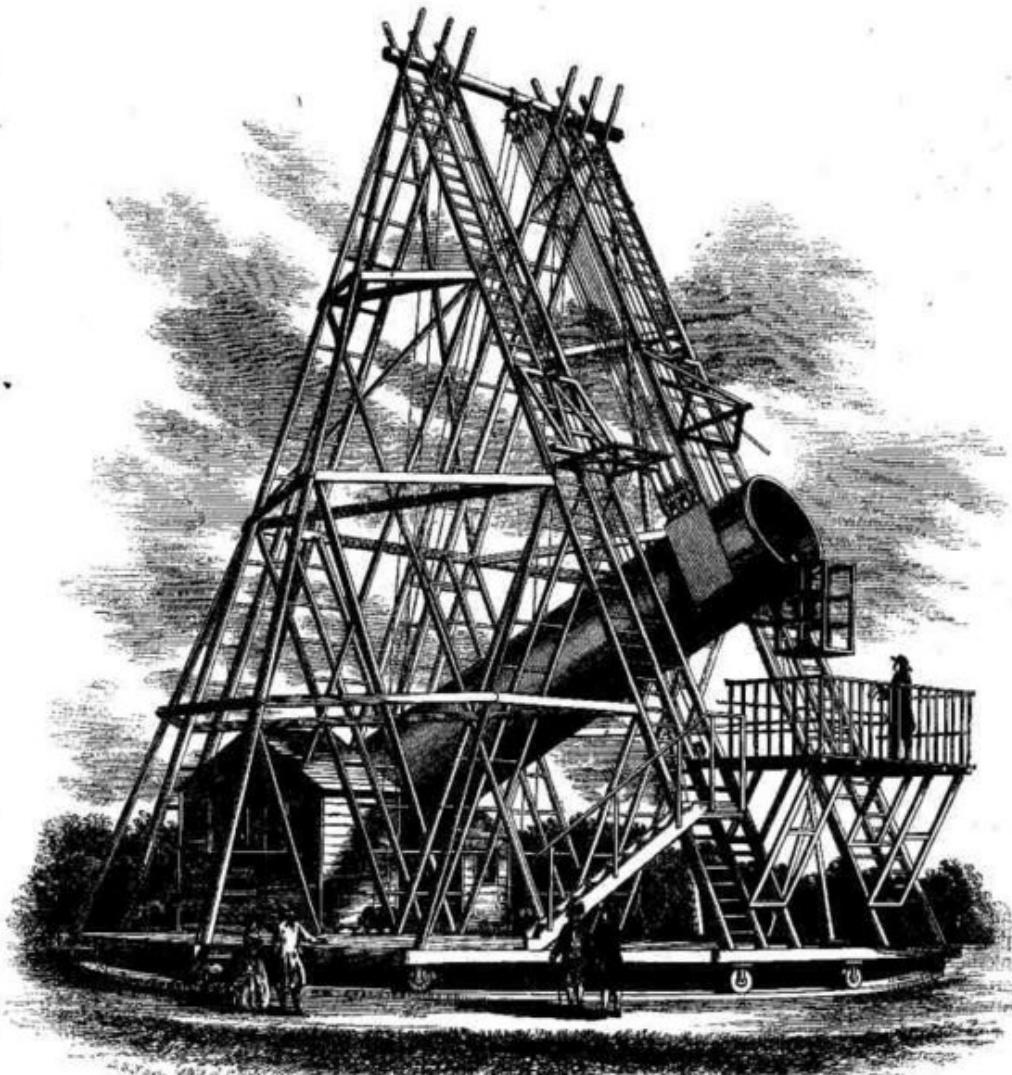


Chapitre 9

La Voie Lactée
et les galaxies

La Voie Lactée



Télescope de Herschel

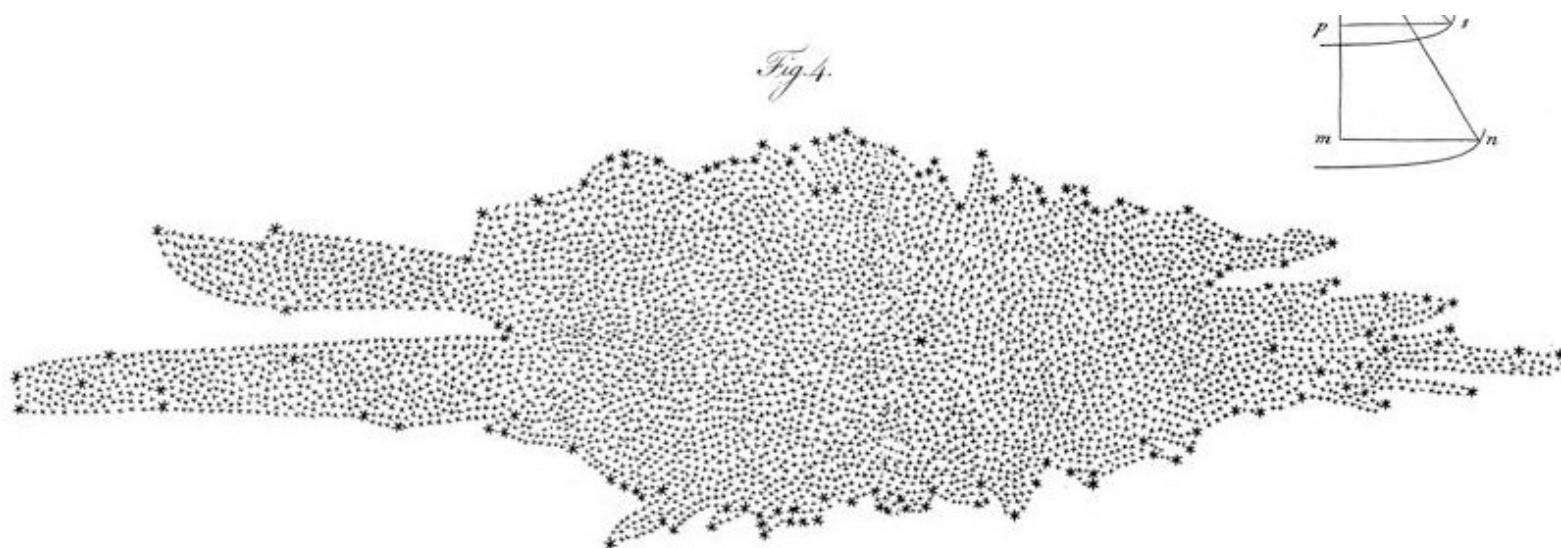
- Galilée (17^{ième} siècle) découvre que la Voie Lactée est composée d'étoiles
- Herschel (18^{ième} siècle) observe le voisinage solaire avec son télescope de 1,25 m à miroir en bronze
- Lord Rosse (19^{ième} siècle) observe les premières galaxies avec son télescope de 1,8m de diamètre

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^{ième})
- 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

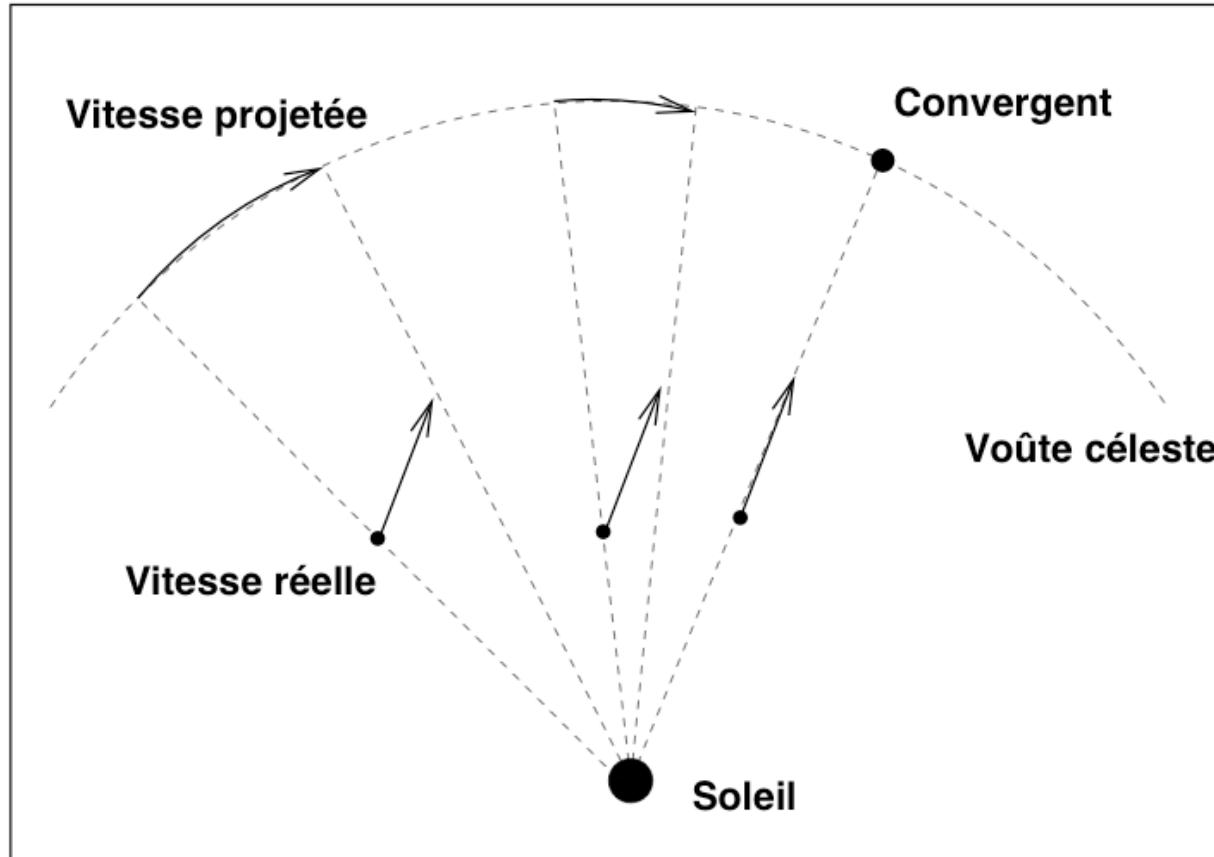
Tentative par Herschel de reconstituer la forme de la Voie Lactée
par des comptages d'étoiles dans diverses directions



Distances dans la Voie Lactée

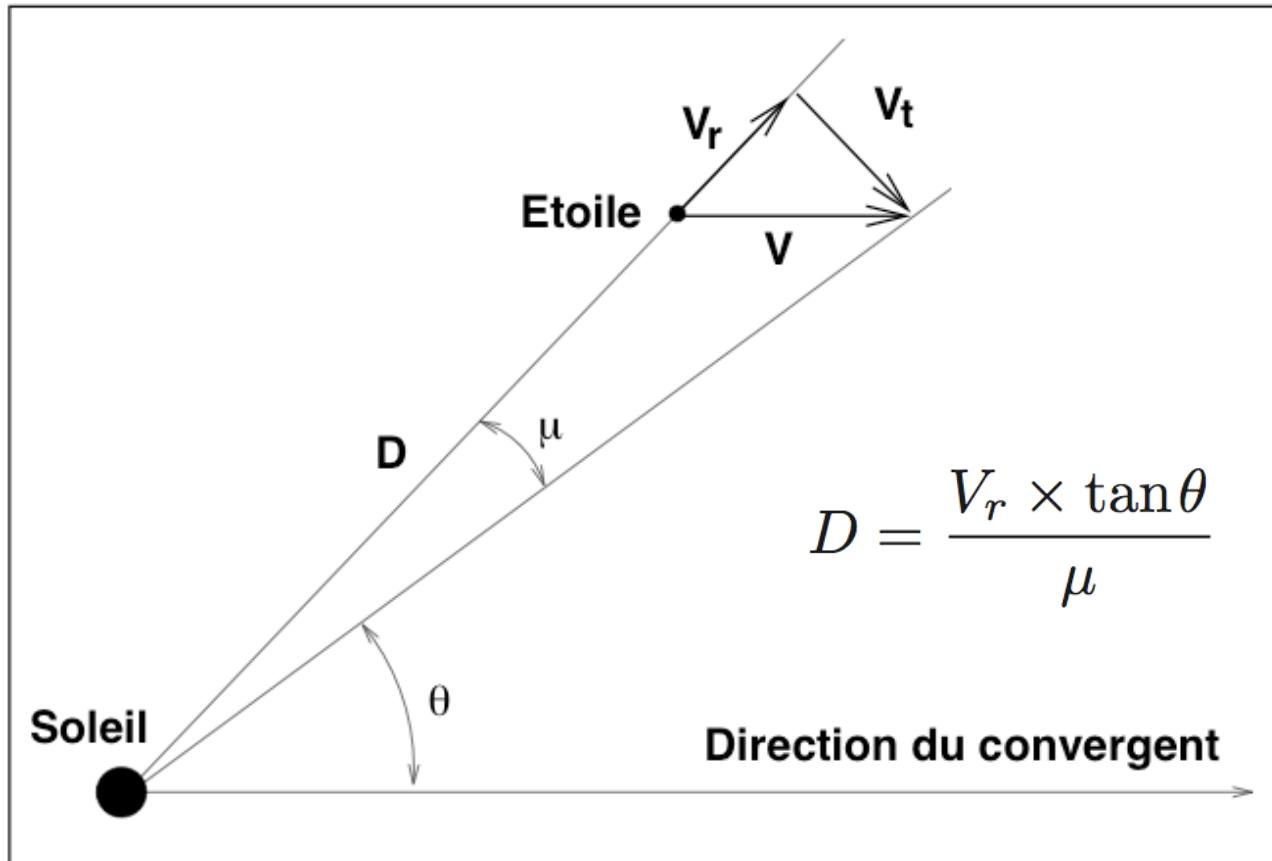
Mesure des distances

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



Mesure des distances

Méthode des « courants d'étoiles »



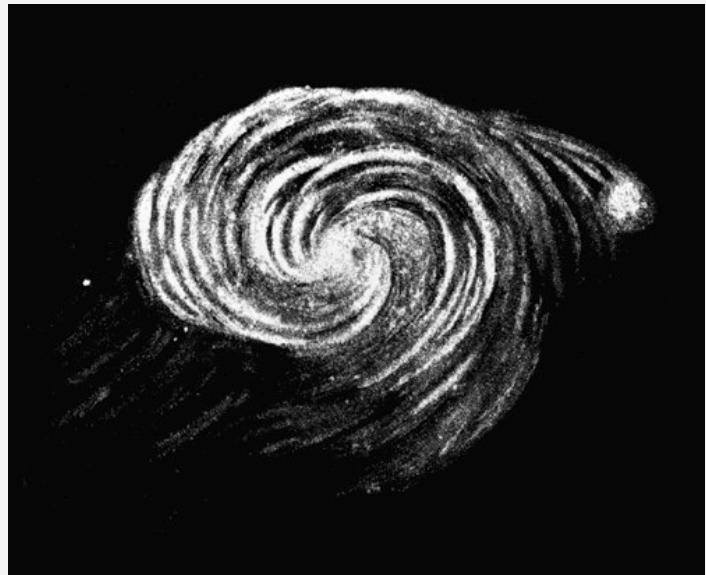
$$\mu = V_t / D \quad \text{Vitesse angulaire des étoiles sur le plan du ciel}$$

