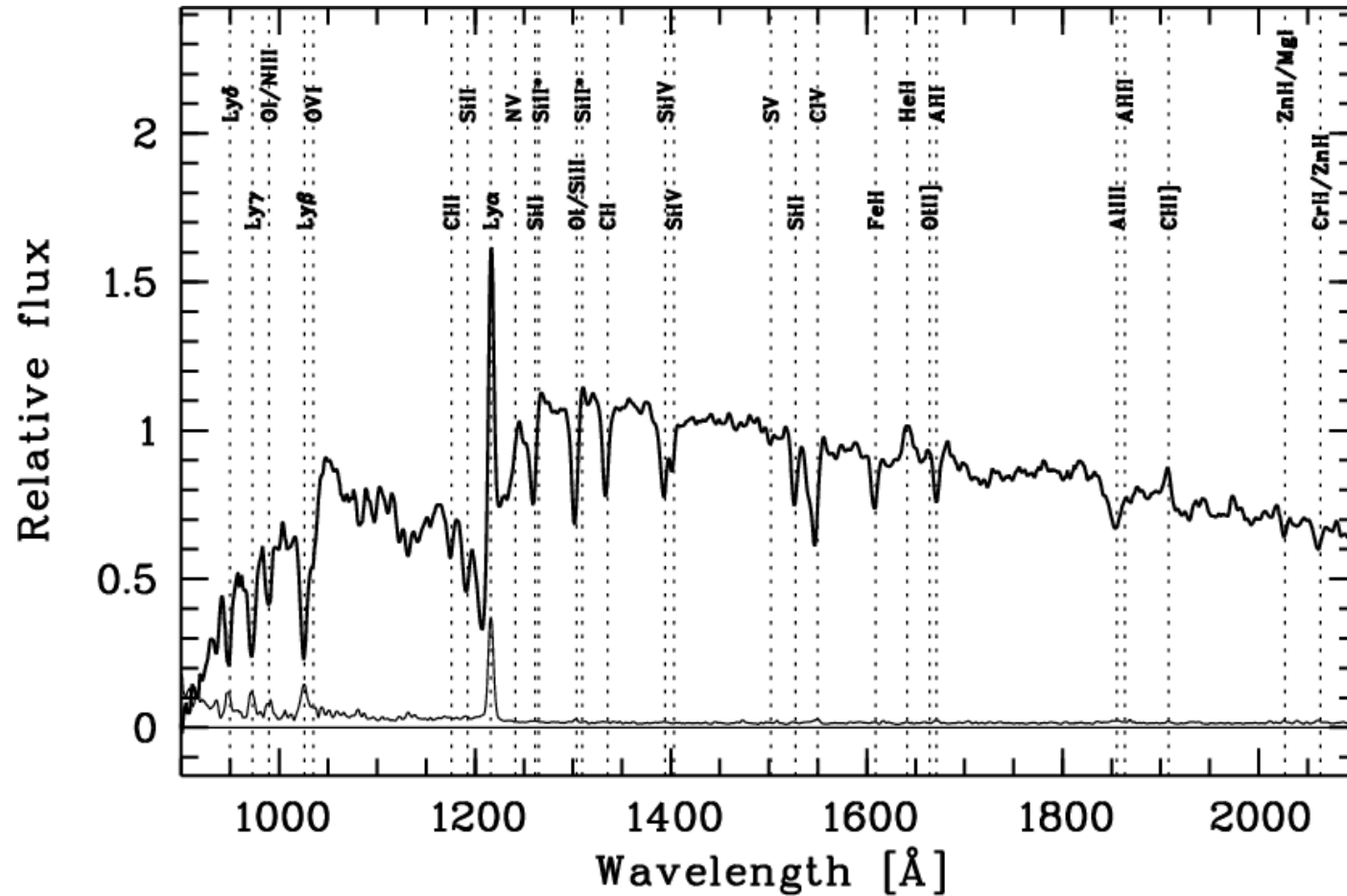
# Recherche par cassure Lyman alpha

Technique utilisée pour la recherche de quasars lointains ou de galaxies en formation

