

# Chapitre 10

## La matière sombre dans l'univers

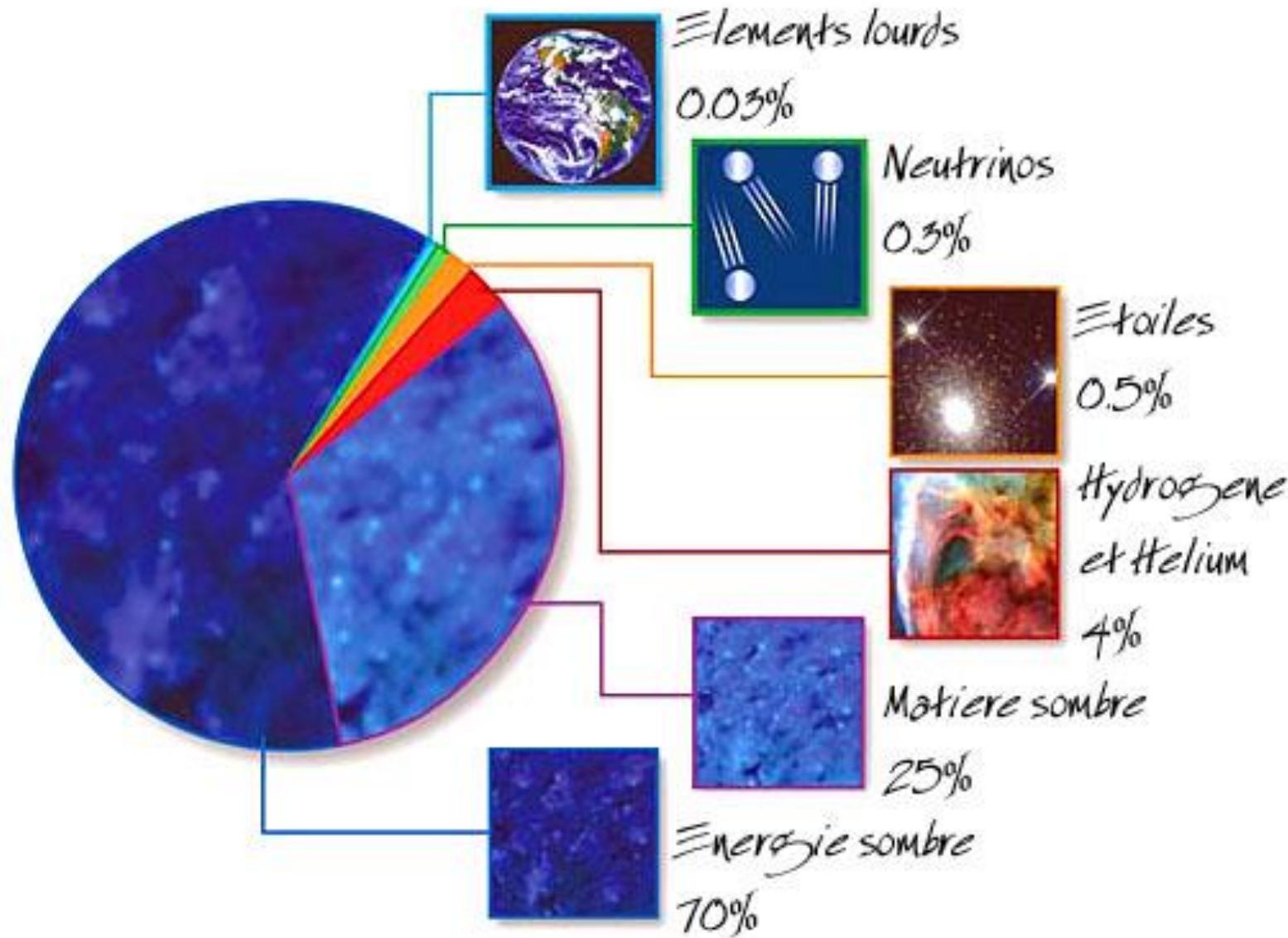
# La matière sombre

**Preuves de l'existence de matière sombre:**

- Dans les galaxies spirales (Courbe de rotation)
- Les groupes et amas de galaxies (Distribution du gaz)
- Détection et étude de la matière sombre:
  - Indirecte: dynamique des étoiles/gaz + thermodynamique du gaz
  - par effet de **lentille gravitationnelle** (Semaine prochaine)
- Croissances des fluctuations initiales (fond diffus cosmologique)

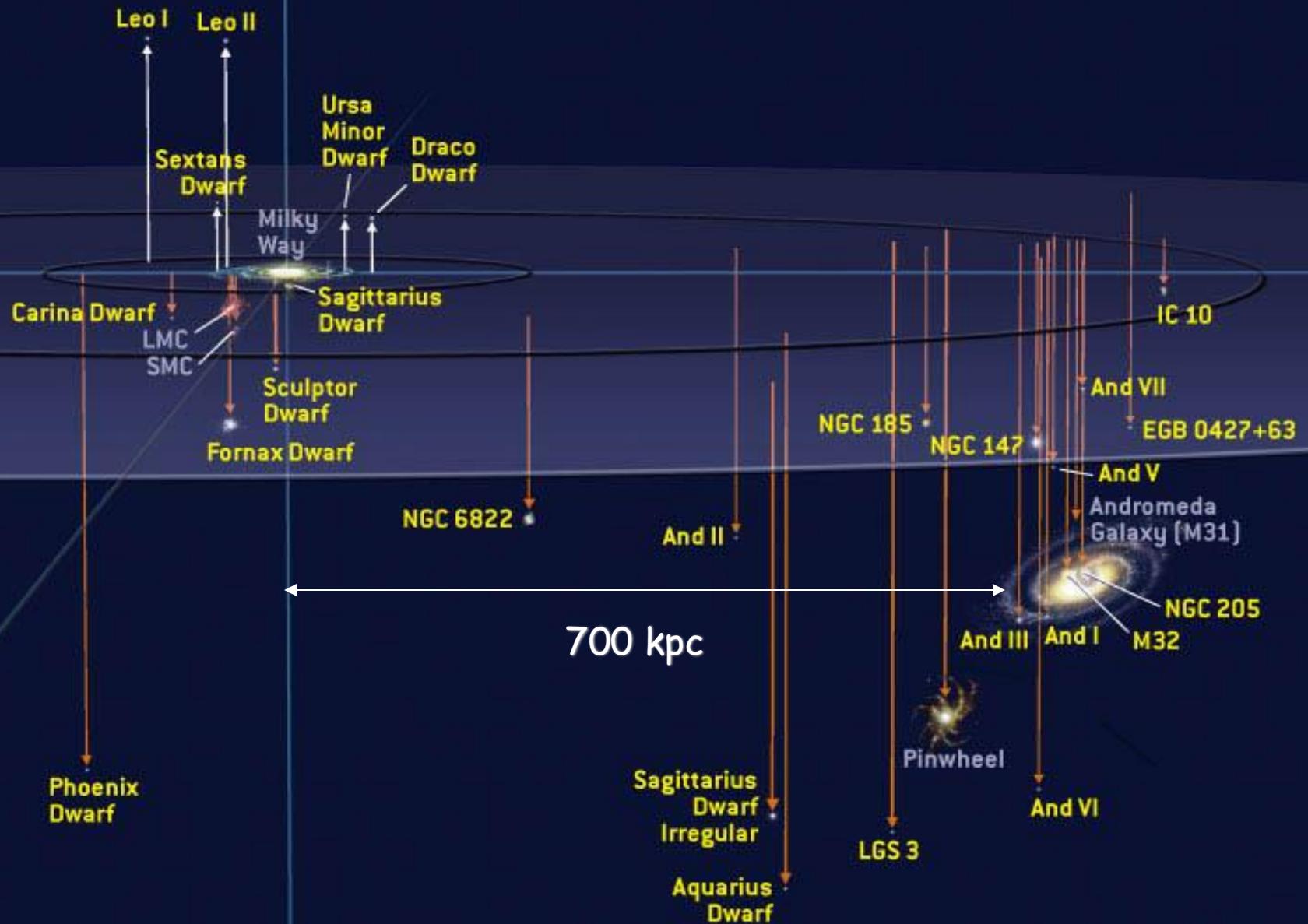
La matière sombre est présente à toutes les échelles.

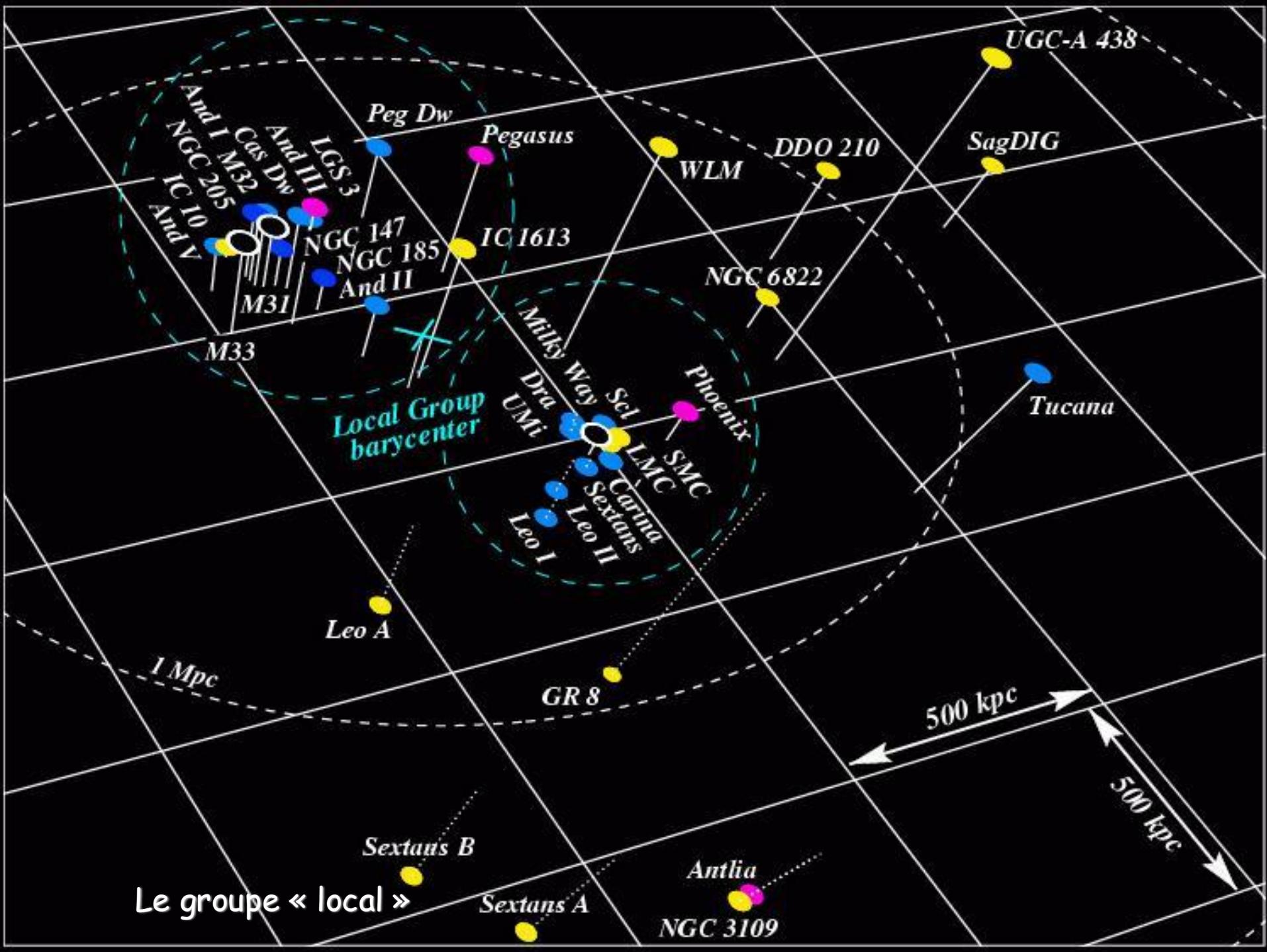
# Composition de l'Univers



Le « groupe local »

# Le groupe « local »





# Les nuages de Magellan (1519), satellites de la Voie Lactée

Grand nuage  
Galaxie irrégulière  
Distance  $\sim 50$  kpc



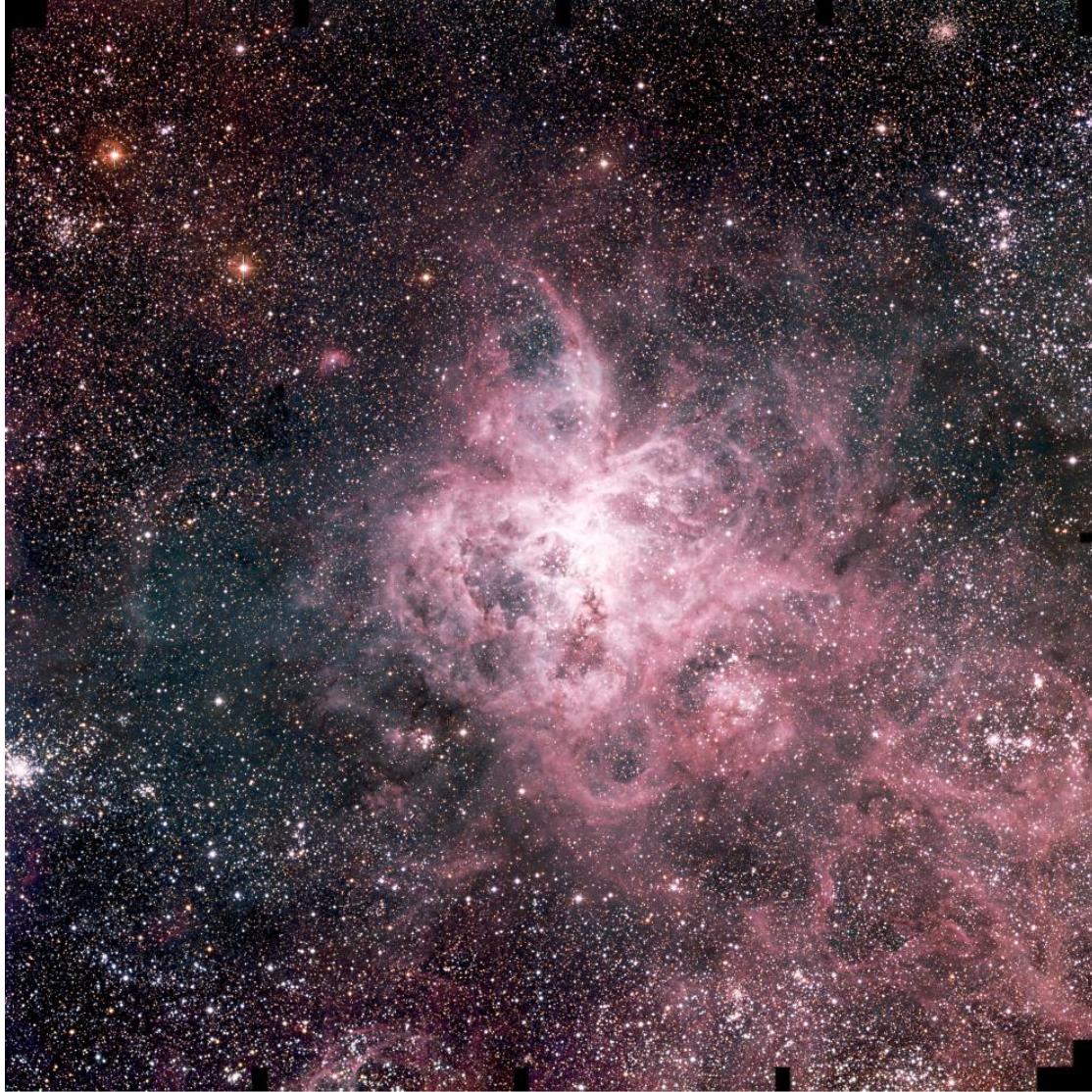
$\sim 2$  kpc

Petit nuage  
Galaxie spirale SB  
Distance  $\sim 60$  kpc

# Grand nuage de Magellan



# Zone de formation d'étoiles dans le grand nuage de Magellan



The Tarantula Nebula in the LMC  
(MPG/ESO 2.2-m + WFI)

ESO PR Photo 14a/02 (7 June 2002)