La Voie Lactée



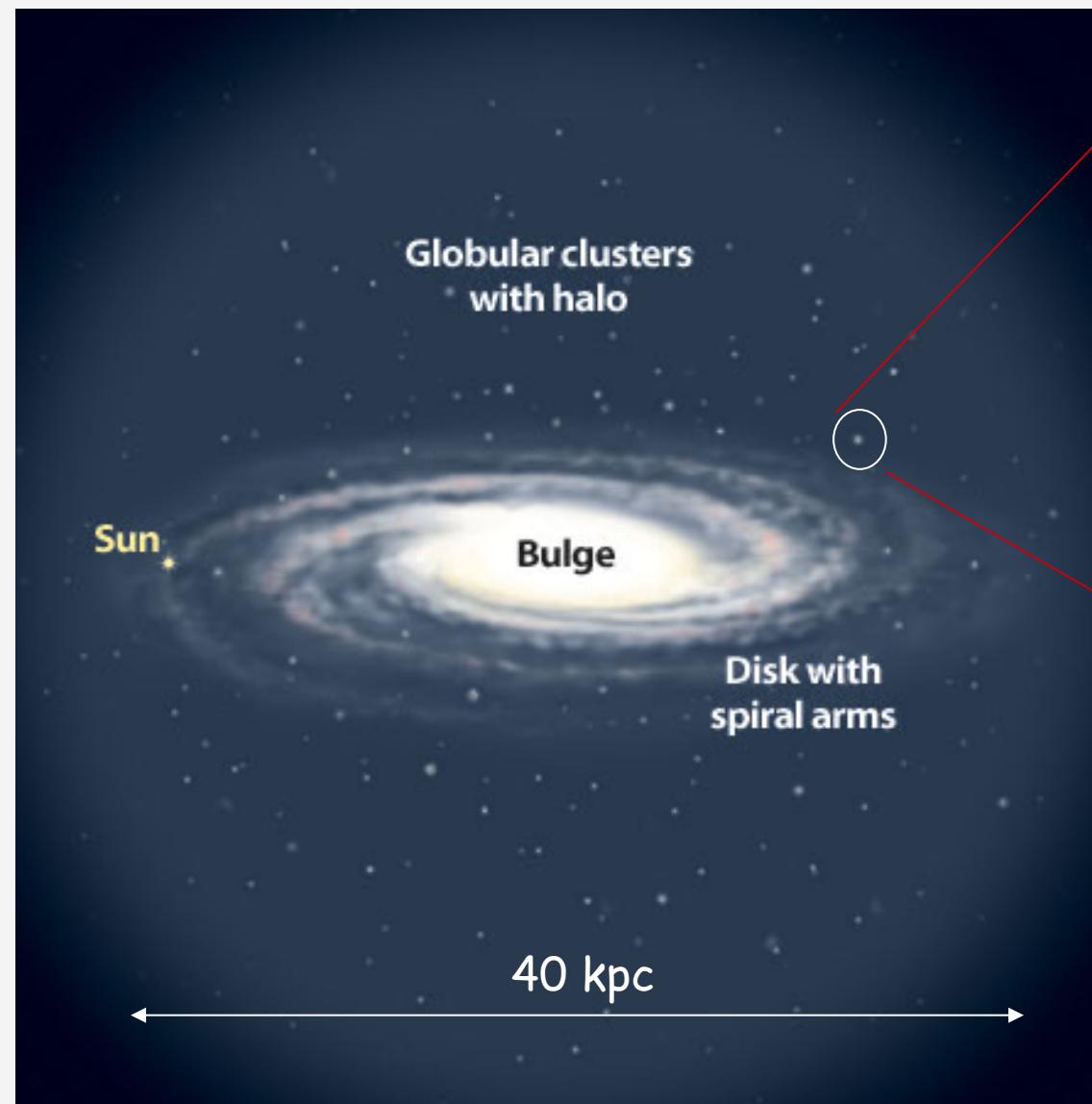
Télescope de Lord Rosse

- Lord Rosse (19^{ième} siècle) observe les premières galaxies avec son télescope de 1,8m de diamètre



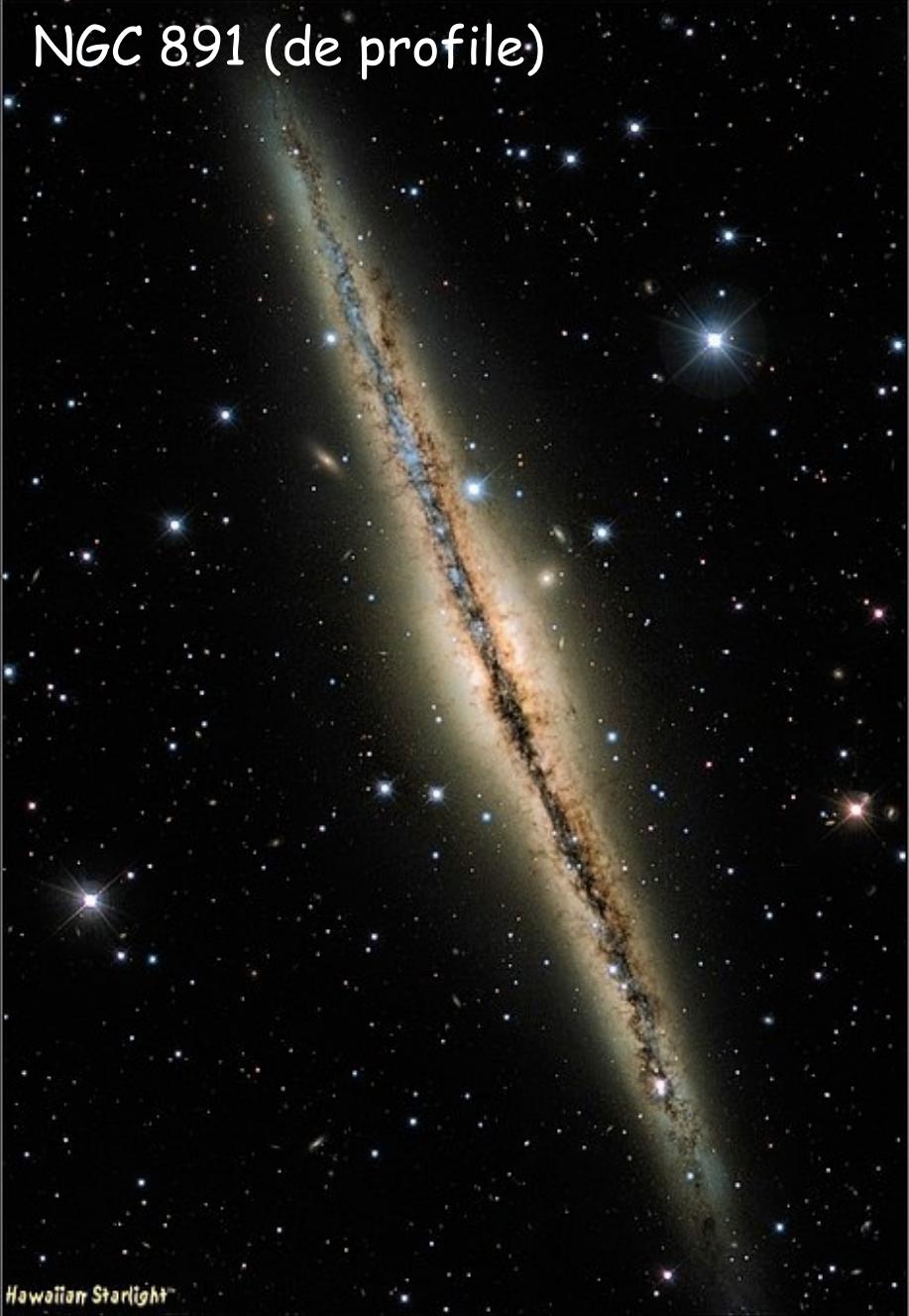
Dessin de la galaxie M51 observée par Rosse, décrite comme « nébuleuse spirale »

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 in the constellation Andromeda. It is one of the most prominent galaxies in the sky, and its spiral structure is clearly visible. The galaxy's central bulge is very bright, and its spiral arms are clearly defined. The galaxy is surrounded by a dense field of smaller galaxies and stars.

NGC 891 will be visible to the naked eye at night, appearing as a small, faint smudge in the sky. It is best viewed through binoculars or a telescope, where its spiral structure can be clearly seen. The galaxy is also visible in the infrared, where its spiral arms appear more prominent due to the presence of young, hot stars.



CANADA
FRANCE
HAWAII
TELESCOPE



www.coelum.com

NGC 1232 (de face)



The Magnificent Spiral Galaxy NGC 1232 (VLT/FORS)



European Organization
for Astronomical Research in the
Southern Hemisphere

ESO. Astronomy made in Europe



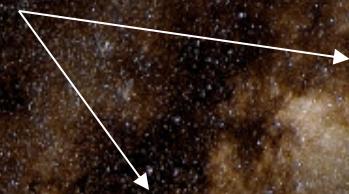
www.eso.org

Voie Lactée (de l'intérieur du disque)

Vue sur 180 degrés

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

Disque



Bulbe

La Voie Lactée

Coordonnées galactiques:

l longitude

b latitude

$$b = +90^\circ$$

$$b = 0^\circ$$

« nuages » de Magellan

$$b = -90^\circ$$

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

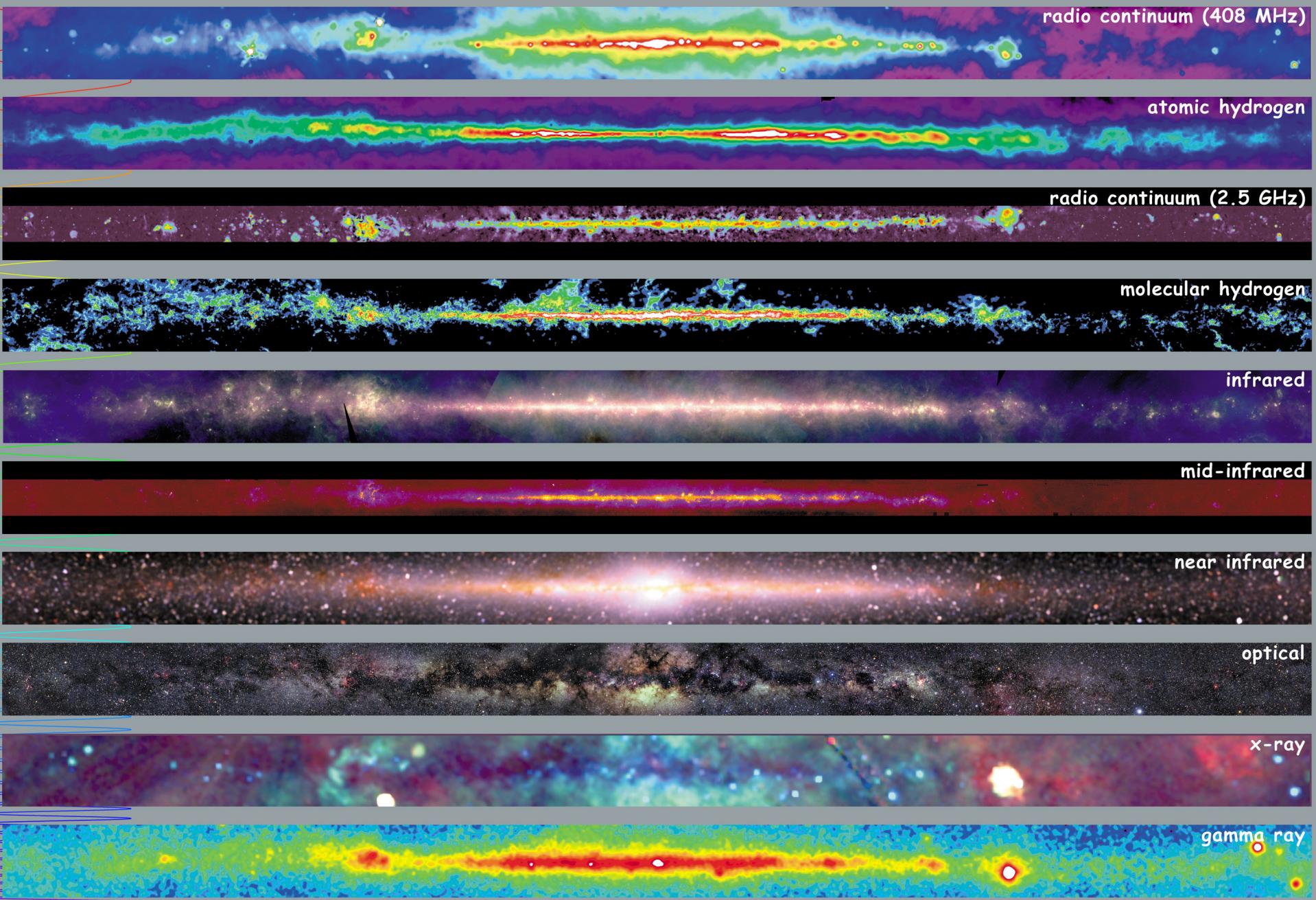
- Forme de la distribution de lumière du halo: mal connue