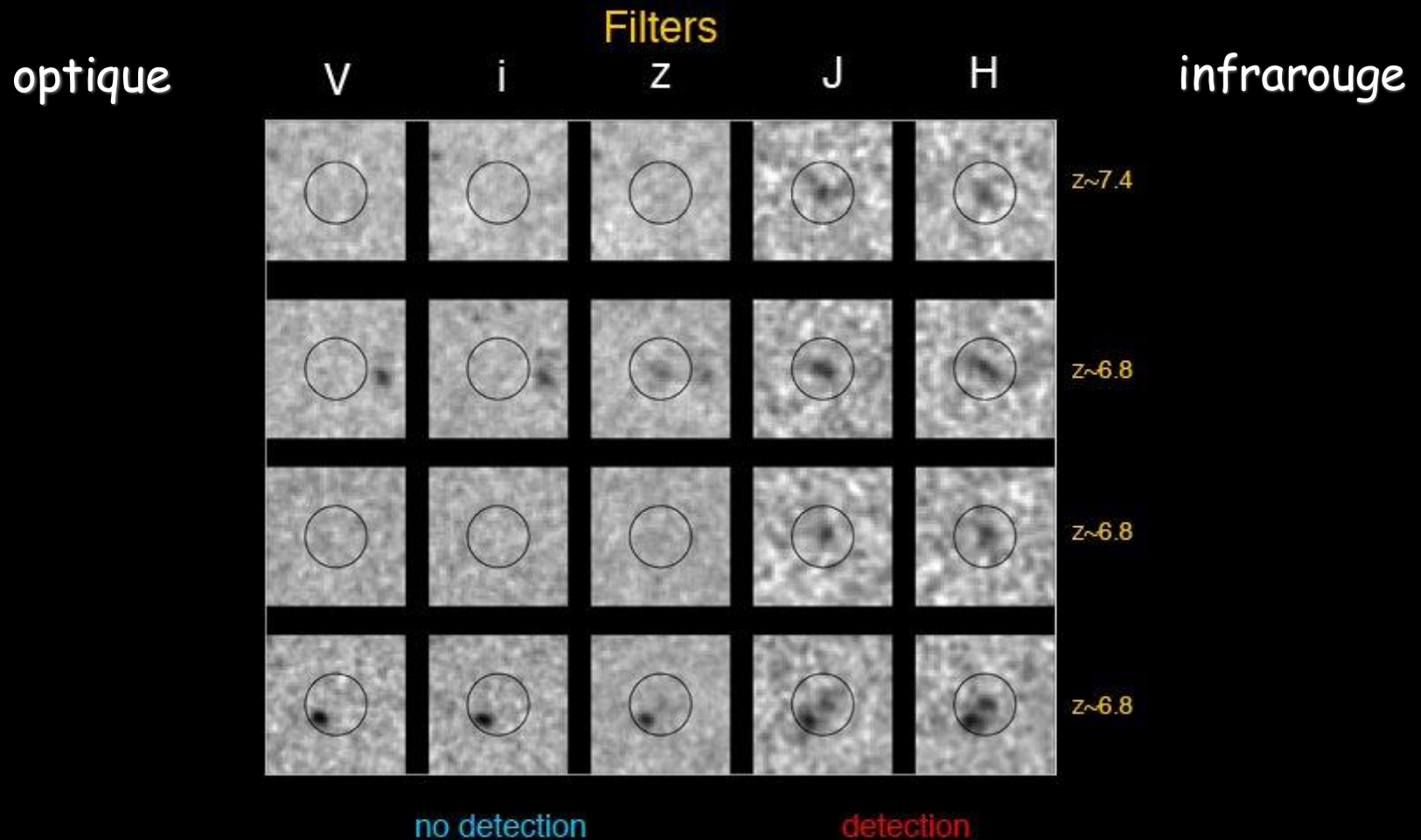
Tire parti de l'extinction par le milieu intergalactique