© European Southern Observatory



# Autres satellites de la Voie Lactée : galaxies naines ( $M \sim 10^8\text{-}10^9 M_\odot$ )

Naine du sculpteur

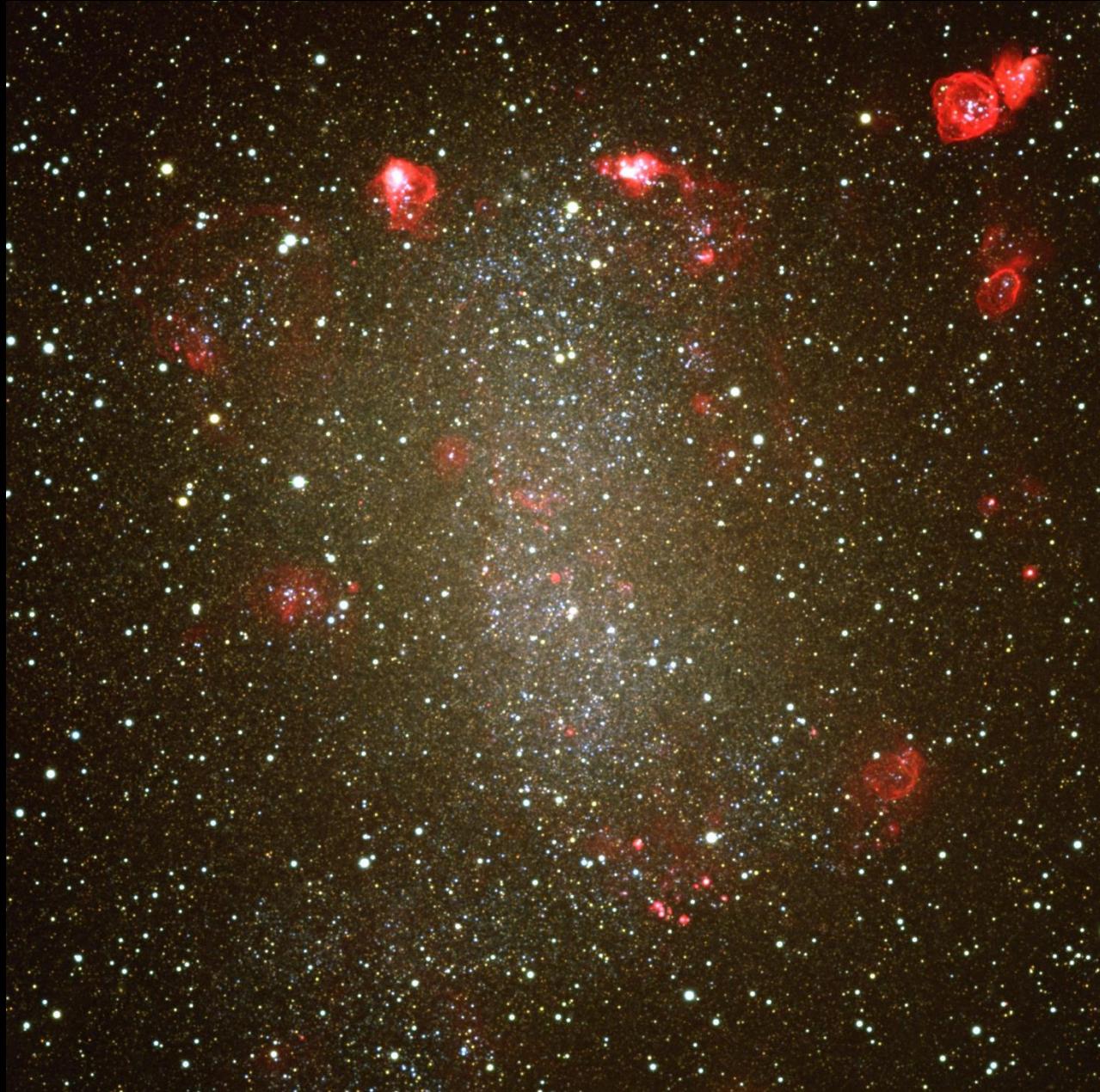
Leo I



Naine de la  
« machine  
pneumatique »

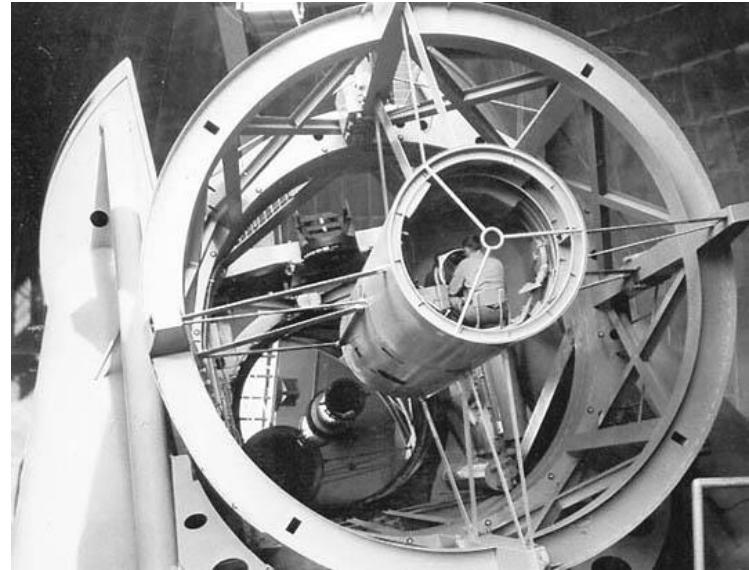
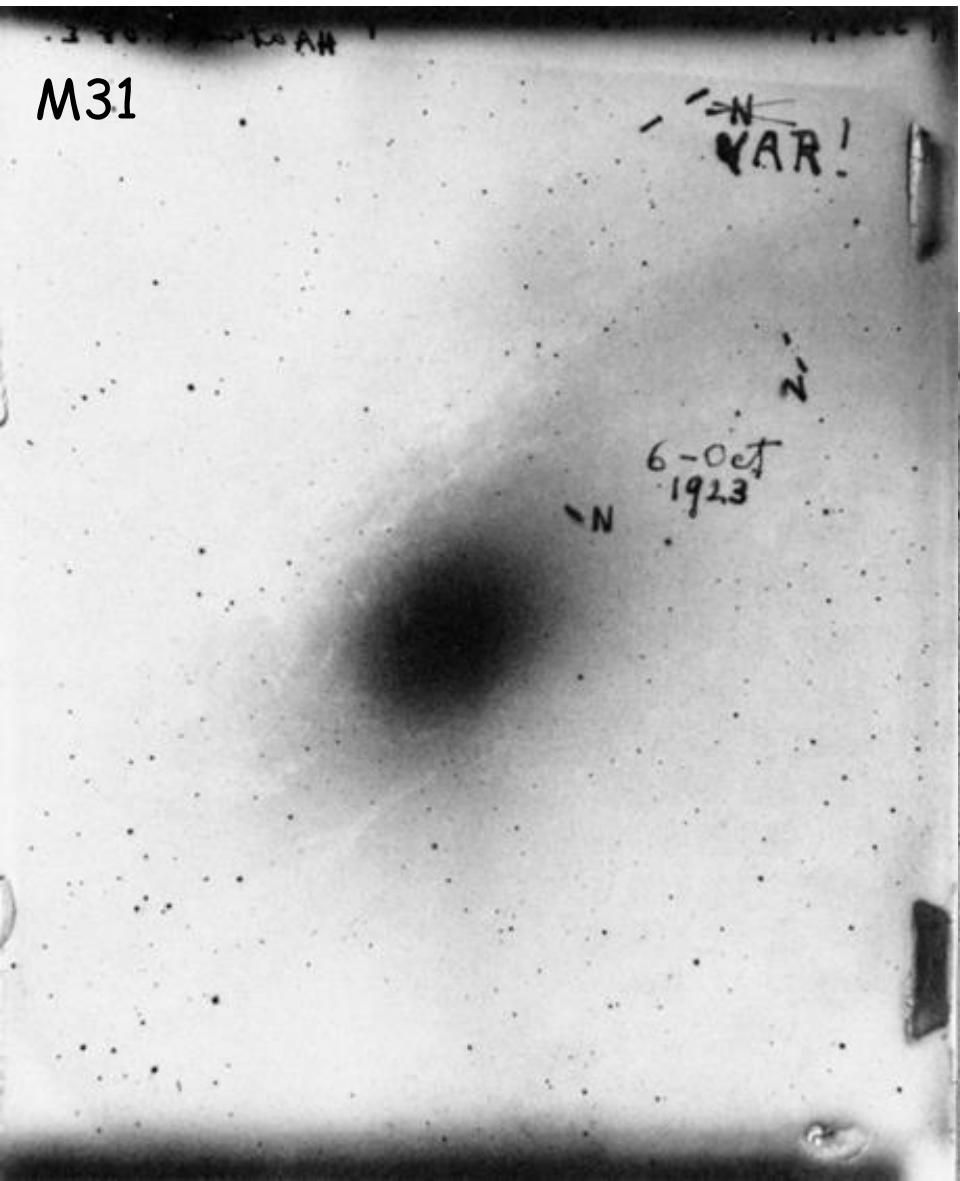


# NGC 6822: galaxie naine du « groupe local »

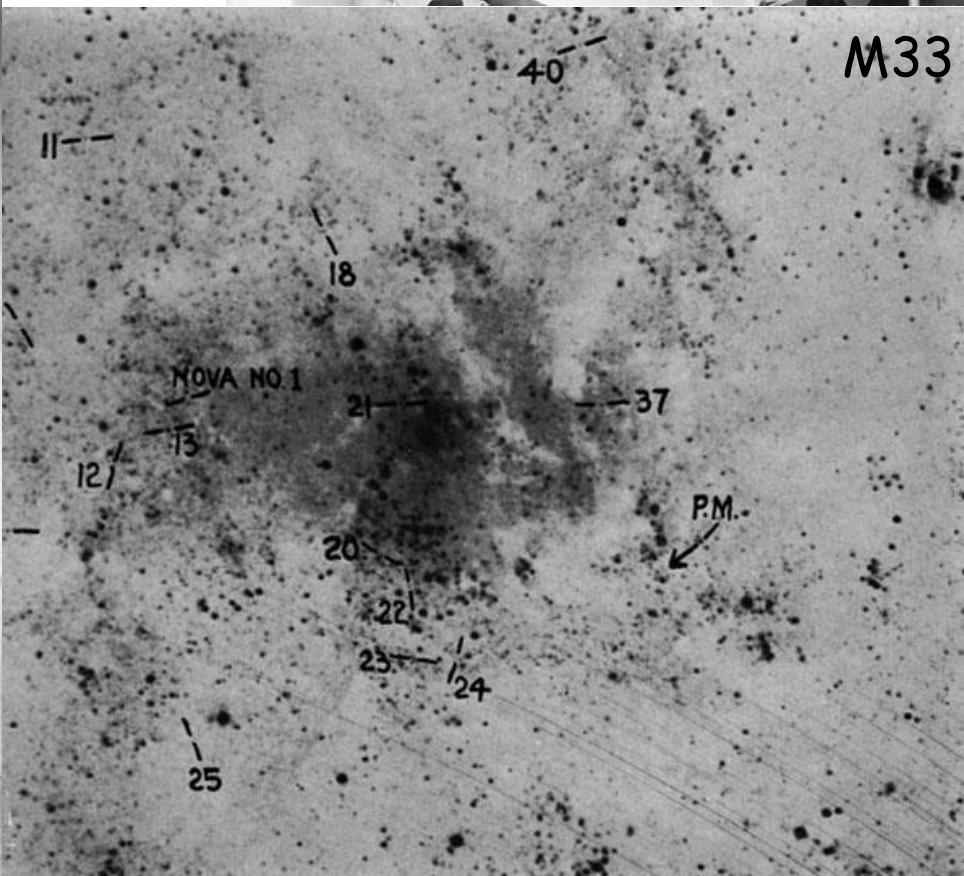


# Etoiles Cépheides dans M31 et M33 (plaques photos prises par Hubble)

M31



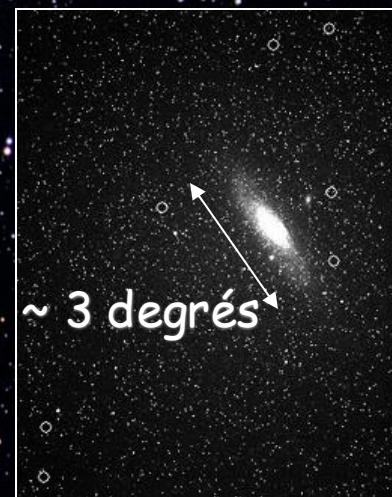
M33



La grande nébuleuse d'Andromède  
(Messier 31) distance 700 kpc

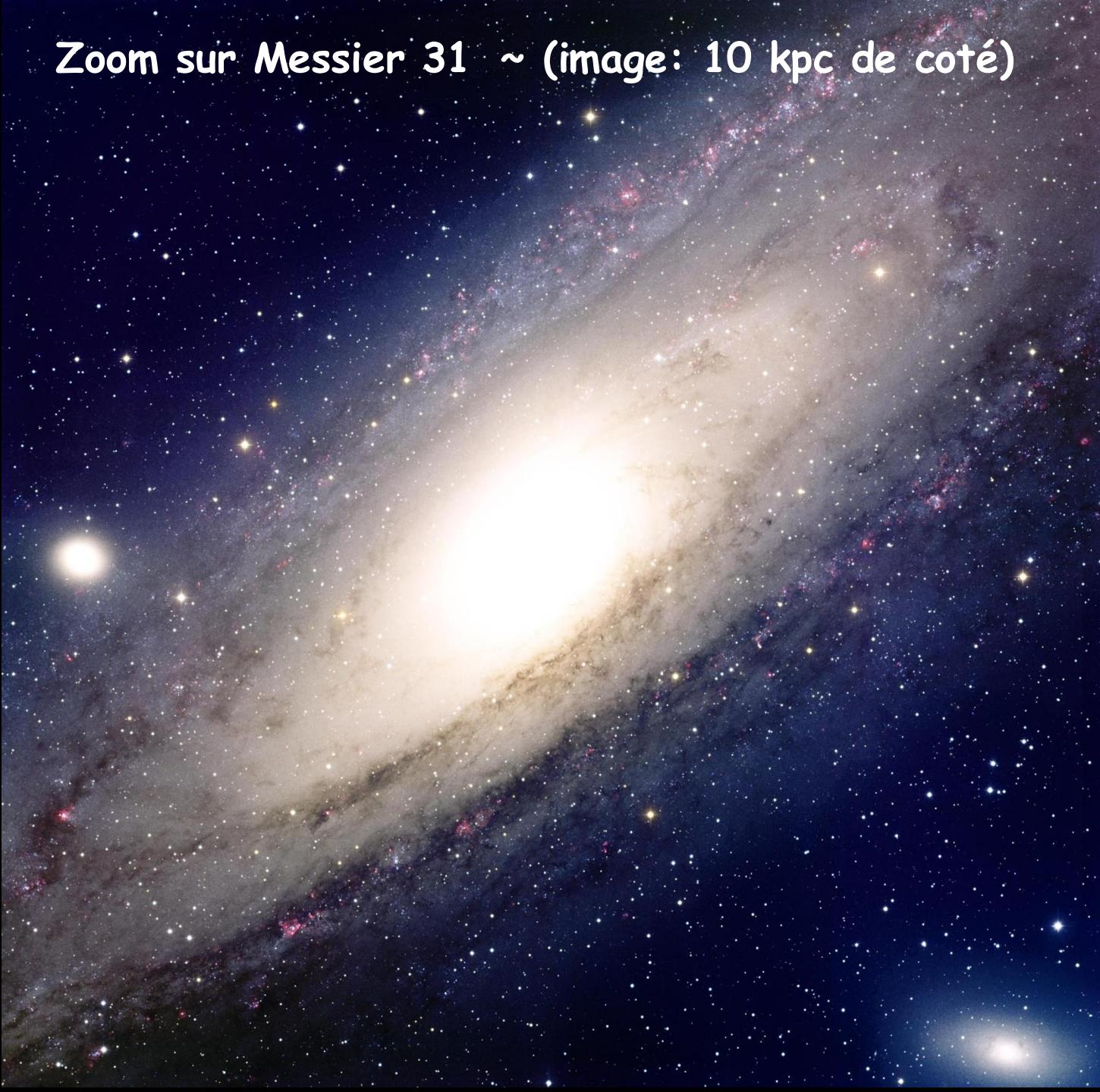
M32

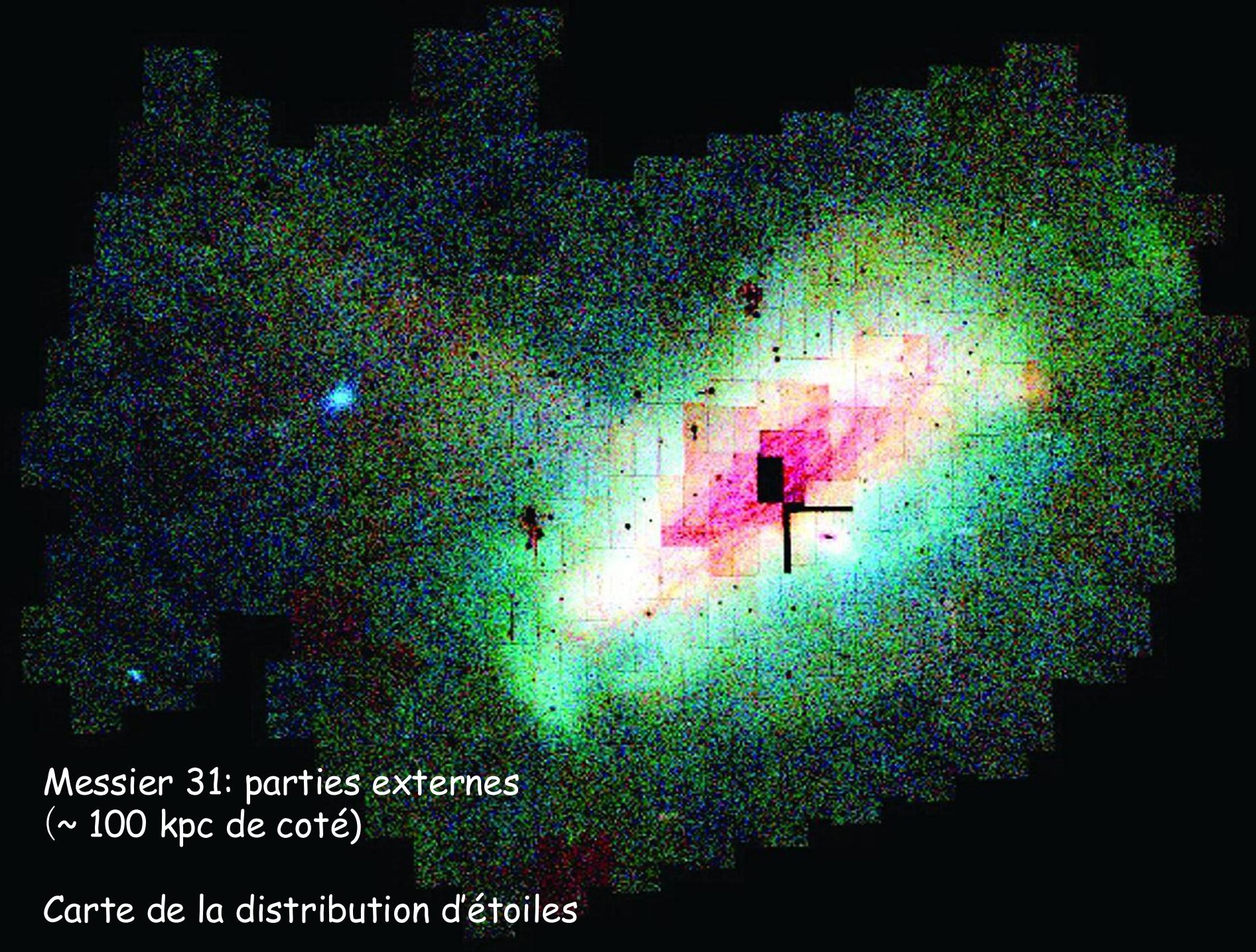
NGC 205



~ 3 degrés

Zoom sur Messier 31 ~ (image: 10 kpc de coté)





