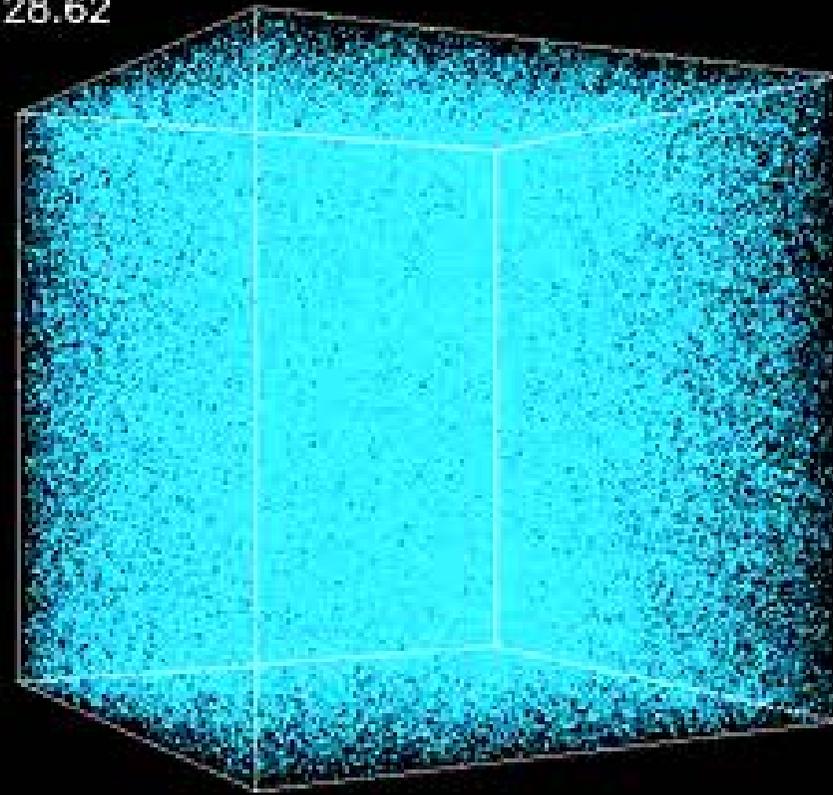




$Z=28.62$



Françoise Combes  
Observatoire de Paris  
21 Janvier 2012

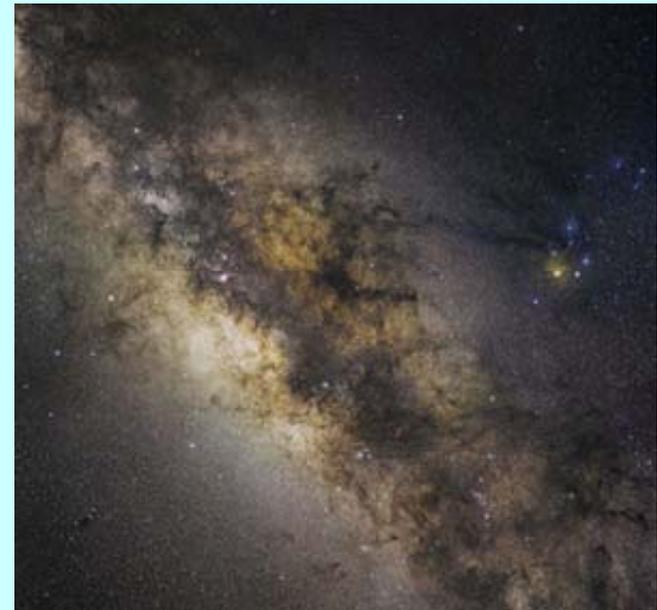
# Formation et Evolution des galaxies

# De quoi sont faites les galaxies?

- Du gaz d'**hydrogène**, avec un peu d'hélium
- Des étoiles (~200 milliards)
- Une pincée de poussières
- De la matière noire
- Des traces d'autres éléments (C, N, O, ... Fe)



