

Chapitre 10

La matière sombre dans l'univers

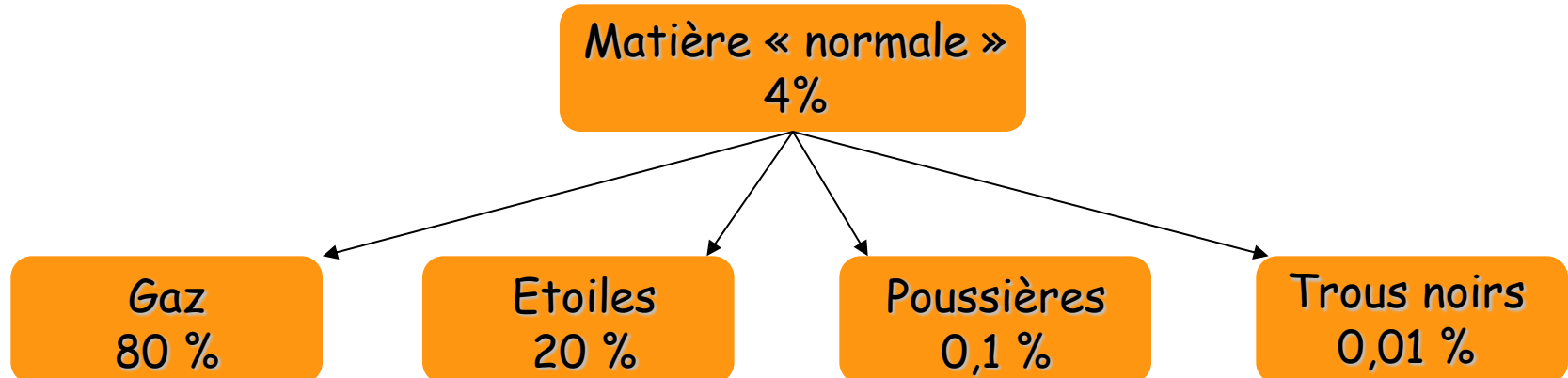
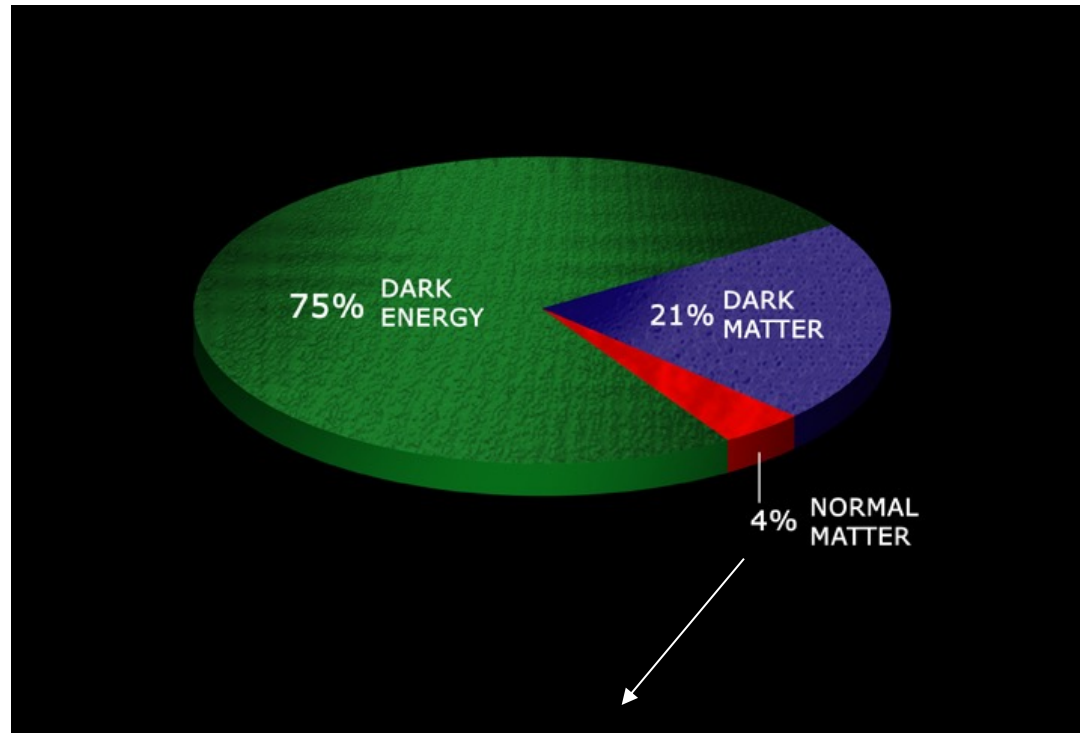
La matière sombre

Preuves de l'existence de matière sombre:

- Dans les galaxies spirales
- Les groupes et amas de galaxies
- Détection et étude de la matière sombre par effet de lentille gravitationnelle

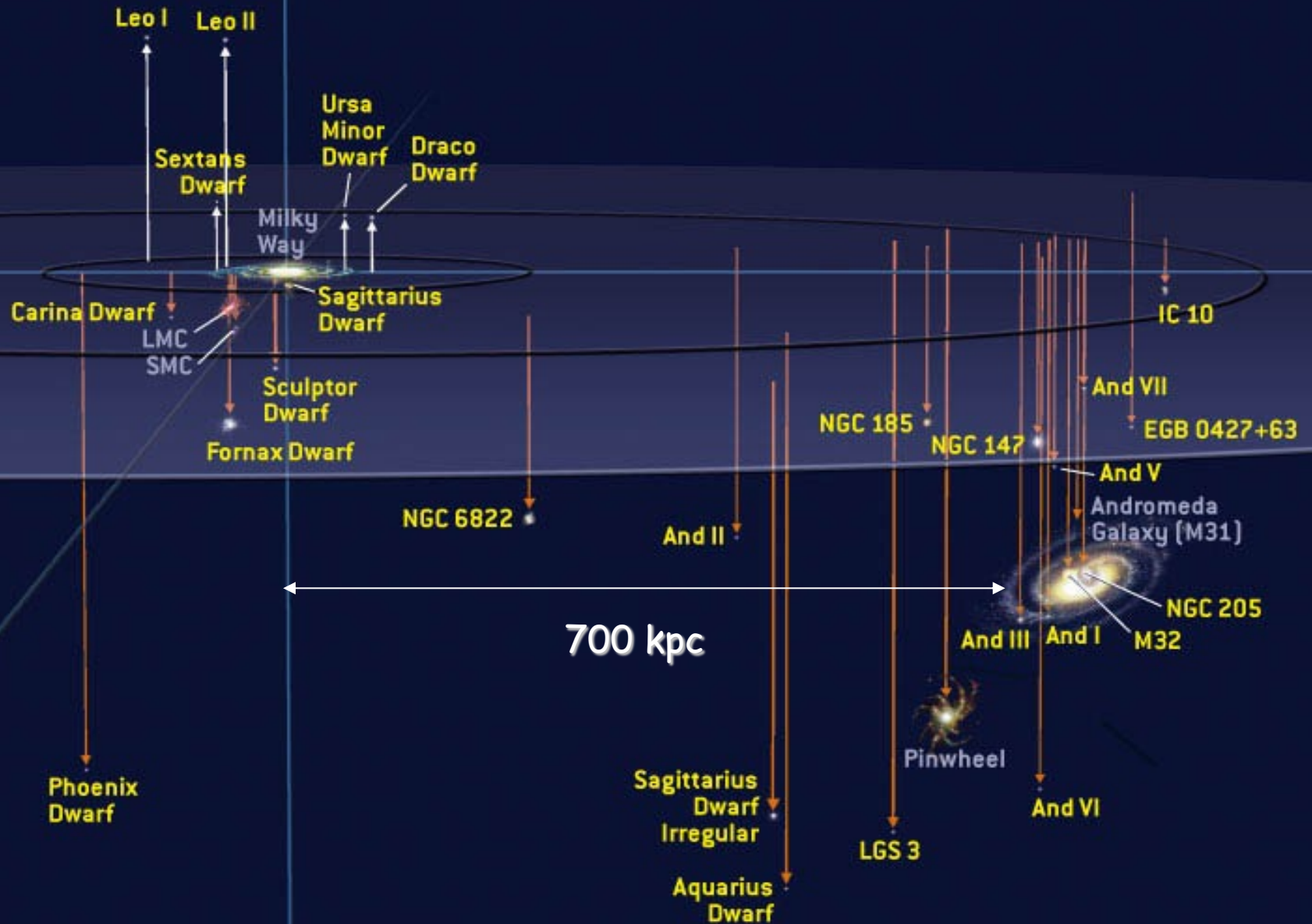
La matière sombre est présente à toutes les échelles et n'est pas toujours corrélée avec la matière visible