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

loi de puissance

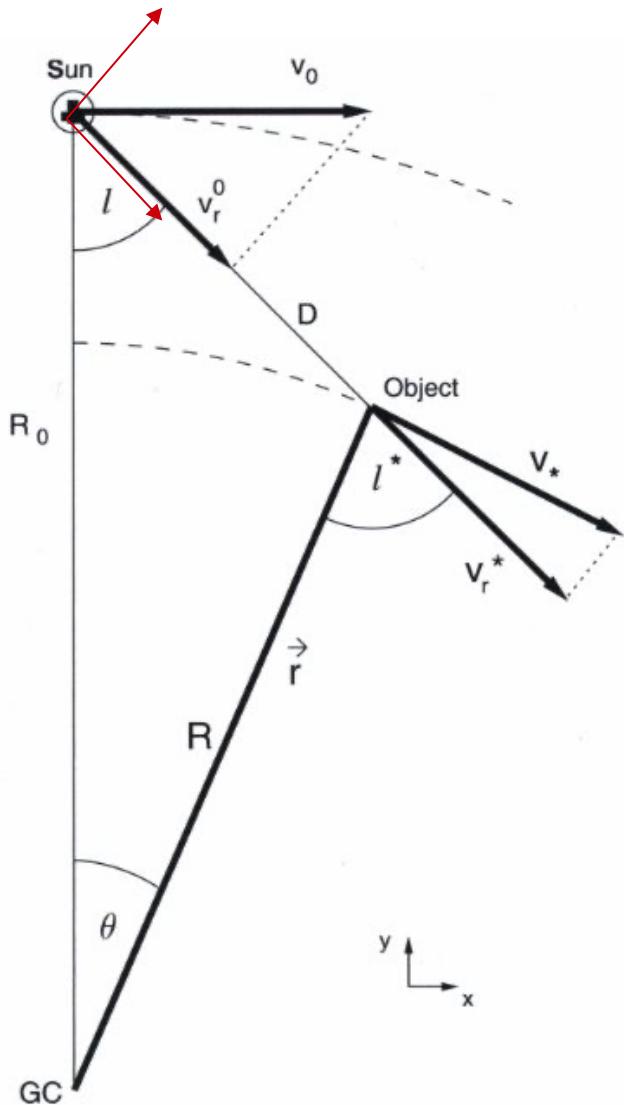
- $r_e \sim 50\text{-}60 \text{ kpc}$ (halo visible)
- Halo visible composé d'environ 150-200 amas globulaires
- Halo sombre qui s'étend plus loin que le halo visible
- $M \sim 5,8 \times 10^{11} M_\odot$
c'est-à-dire plus de 10 x masse du disque ou du bulbe
- Rapport $M/L \sim ?$

La Voie Lactée: vue multi-longueurs d'onde



Dynamique de la Voie Lactée

Rotation du disque



Disque en rotation:

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

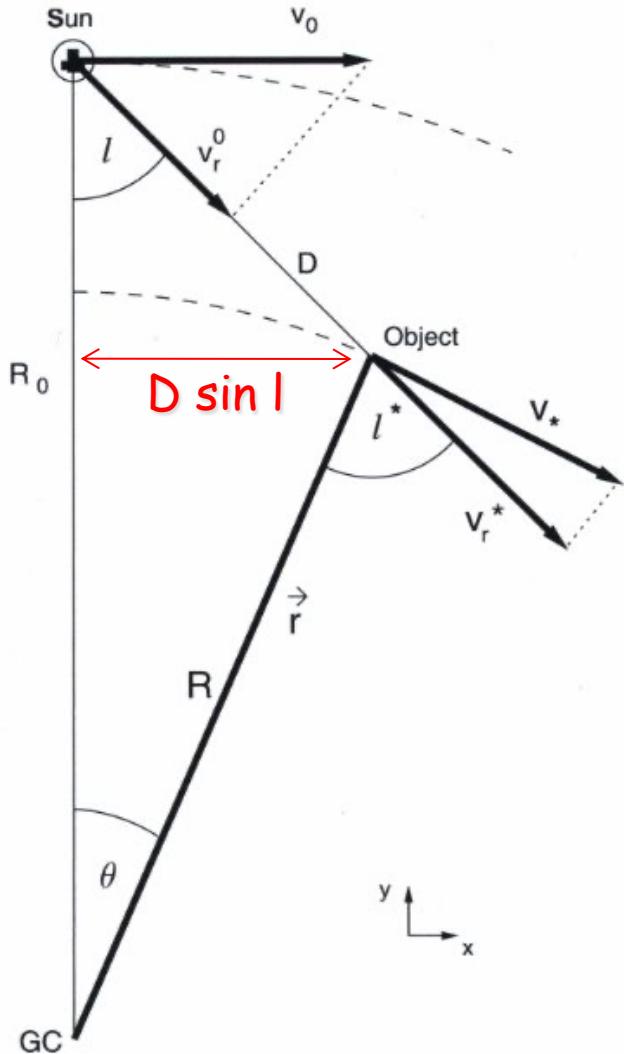
$$V = \omega R \quad (\text{Objet})$$

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:

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

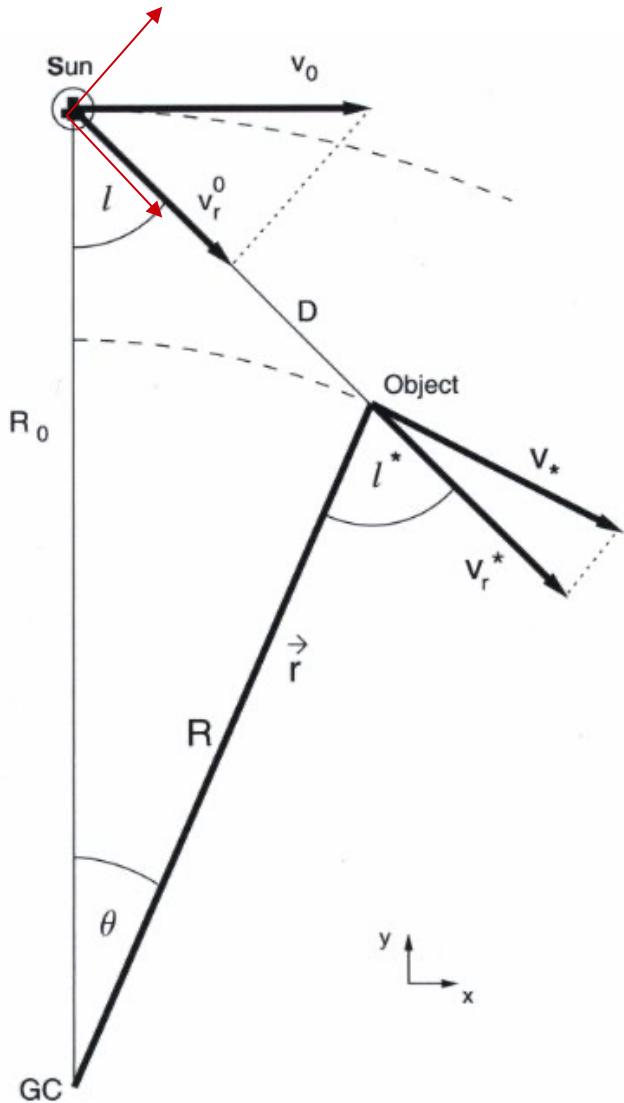
$$\vec{r} = \begin{pmatrix} D \sin l \\ R_0 - D \cos l \end{pmatrix}$$

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:

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

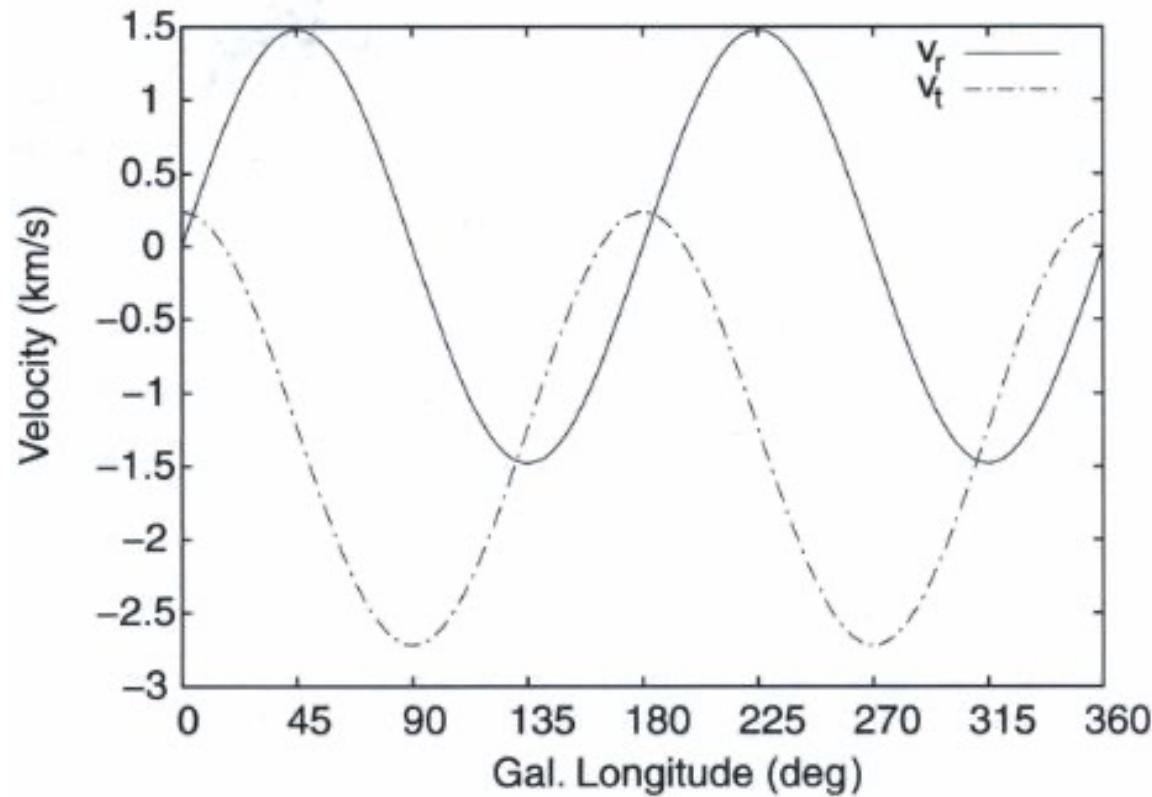
$$v_t = A D \cos 2l + B D$$

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

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

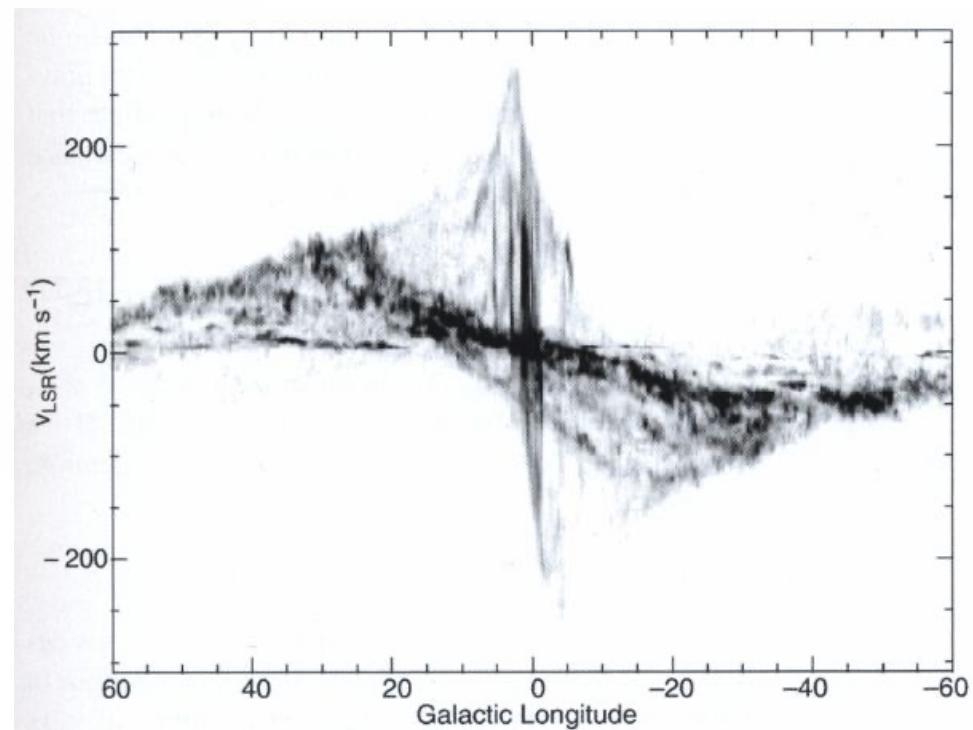
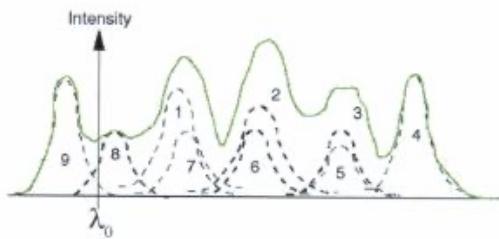
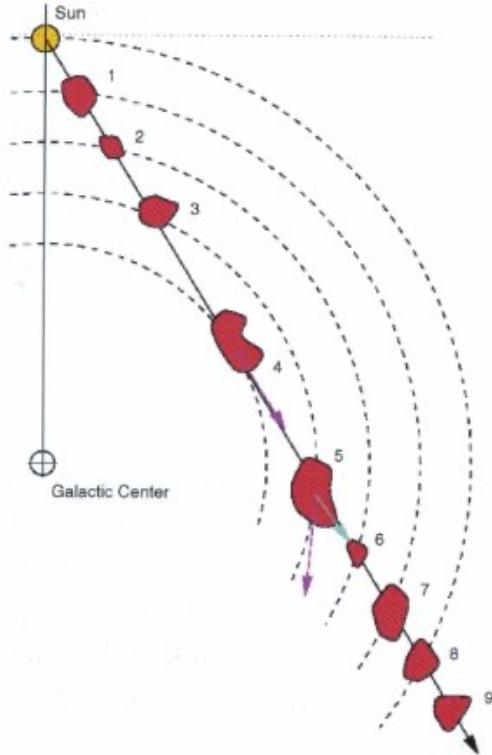
Rotation du disque