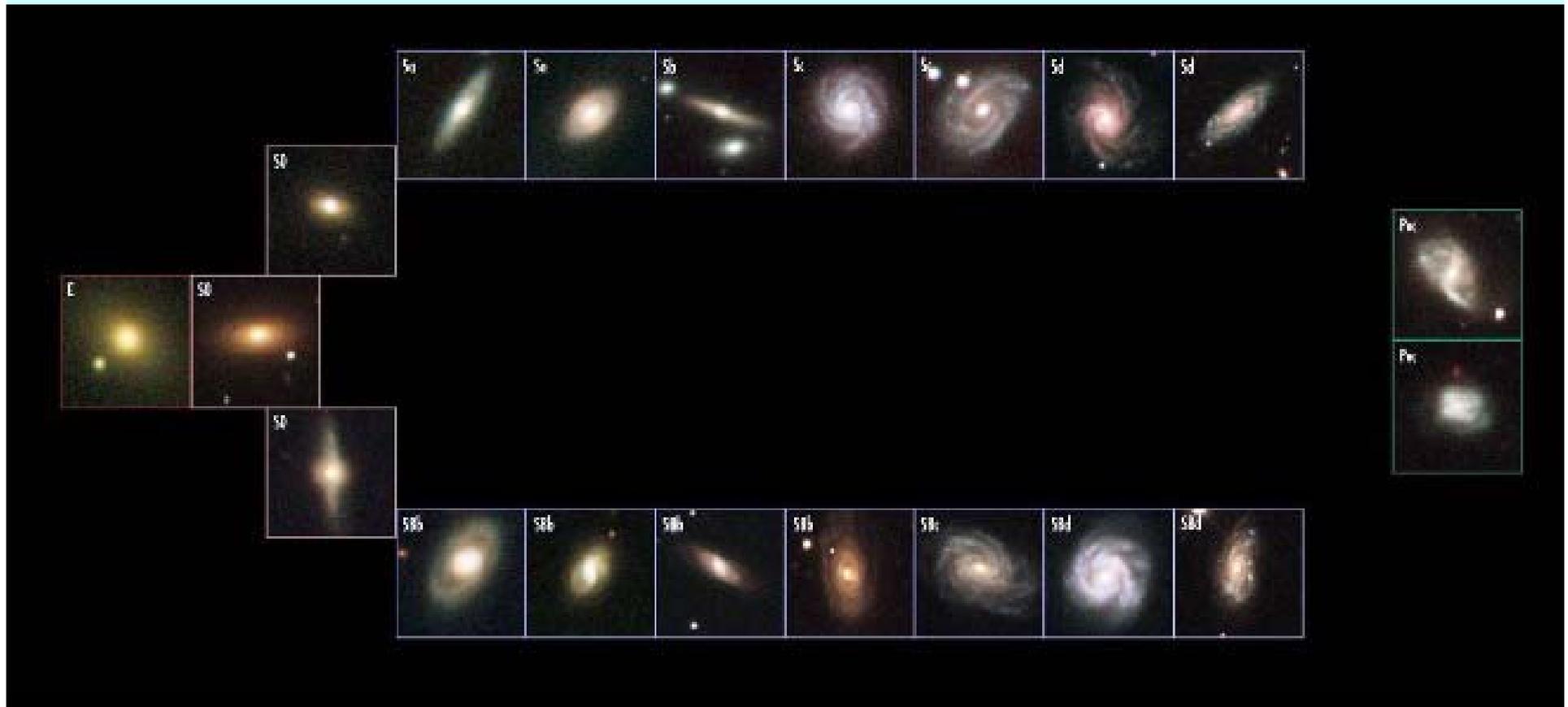
Messier 83



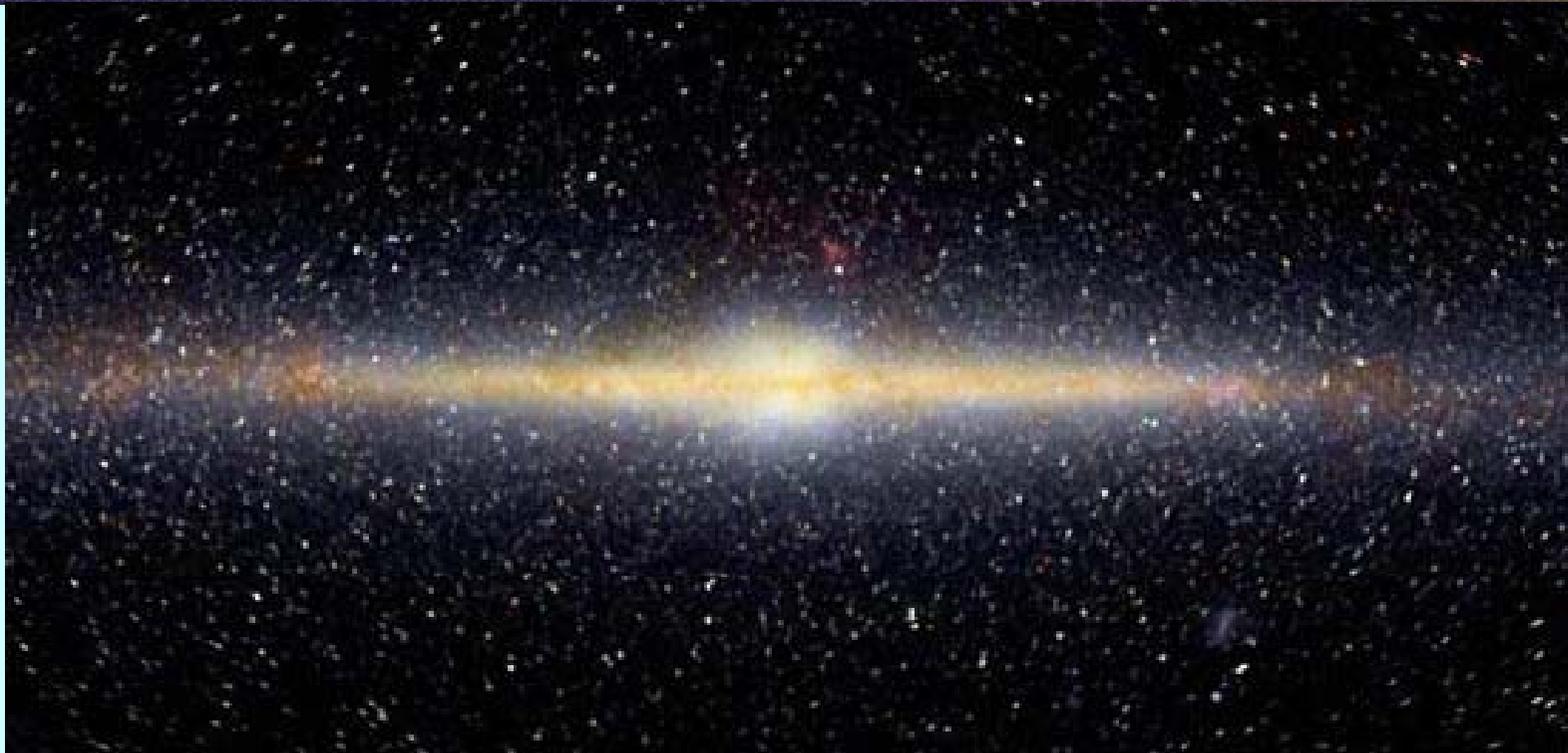