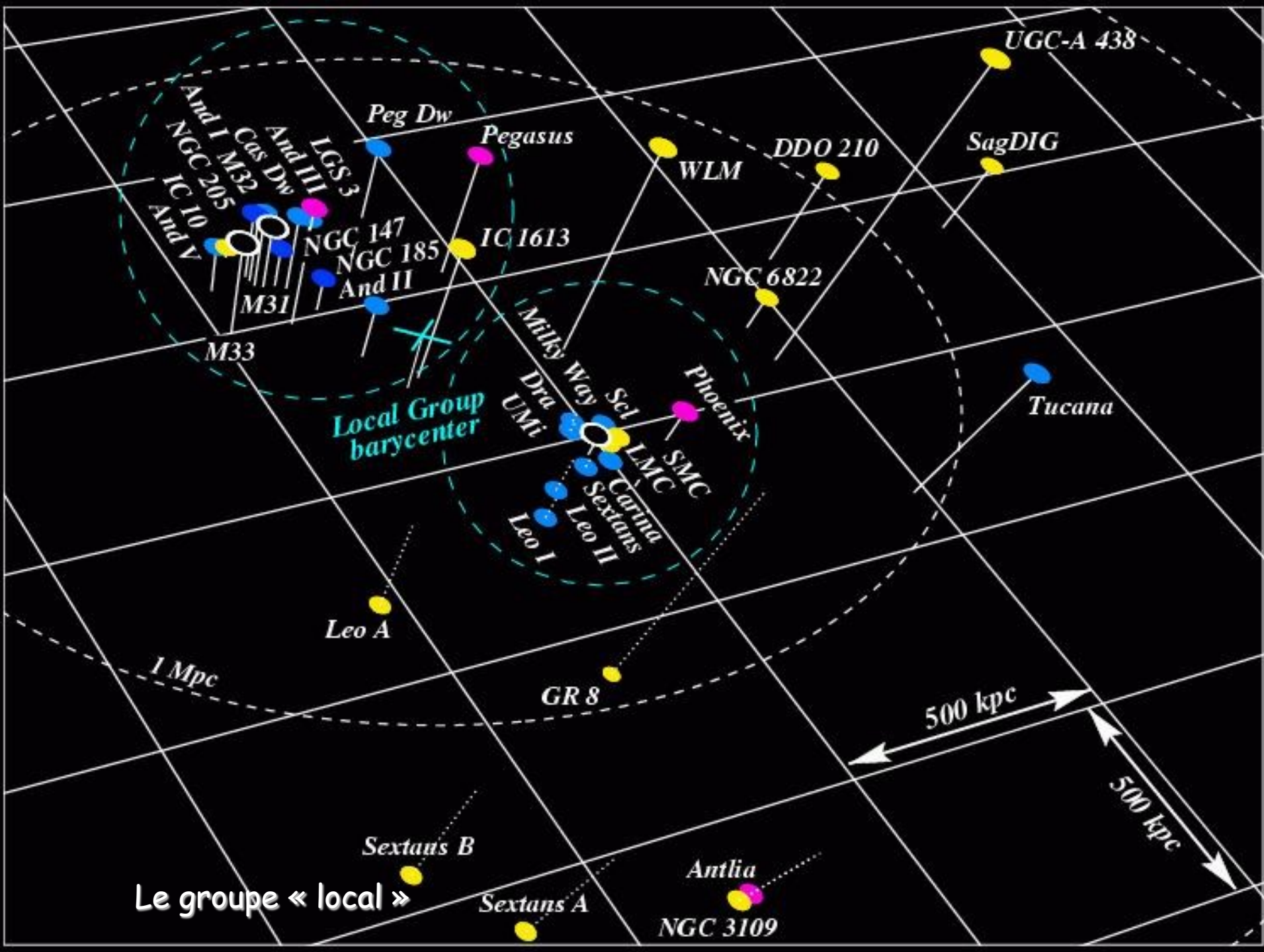
Composition de l'Univers



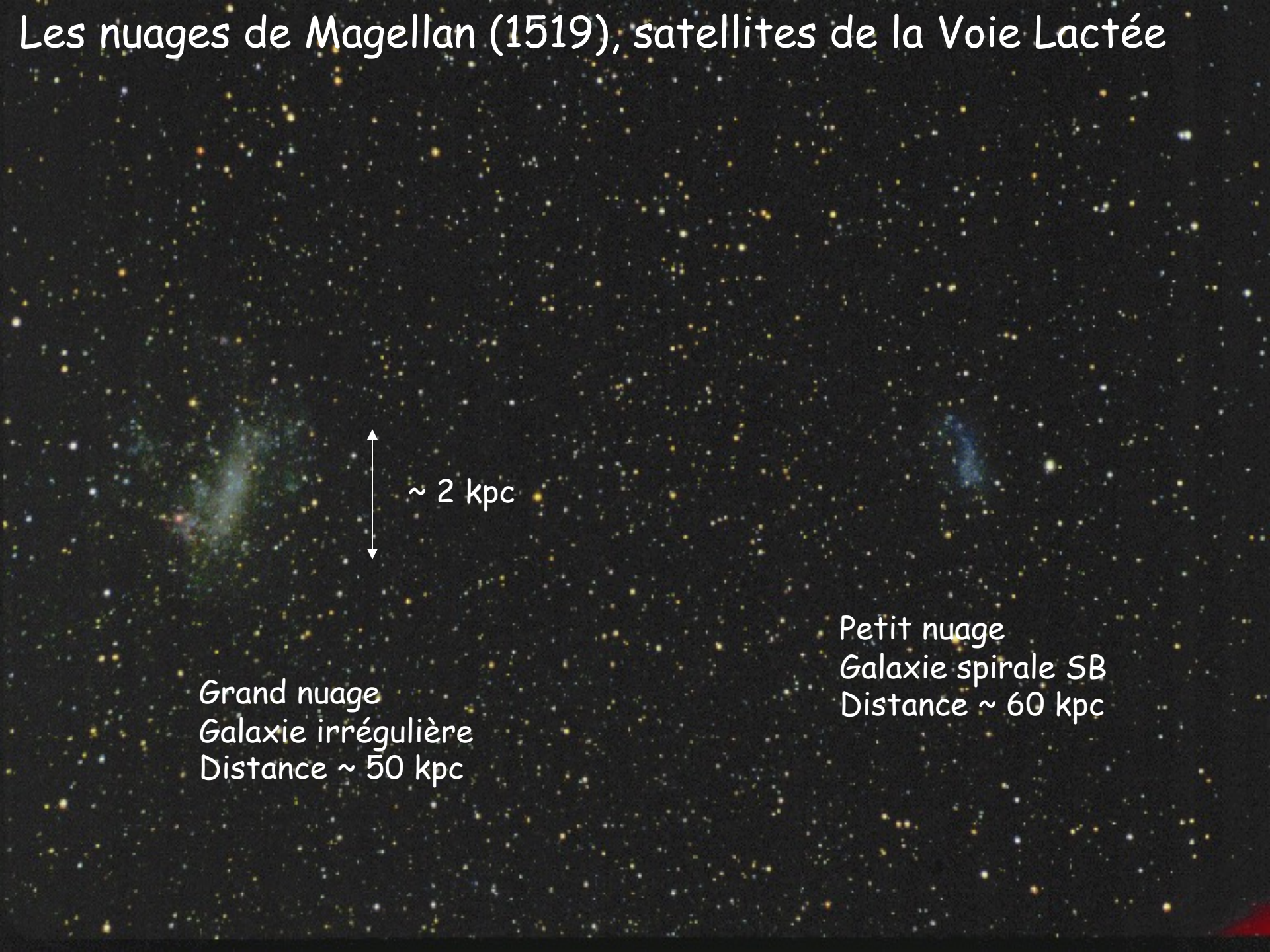
Le « groupe local »

Le groupe « local »





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



Grand nuage
Galaxie irrégulière
Distance ~ 50 kpc

~ 2 kpc

Petit nuage
Galaxie spirale SB
Distance ~ 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 ($M \sim 10^8 - 10^9 M_{\odot}$)

Leo I



Naine du sculpteur



Naine de la
« machine
pneumatique »

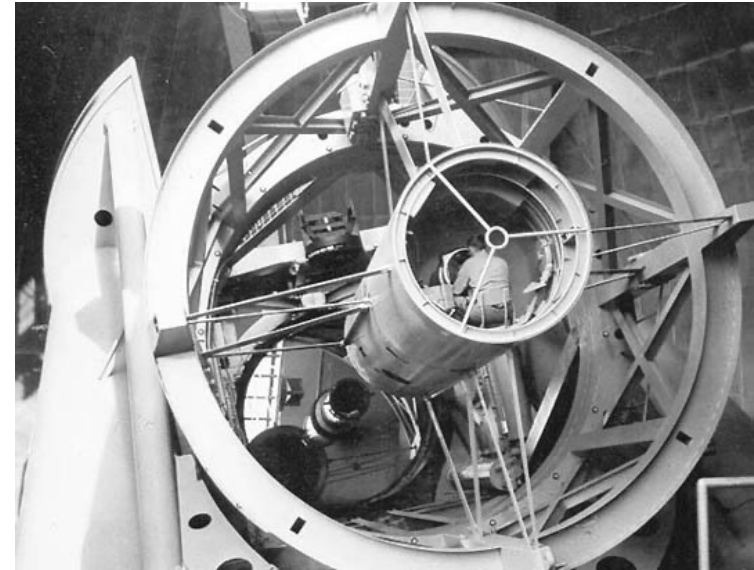
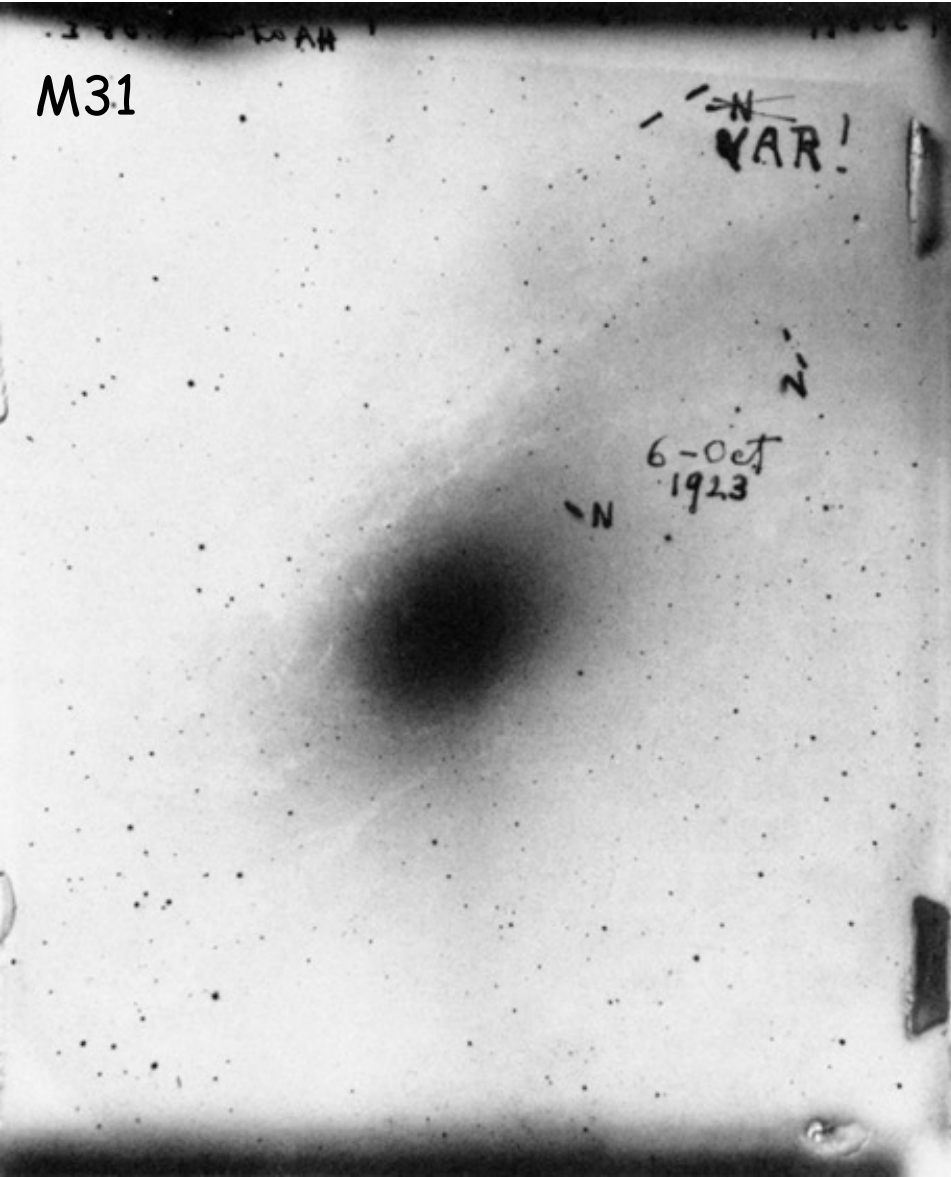


NGC 6822: galaxie naine du « groupe local »

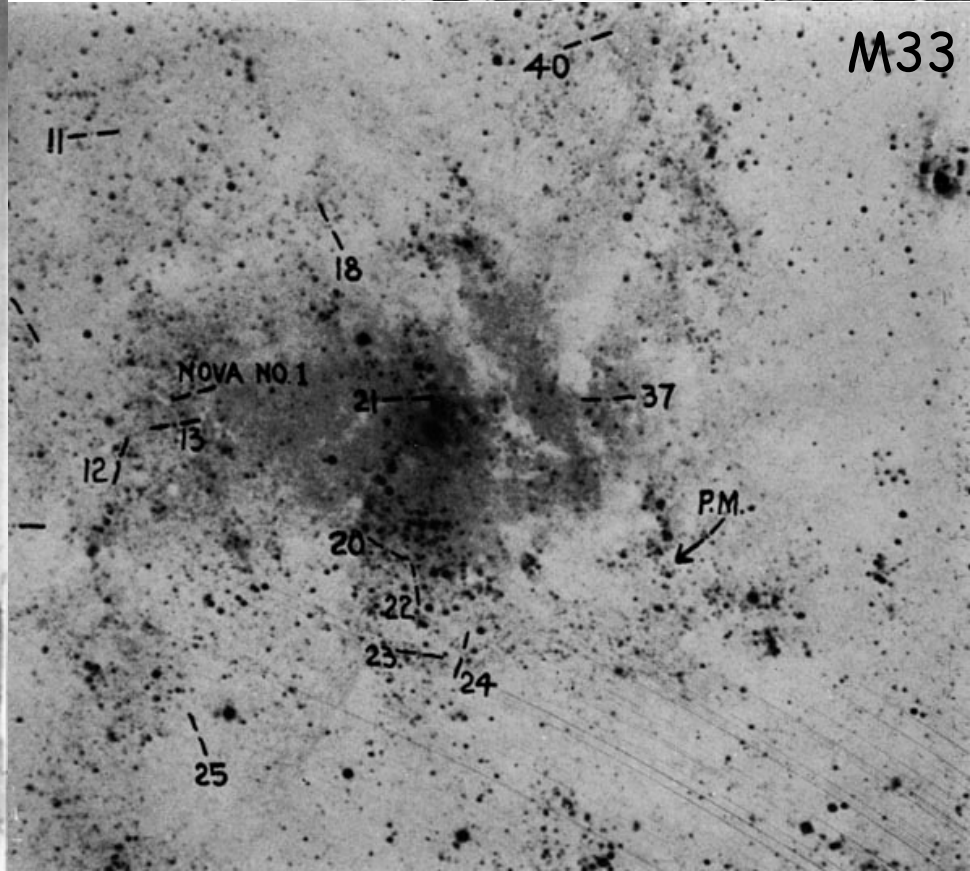


Etoiles Cépheides dans M31 et M33 (plaques photos prises par Hubble)

M31



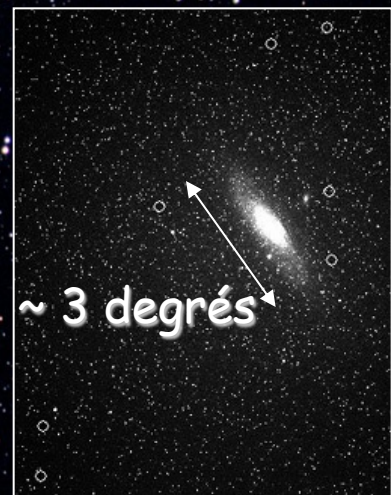
M33



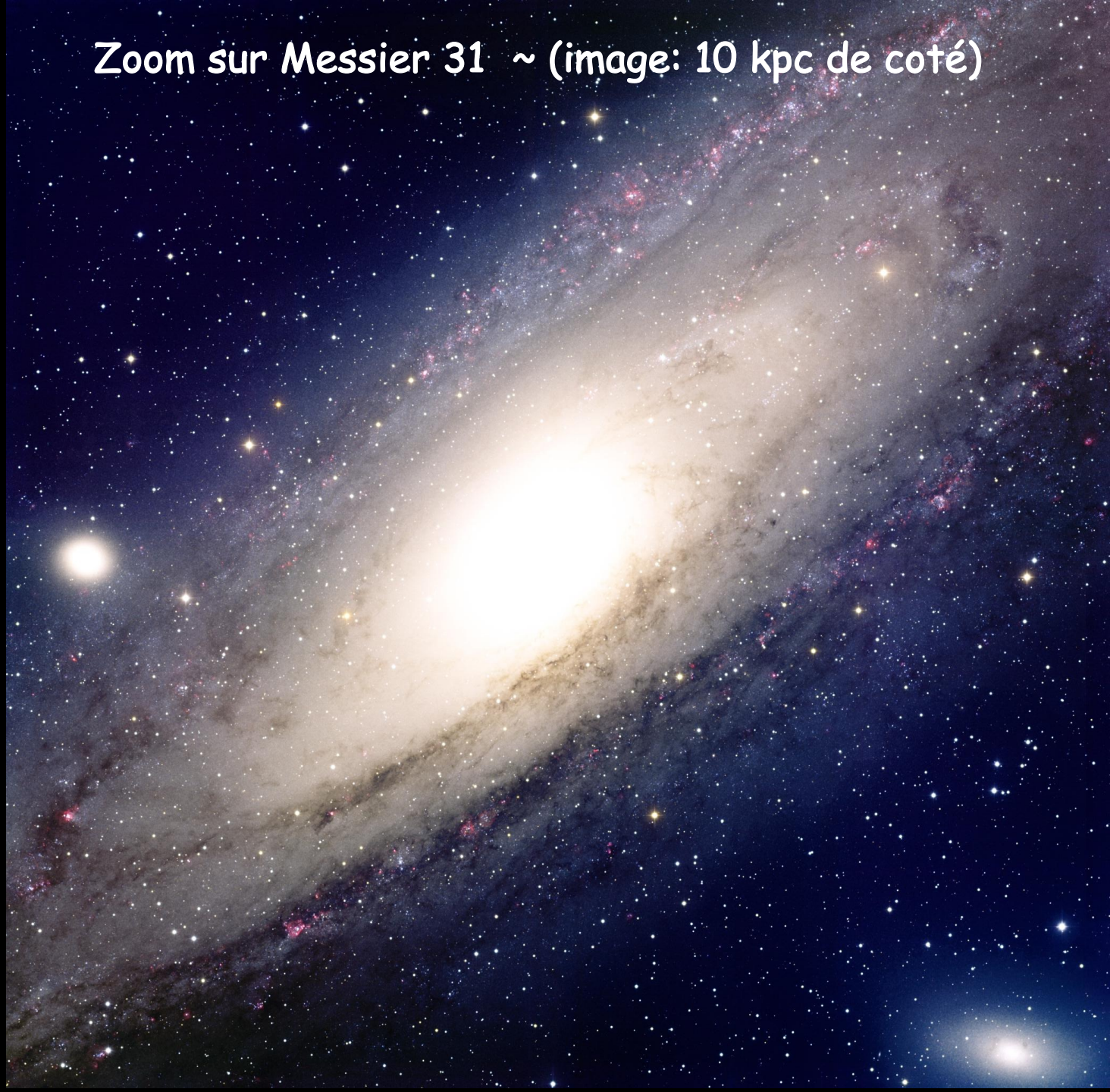
La grande nébuleuse d'Andromède
(Messier 31) distance 700 kpc