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



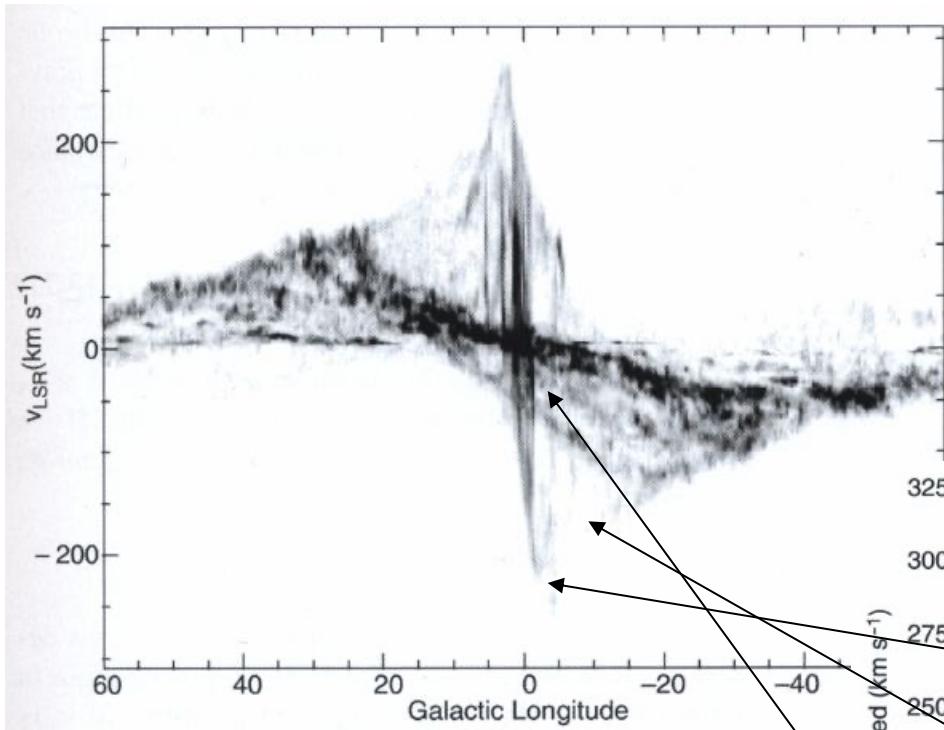
Rotation du disque

Méthode du point tangent

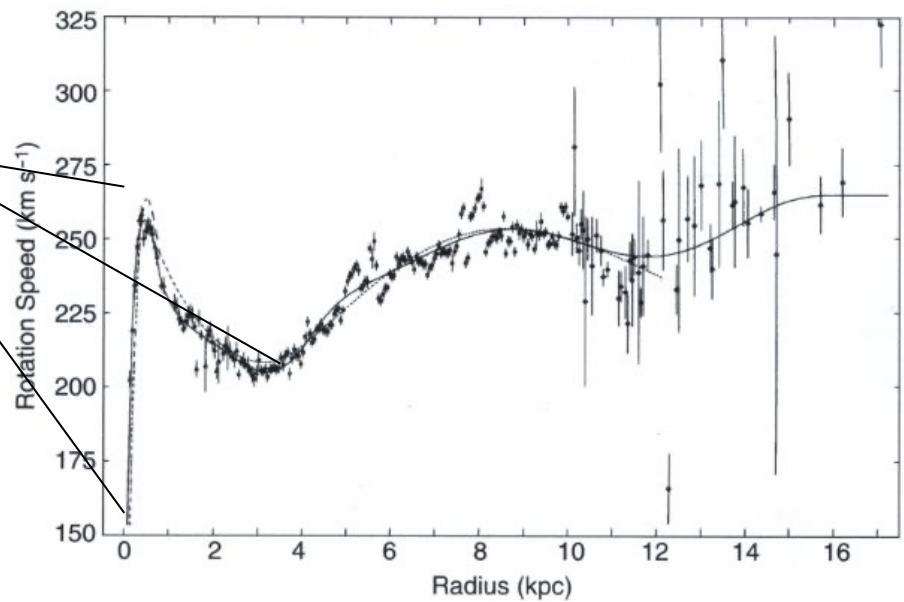


Rotation du disque

Courbe de rotation HI



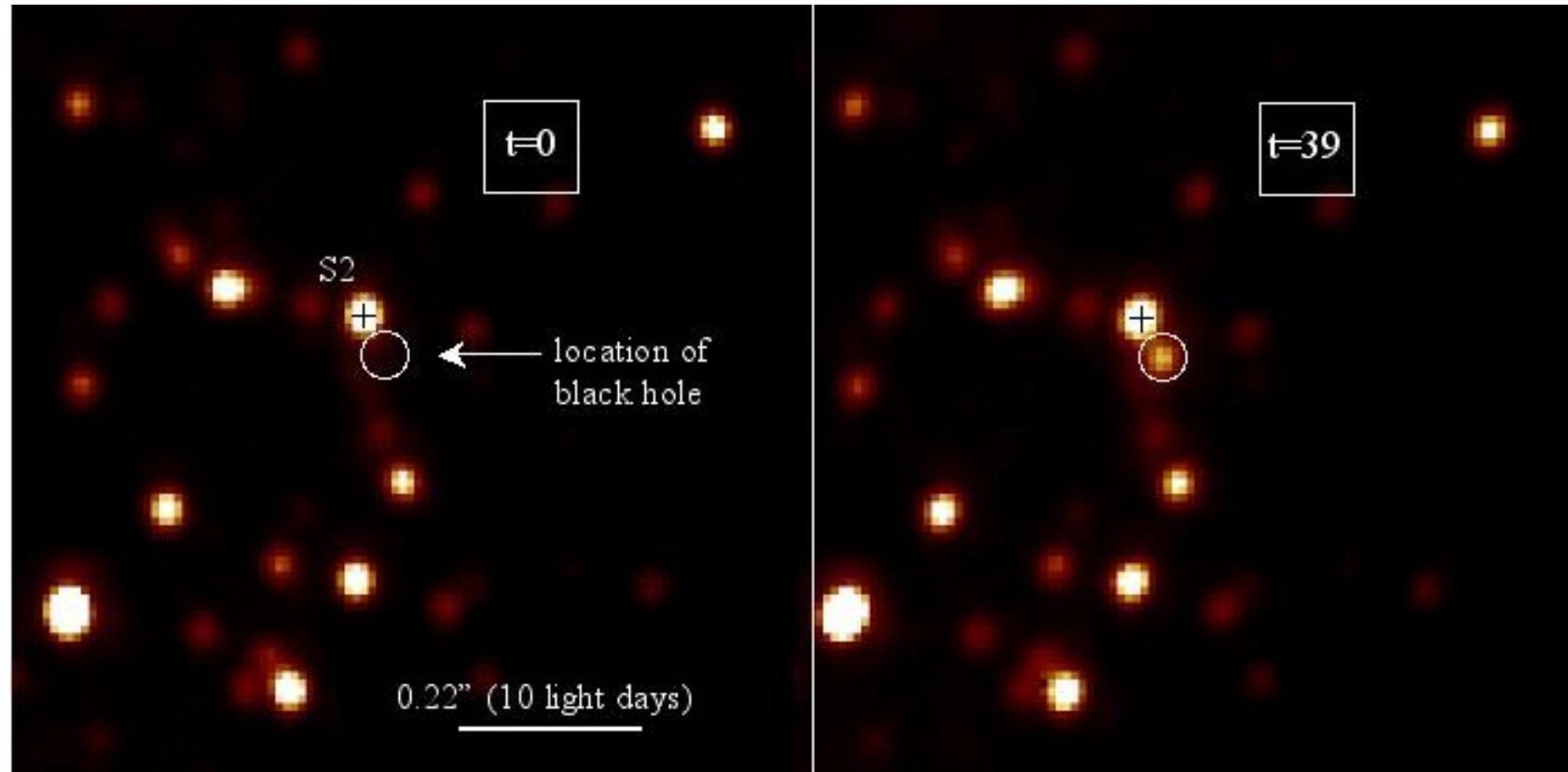
Courbe de rotation HI (1D)



Le trou noir central

Le trou noir central

Mise en évidence par détection de flashes lumineux.



Le trou noir central

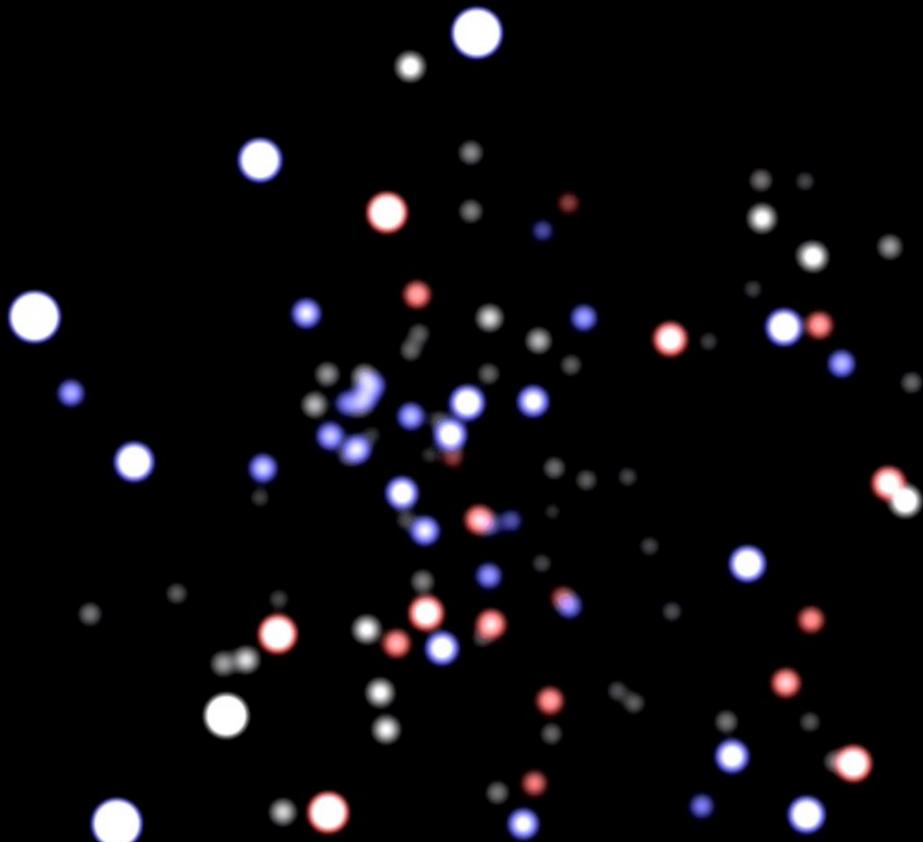


Mise en évidence par mesure des paramètres orbitaux d'étoiles orbitant le centre de la Voie Lactée.

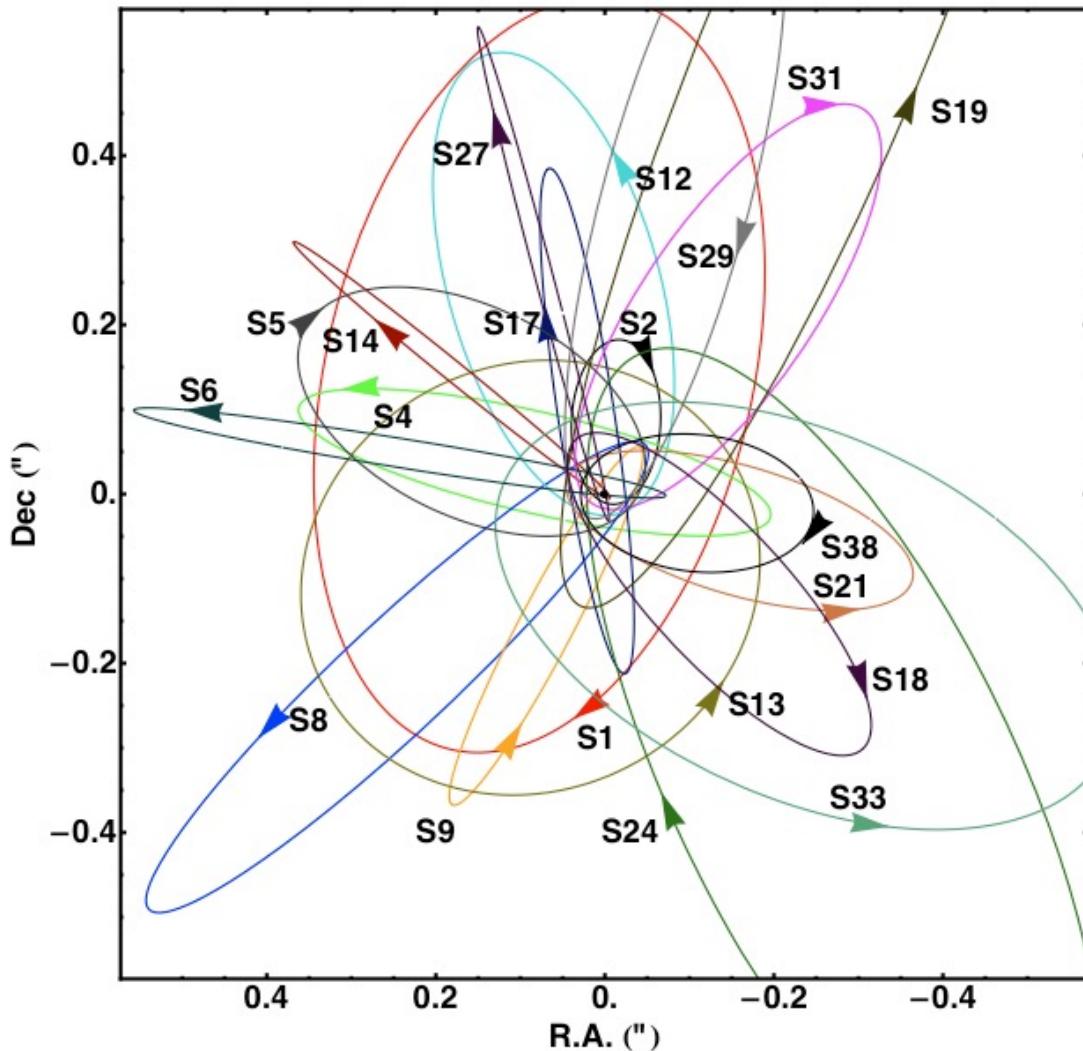
Périodes de quelques années

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
 $R_0 = 8.33 \pm 0.35 \text{ kpc}$