Voie Lactée

# Toutes sortes de galaxies

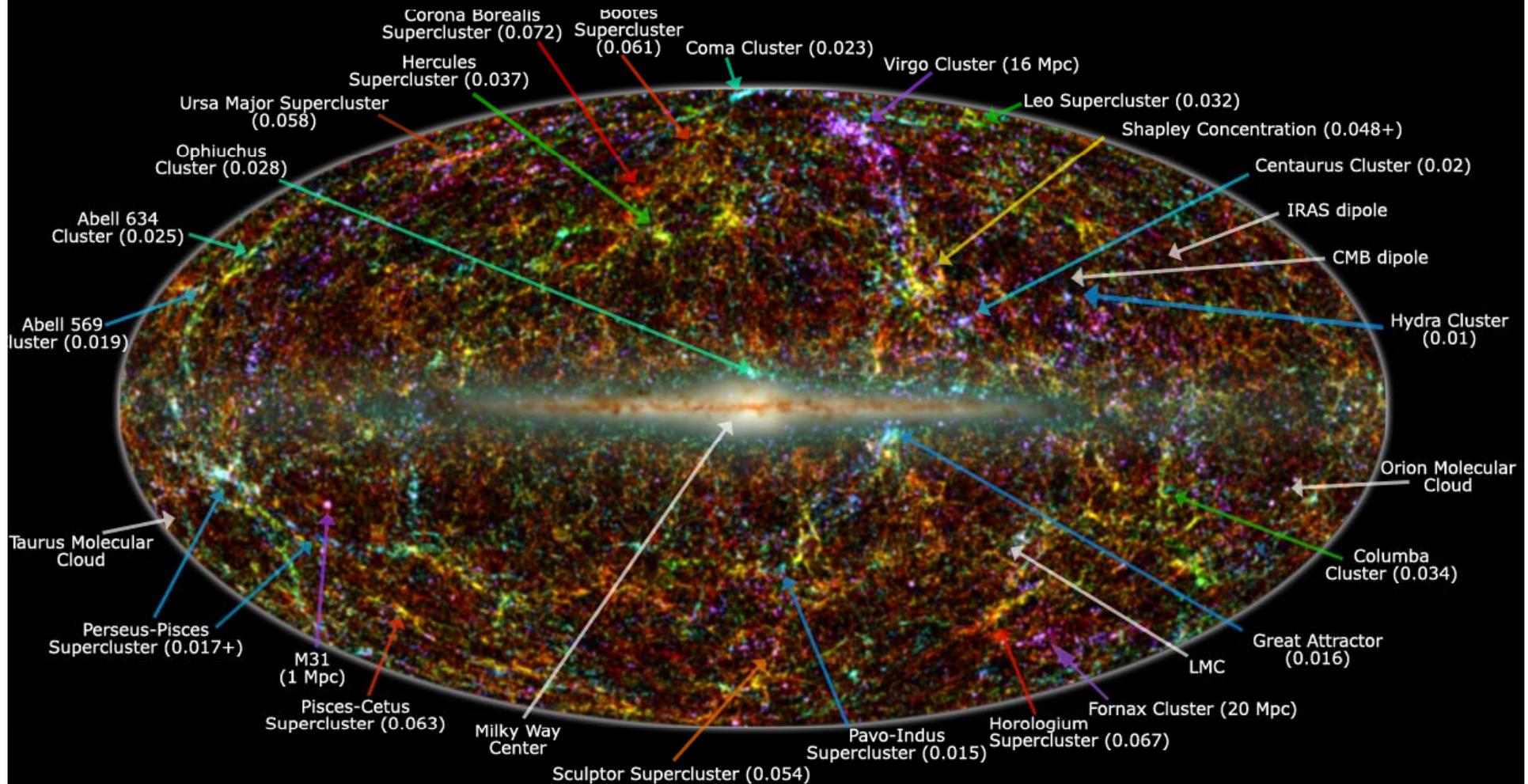
Elliptiques ... Bulbe dominant ... Spirales ... Irrégulières