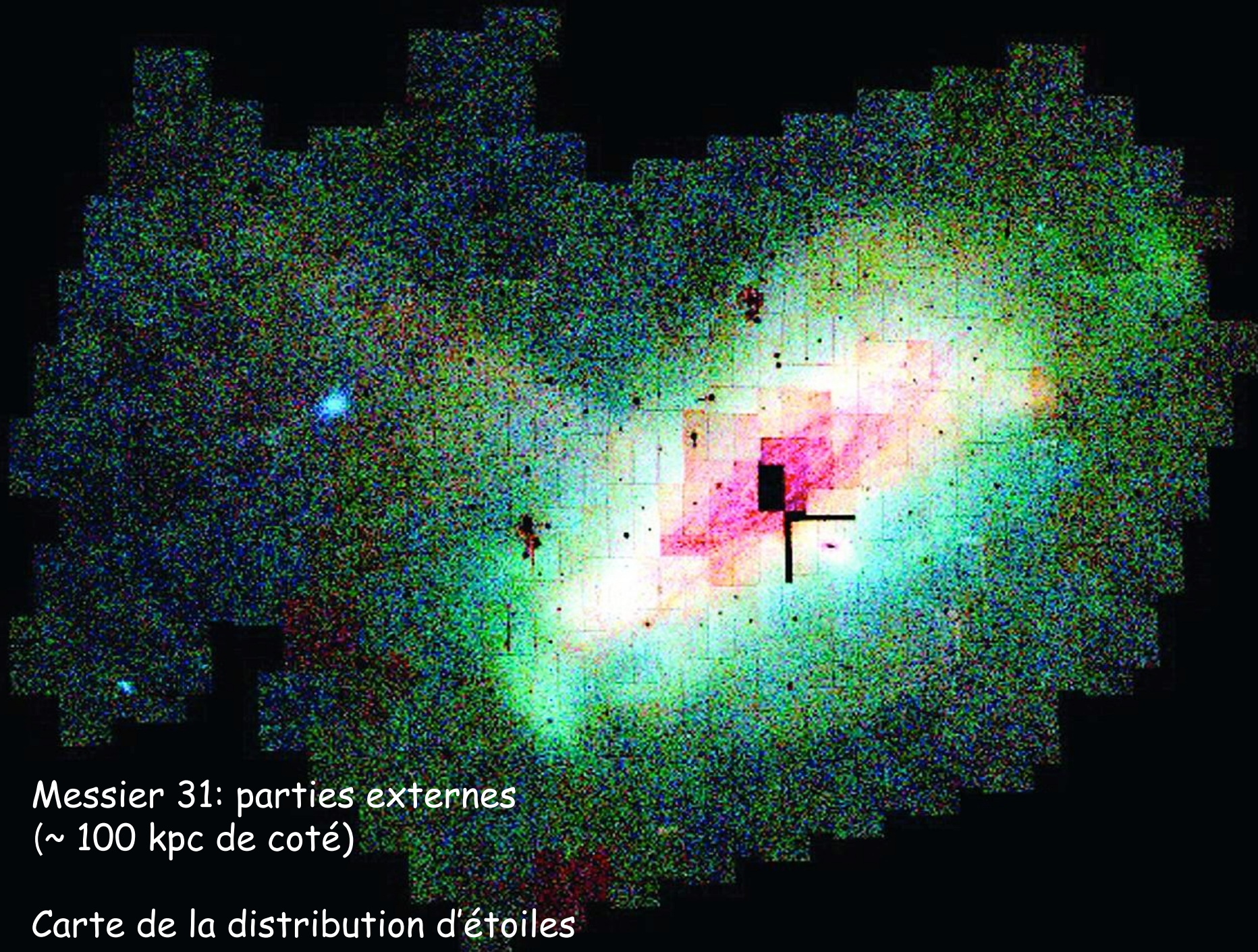
M32

NGC 205



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





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

Carte de la distribution d'étoiles

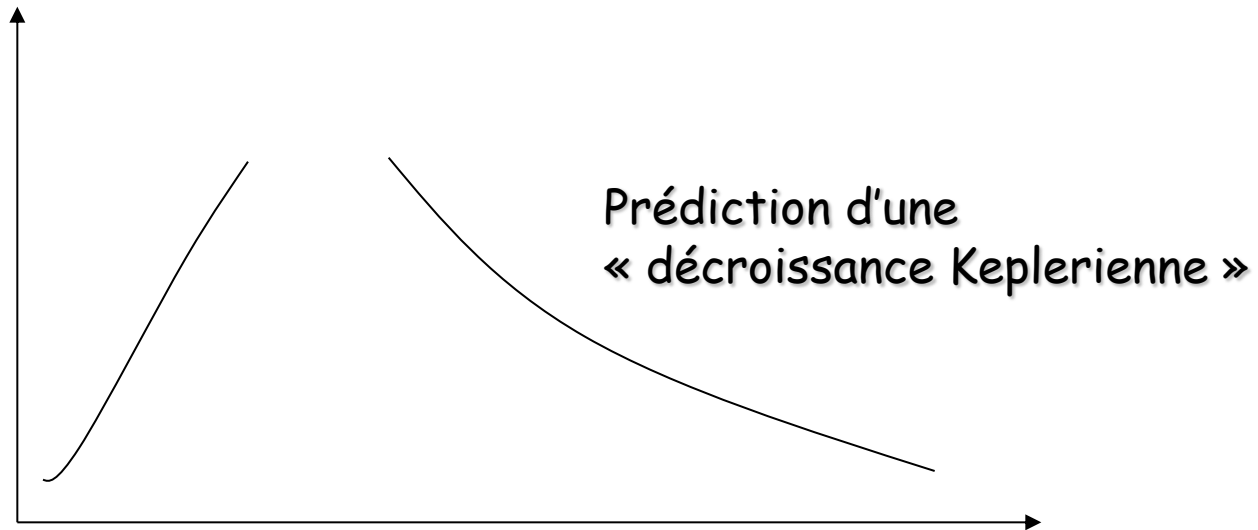
Rotation des galaxies spirales

Rotation des galaxies spirales

Distribution de la masse dans les galaxies spirales, grâce à la mesure de la vitesse circulaire

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

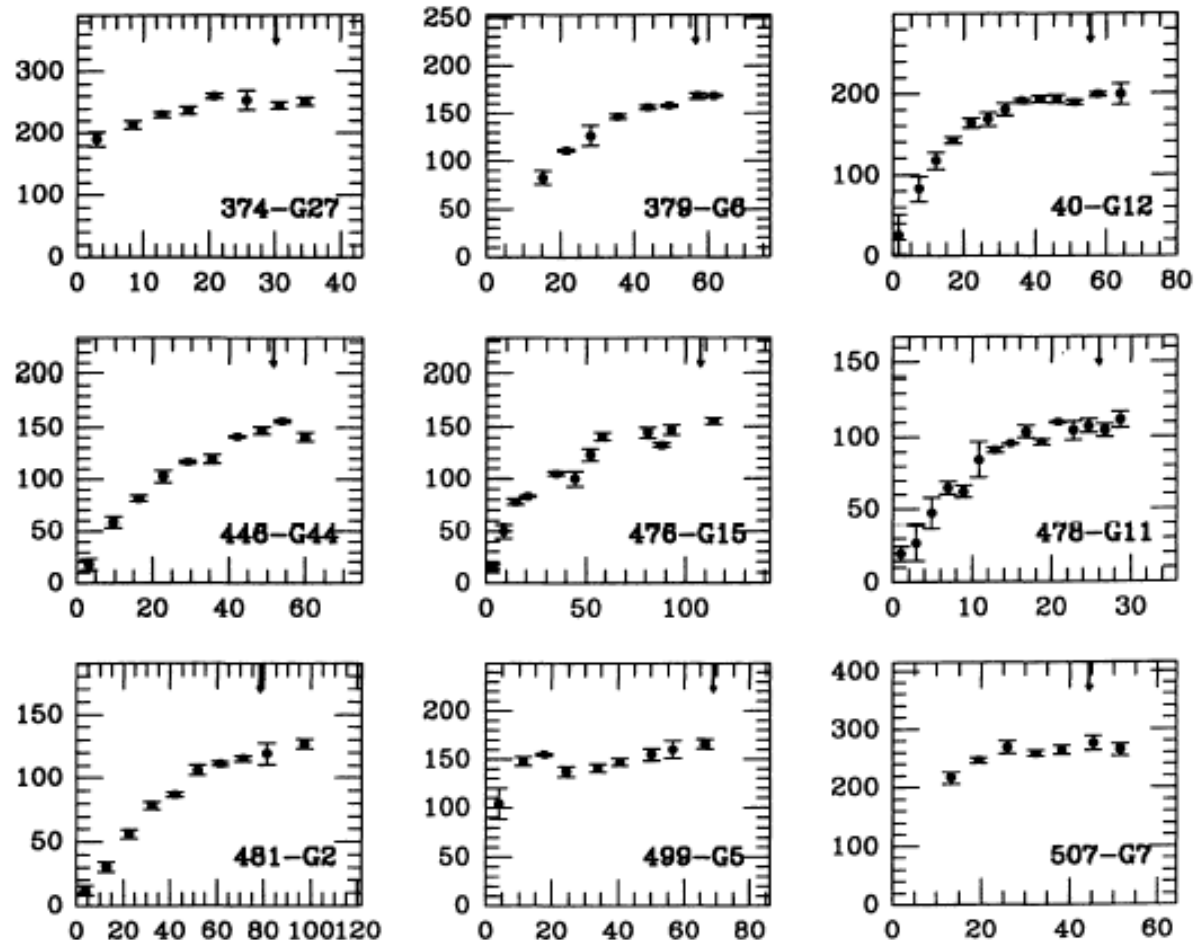
Proche du noyau $V(r) \propto r^{-1/2}$



Rotation des galaxies spirales

Observations en contradiction avec la théorie

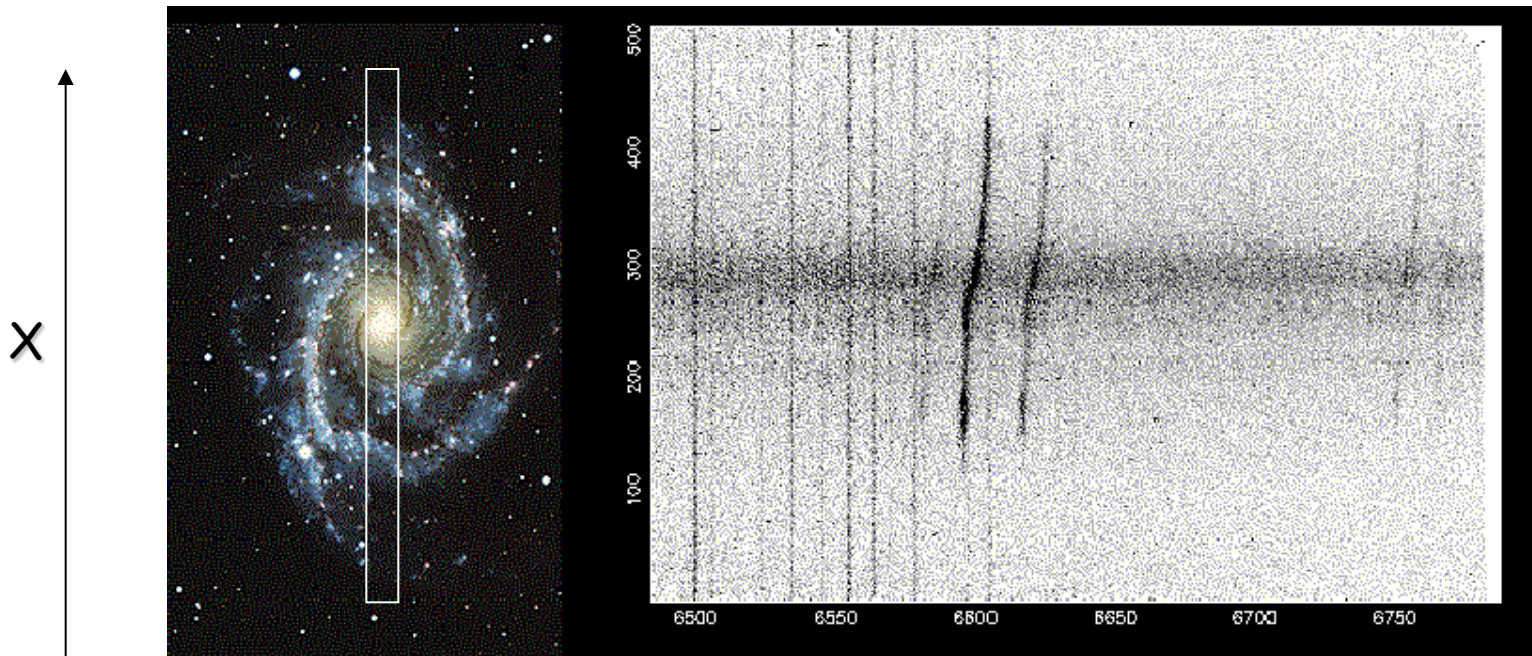
-> courbes de rotation **plates** -> existence d'un halo sombre