Messier 31: parties externes  
(~ 100 kpc de côté)

Carte de la distribution d'étoiles

# Rotation des galaxies spirales

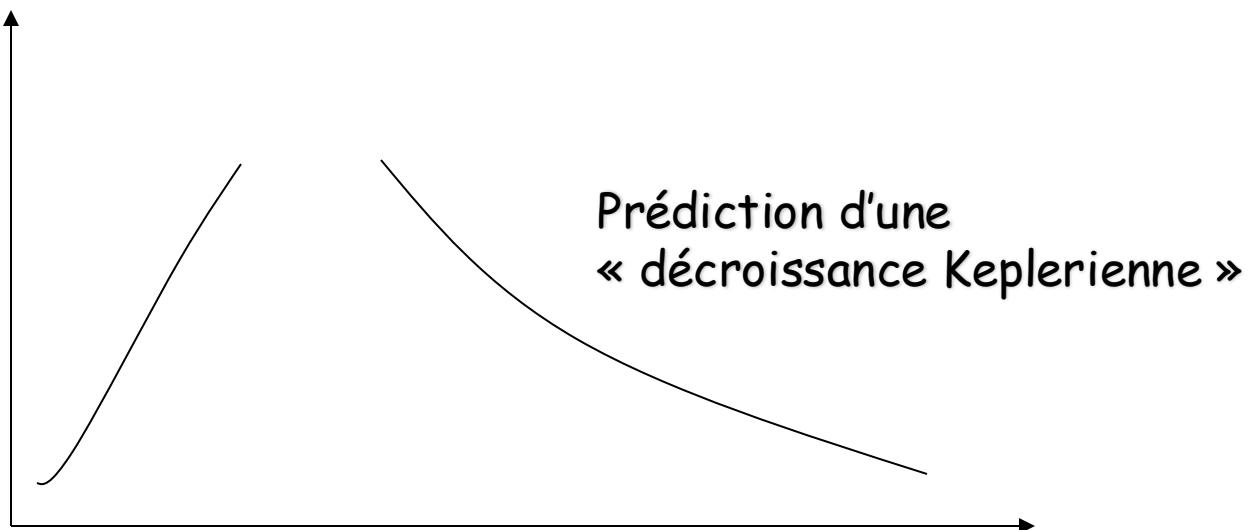
# Rotation des galaxies spirales

Prédiction de la distribution de la masse dans les galaxies spirales, grâce à la mesure de la vitesse circulaire (loi de Newton):

Proche du noyau  $V(r) \propto r$

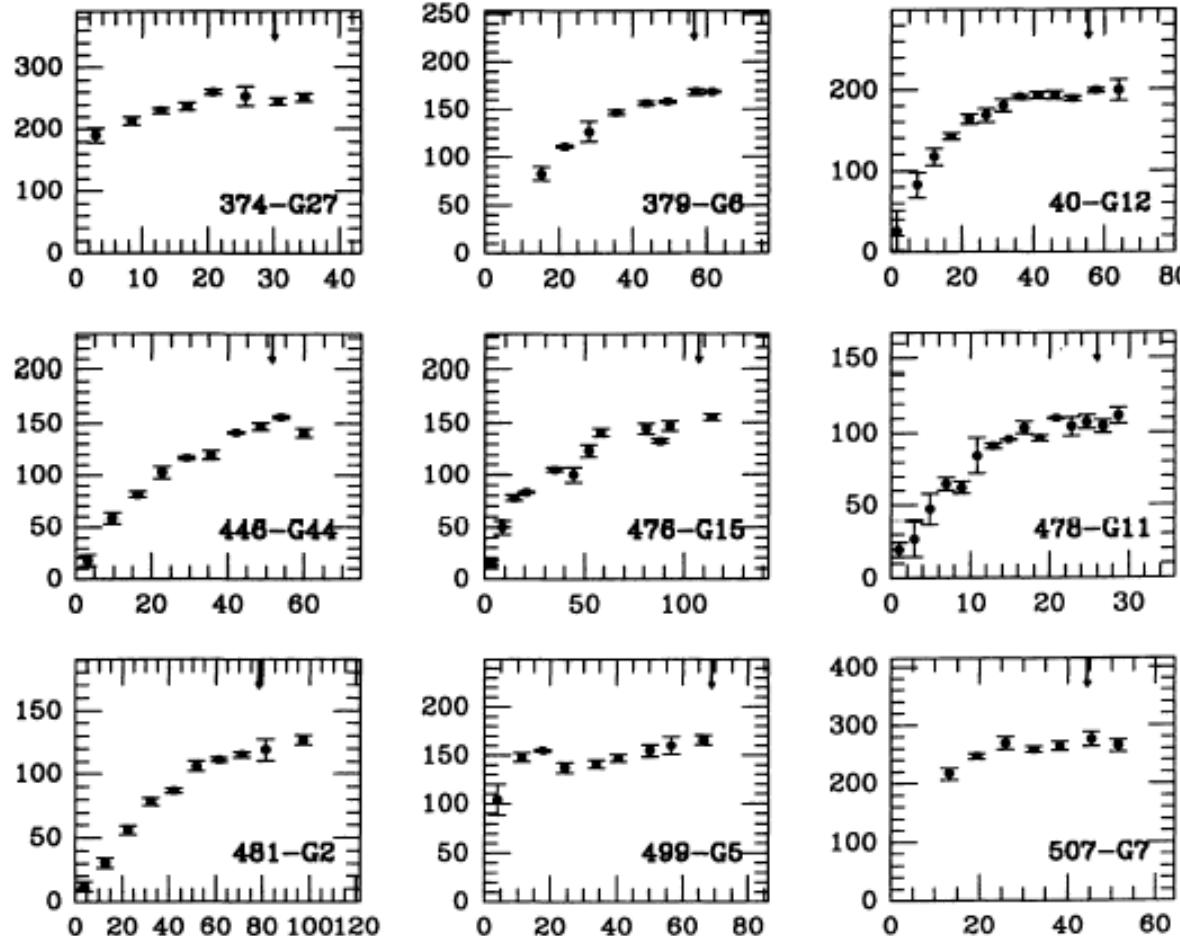
$$V^2 = GM(r)/r$$

Loin du noyau  $V(r) \propto r^{-1/2}$



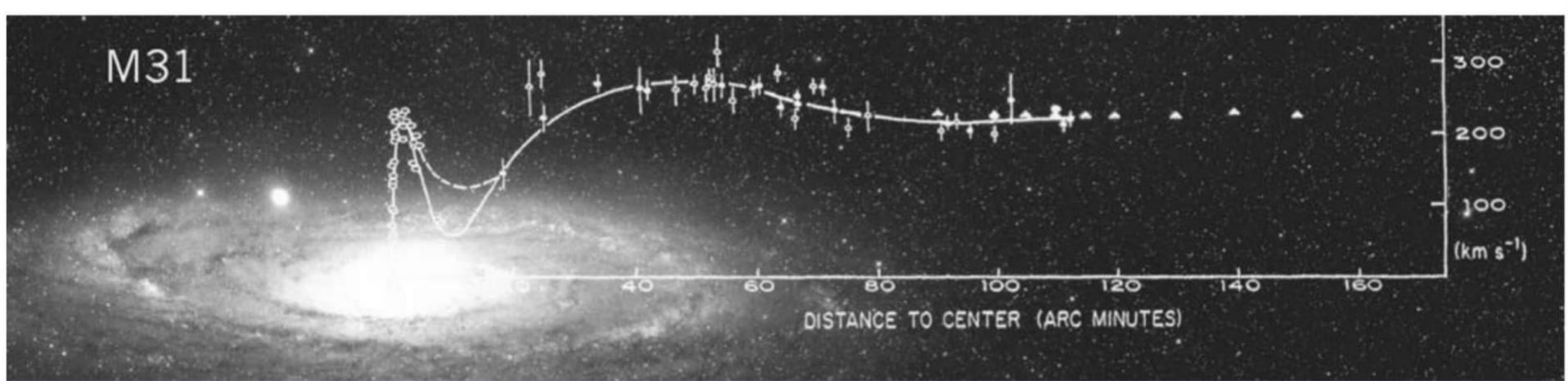
# Observation de la rotation des galaxies spirales

Cependant, les observations en contradiction avec la théorie  
→ courbes de rotation plates → existence d'un halo sombre



Echelle en kpc et en km/s

M31



The M31 major axis mean optical radial velocities and the rotation curve,<sup>4</sup>  $r < 120$  arcmin, superposed on the M31 image from the Palomar Sky Survey. Velocities from radio observations<sup>5</sup> are indicated by triangles,  $90 < r < 150$  arcmin. Rotation velocities remain flat well beyond the optical galaxy, implying that the M31 cumulative mass rises linearly with radius. (Image by Rubin and Janice Dunlap.)



Vera Rubin pioneered measurements of galaxy rotation curves. Starting with her Rubin & Kent (1970) paper on the rotation curve of M31, her work provided compelling evidence for extended halos of dark matter around galaxies.

# Extension d'une galaxie Spirale

Credit: T. Oosterloo

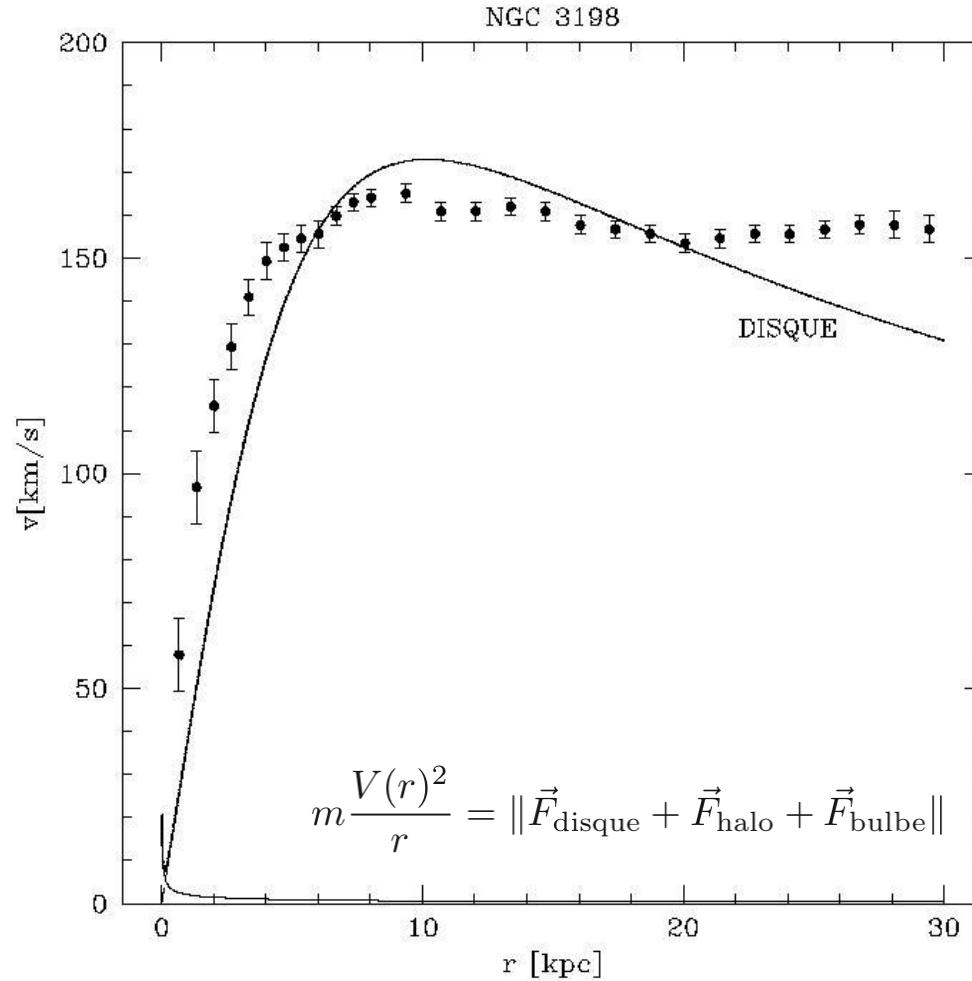
NGC 6964: same scale

Optical (stars)

radio 21cm (hydrogen gas)

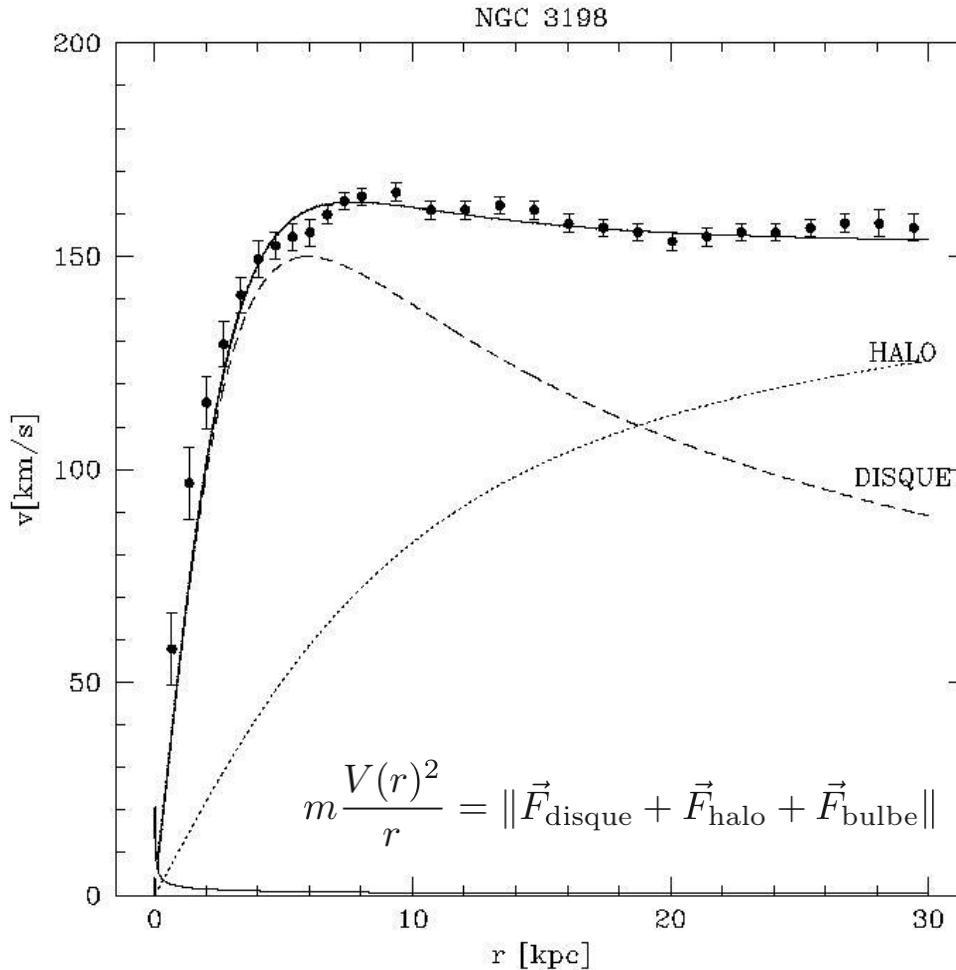
# Rotation des galaxies spirales

Modèle de masse avec un disque seul



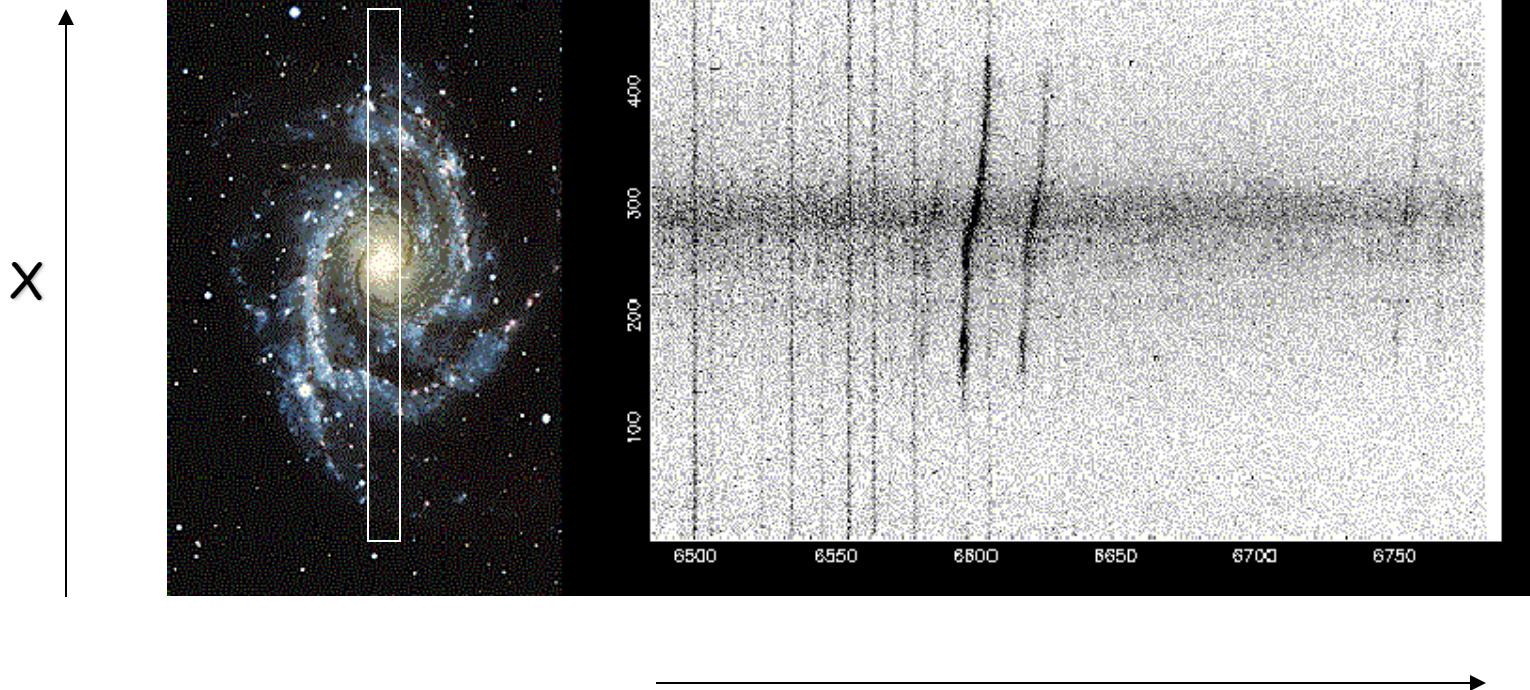
# Rotation des galaxies spirales

Modèle de masse: disque, bulbe, halo



# Rotation des galaxies spirales

Mesure de la courbe de rotation



Nécessite la mesure de  
l'inclinaison du disque

Longueur d'onde

# Masse depuis le champ de vitesse

- Inclination is given by (assuming a disk galaxy):

$$\cos(i) = \frac{b}{a}$$

- radial velocity observed is given by:

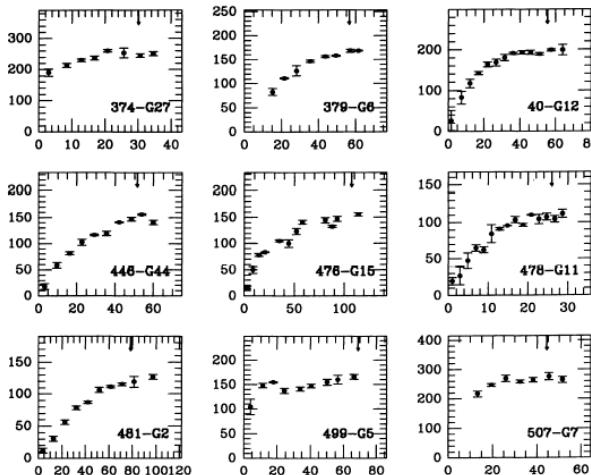
$$v_r(r) = v(r) \sin(i)$$

- derived mass:

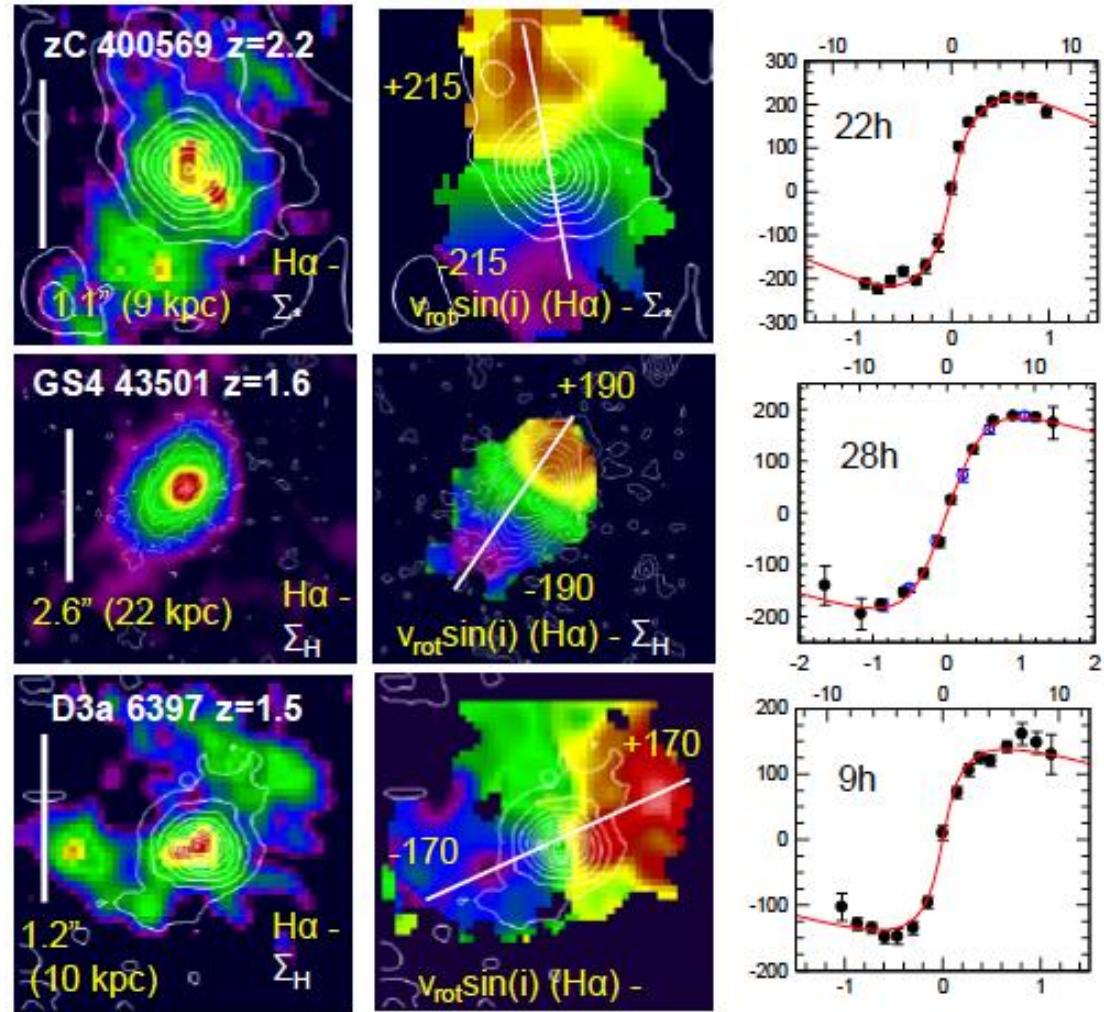
$$M(r) = r \frac{v^2(r)}{G}$$

# Evolution avec le redshift

Courbes de rotation **moins plates** → moins de matière sombre ?



Galaxies proches



Galaxies distantes

# Masse depuis le champ de vitesse - ordre de magnitude

- Expressing the mass relation in typical units:

$$M(r) \sim 2.3 \times 10^{10} \left( \frac{v(r)}{100 \text{ km/s}} \right)^2 \left( \frac{r}{10 \text{ kpc}} \right) M_{\odot}$$

- **Milky Way:**

- Dynamical mass:  $v \sim 254 \text{ km/s}$ ,  $r \sim 80 \text{ kpc}$  leading to  $M \sim 10^{12}$  solar masses
- Mass of stars in the MW  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  solar masses
- $M/M^* \sim 20$**

# **« Dispersion des vitesses » dans les galaxies elliptiques**

# Les galaxies elliptiques



Messier 87

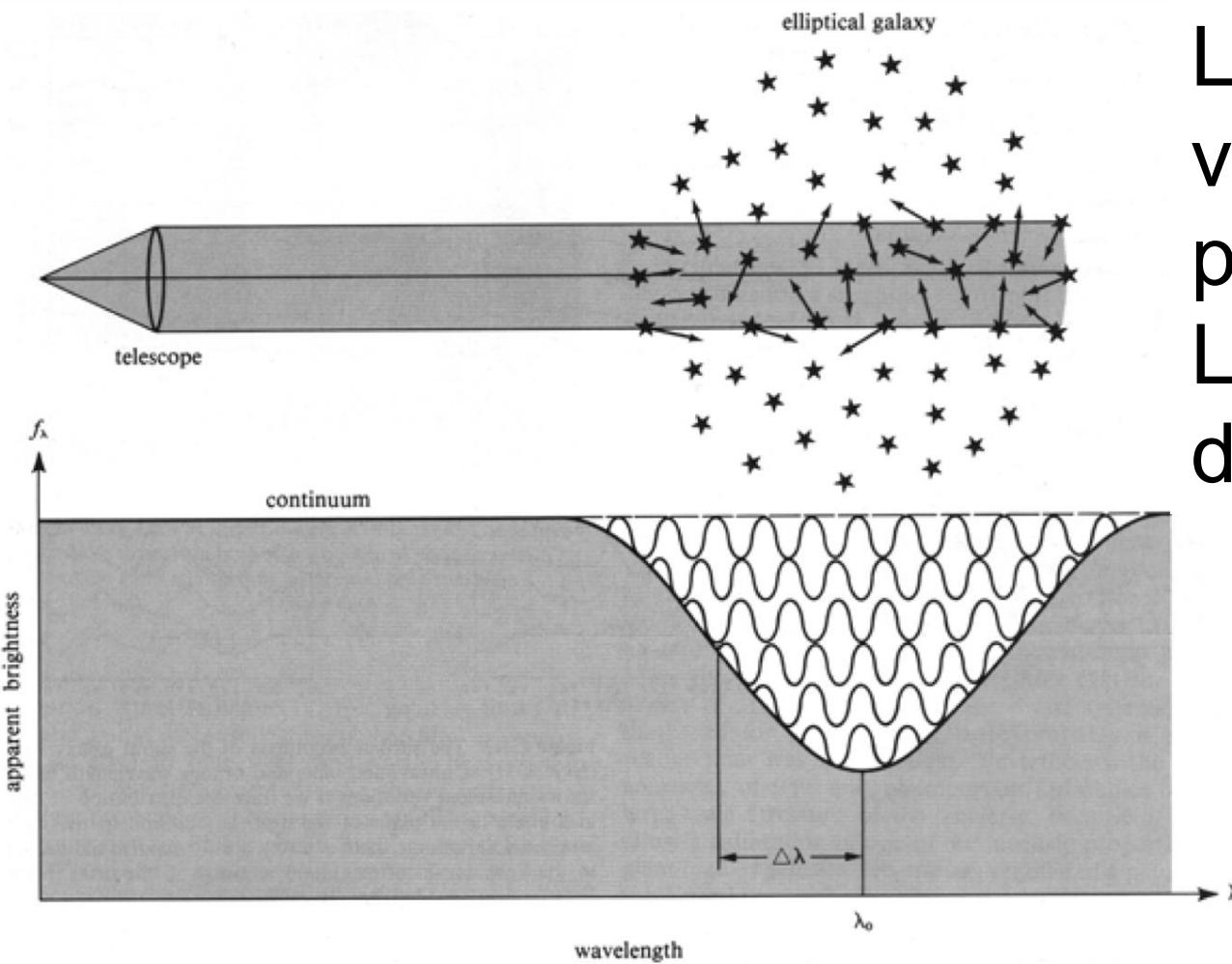


Classification

Abell 1689  
Many E galaxy  
in the core



# Mesure de la dispersion de vitesse



La dispersion de vitesse est proportionnelle à L'élargissement de l'absorption

$$\sigma \sim -\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} c$$

## \* Théorème du Viriel

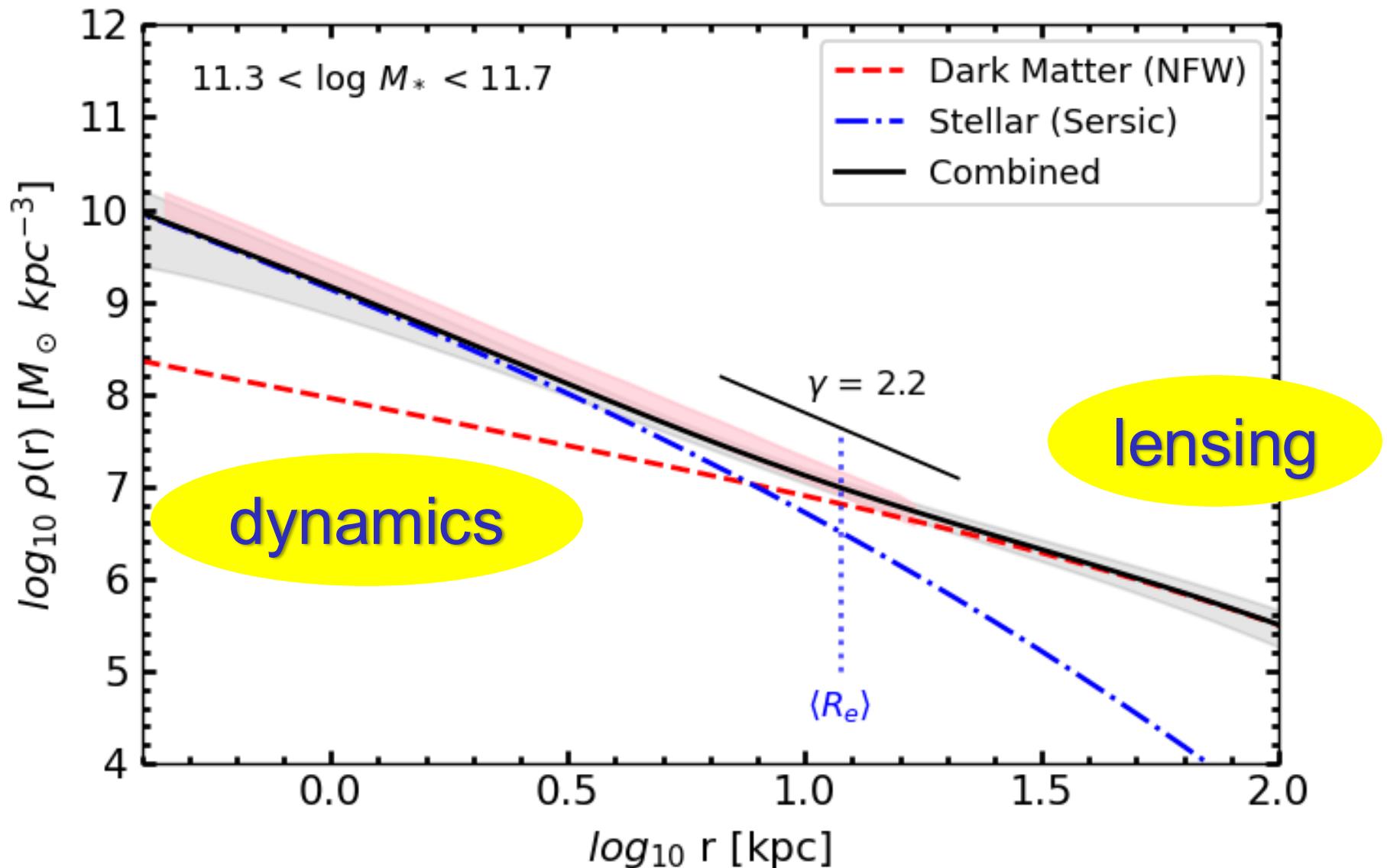
- The total mass of an isolated spherical system in a steady state can be expressed as (Binney and Tremaine, 2008):