# Aperçu en optique, infra-rouge

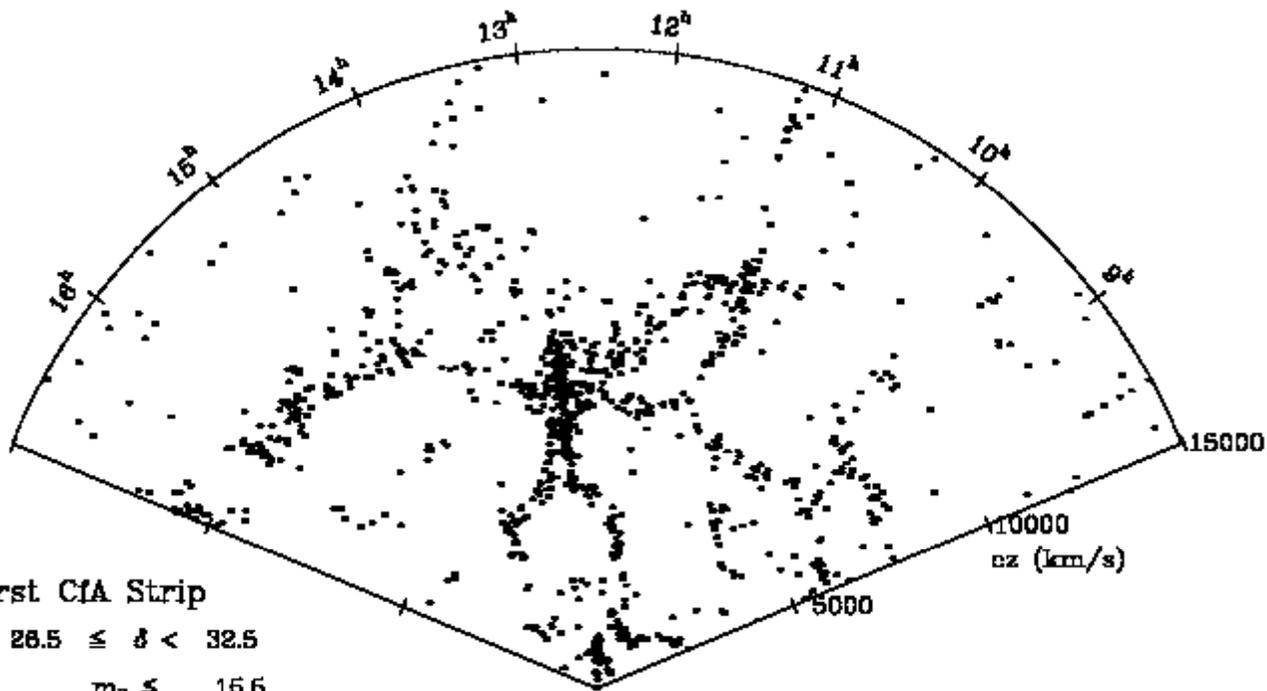


# Grandes structures de l'Univers local



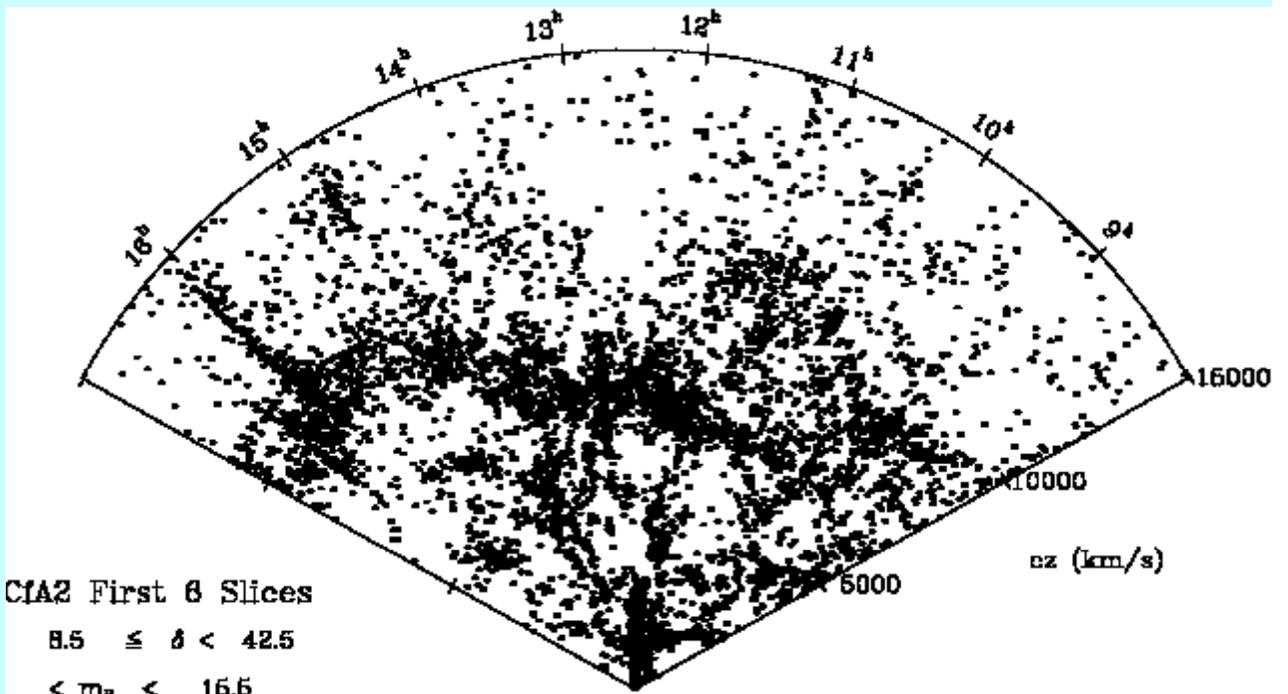
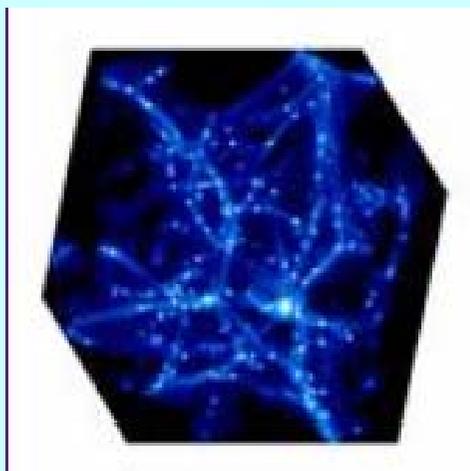
**Legend:** image shows 2MASS galaxies color coded by redshift (Jarrett 2004); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).  
Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)