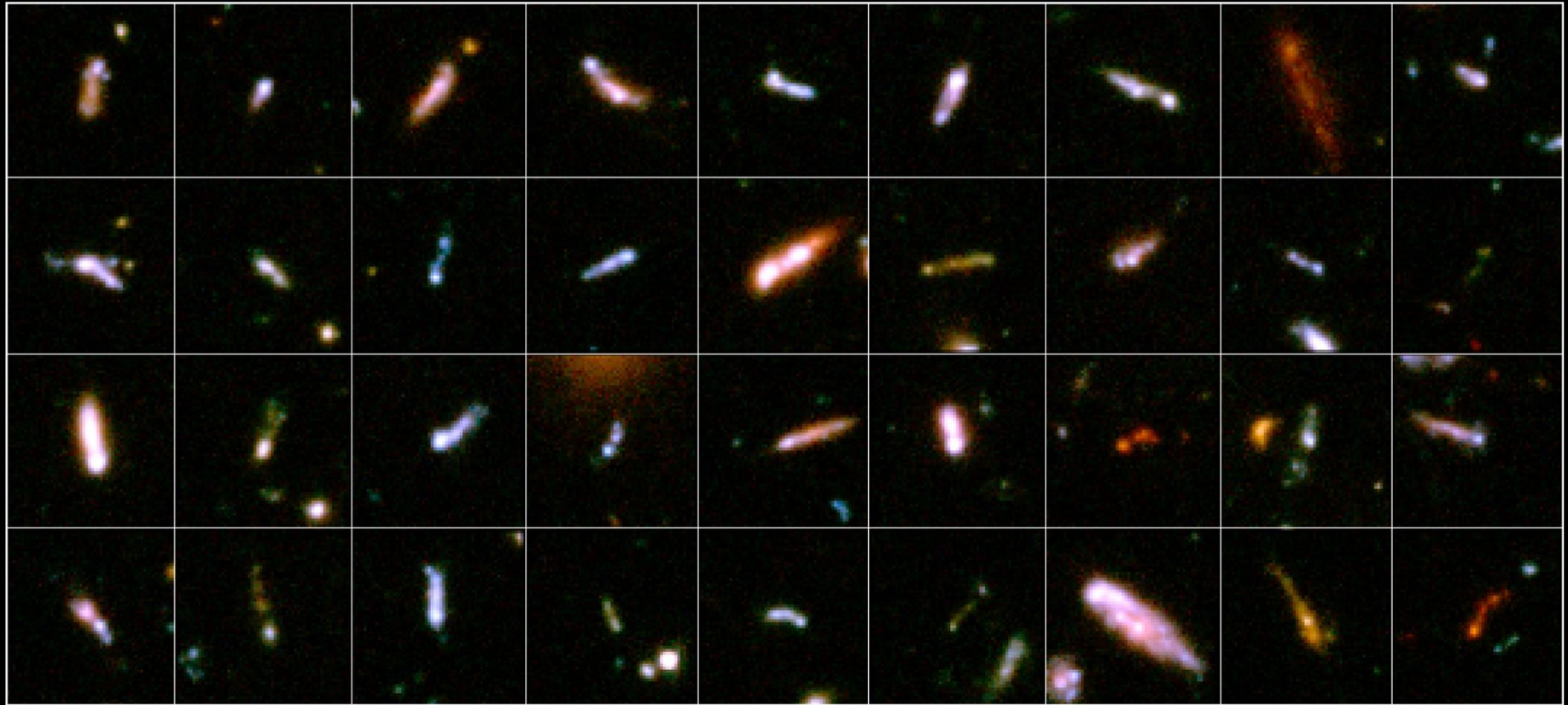
# Recherche par cassure Lyman alpha et par émission Lyman alpha