Echelle en kpc et en km/s

Rotation des galaxies spirales

Mesure de la courbe de rotation

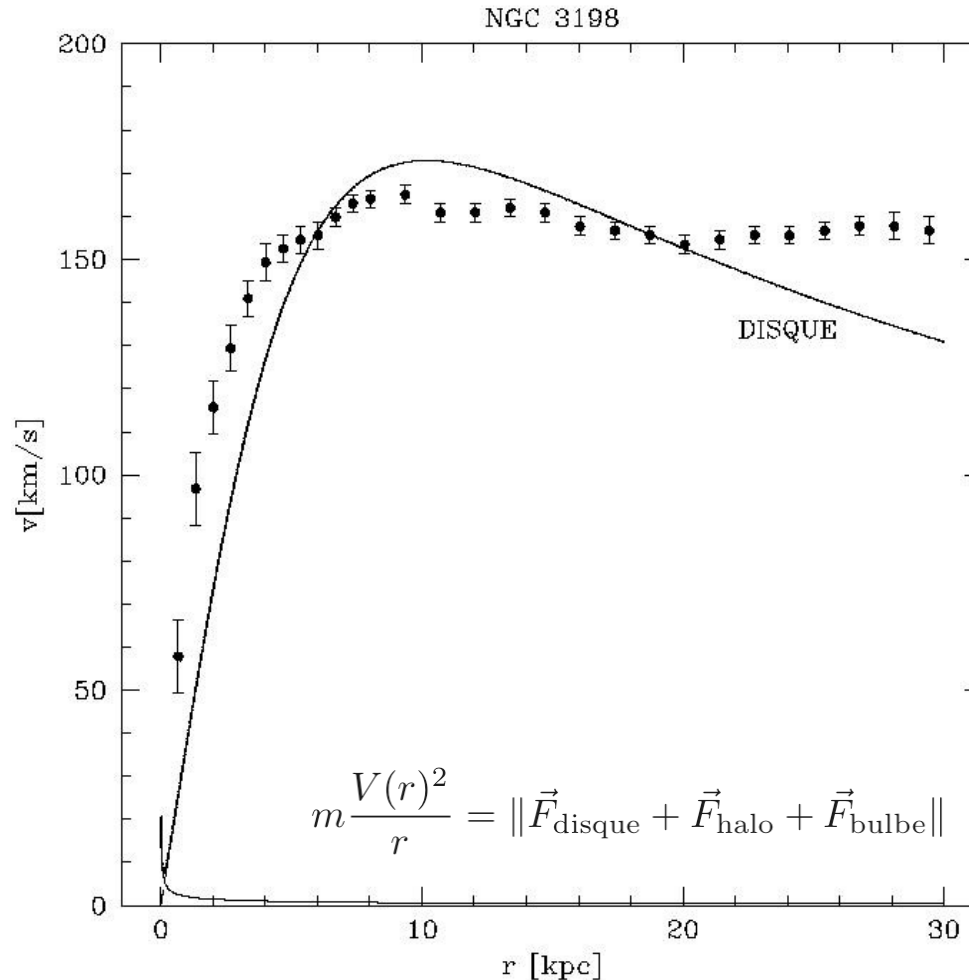


Nécessite la mesure de
l'inclinaison du disque

Longueur d'onde

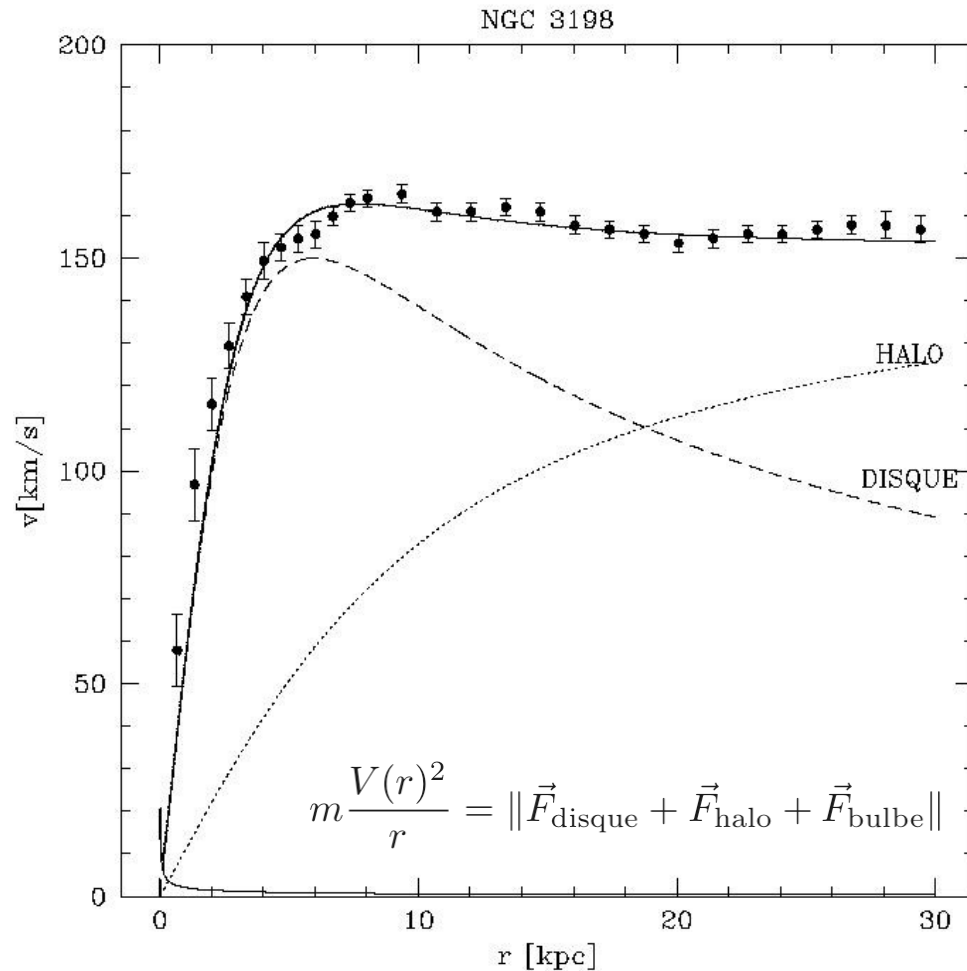
Rotation des galaxies spirales

Modèle de masse avec un disque seul



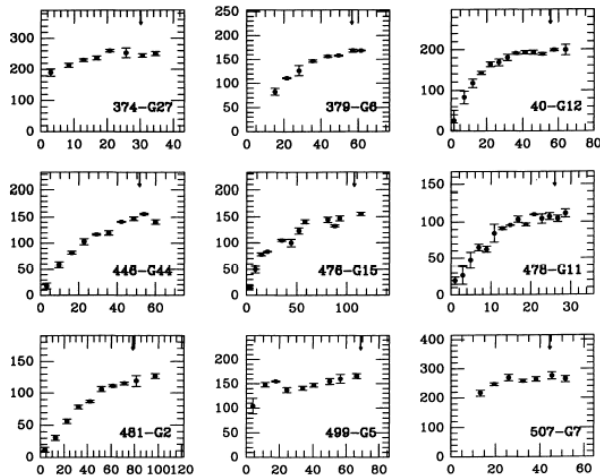
Rotation des galaxies spirales

Modèle de masse: disque, bulbe, halo

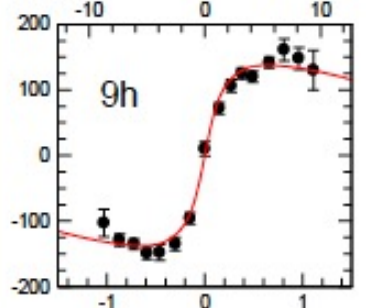
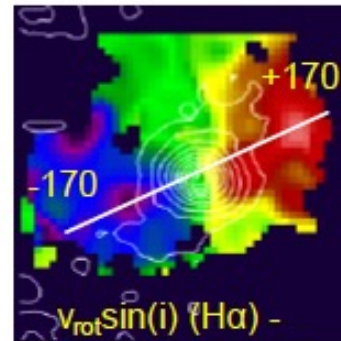
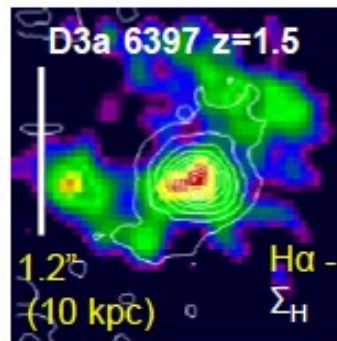
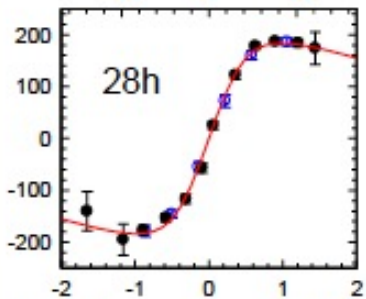
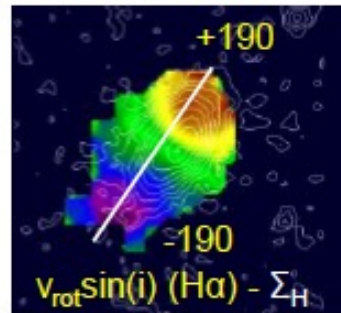
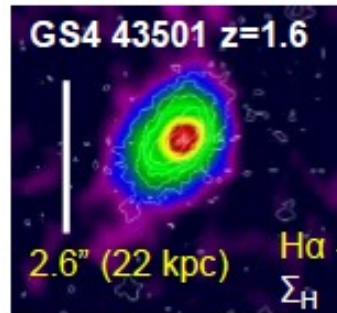
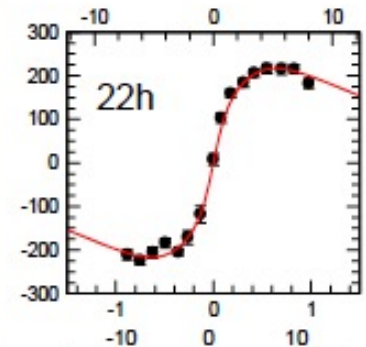
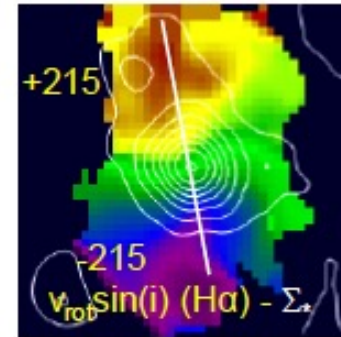
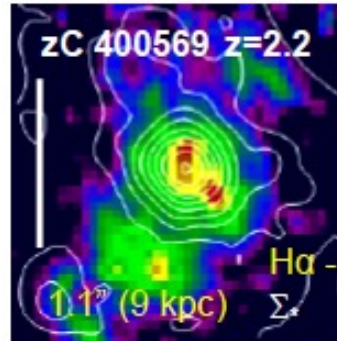