## Amas et superamas proches



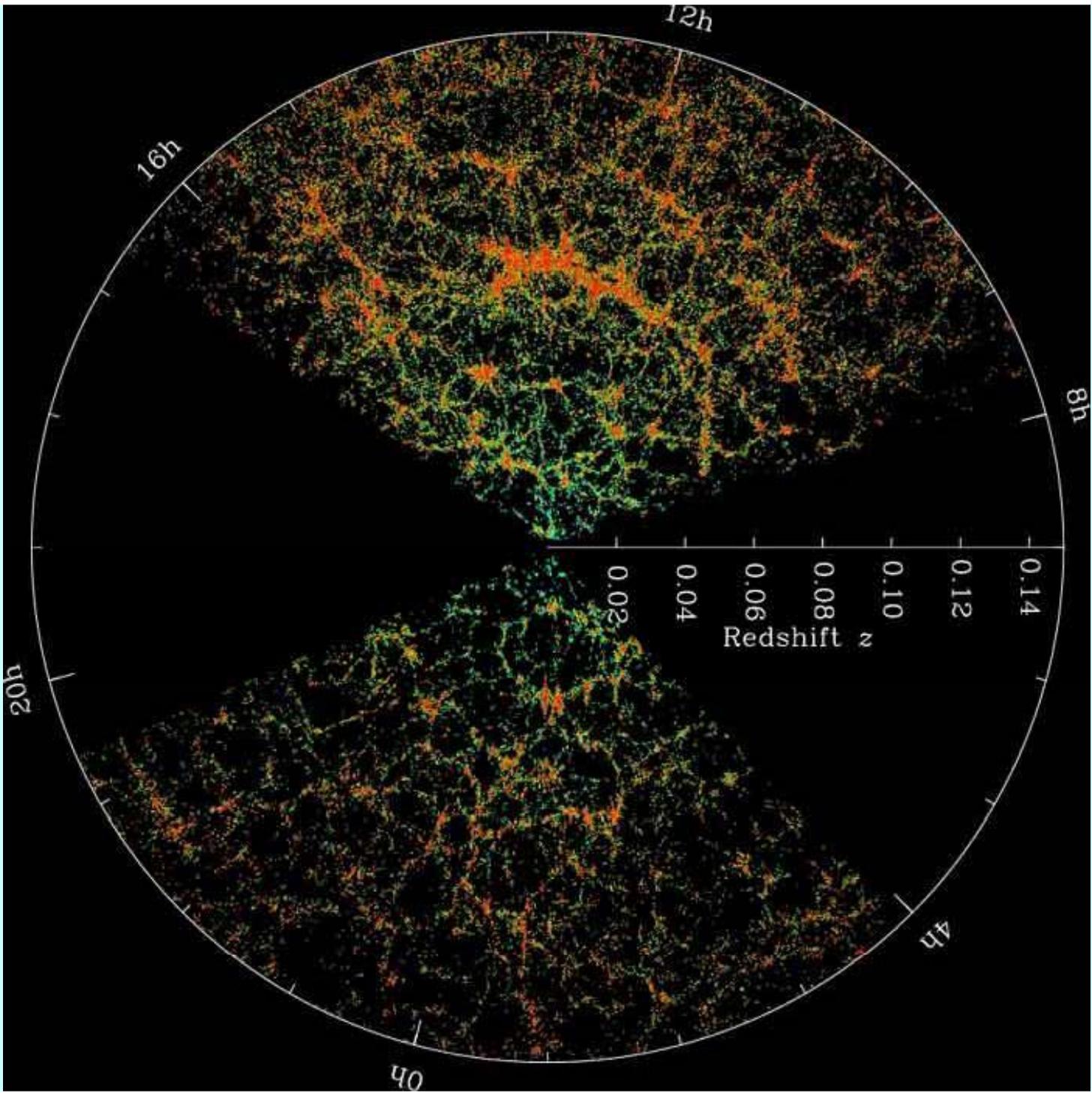
First CfA Strip

$26.5 \leq \delta < 32.5$   