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

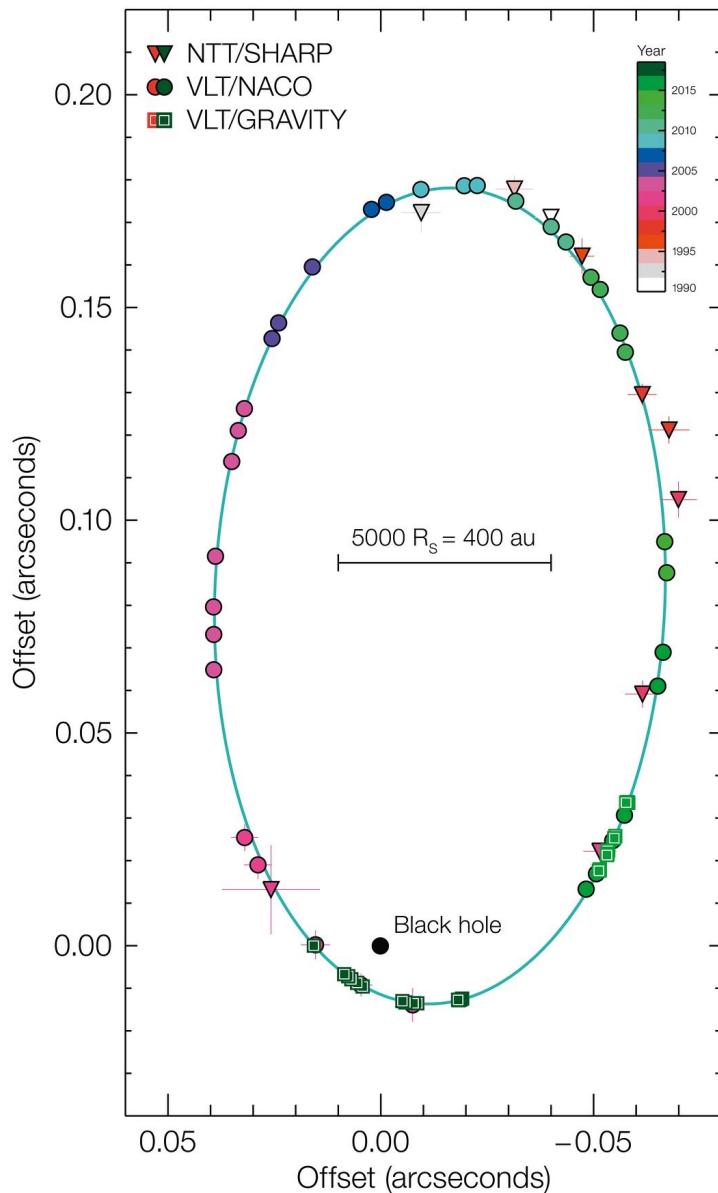


Nouvelles observations VLT jusqu'en 2018

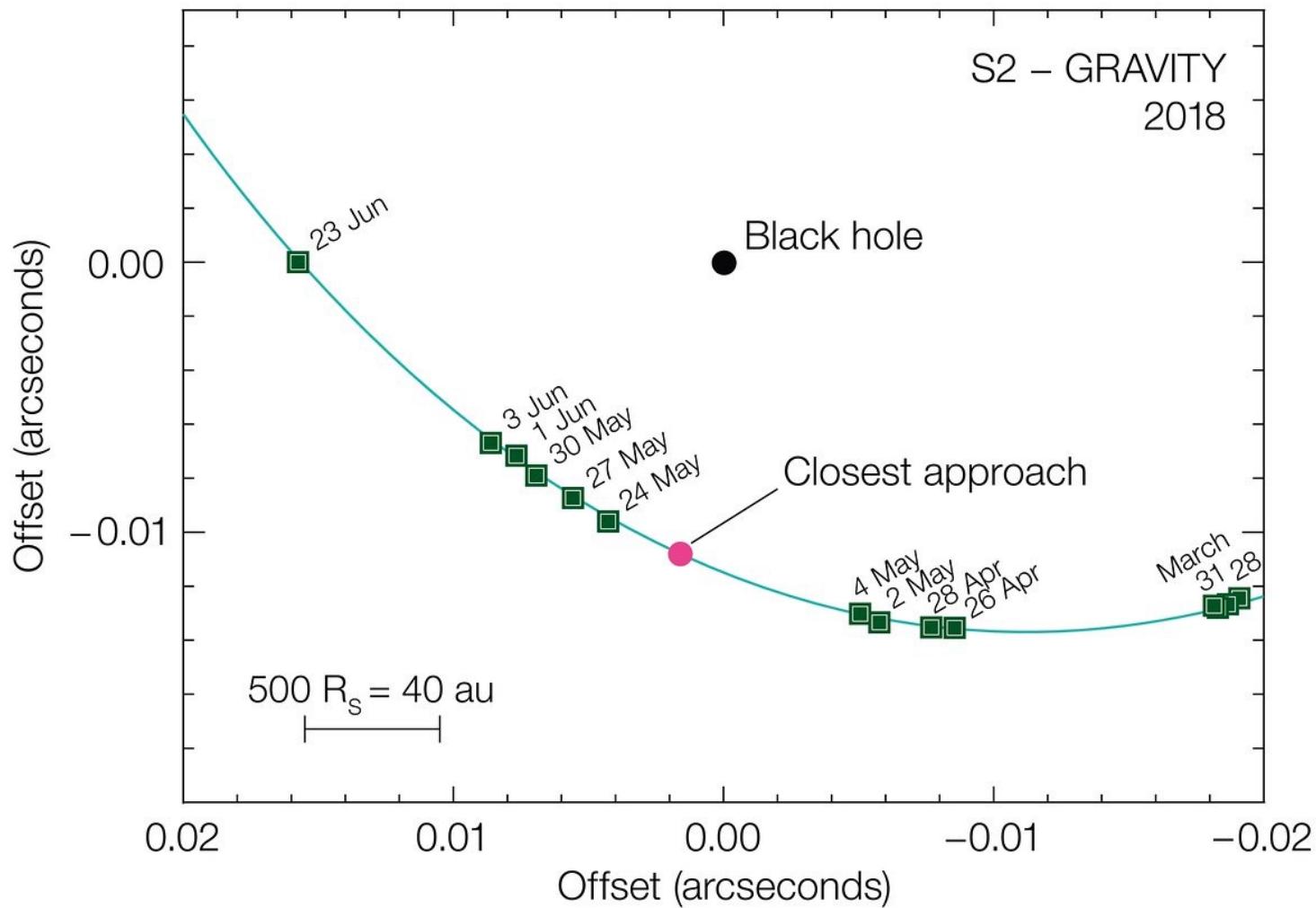


The highly elliptical, 16-year-period orbit of the star S2 around the massive black hole candidate Sgr A* is a sensitive probe of the gravitational field in the Galactic centre. Near pericentre at 120 AU ≈ 1400 Schwarzschild radii, the star has an orbital speed of ≈ 7650 km/s, such that the first-order 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 $z = \Delta\lambda/\lambda \approx 200$ 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.

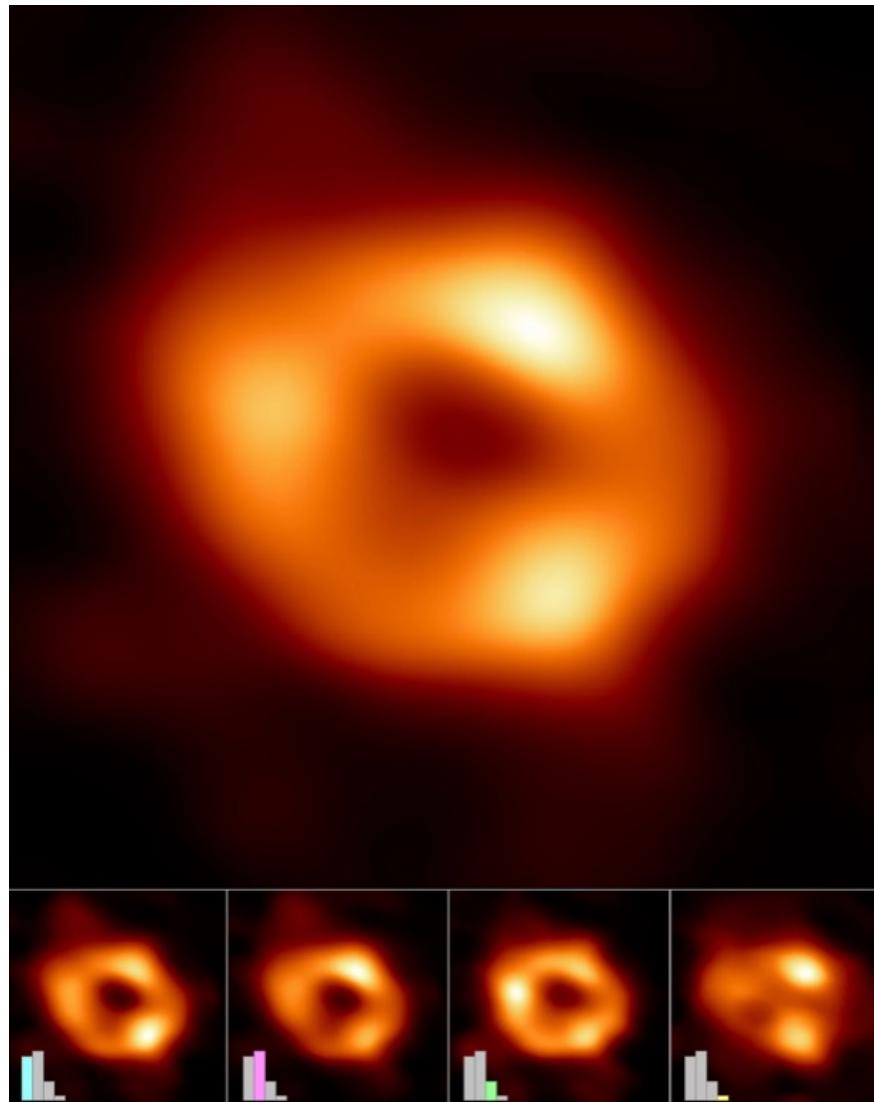
Nouvelles observations VLT jusqu'en 2018



Nouvelles observations VLT jusqu'en 2018



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

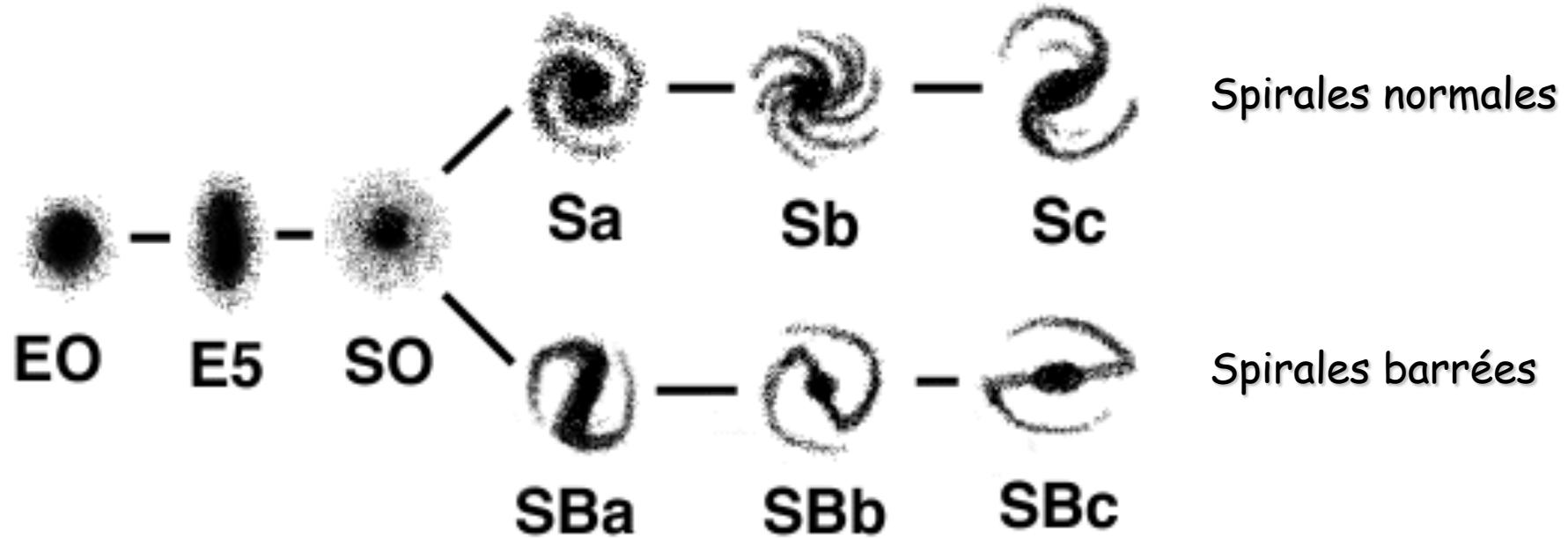


Les galaxies

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.

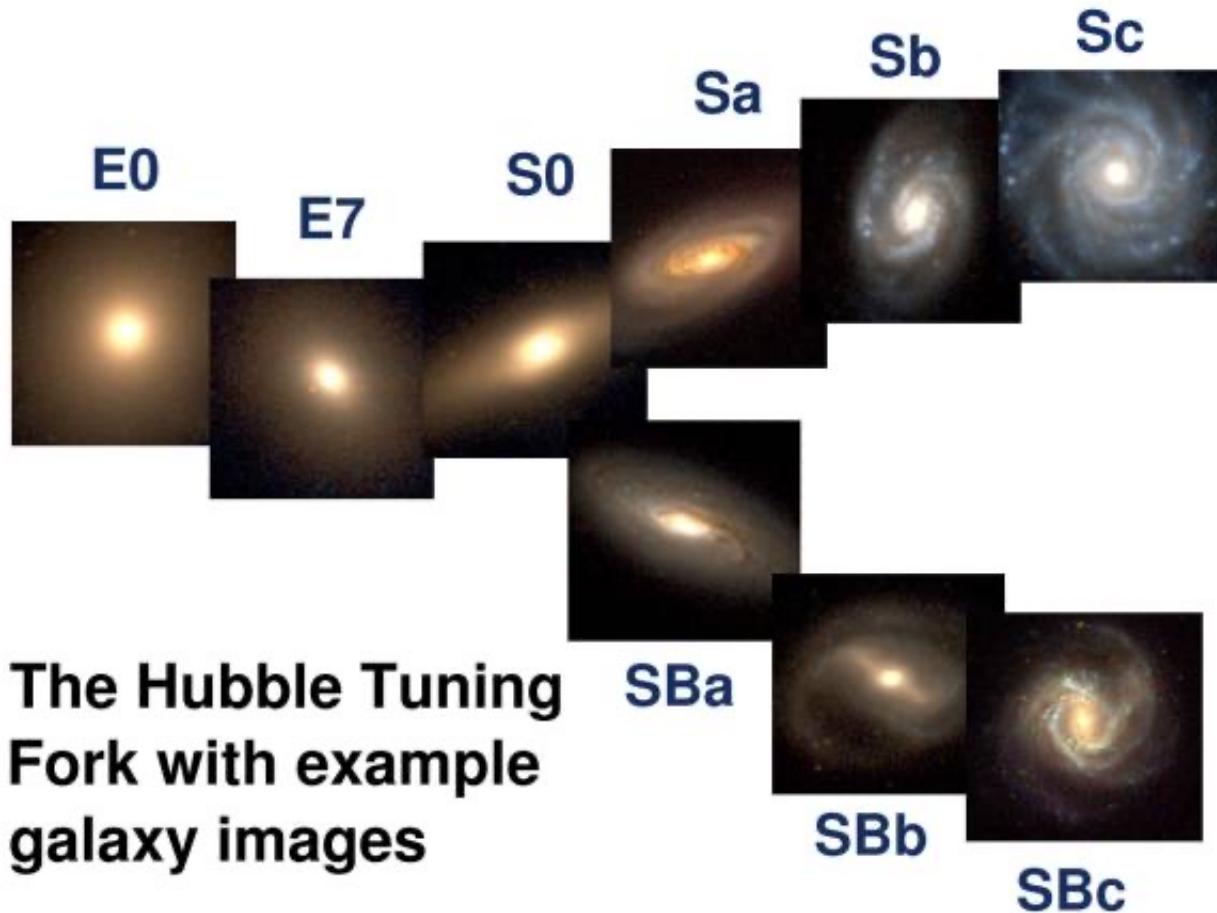
Classification de Hubble



Galaxies elliptiques
« type précoce »