Evolution avec le redshift

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



Galaxies proches



Galaxies distantes

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



Les amas de galaxies

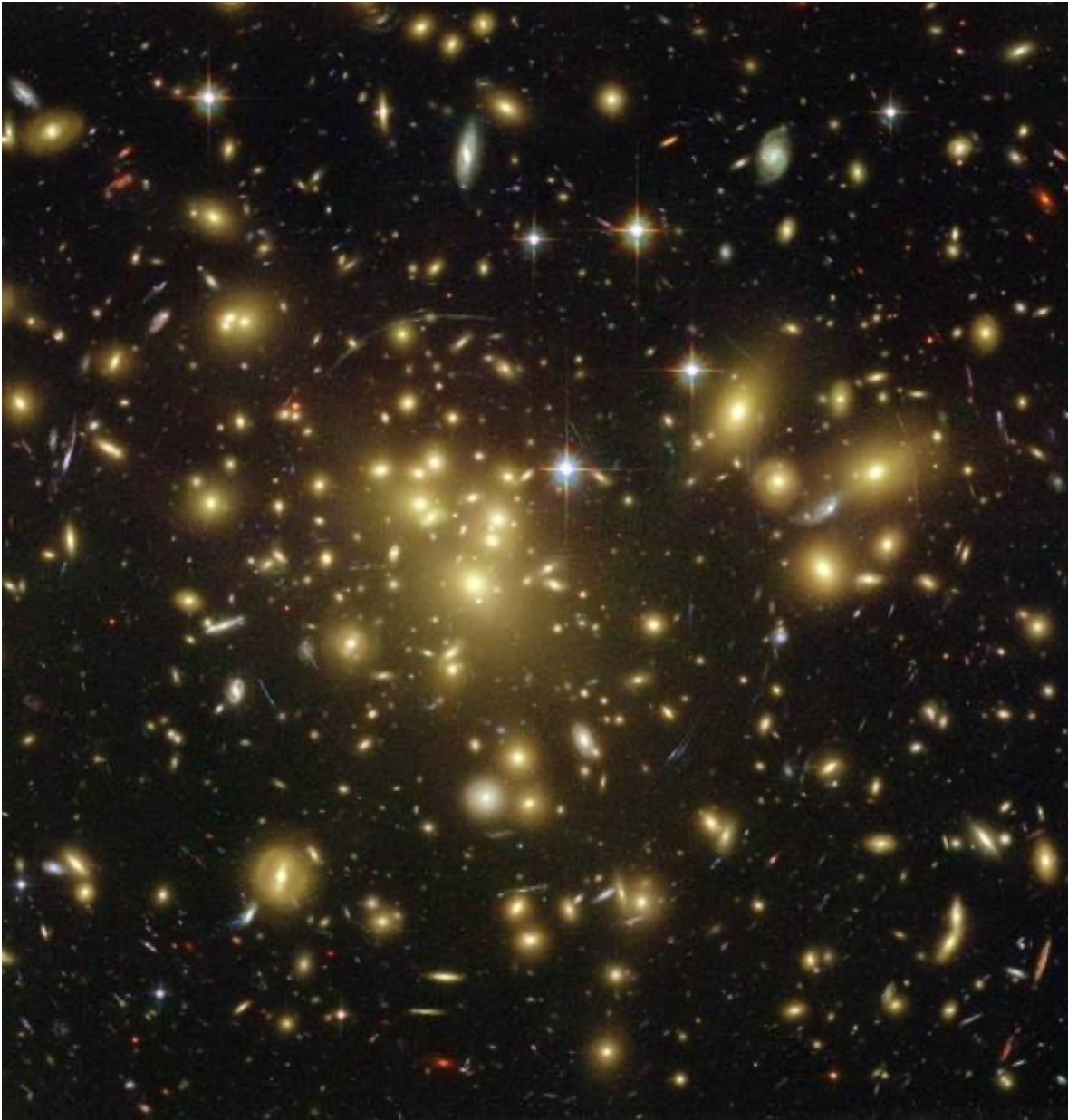
- Contiennent encore plus de matière noire que les galaxies

- Masse du Viriel \gg masse lumineuse ($M/L \sim 600$)

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

- Masses typiques $\sim 10^{13} - 10^{15} M_{\odot}$
- Tailles typiques 100 Mpc ou plus
- Distances: quelques giga parsecs ($z=1$)

Amas Abell 1689



Quelques centaines
de galaxies

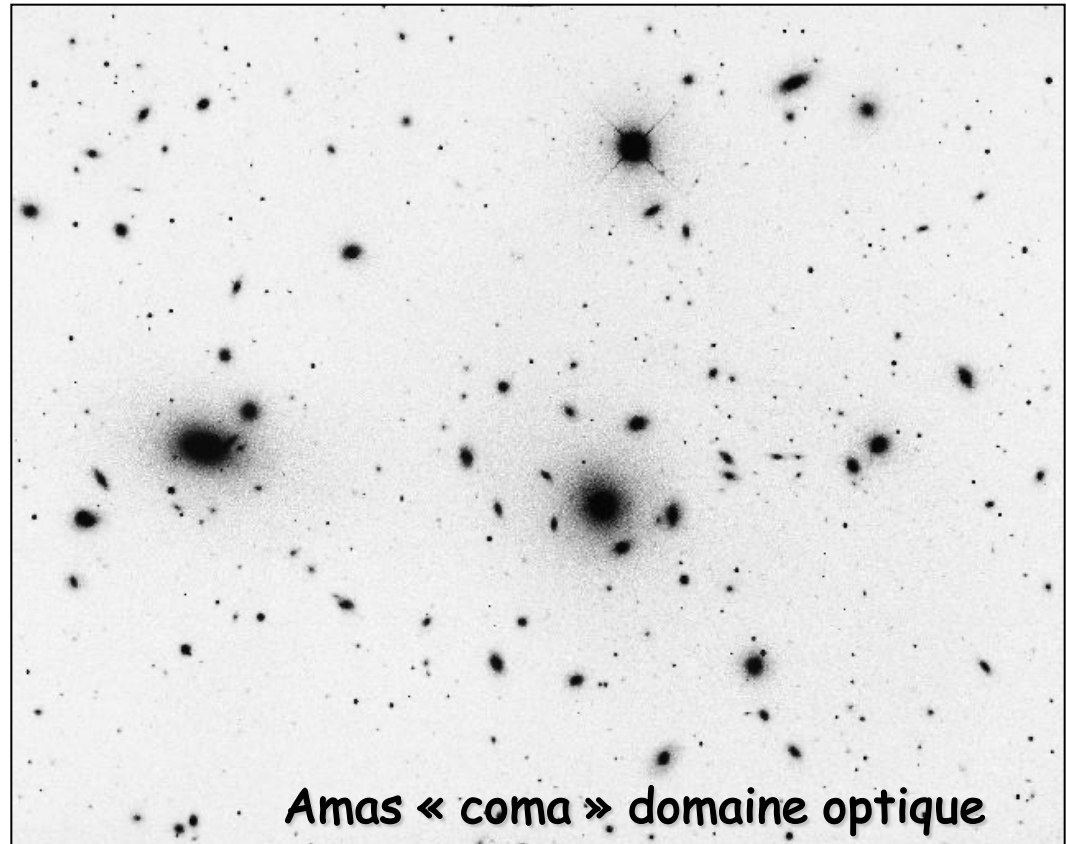
Dominé en général par
une grosse galaxie
elliptique centrale

Gaz intergalactique
invisible

Matière sombre
supplémentaire
(non baryonique ?)

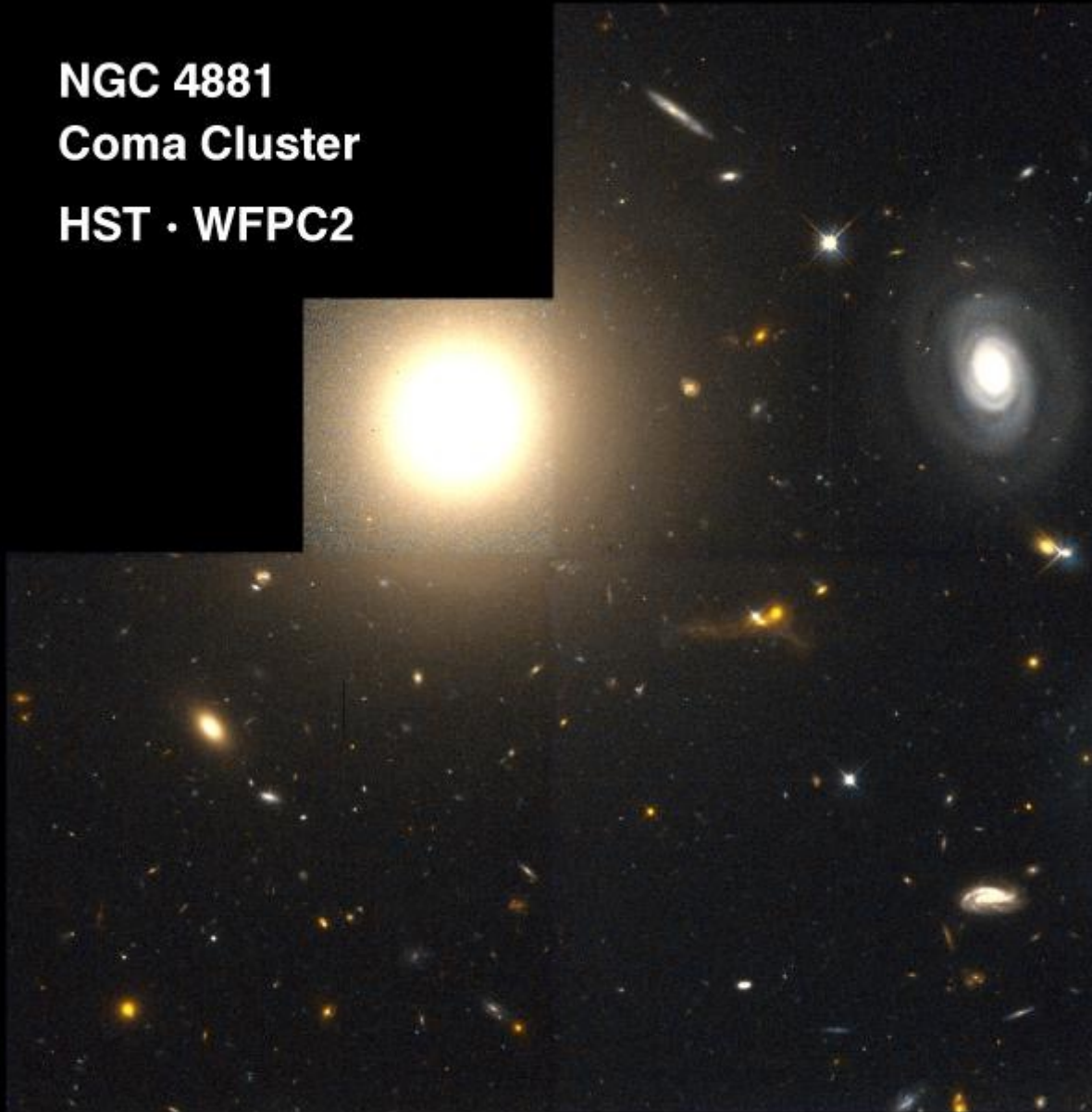
Les amas de galaxies

Mise en évidence matière sombre intergalactique par Fritz Zwicky en 1937



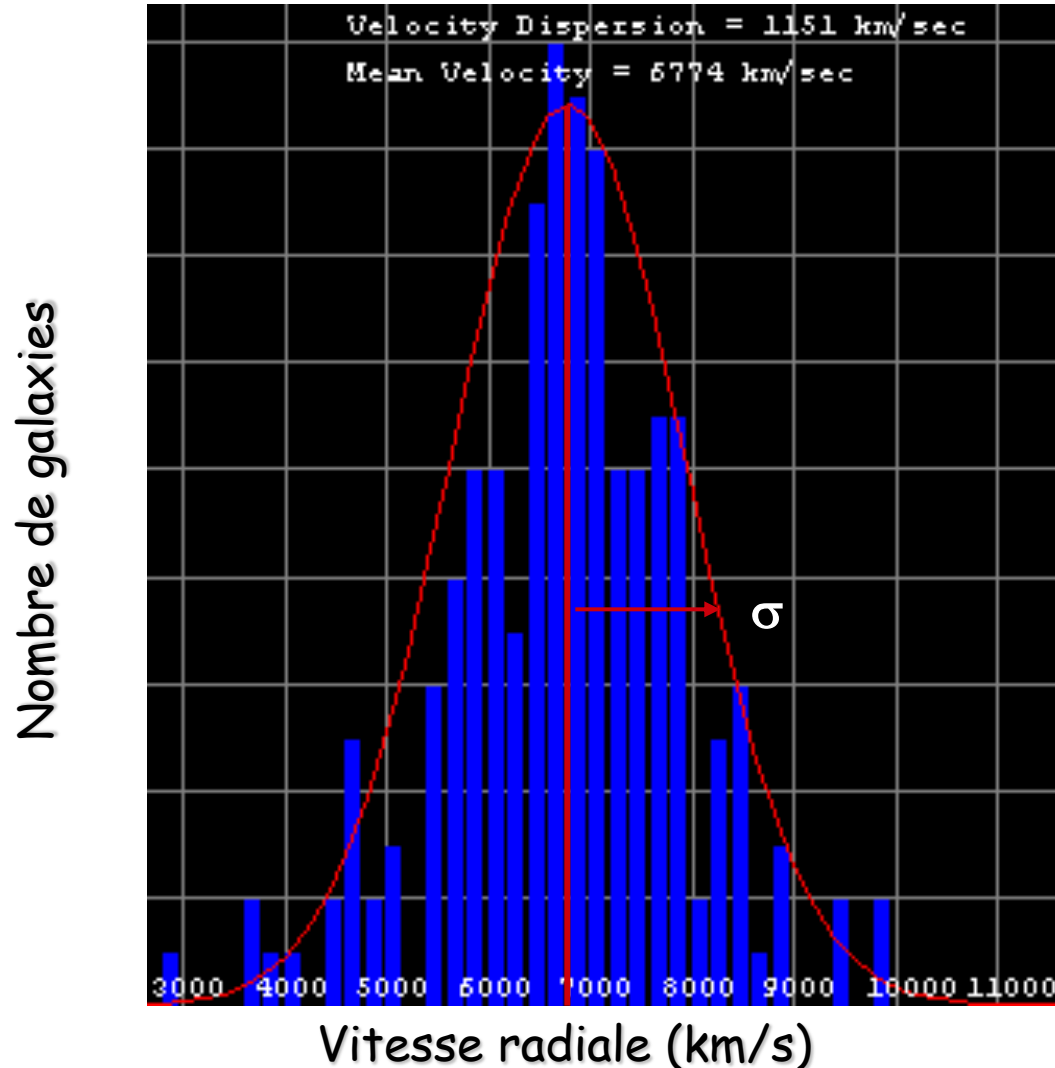
Amas Coma, dominé par une elliptique centrale