 $m_B \leq 15.6$



CfA2 First 6 Slices

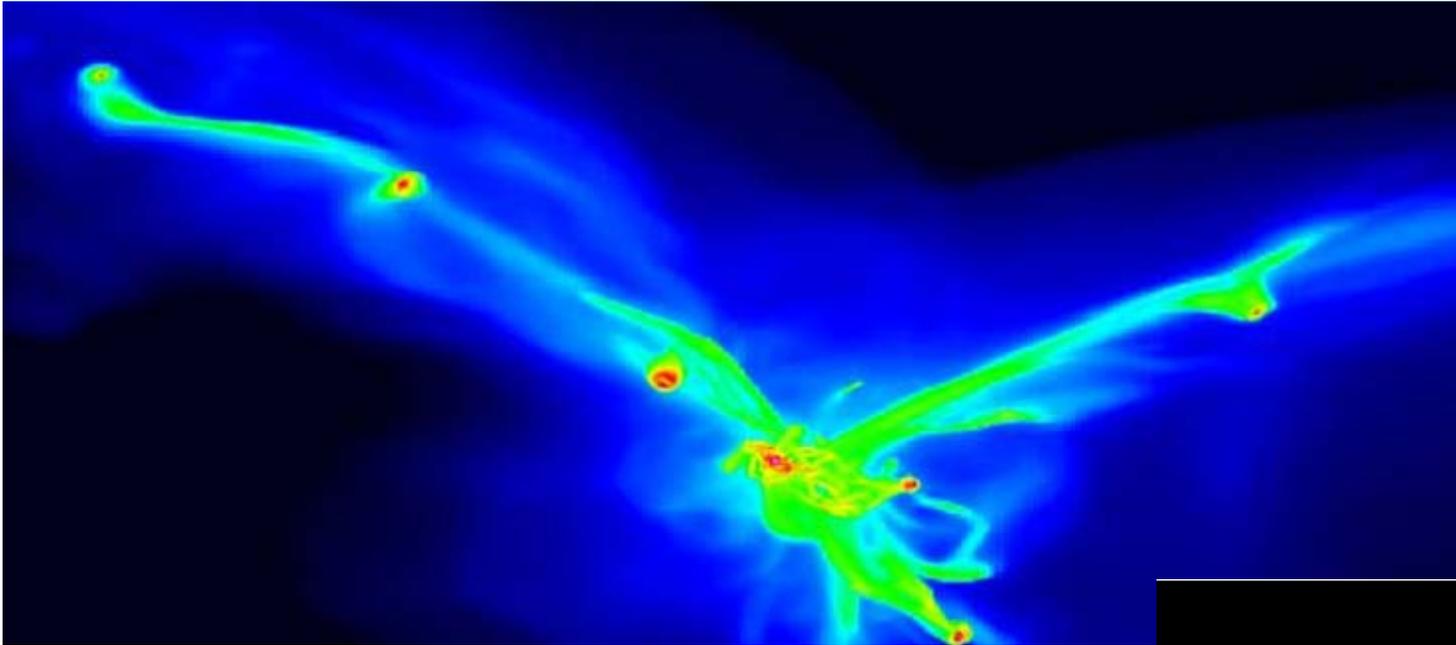
$8.5 \leq \delta < 42.5$   
 $< m_B < 16.6$