Galaxies spirales
« type tardif »

Classification de Hubble



Galaxies elliptiques
« type précoce »

Galaxies spirales
« type tardif »

Spirales normales

Spirales barrées

Classification de Hubble

- Sous-classes des spirales qui dépendent de l'importance relative du bulbe et du disque

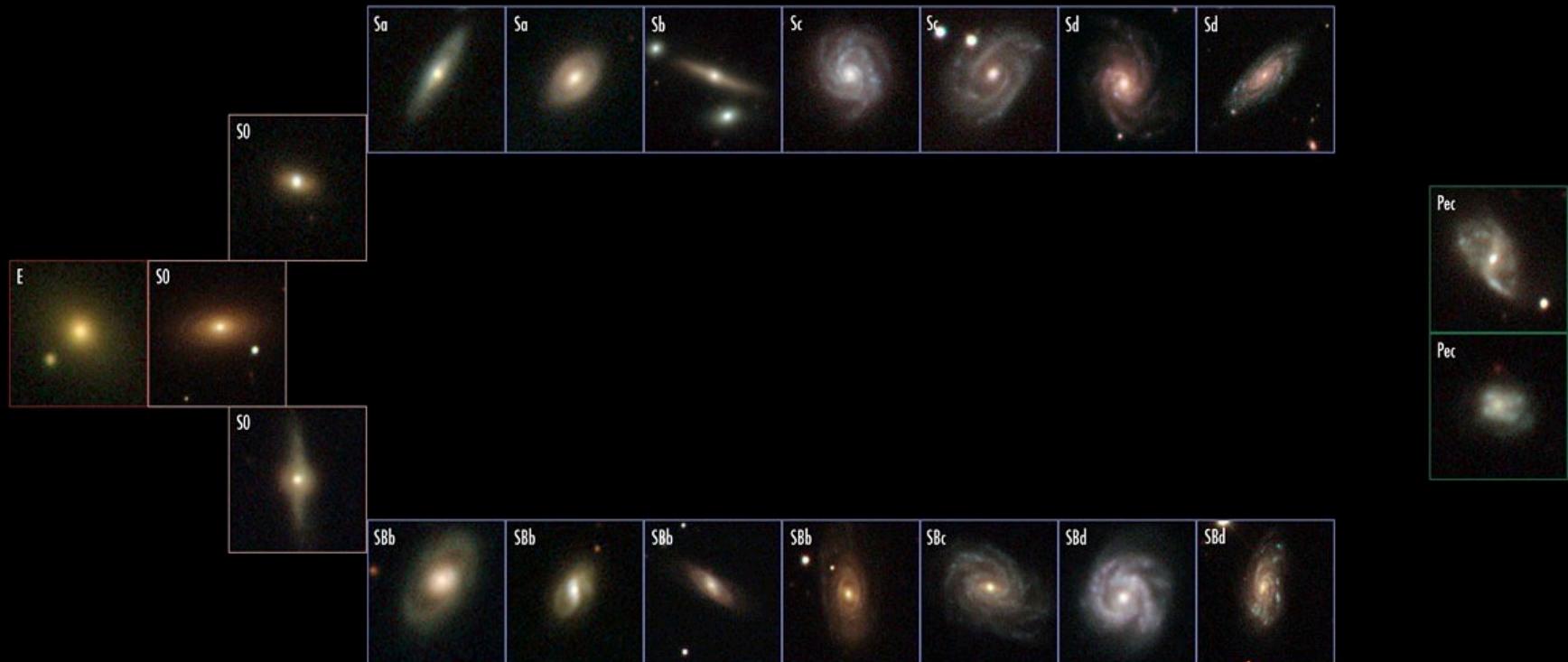
Sa: bulbe important

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



E 3%

S0 15%

Spiral 72%

Peculiar 10%

10% de galaxies irrégulières

Classification de Hubble (Univers lointain)

Distant Galaxies



57% de galaxies irrégulières

Exemples de galaxies

Messier 81, spirale Sb



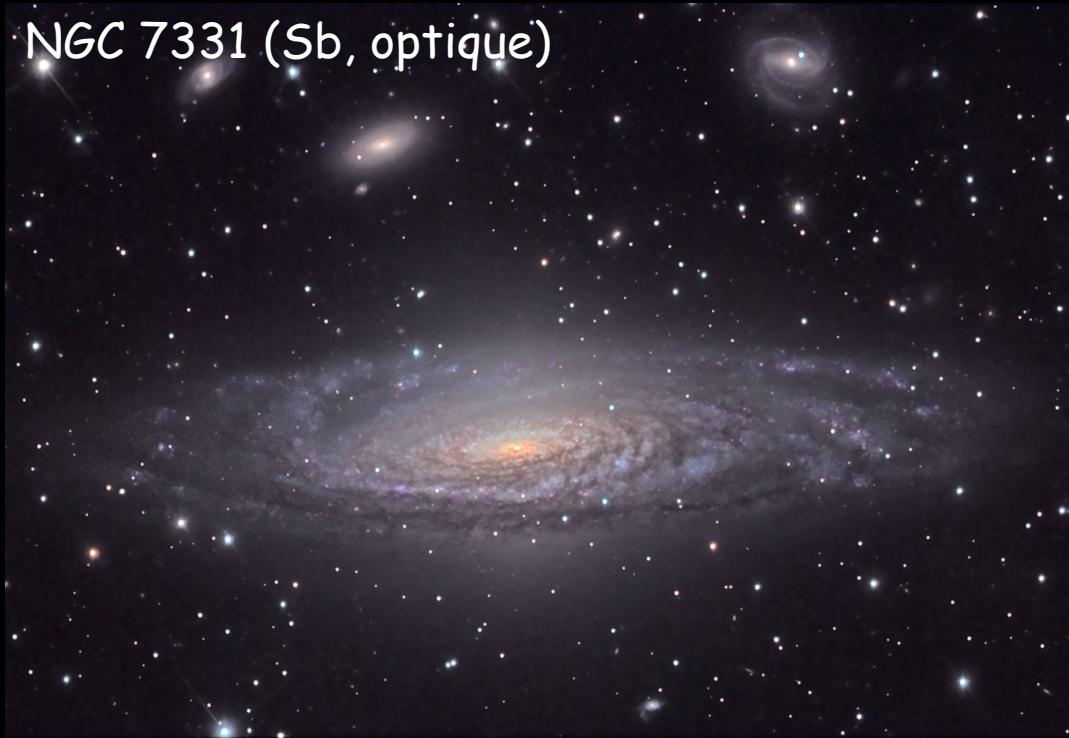
Messier 81, spirale Sb



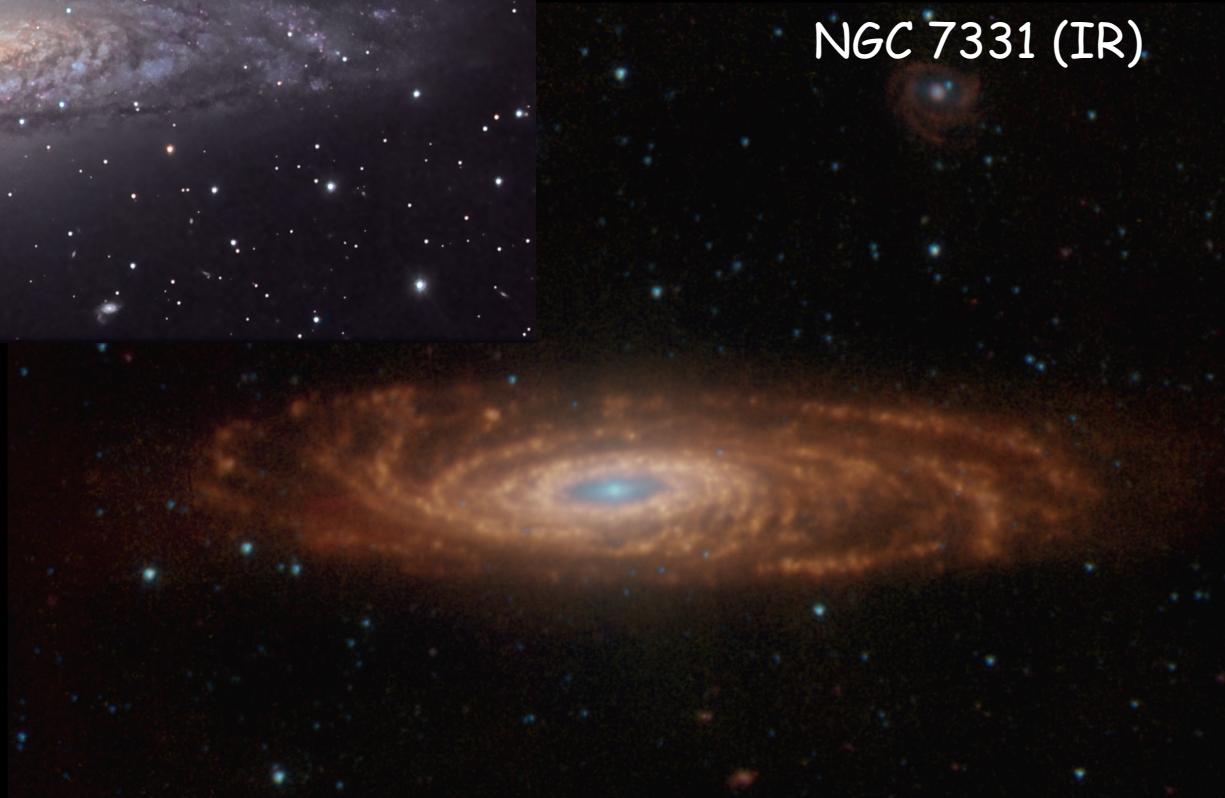
Vision infrarouge, où les poussières émettent
un rayonnement de corps noir

Vues comparées optique/IR

NGC 7331 (Sb, optique)



NGC 7331 (IR)