$$\langle \sigma_p^2 \rangle = \frac{GM}{3r_g}$$

$r_g$  is the gravitational radius

$\langle \sigma_p^2 \rangle$  is the average line of sight velocity dispersion

# Distribution de masse - galaxies elliptiques

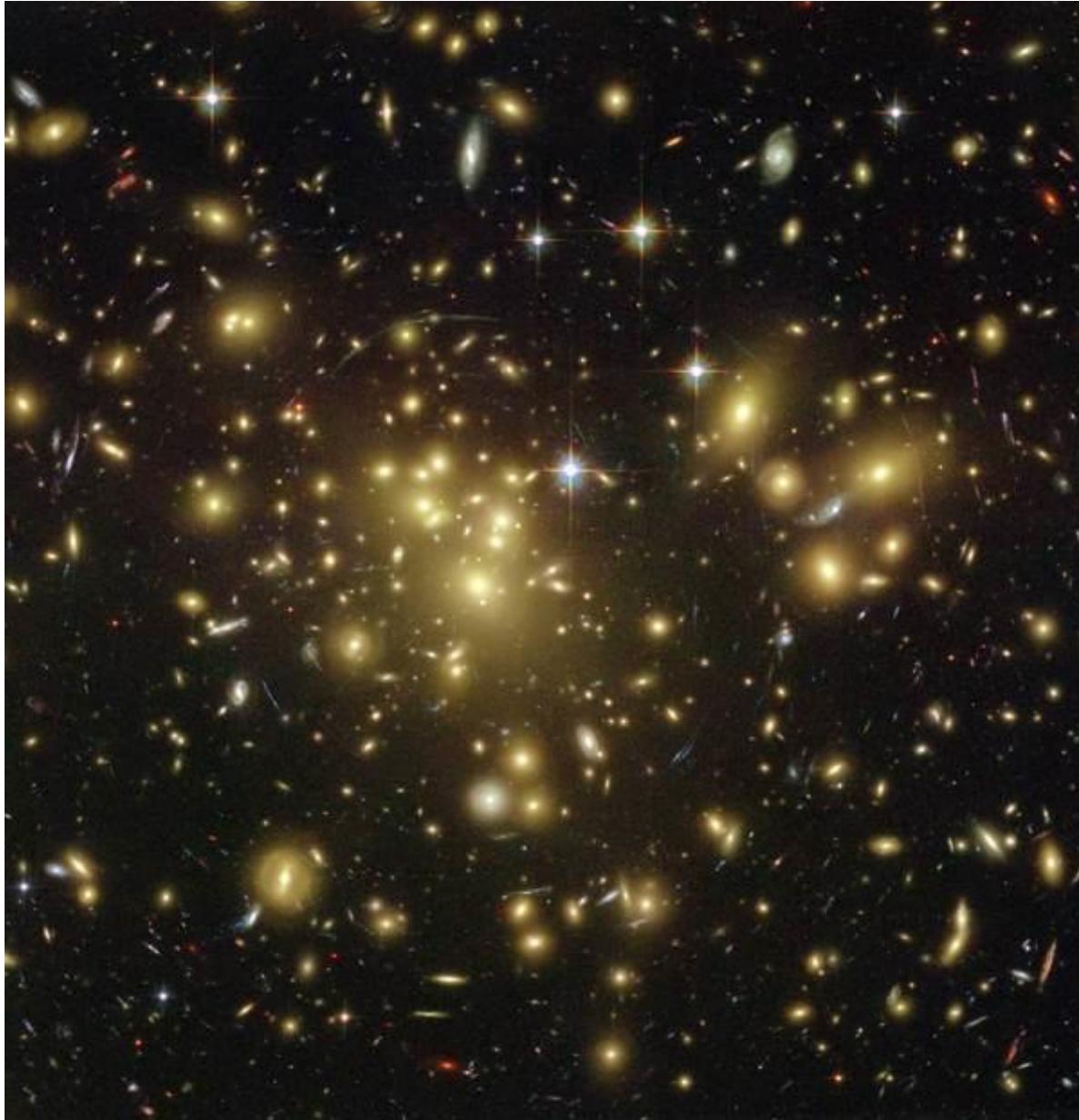


# Les amas de galaxies

- Contiennent encore plus de matière noire que les galaxies
- Masse du Viriel  $\gg$  masse lumineuse ( $M/L \sim 200$ )
- Masses typiques  $\sim 10^{13} - 10^{15} M_{\odot}$
- Tailles typiques 100 Mpc ou plus
- Distances: quelques giga parsecs ( $z=1$ )

$$M = \frac{5\sigma^2 R}{G}$$

# Amas Abell 1689



Quelques centaines  
de galaxies

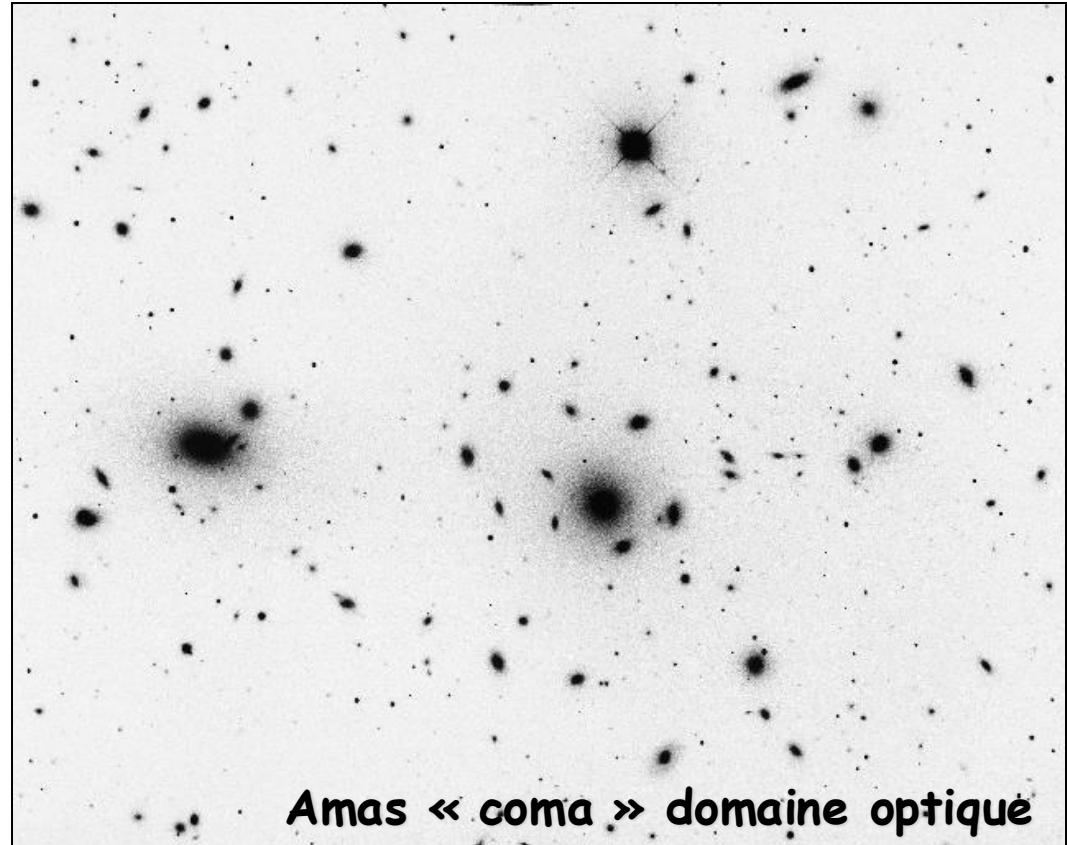
Dominé en général par  
une grosse galaxie  
elliptique centrale

Gaz intergalactique  
invisible

Matière sombre  
supplémentaire  
(non baryonique ?)

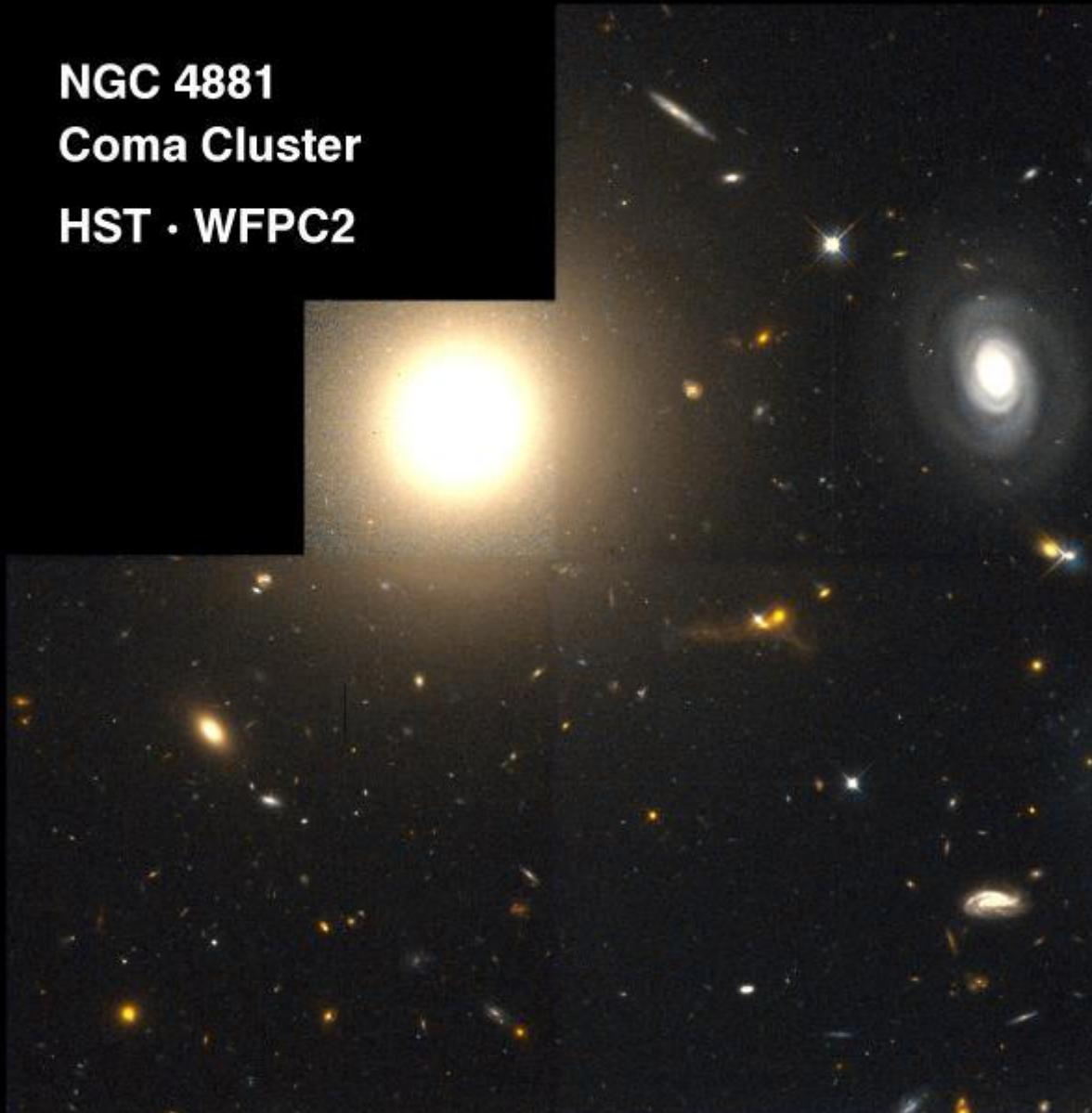
# Les amas de galaxies

Mise en évidence matière sombre intergalactique par **Fritz Zwicky** en 1937



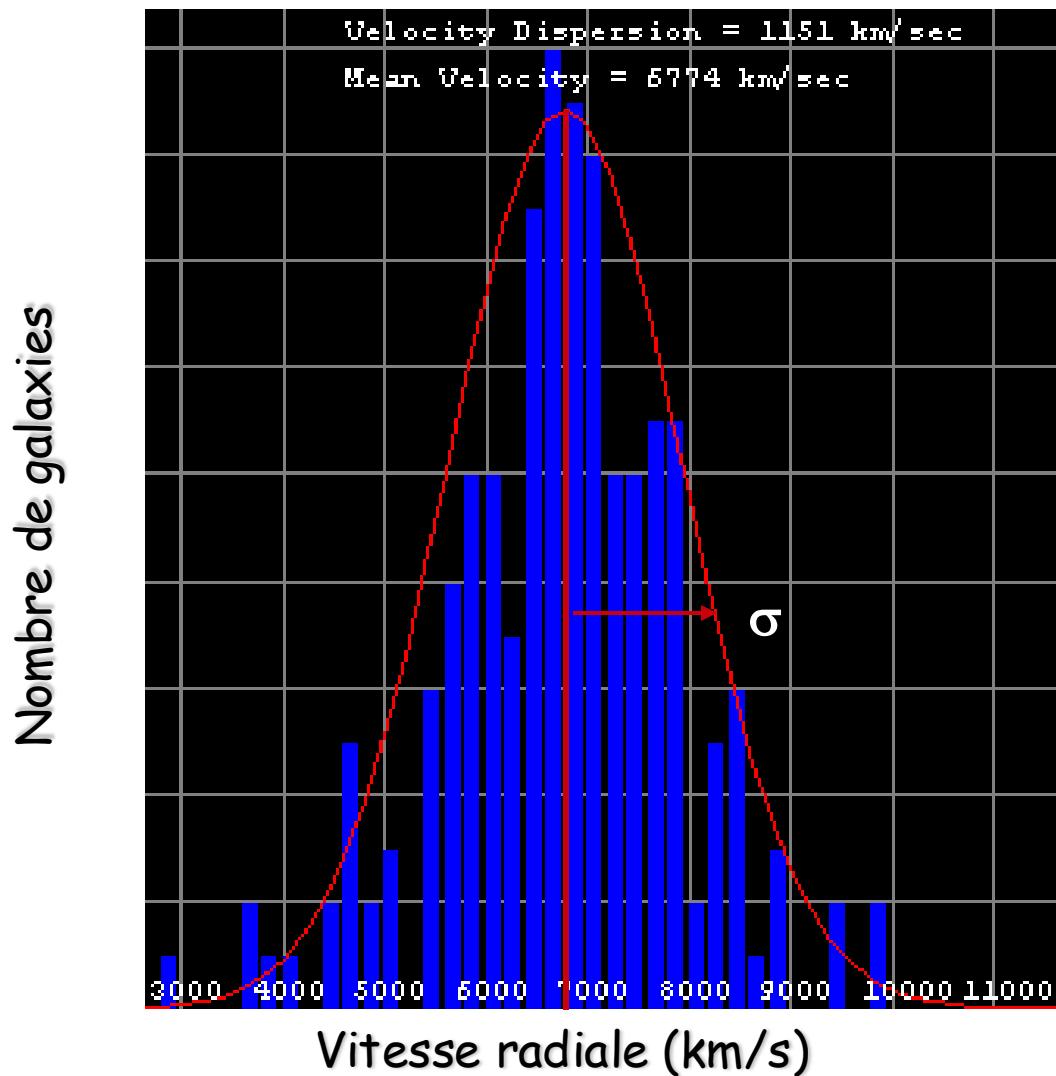
# Amas Coma, dominé par une elliptique centrale

**NGC 4881**  
**Coma Cluster**  
**HST · WFPC2**



# Mesure de la dispersion des vitesses

Mesure de la dispersion des vitesses pour un amas de galaxies



Pour un amas de galaxies les dispersions des vitesses sont de l'ordre de 1000 km/s

# Masse du Viriel vs. masse lumineuse



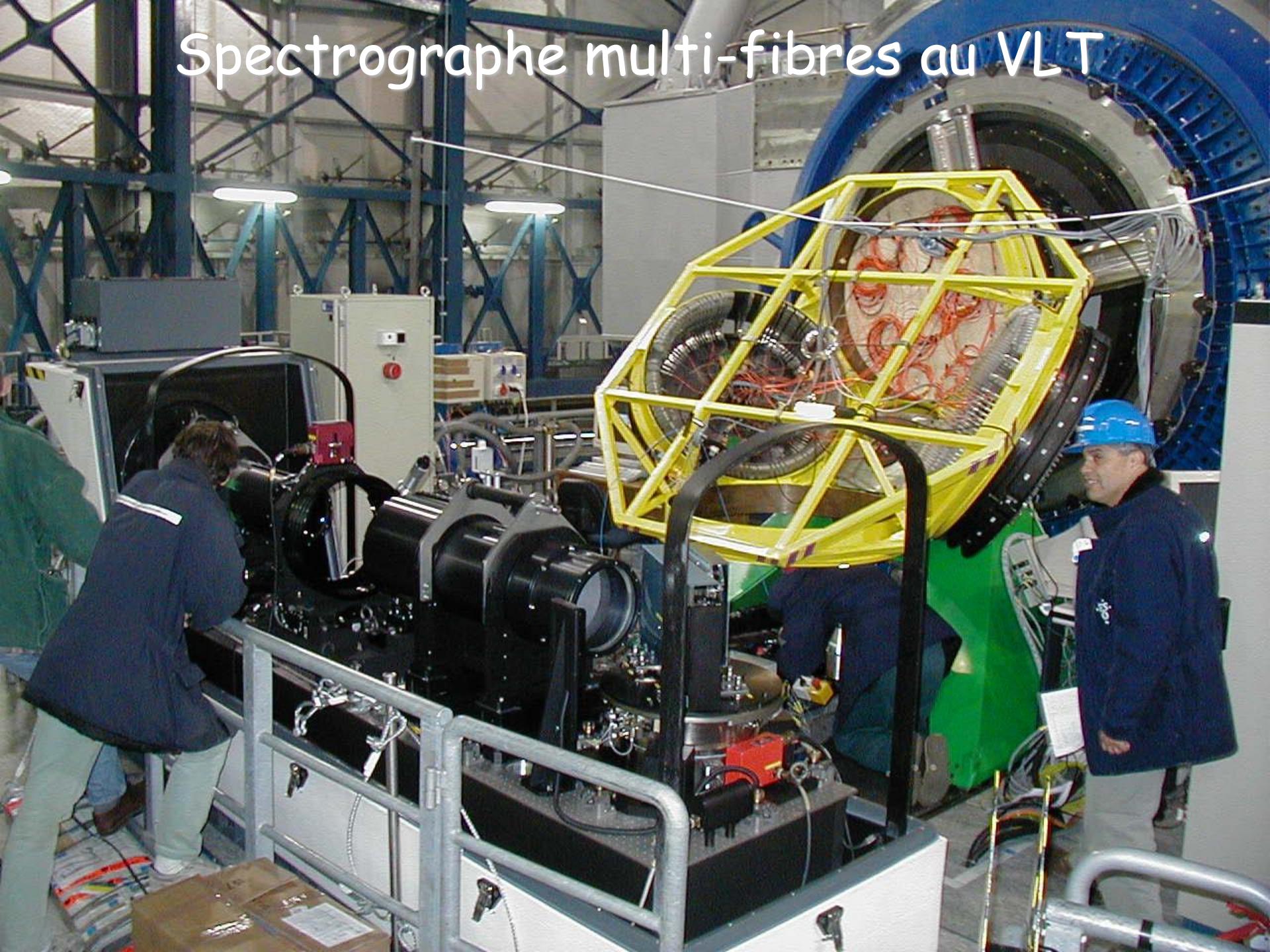
Mesure de la dispersion de vitesses au VLT:

- Dispersion des vitesses des amas autour de la galaxie
- Dispersion des vitesses des amas individuels