NGC 4881
Coma Cluster
HST · WFPC2



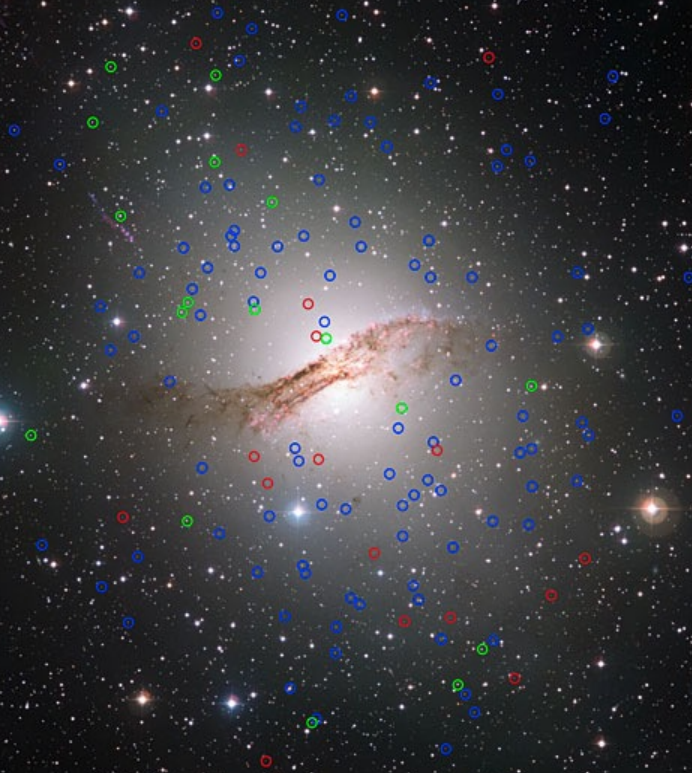
Mesure de la dispersion des vitesses

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



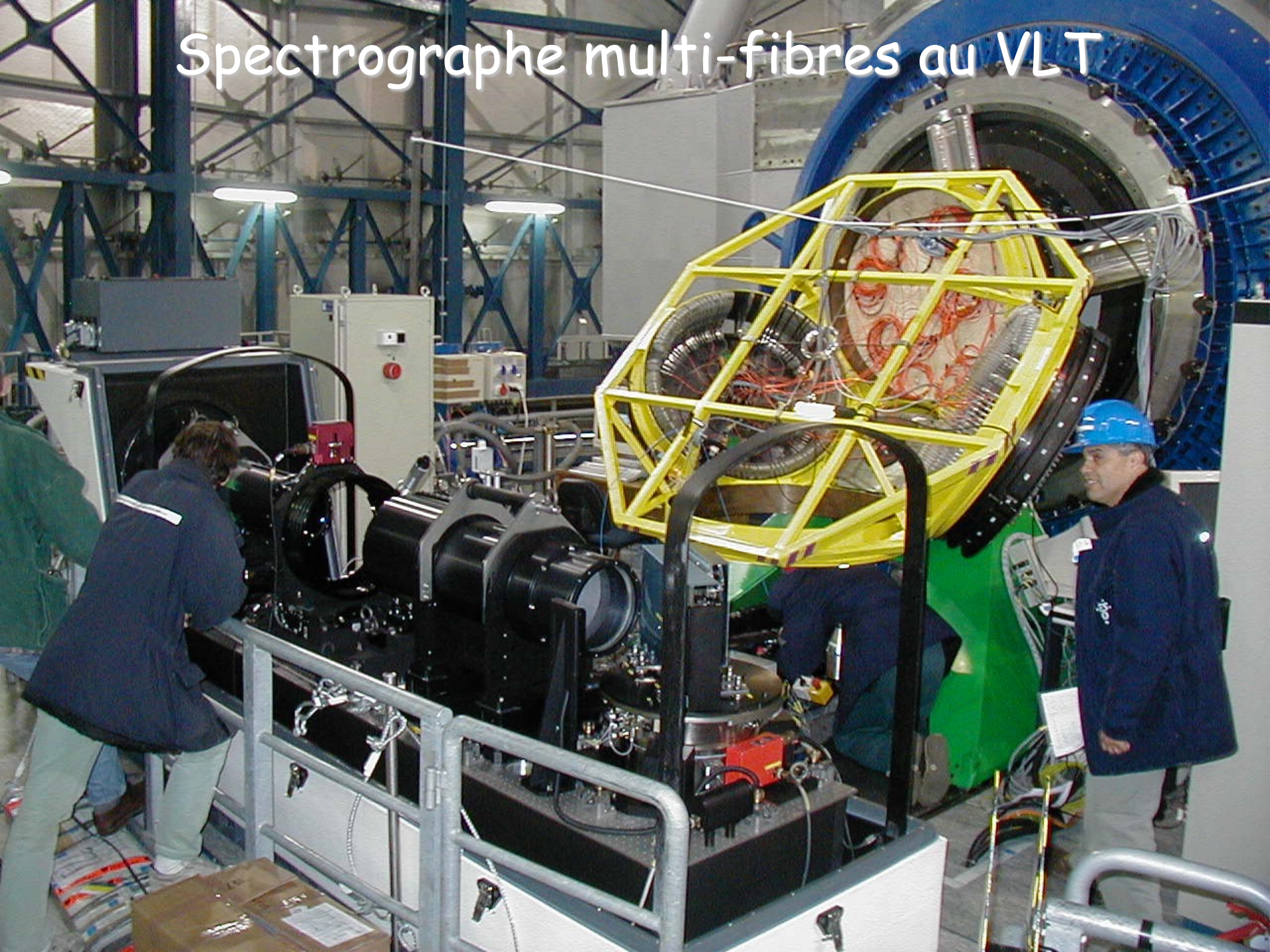
Mesure de la dispersion de vitesses au VLT:

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

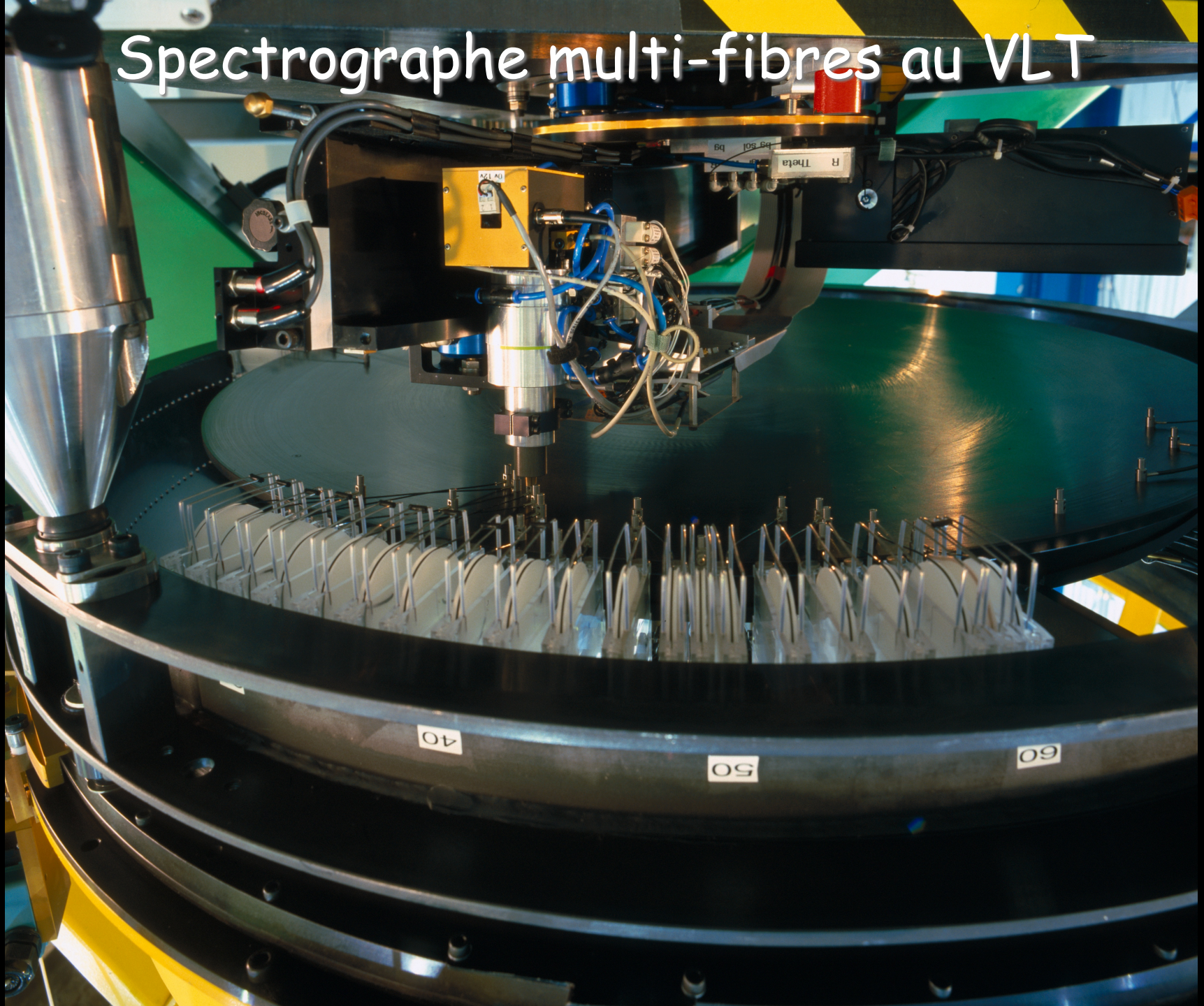


Spectrographe multi-fibres au VLT

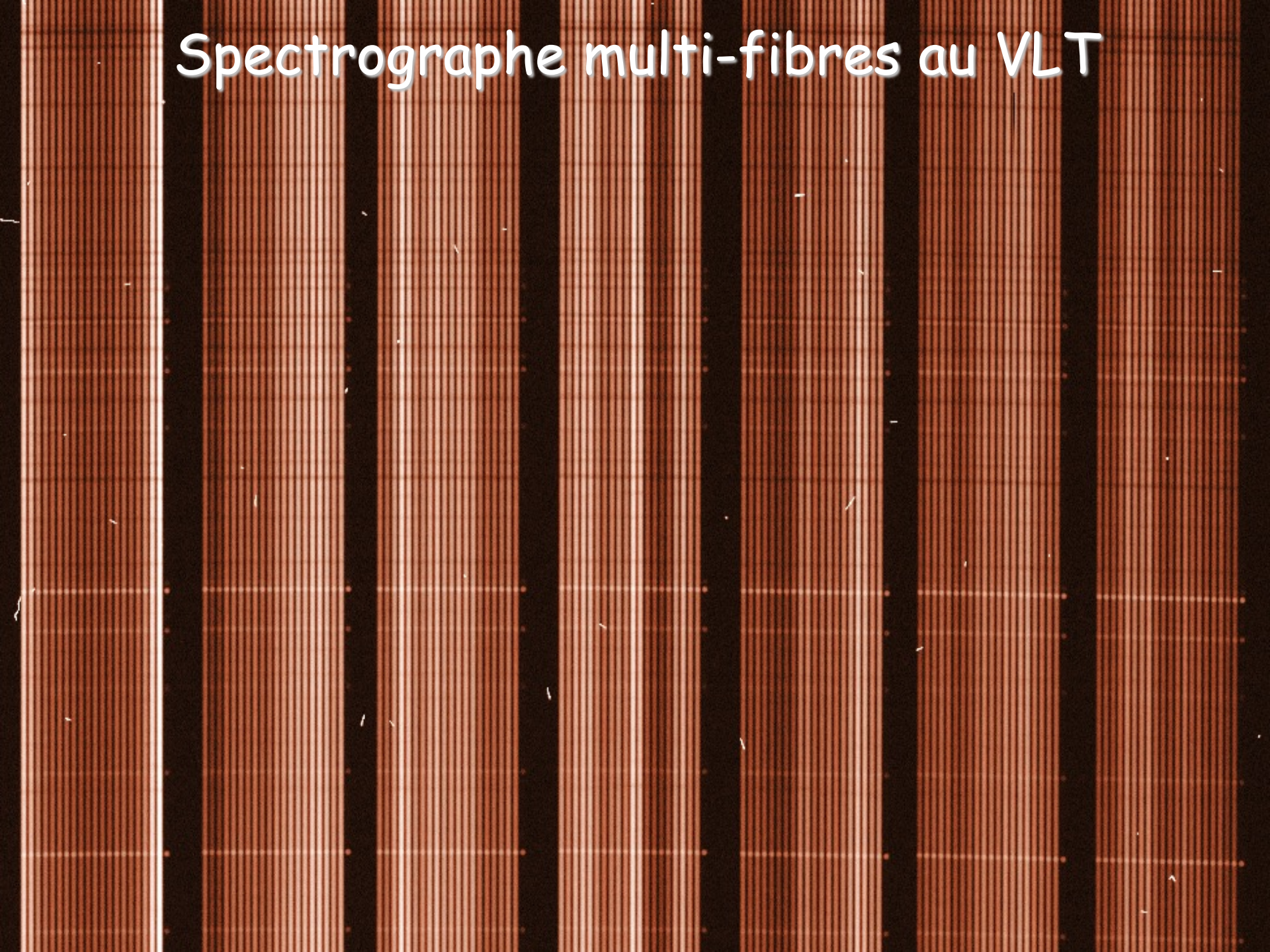
Spectrographe multi-fibres au VLT



Spectrographe multi-fibres au VLT



Spectrographe multi-fibres au VLT



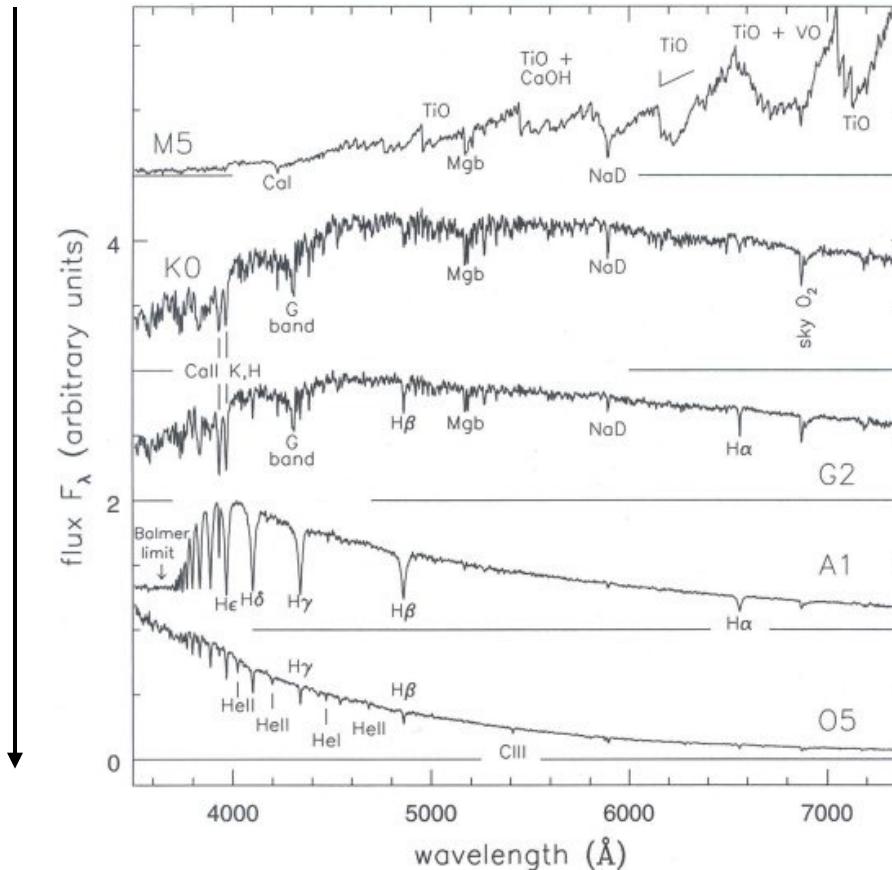
Masse du Viriel vs. masse lumineuse

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

1.1 The stars

5

Température
croissante

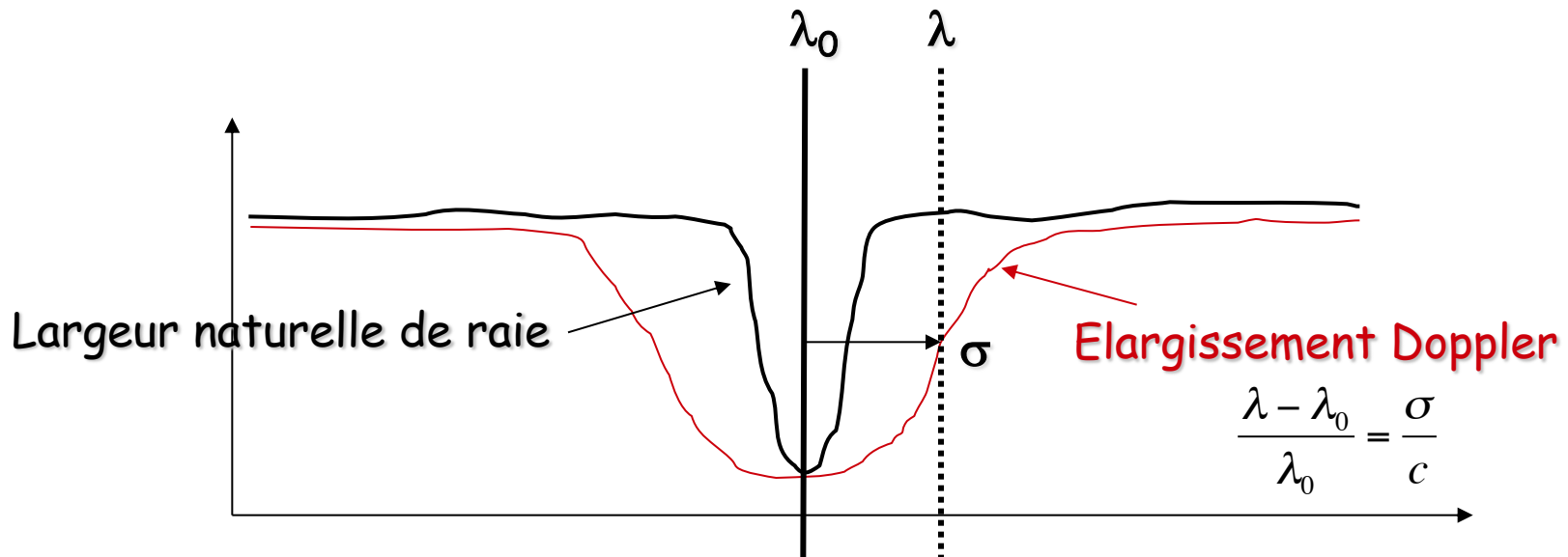


Etoiles de
type solaire:
dominant dans
les galaxies
elliptiques

Figure 1.1 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:

$$M = 3,3 \times 10^{15} M_{\odot} \text{ (masse du Viriel)}$$

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

$$M/L = 600$$

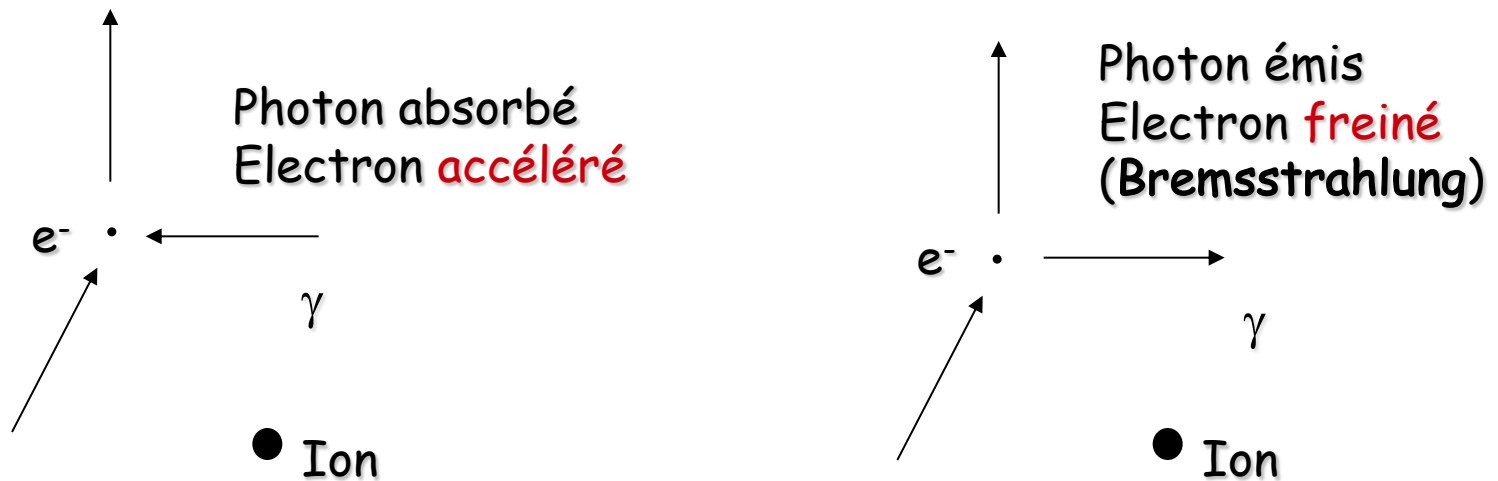
Existe t'il un milieu intergalactique massif visible à d'autres longueurs d'ondes ?

Gaz intergalactique

Gaz intergalactique

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**

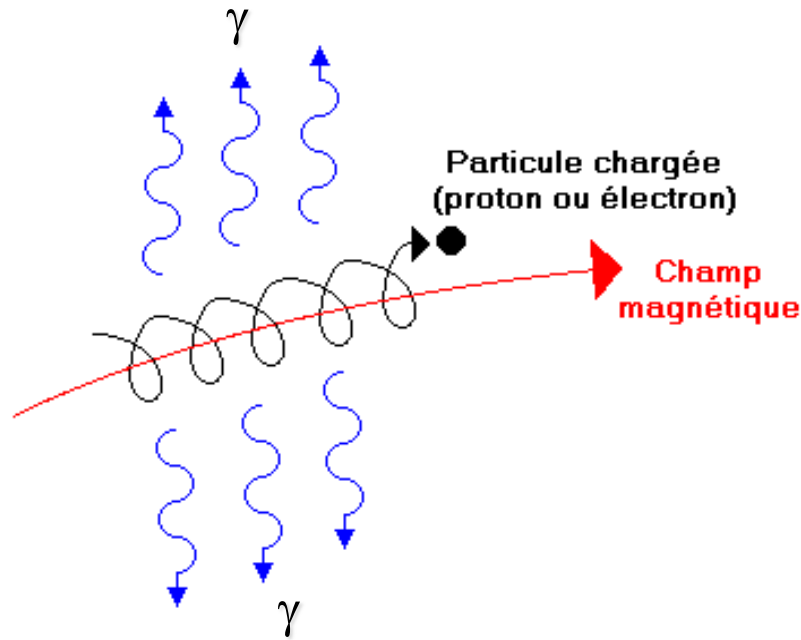


Ce rayonnement n'est possible QU'EN PRESENCE d'un ion.
Le gaz est chaud, il s'agit d'un **rayonnement thermique**.

Gaz intergalactique

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



Gaz intergalactique

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

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

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

The diagram illustrates the components of the synchrotron radiation formula. Arrows point from the following labels to their corresponding terms in the equation:

- erg s⁻¹ cm⁻³** points to $l_\nu d\nu$
- Densité électronique** points to n_e^2
- Température du gaz** points to $T^{-1/2}$
- Fréquence du rayonnement** points to ν in the exponent $\exp\left(\frac{-h\nu}{kT}\right)$

Gaz intergalactique

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

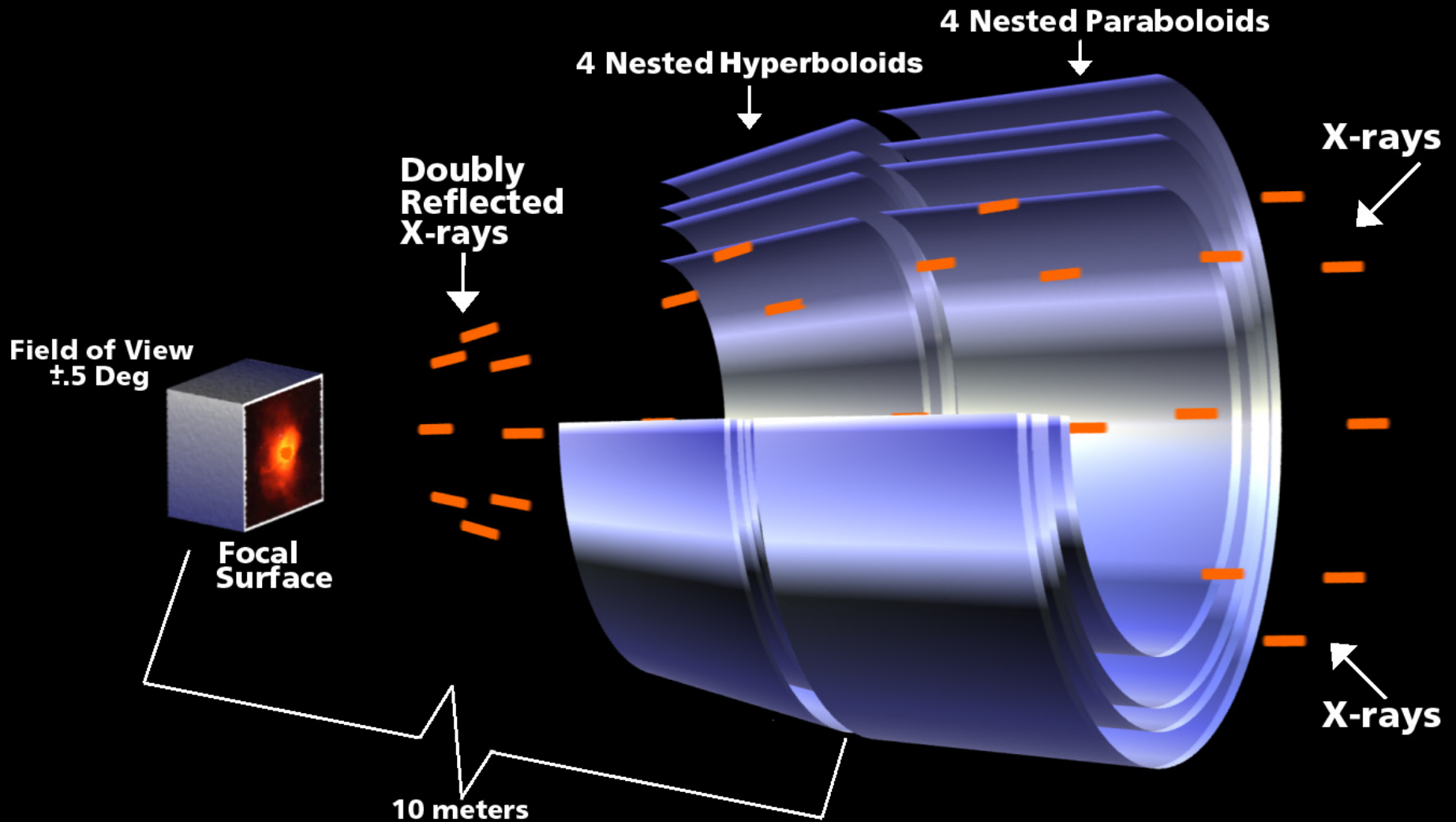
$$L_{vol} = \int_0^{\infty} l_{\nu} d\nu$$