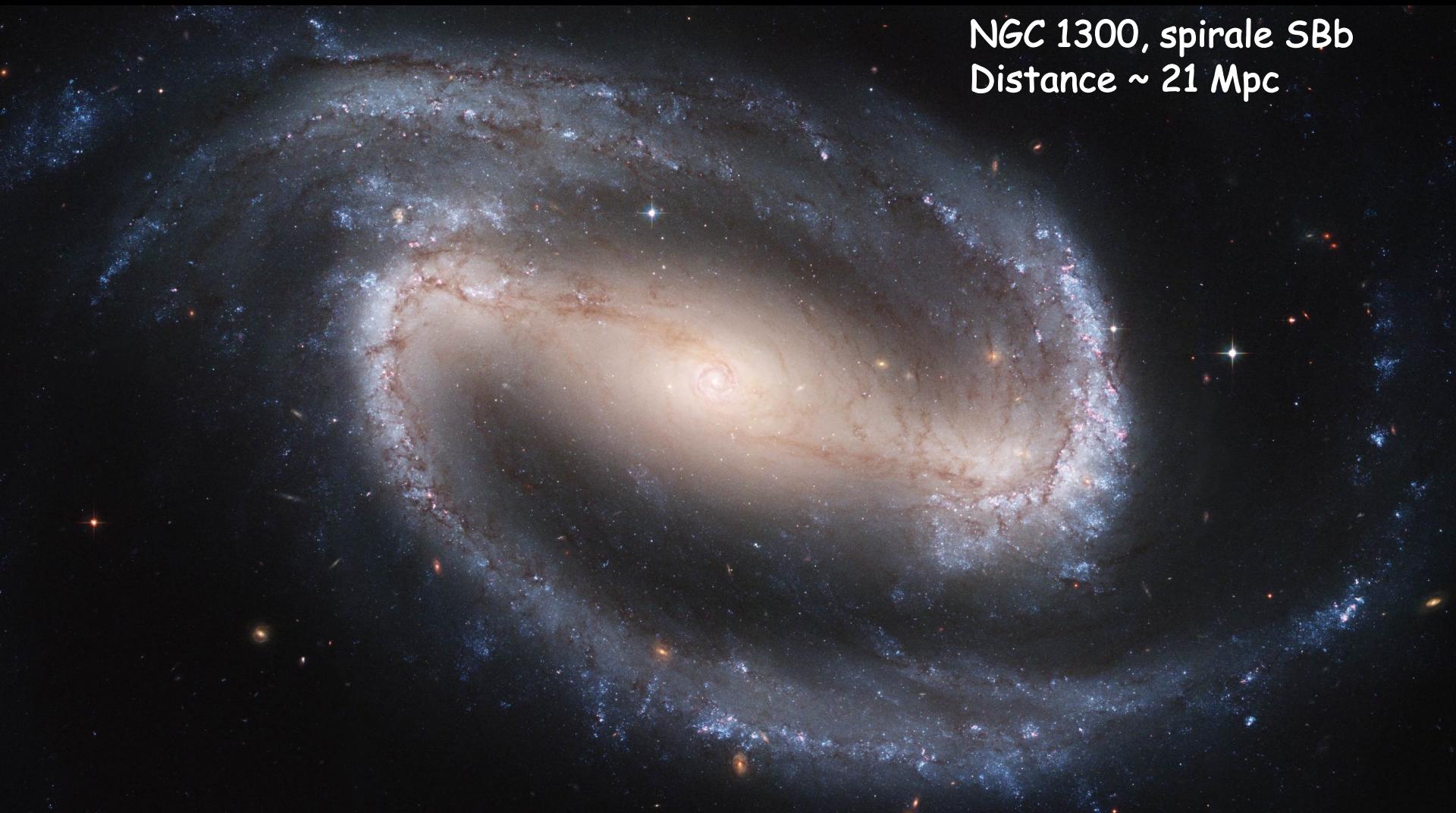


Messier 104, spirale Sa

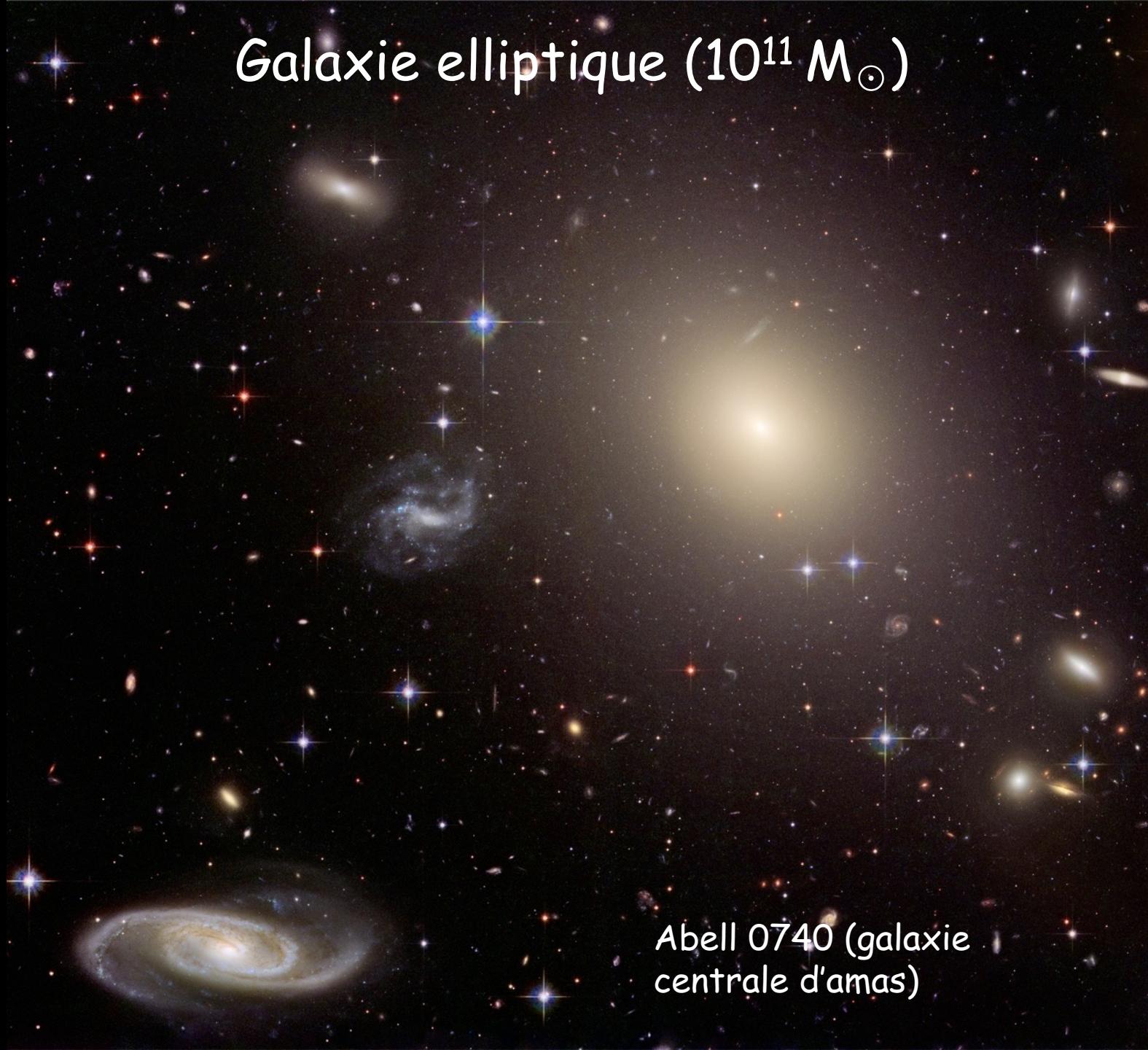


Spirales barrée (image optique)

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

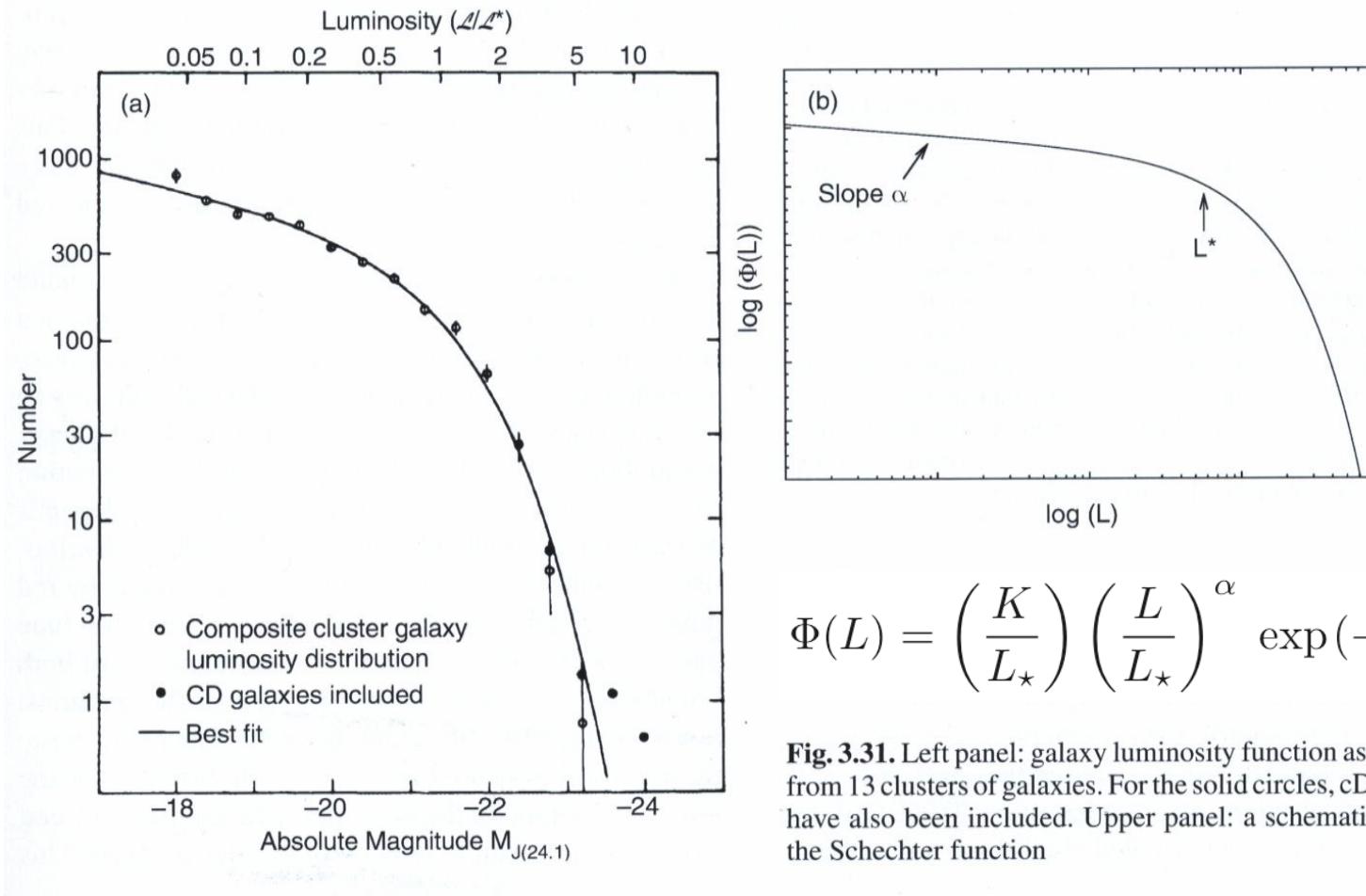


Fig. 3.31. Left panel: galaxy luminosity function as obtained from 13 clusters of galaxies. For the solid circles, cD galaxies have also been included. Upper panel: a schematic plot of the Schechter function

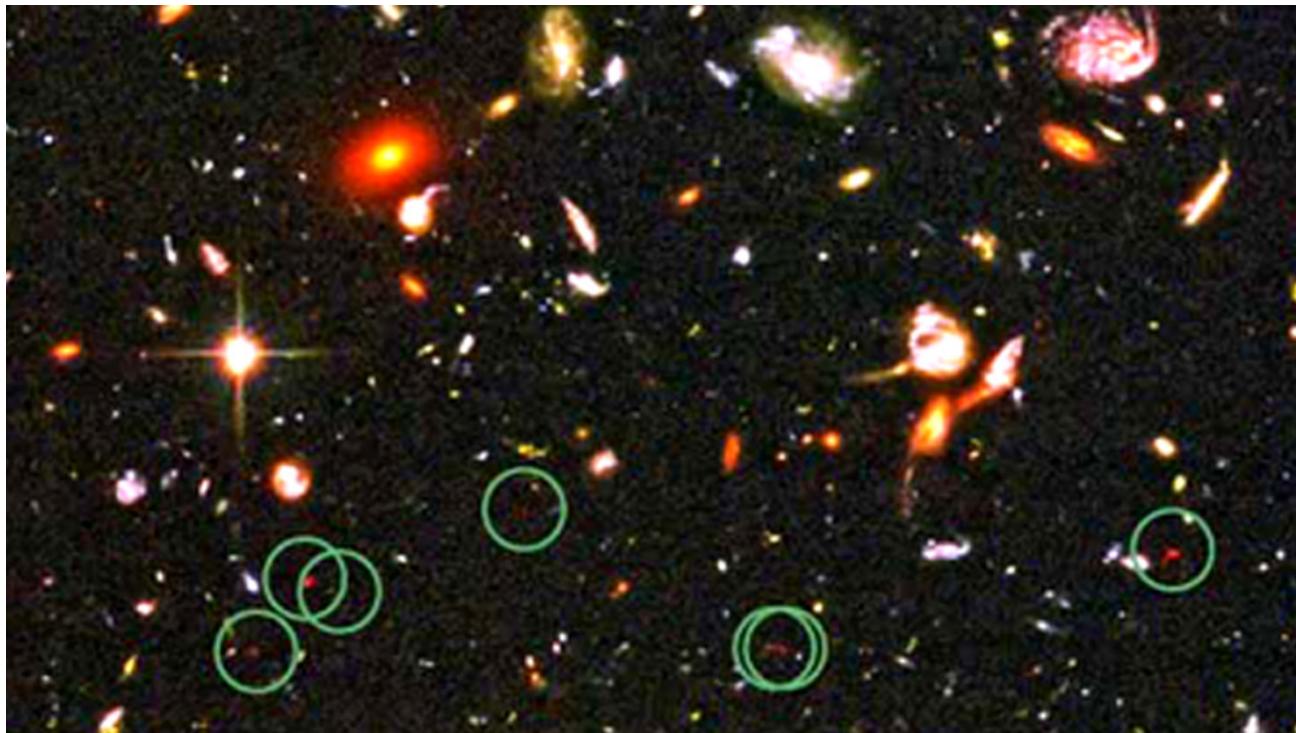
$$\Phi(L) = \left(\frac{K}{L_*}\right) \left(\frac{L}{L_*}\right)^\alpha \exp(-L/L_*)$$

Les galaxies les plus lointaines

Hubble Ultra Deep Field



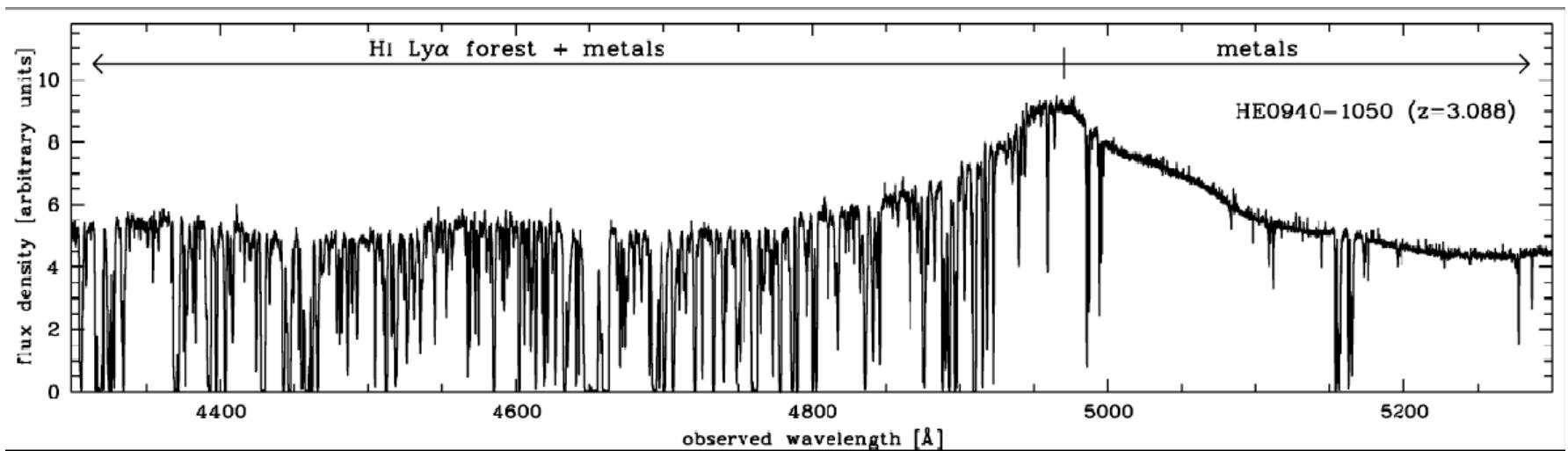
Hubble Ultra Deep Field



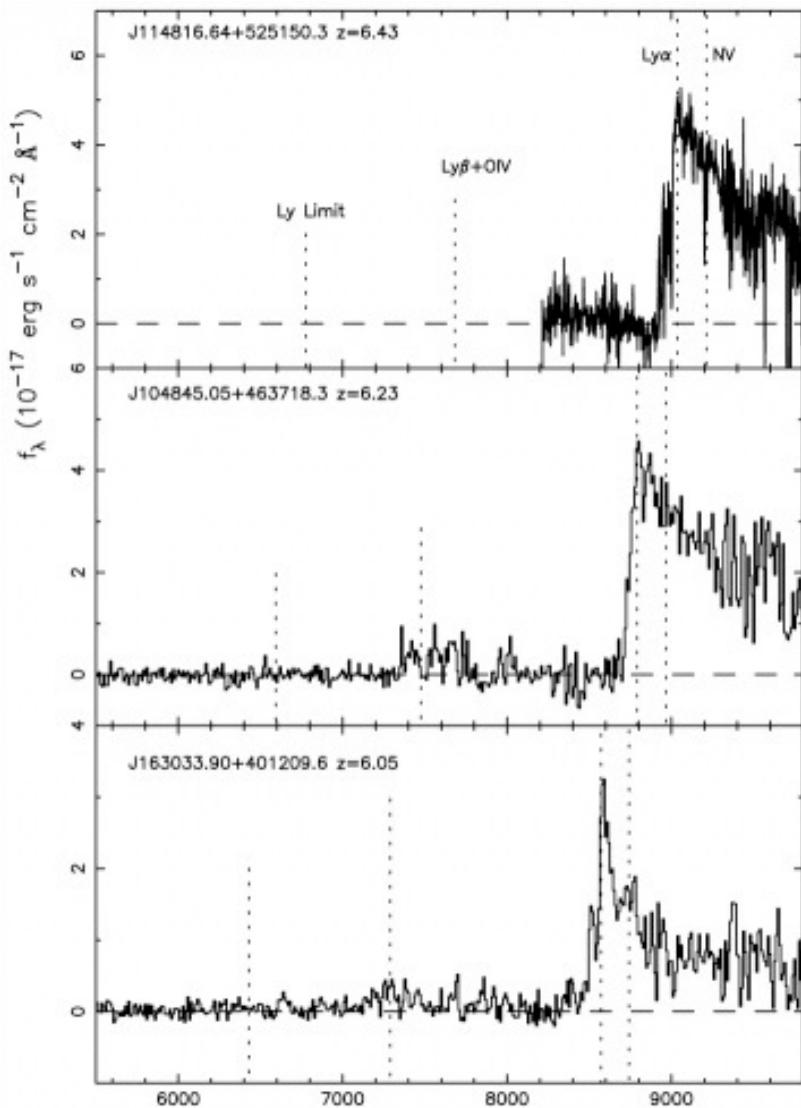
Recherche des galaxies lointaines par l'observations:

- 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

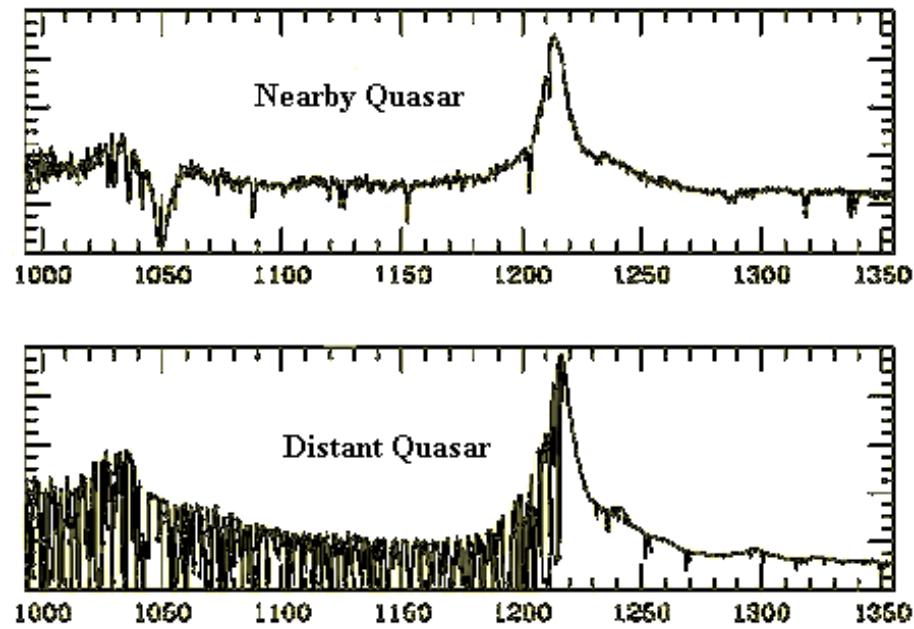


Recherche par cassure Lyman alpha

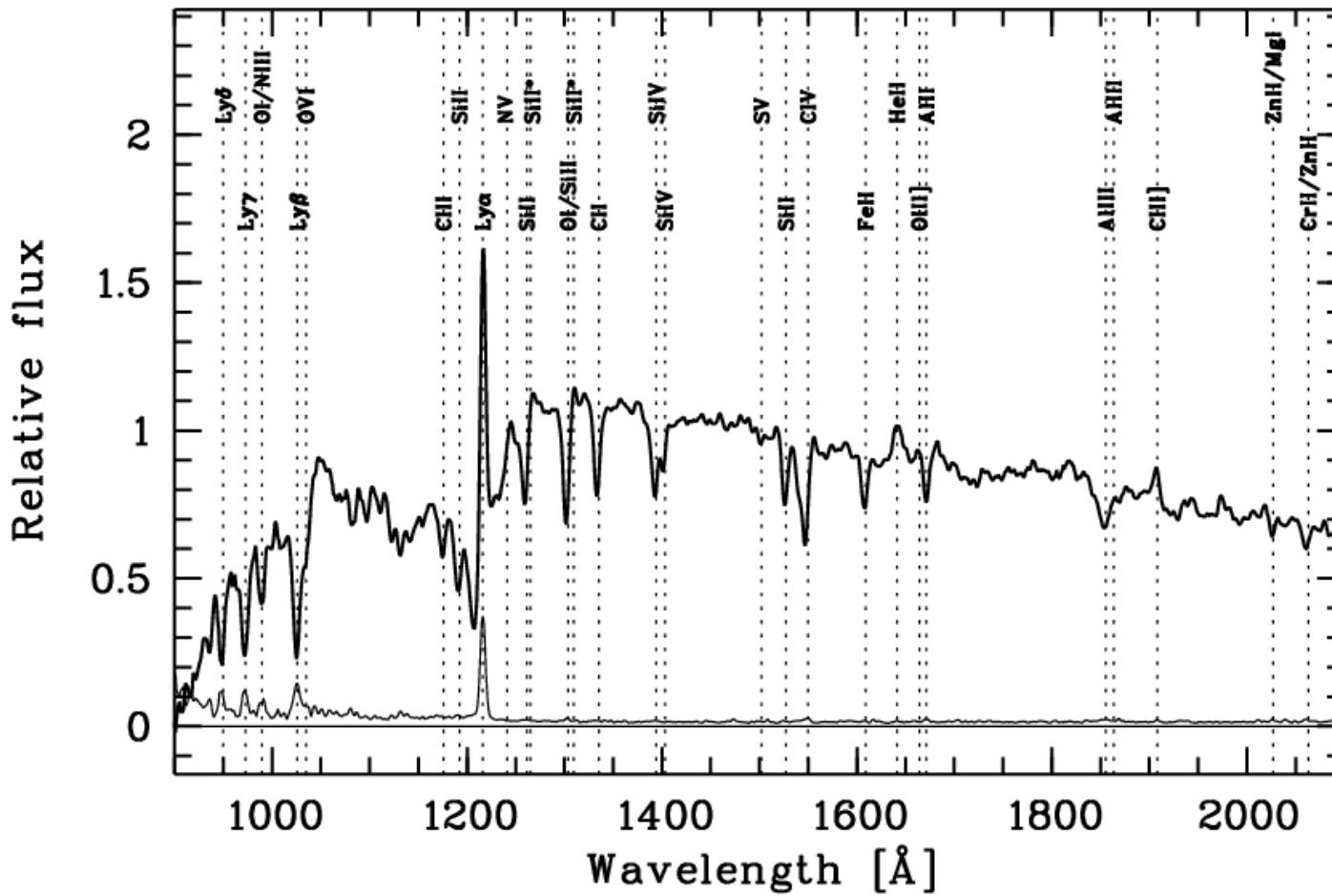


Technique utilisée pour la recherche de quasars lointains ou de galaxies en formation

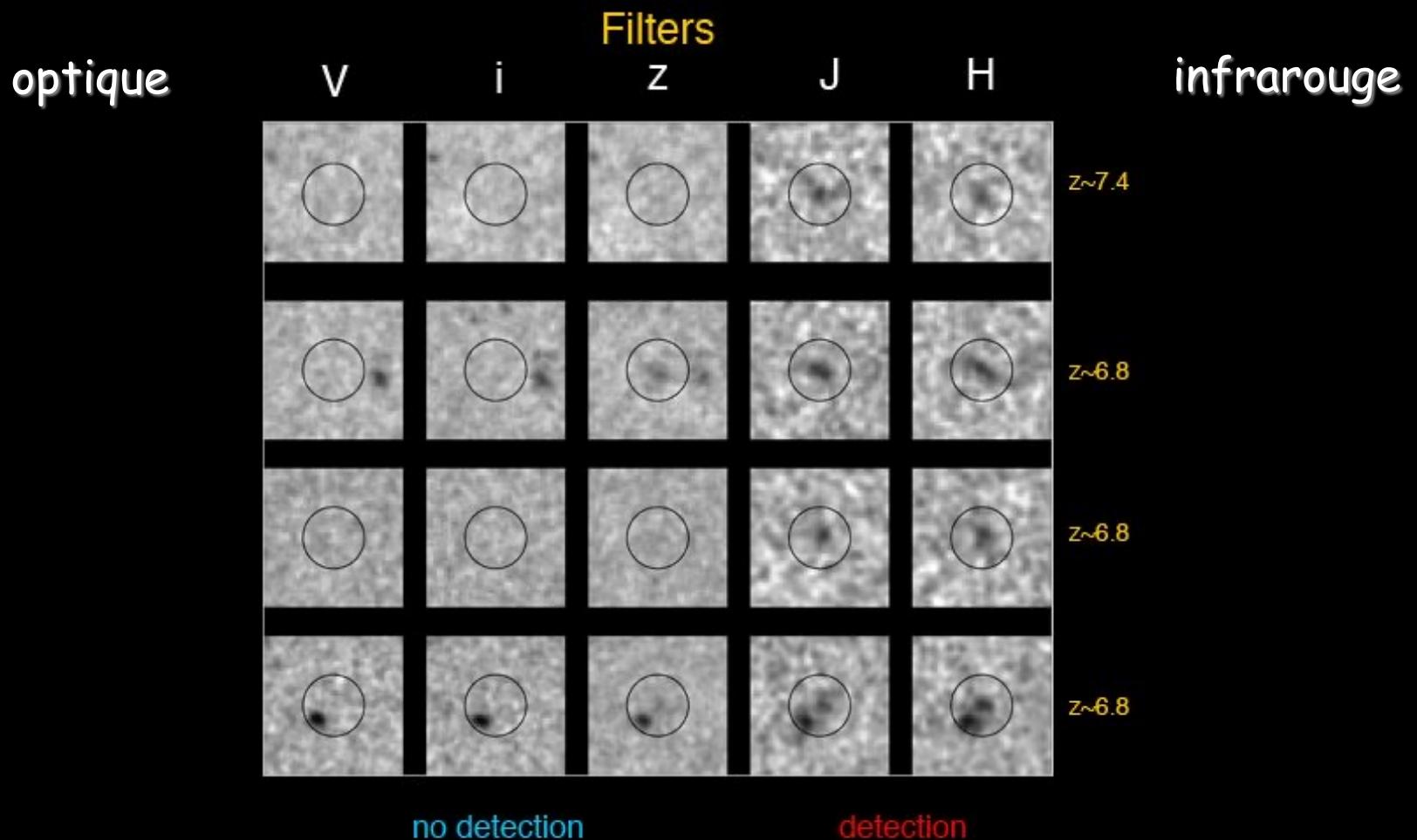
Tire parti de l'extinction par le milieu intergalactique



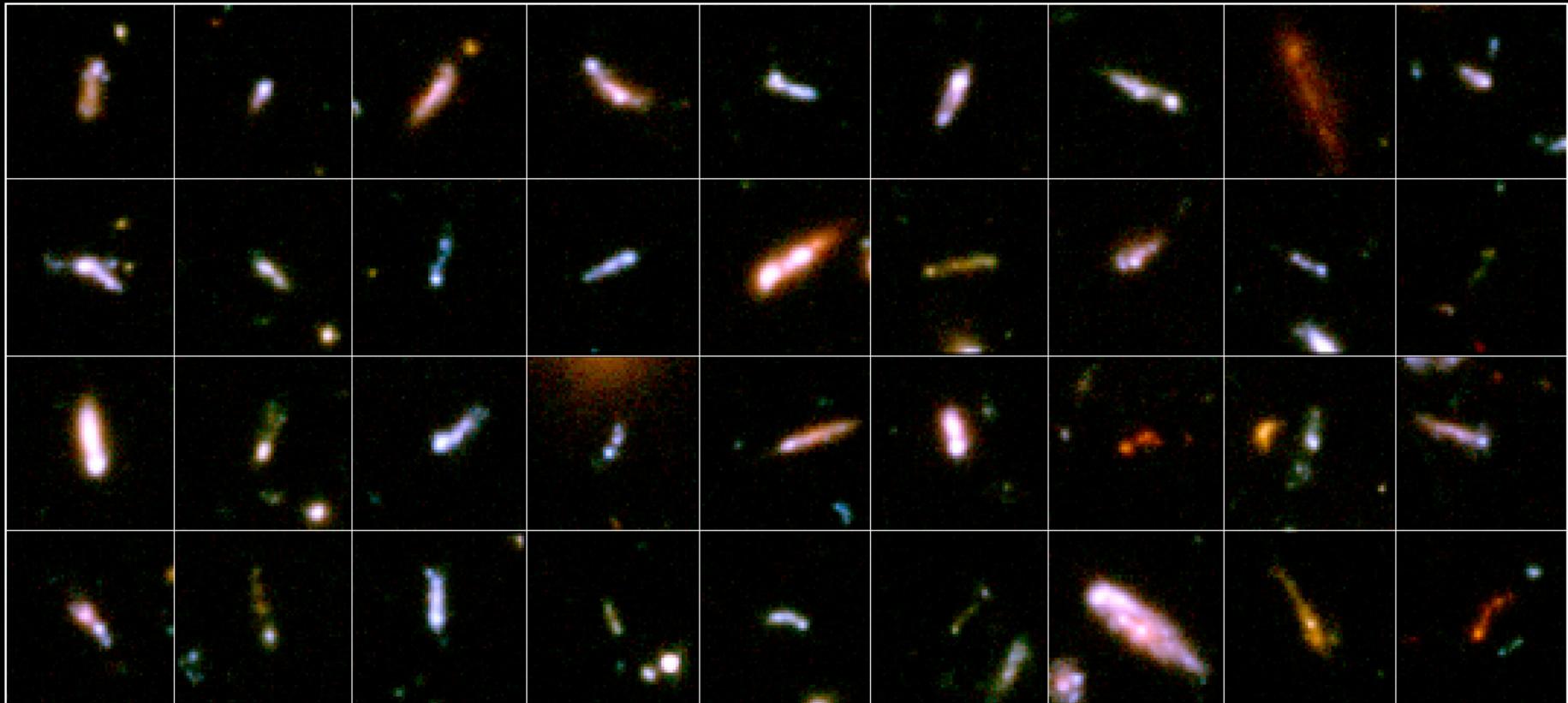
Recherche par cassure Lyman alpha et par émission Lyman alpha



Recherche par cassure Lyman alpha



Exemples de galaxies lointaines en formation



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