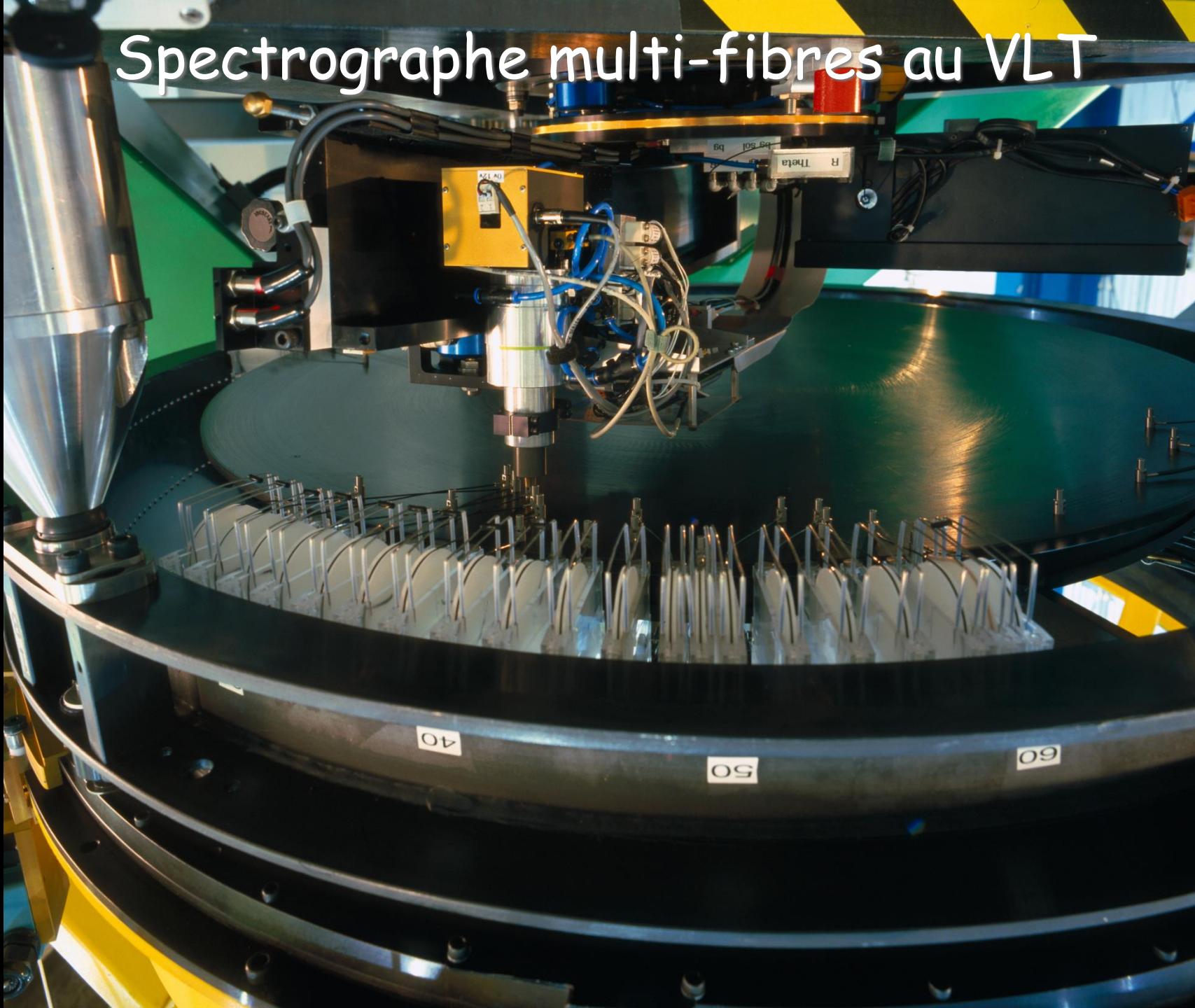


Spectrographe multi-fibres au VLT

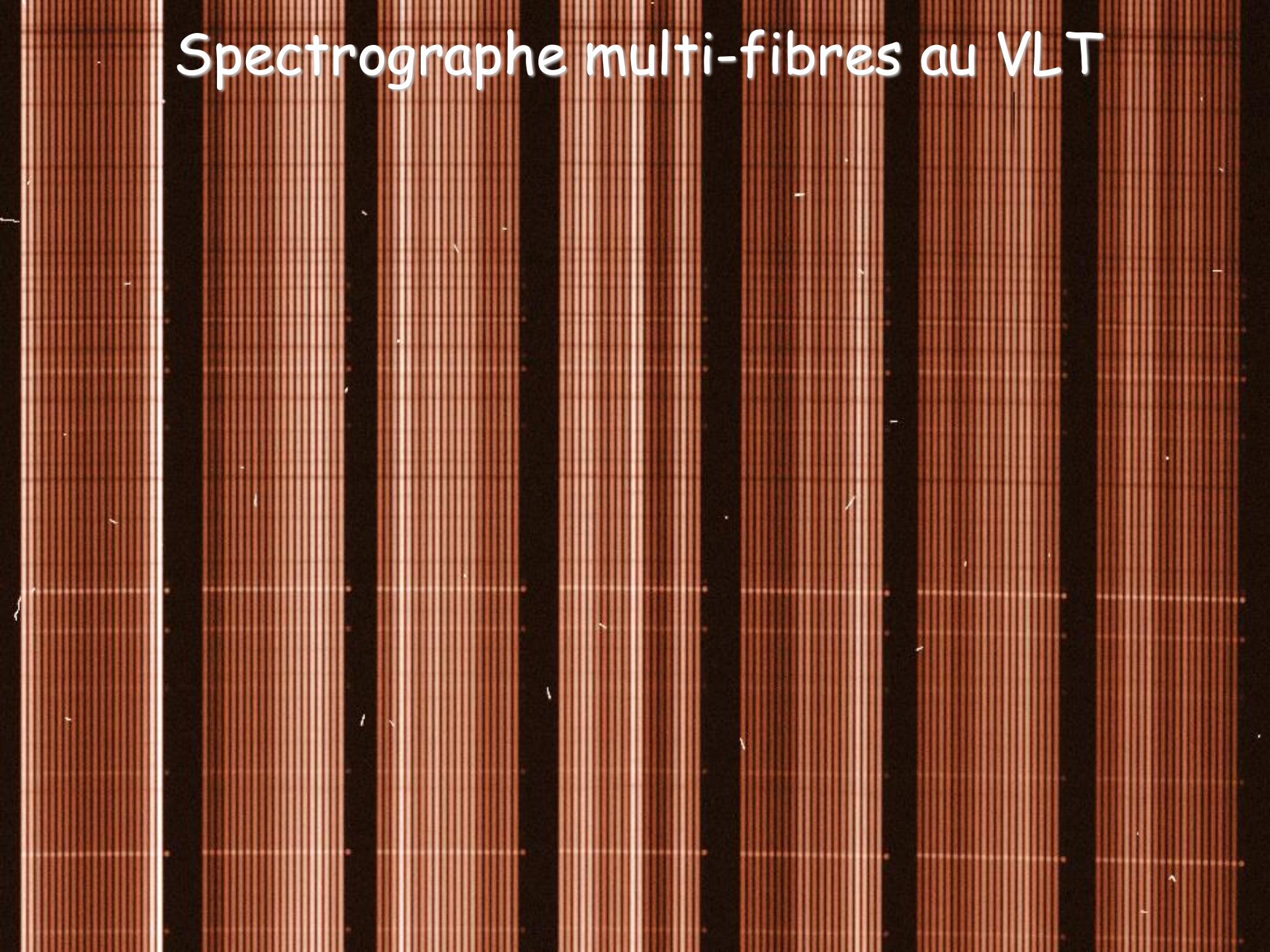
# Spectrographe multi-fibres au VLT



# Spectrographe multi-fibres au VLT



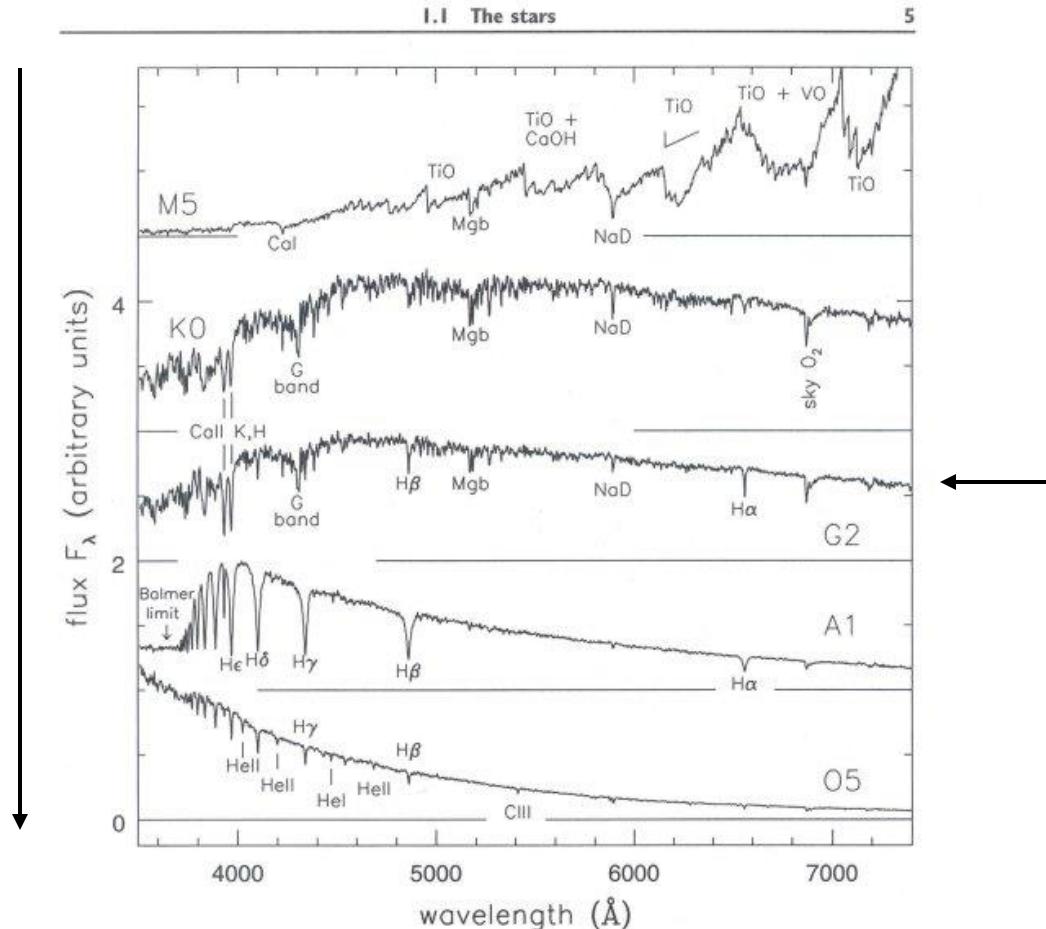
# Spectrographe multi-fibres au VLT



# masse du Viriel vs. masse lumineuse

Mesure de l'élargissement Doppler des raies **stellaires**

Température croissante

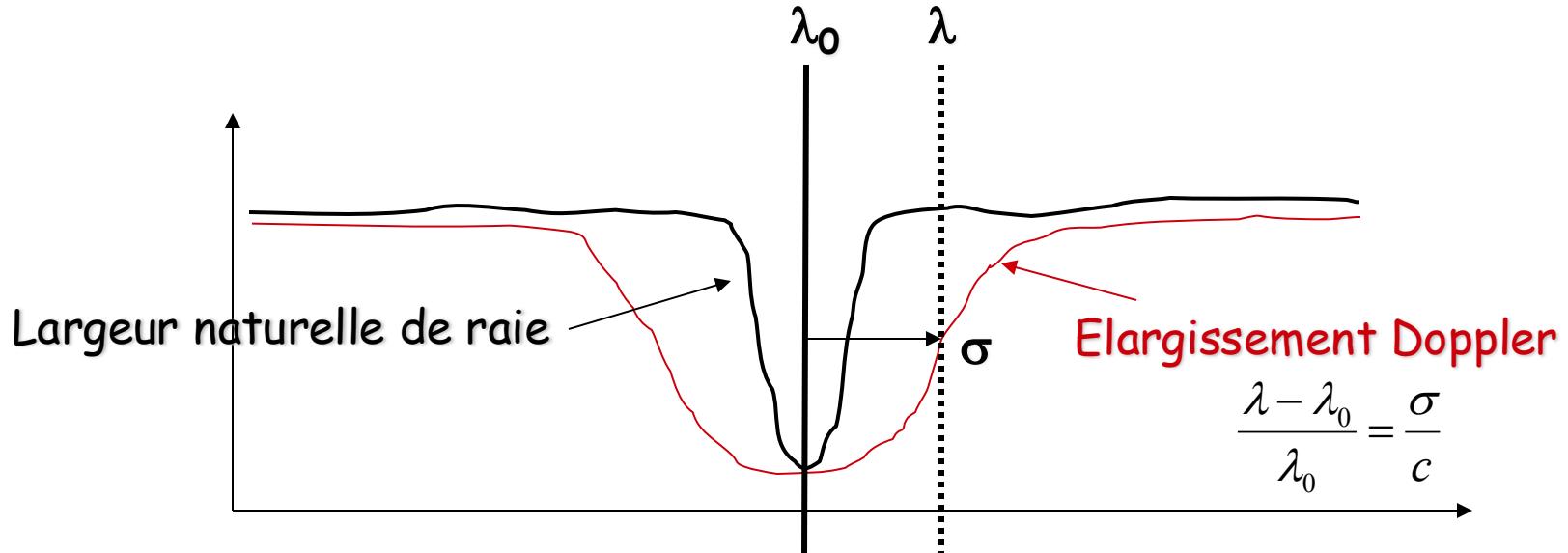


Etoiles de type solaire: dominant dans les galaxies elliptiques

Figure I.1 Optical spectra of main-sequence stars with roughly the solar chemical composition. From the top in order of increasing surface temperature, the stars have spectral classes M5, K0, G2, A1, and O5 – G. Jacoby *et al.*, spectral library.

# masse du Viriel vs. masse lumineuse

masse du Viriel donnée par la mesure de la dispersion des vitesses:



Pour une distribution sphérique isolée:

$$M = \frac{5\sigma^2 R}{G}$$

Avec  $3\sigma^2 = V^2 = 3V_r^2 = V_r^2 + V_\theta^2 + V_\phi^2$  (isotropie des vitesses)

# Masse du Viriel vs. masse lumineuse

Pour l'amas coma:

$$M = 10^{15} M_{\odot} \text{ (masse du Viriel)}$$

$$L = 5 \times 10^{12} L_{\odot} \text{ (ajustement d'un profil en } r^{1/4})$$

$$M/L = 200$$

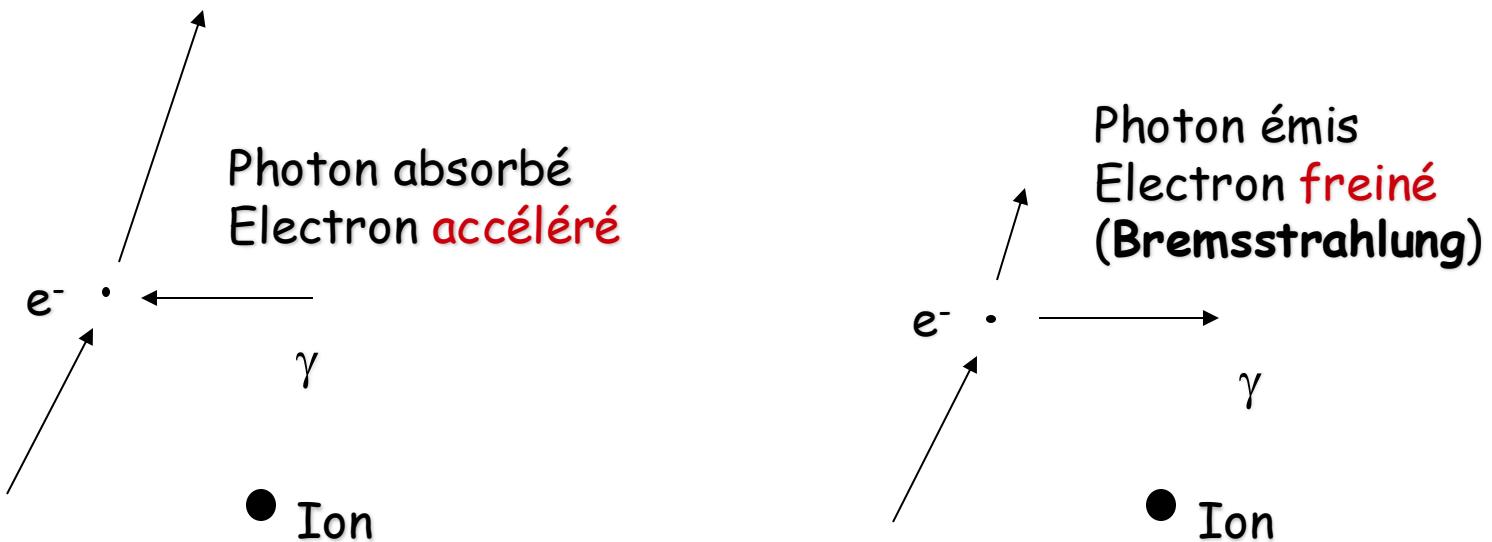
Existe t'il un milieu intergalactique massif visible à d'autres longueurs d'ondes ?