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

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

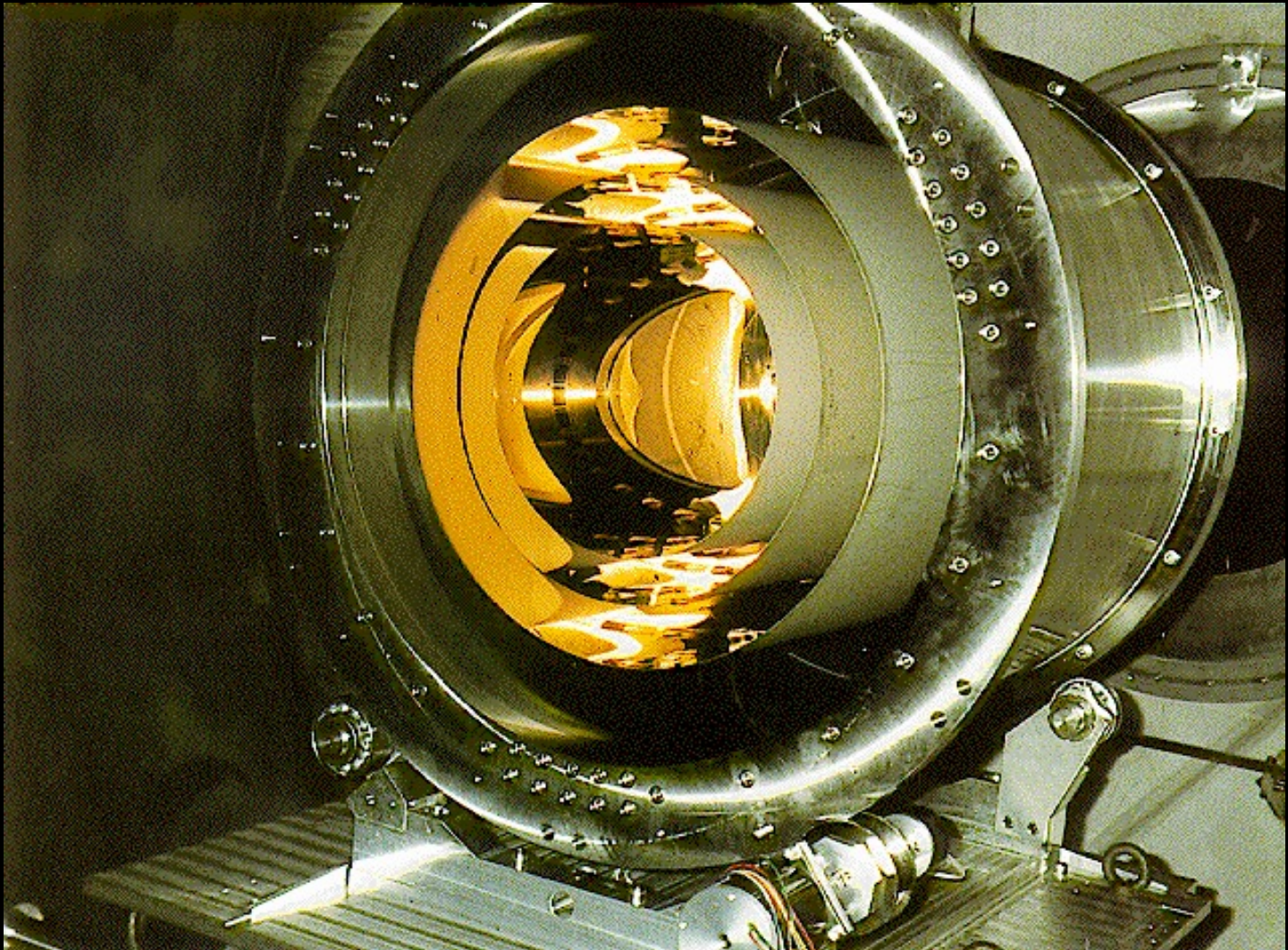
Températures de l'ordre de $10^7 - 10^8$ K

Exemple de « télescope » X à incidence rasante

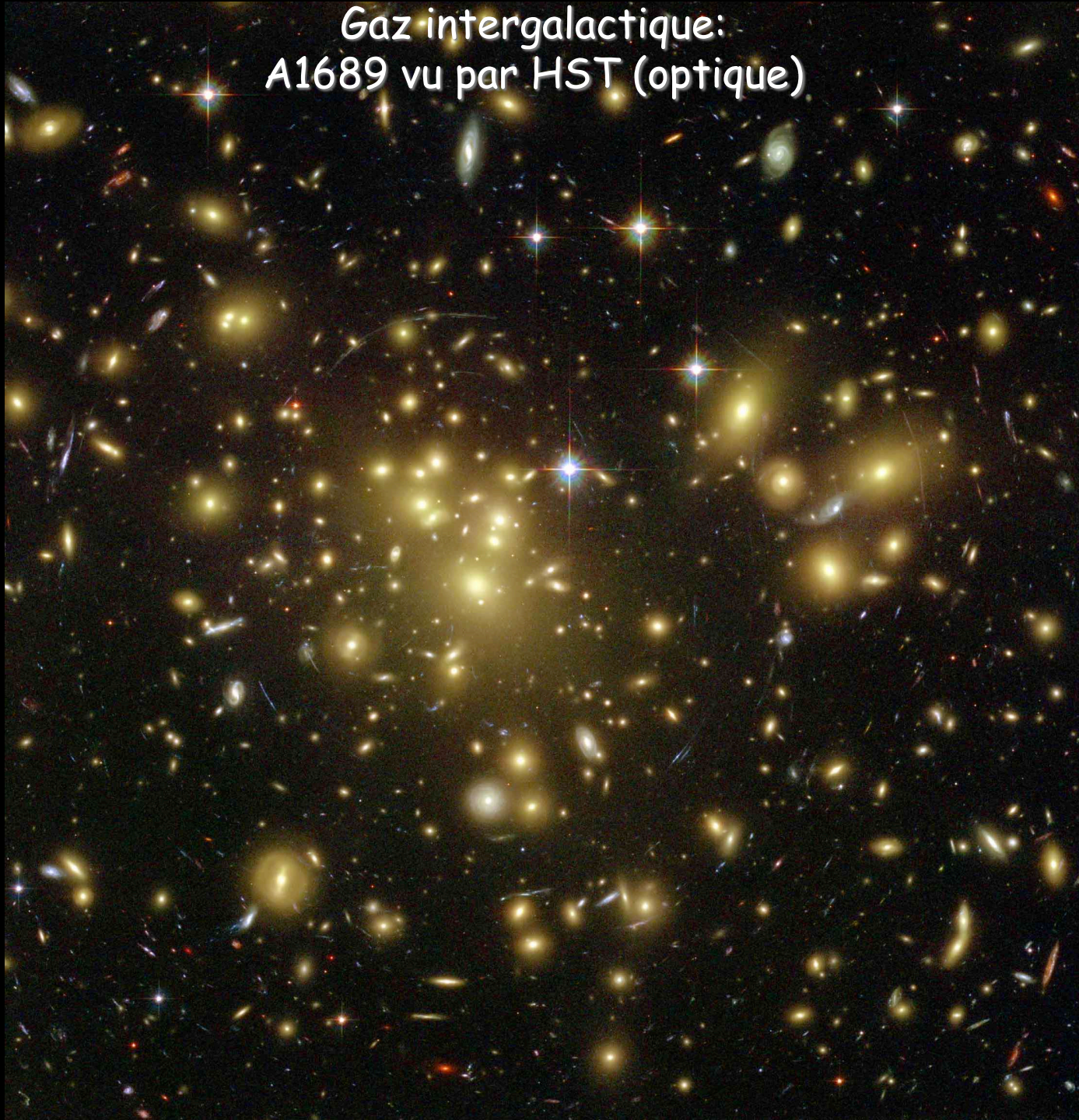


Mirror elements are 0.8 m long and from 0.6 m to 1.2 m diameter

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



Gaz intergalactique:
A1689 vu par HST (optique)



Gaz intergalactique:
A1689 vu Chandra (X)



Gaz intergalactique:
A1689 vu par HST (optique) et Chandra (X)

Galaxies: 5-10% en masse
Gaz: 10-20% en masse
Matière sombre: le reste !

Gaz intergalactique

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 \sim quelques minutes d'arc mais très sensible
- Chandra (NASA). Résolution \sim quelques secondes d'arc

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

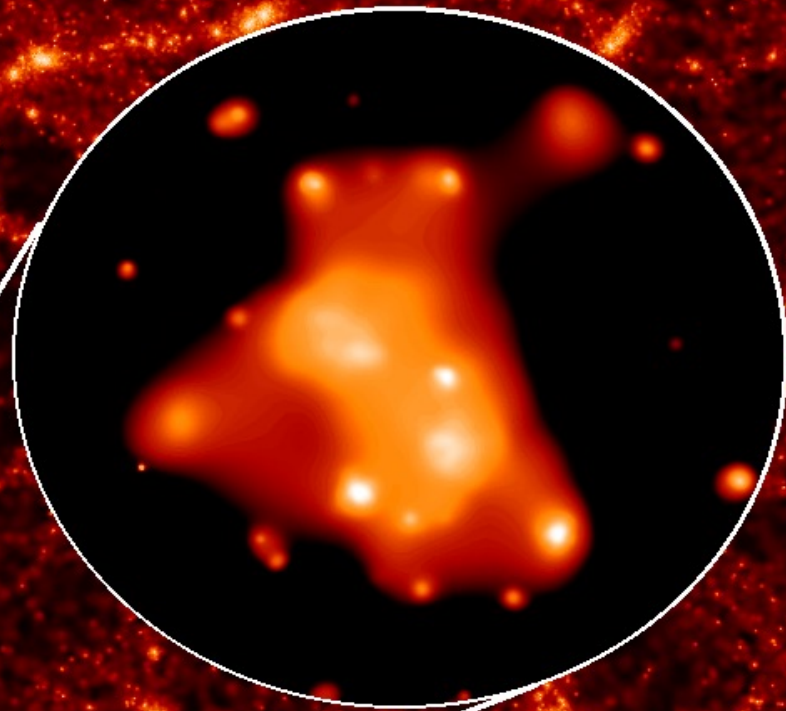
- La masse de gaz ne constitue que 10-20% de la masse totale
- Les galaxies représentent 5-10% de la masse
- Le reste est d'origine inconnue

Formation des amas

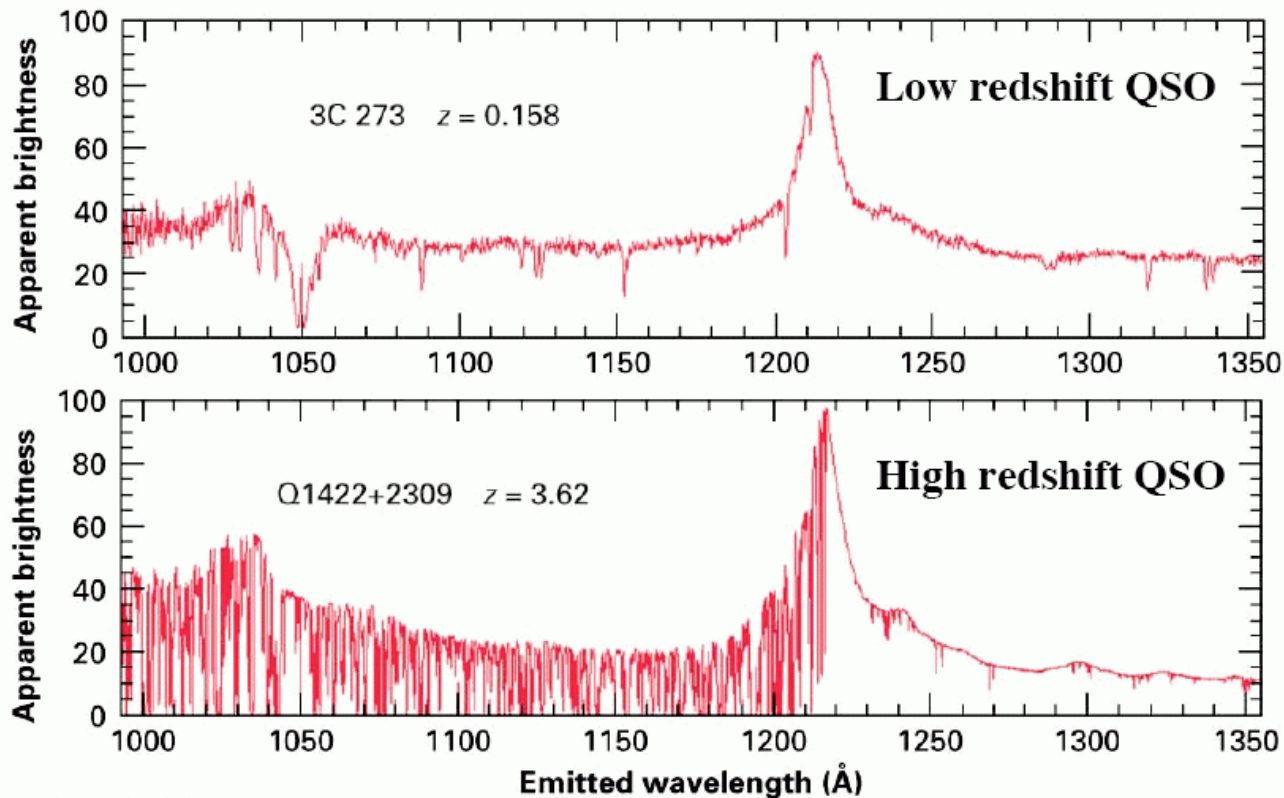
A partir des structures à grande échelle

- 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 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 effet de **lentille gravitationnelle**

Formation des amas aux
connections entre filaments



Détection des filaments grâce aux quasars



Forêt Lyman alpha (1216 Å) due à l'hydrogène neutre sur la ligne de visée de **quasars** distants

Détection de l'hydrogène neutre en émission (21 cm)

SKA: Square Kilometer Array



(Consortium international. Observatoires en Afrique du sud, et en Australie)