# Recherche par cassure Lyman alpha

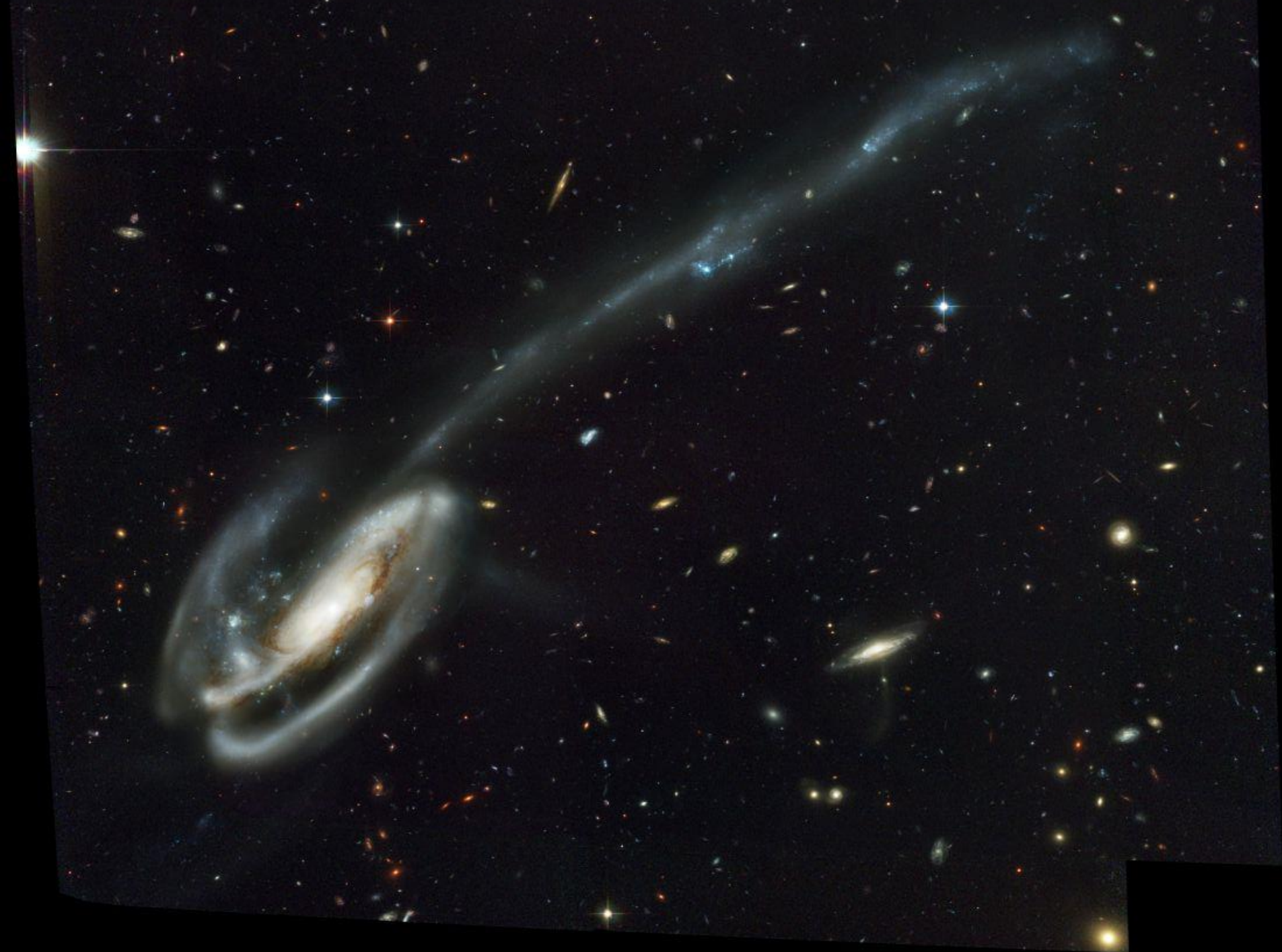


# Exemples de galaxies lointaines en formation



**“Tadpole” Galaxies in the Hubble Ultra Deep Field**  
*Hubble Space Telescope ■ ACS/WFC*