# Gaz intra-cluster (Intra Cluster Medium - ICM)

# Gaz intra-cluster

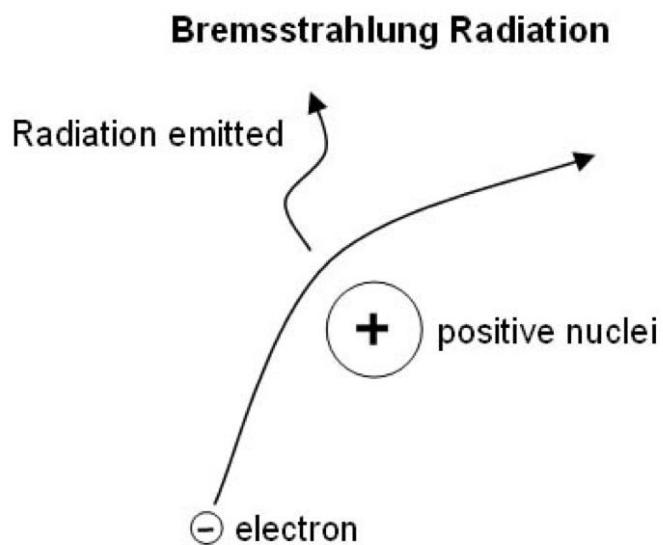
L'énergie gravitationnelle est si grande que le gaz intergalactique est chauffé et ionisé. C'est donc un gaz de protons et d'électrons libres.

On prédit un rayonnement des électrons par émission synchrotron ou « de freinage »: émission **libre-libre**

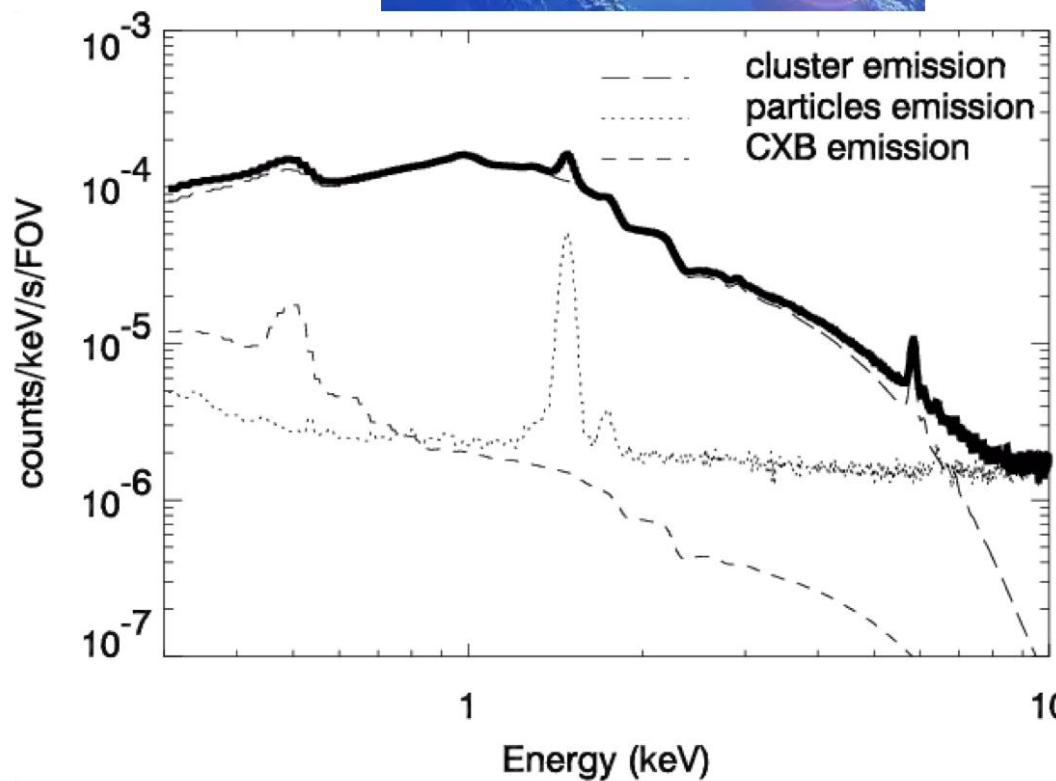


Ce rayonnement n'est possible QU'EN PRESENCE d'un ion.  
Le gaz est chaud, il s'agit d'un **rayonnement thermique**.

## ● X-ray Bremsstrahlung



**Figure 1:** Bremsstrahlung (or 'braking') radiation is emitted when the path of a charged particle such as an electron is deviated by another charged particle. The acceleration of the electron causes it to emit a photon of light with an energy indicative of the electrons kinetic energy.



# Gaz intra-cluster

Dans les amas de galaxies l'hydrogène ionisé émet du rayonnement X

$$l_\nu d\nu = 5,44 \times 10^{-39} \times 4\pi n_e^2 \times T^{-1/2} \times \exp\left(\frac{-h\nu}{kT}\right) \times d\nu$$

erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-3</sup>

Densité  
électronique

Température  
du gaz

Fréquence du  
rayonnement

# Gaz intra-cluster

L'intégrale sur les fréquences donne la densité volumique de rayonnement

$$L_{vol} = \int_0^{\infty} l_{\nu} d\nu$$

$$L_{vol} = 1,42 \times 10^{-27} \times n_e^2 \times \sqrt{T}$$

La mesure de la luminosité totale d'un amas en X et de sa température donnent une estimation de sa densité de matière ionisée

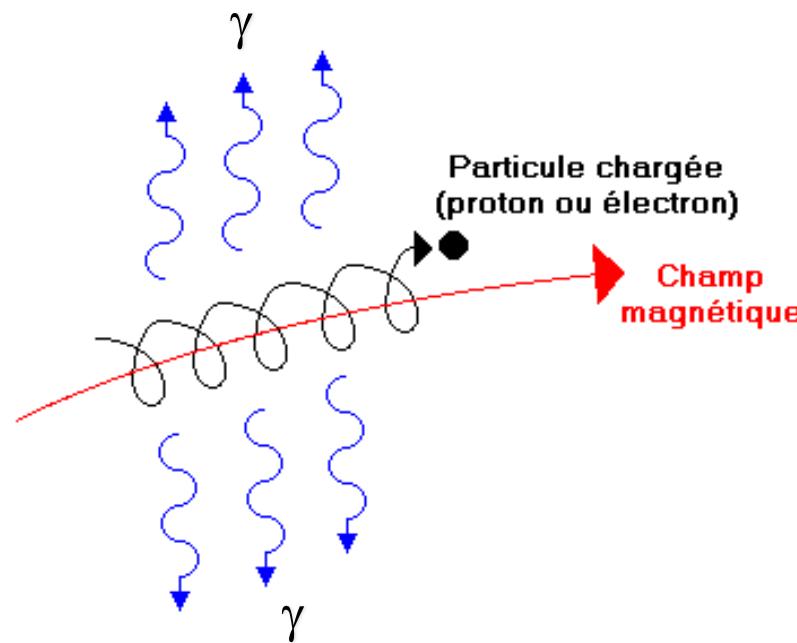
Températures de l'ordre de  $10^7 - 10^8$  K

# Gaz intra-cluster

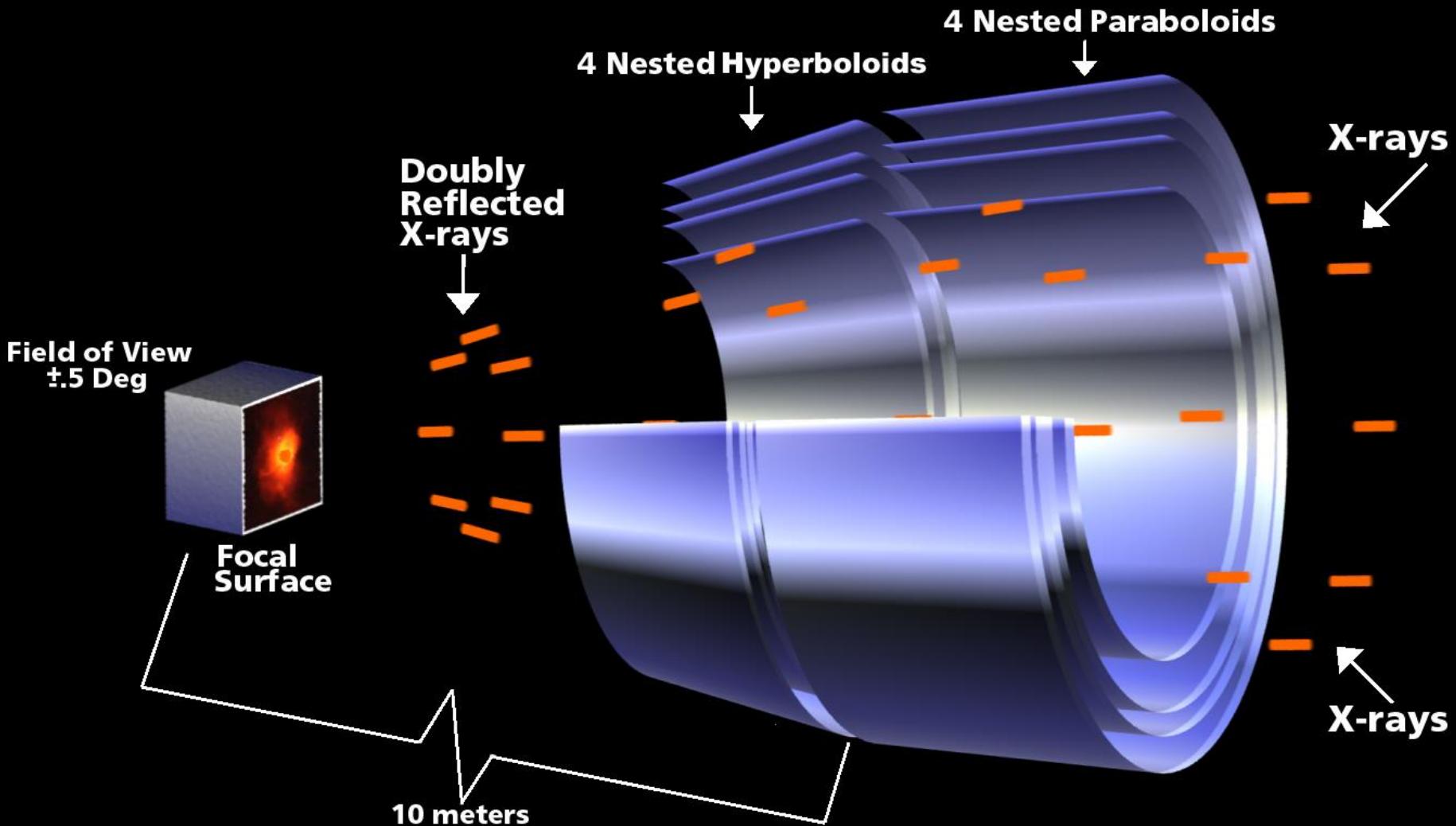
Rayonnement synchrotron **non-thermique** en présence d'un **champ magnétique**

L'énergie des photons dépend de l'énergie de l'électron et de l'intensité du champ magnétique.

Le rayonnement synchrotron émet un **spectre continu** qui peut intervenir depuis les rayons X jusqu'aux ondes radios

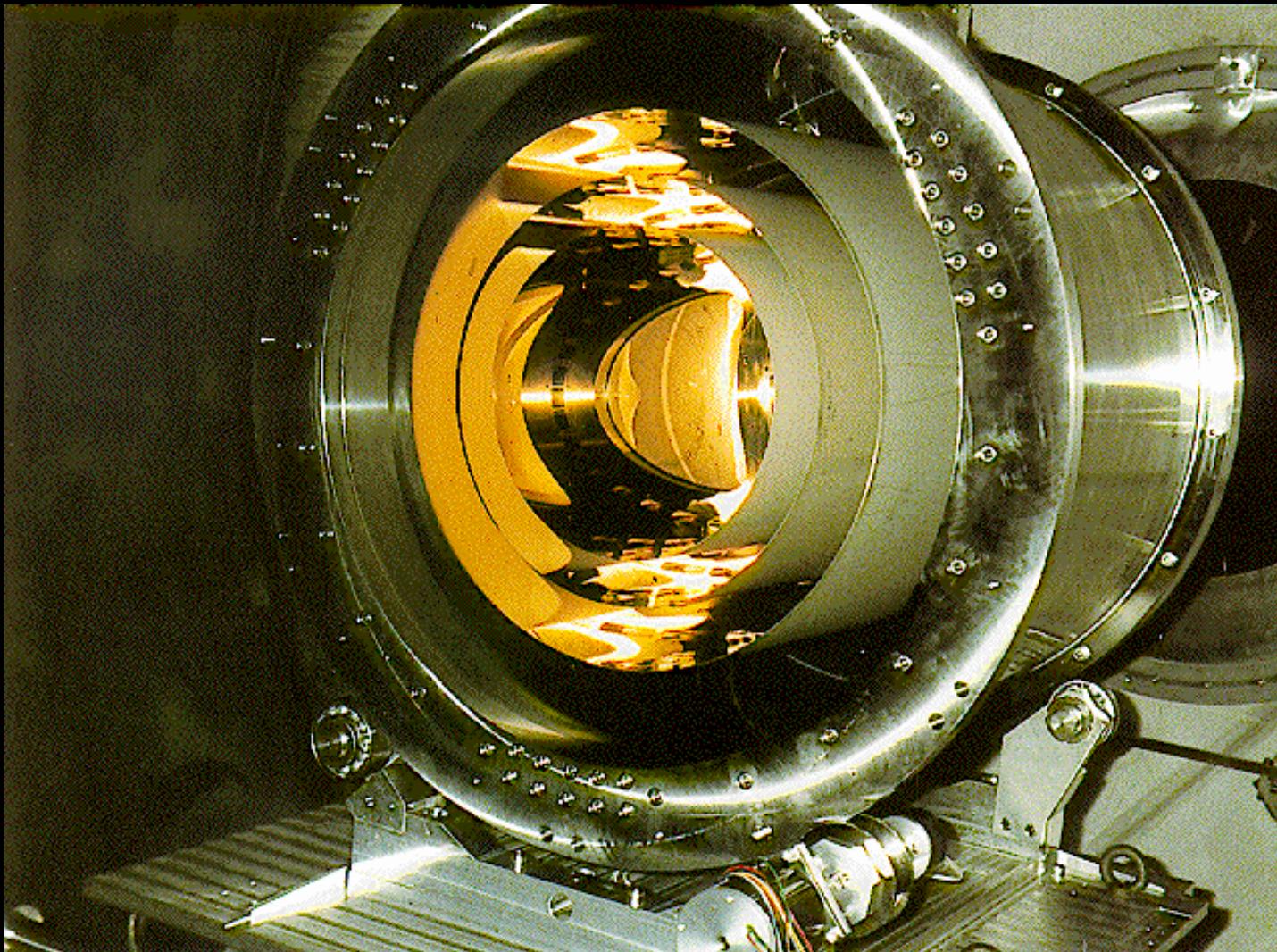


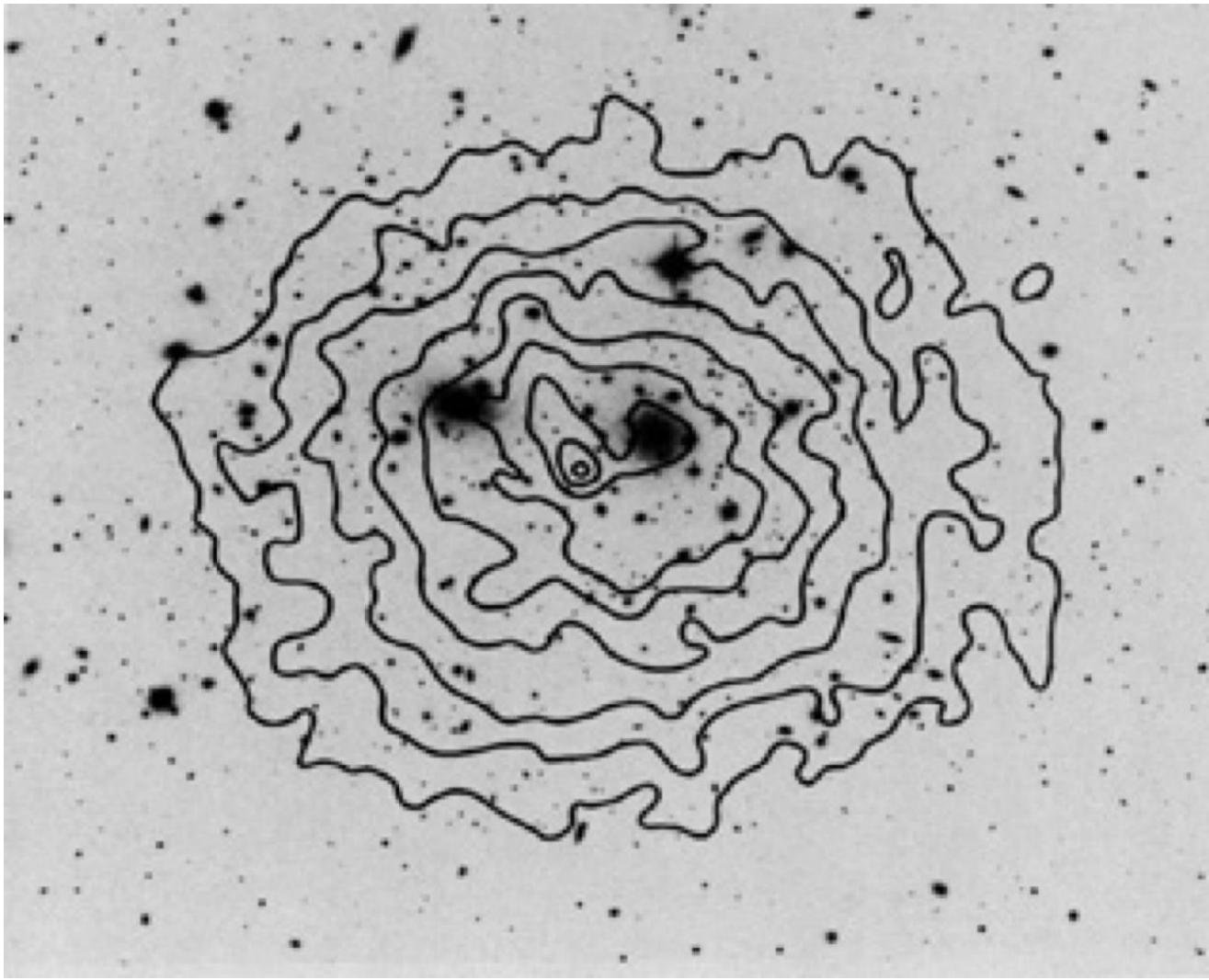
## Exemple de « télescope » X à incidence rasante



Mirror elements are 0.8 m long and from 0.6 m to 1.2 m diameter

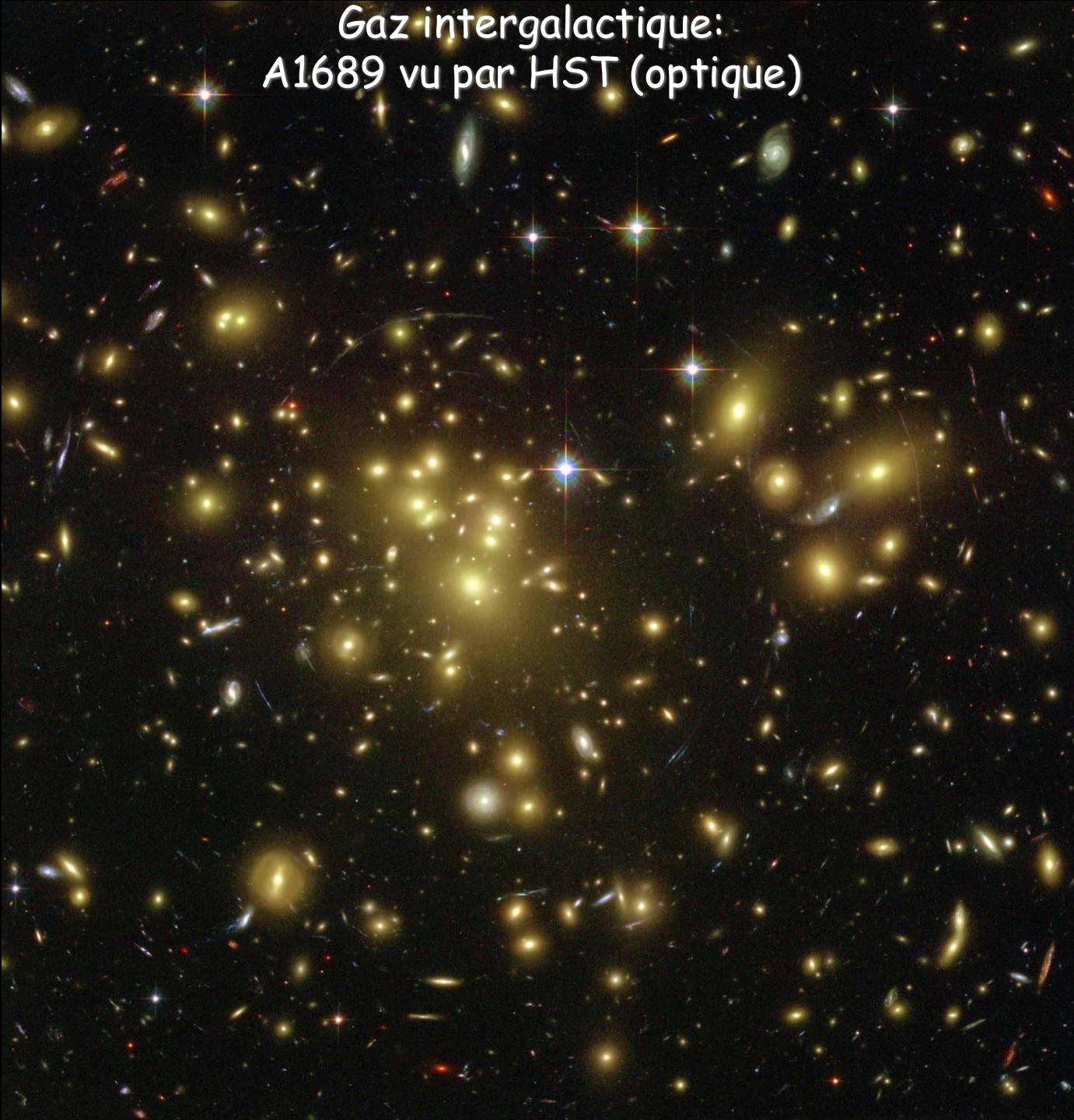
Exemple de « télescope » X à incidence rasante  
Surface réflectrice en or





- L'amas de galaxies "Coma" ( $z \sim 0.02$ )
- Détection en rayon X-ray avec le satellite Uhuru en 1971

Gaz intergalactique:  
A1689 vu par HST (optique)



Gaz intra-cluster:  
A1689 vu Chandra (X)



Gaz intra-cluster:  
A1689 vu par HST (optique) et Chandra (X)



Galaxies: 5-10% en masse

Gaz: 10-20% en masse

Matière sombre: le reste !

# Gaz intra-cluster

Premières détections du rayonnement X des amas dans les années 90.

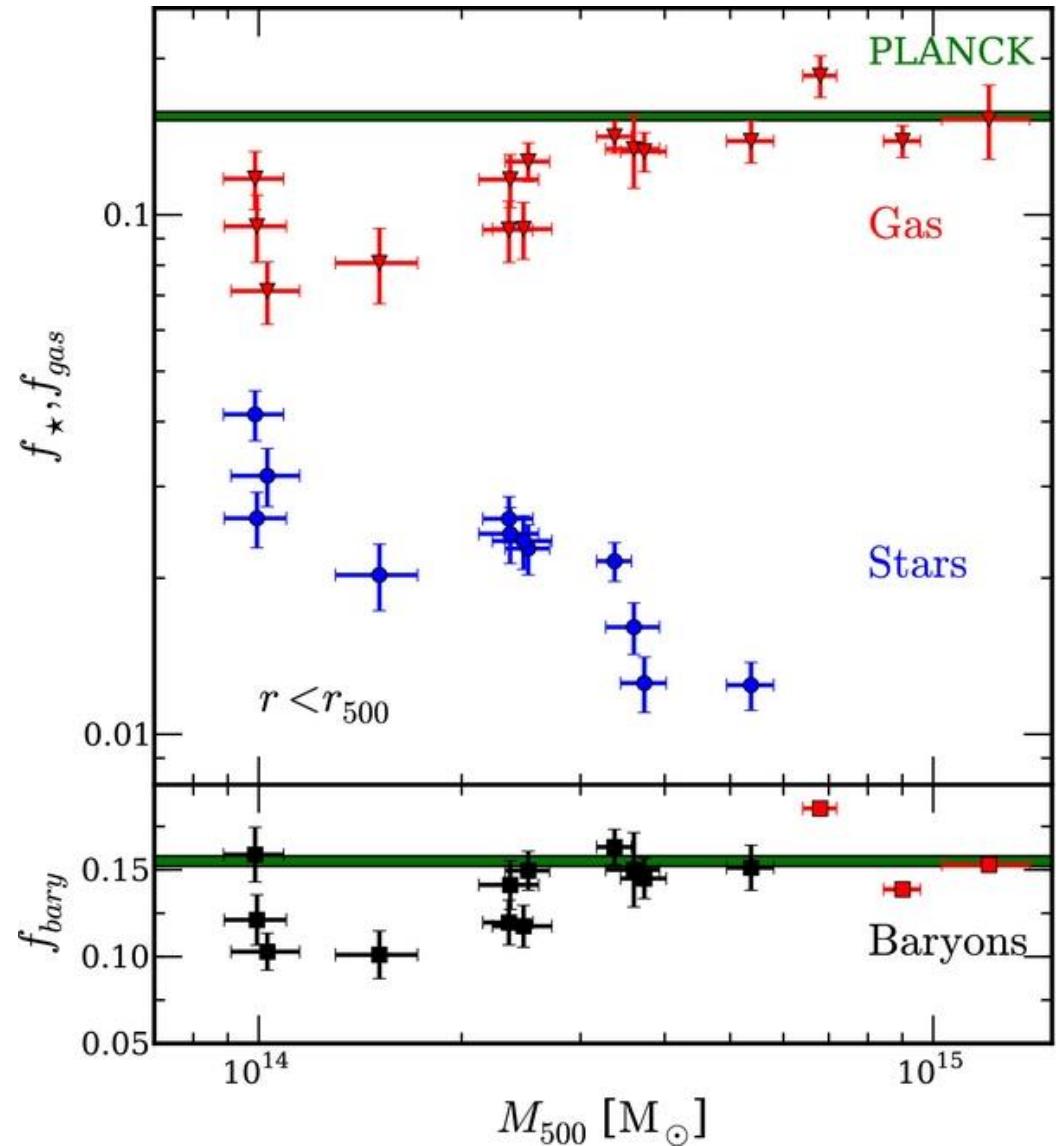
Observations depuis avec des observatoires spatiaux

- ROSAT (ESA). Résolution, quelques dizaines de minutes d'arc
- XMM (ESA). Résolution ~ quelques minutes d'arc mais très sensible
- Chandra (NASA). Résolution ~ quelques secondes d'arc

Température typique du gaz dans les amas de galaxies  $\sim 10^6$  K

- La masse de gaz ne constitue que 10-20% de la masse totale
- Les galaxies représentent 5-10% de la masse
- Le reste est d'origine inconnue: Matière Noire

# Fraction de masse baryonique

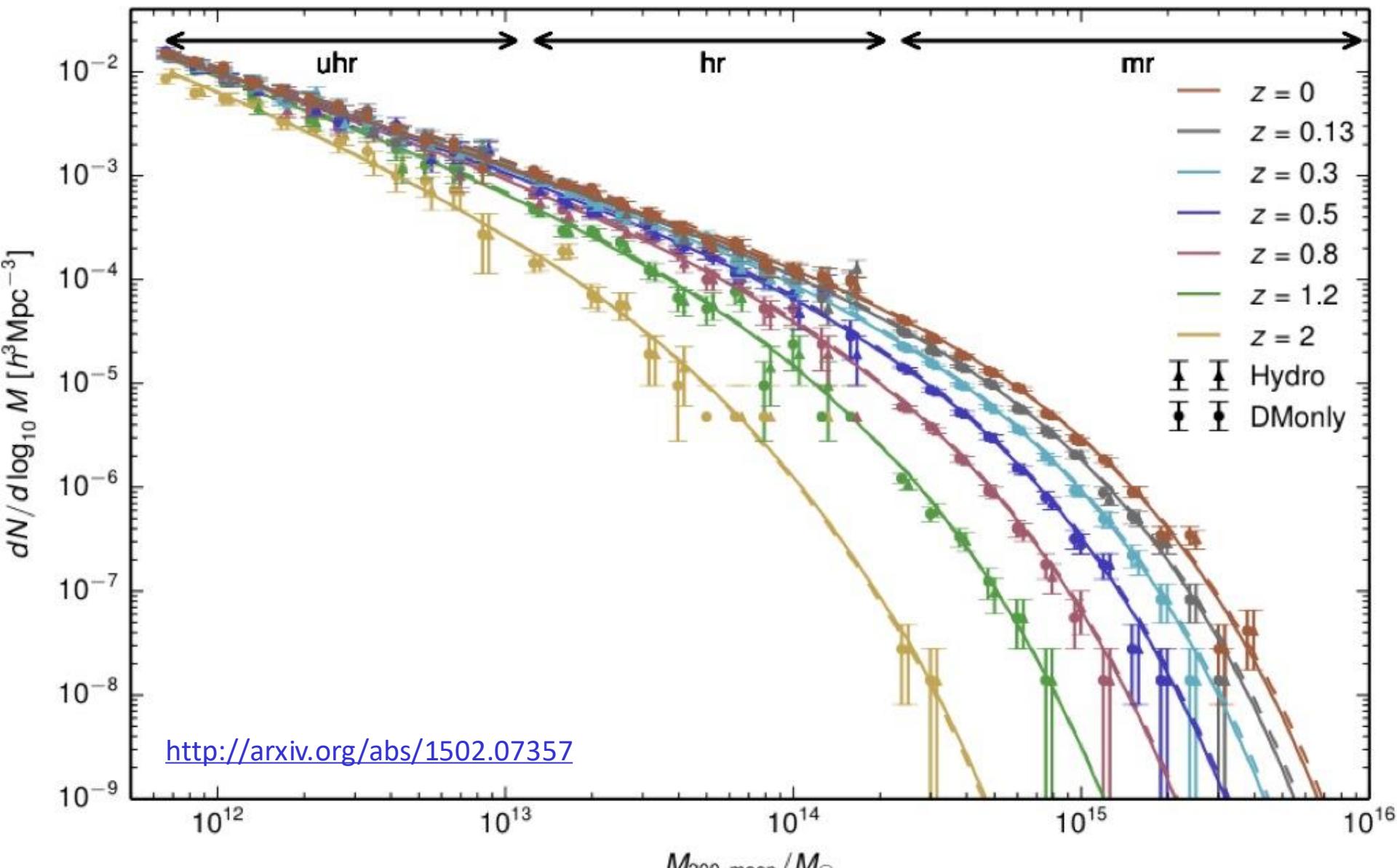


# Formation des amas

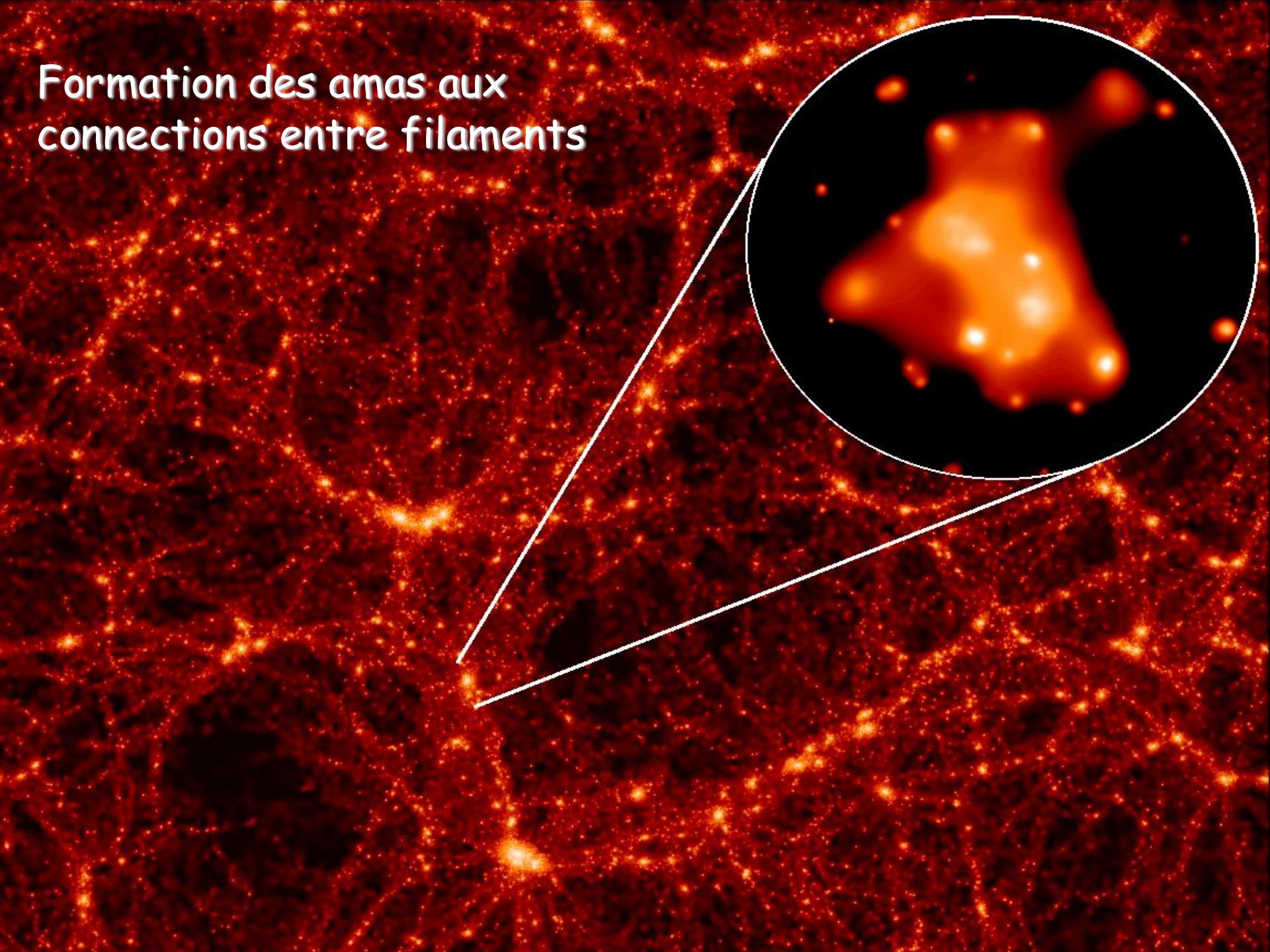
A partir des structures à grande échelle

- Le temps de formation des amas n'est pas négligeable devant l'âge de l'Univers
- On ne voit donc pas d'amas très lointains
- Les amas se trouvent à la jonction entre les « filaments cosmiques »
- Ces filaments de galaxies et d'hydrogène neutre peuvent être détectés:
  - en **absorption** (spectre de quasars d'arrière-plan)
  - en **émission** grâce à la raie à 21 cm de longueur d'onde
  - Par la détection de galaxies
  - par effet de **lentille gravitationnelle**

# Fonction de masse des amas



Formation des amas aux  
connections entre filaments



# MACS J0717.5+ 3745 (z=0.5458)

- WL
- X-rays
- Galaxies