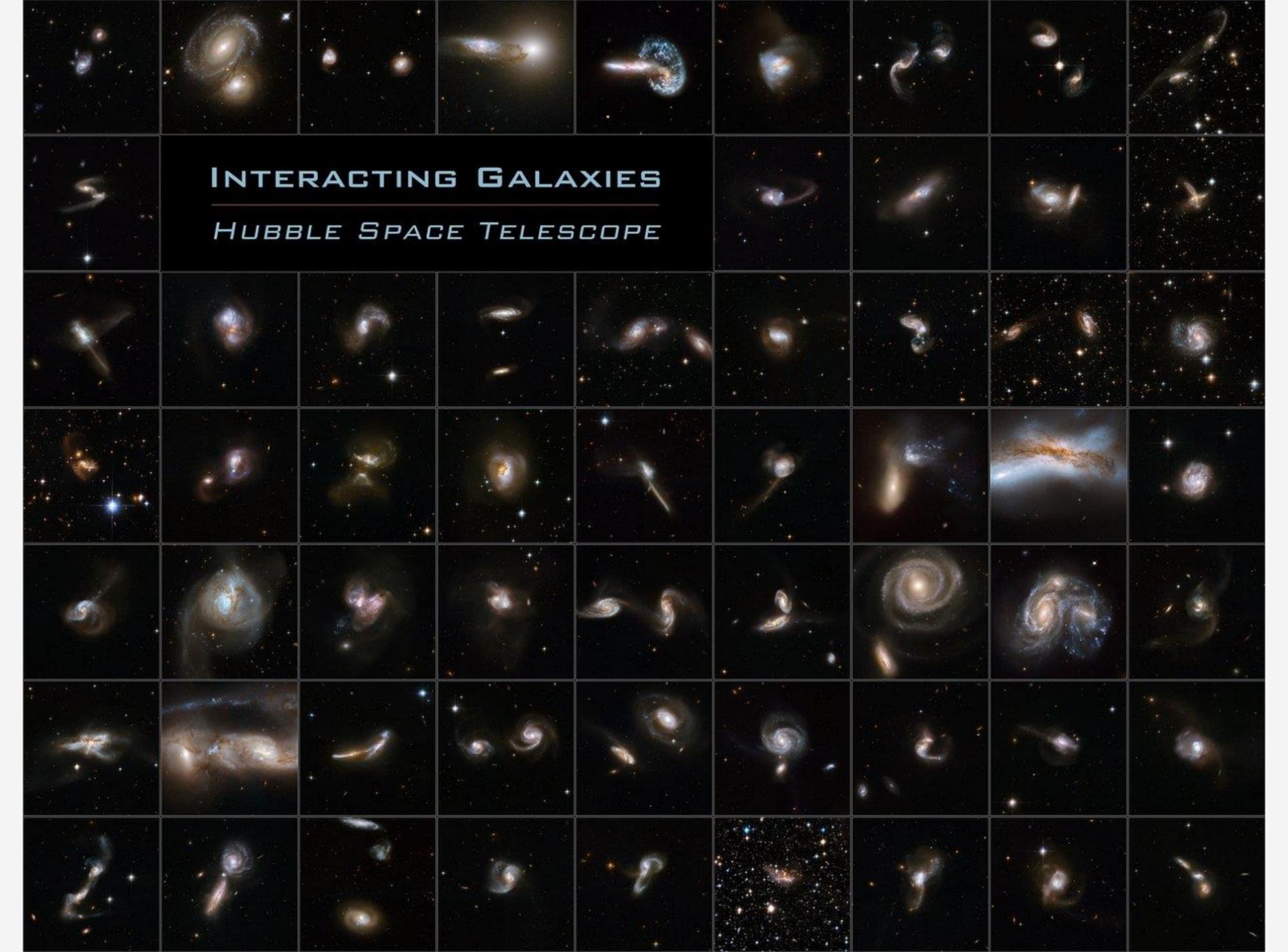
# **Les galaxies en interactions**





**Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039**  
Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2





**INTERACTING GALAXIES**  
*HUBBLE SPACE TELESCOPE*