# Expansion de l'Univers et décalage vers le rouge

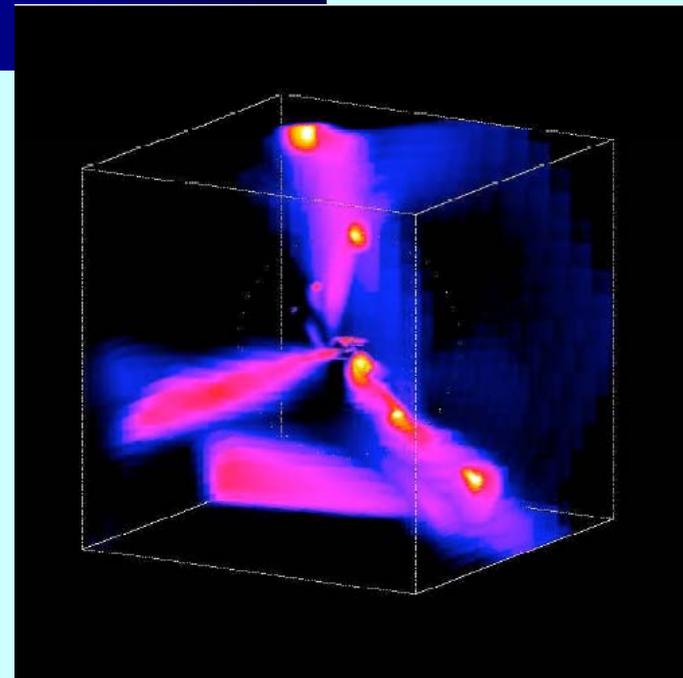


# Filaments Cosmiques



Galaxies se formant dans les filaments,  
et amas de galaxies à la  
croisée des filaments

→ Accrétion de gaz



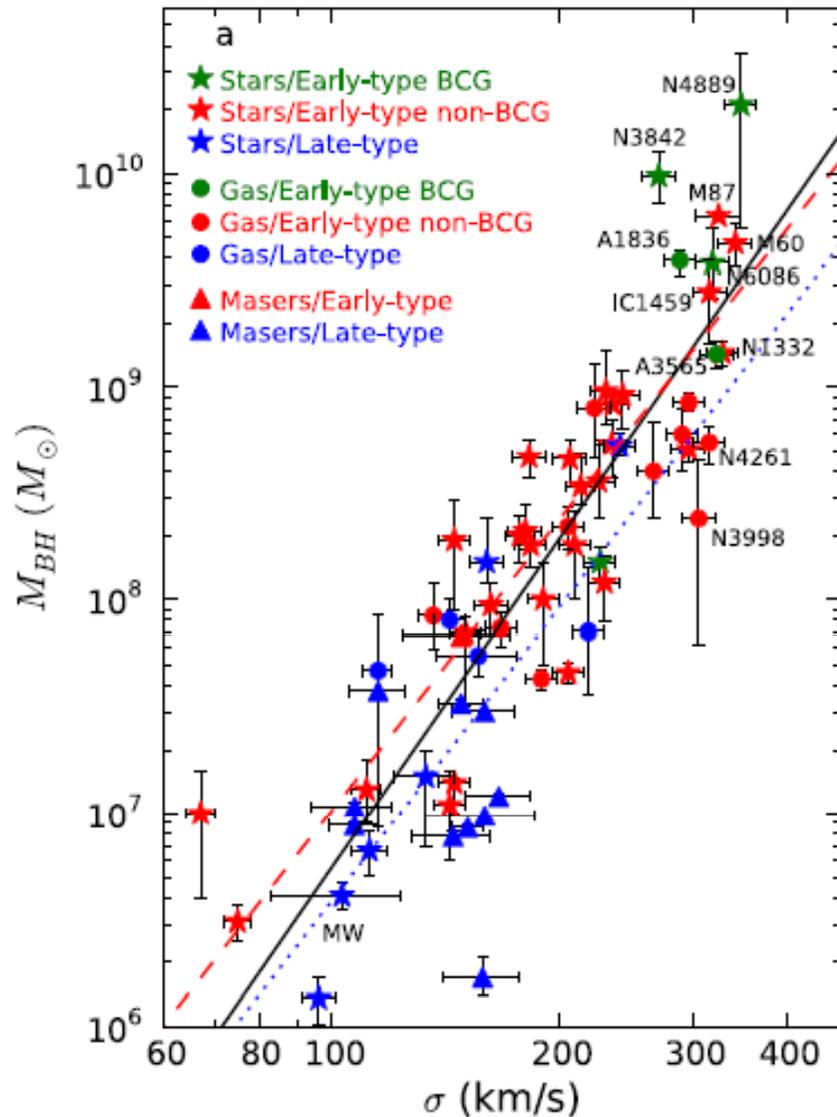
# Dans chaque galaxie, un trou noir massif

- Trous noirs de quelques millions à qq milliards de  $M_{\text{solaires}}$

## Phénomène de Noyaux Actifs de Galaxies

- Quasars** (ou quasi-stars, car objets ponctuels, très loin)  
**1000 fois** la luminosité de la Voie Lactée
- Rendement exceptionnel de l'énergie gravitationnelle **10%  $Mc^2$**   
Alors que le rendement nucléaire dans les étoiles  $< 1\%$

# Masse du trou noir et masse du bulbe

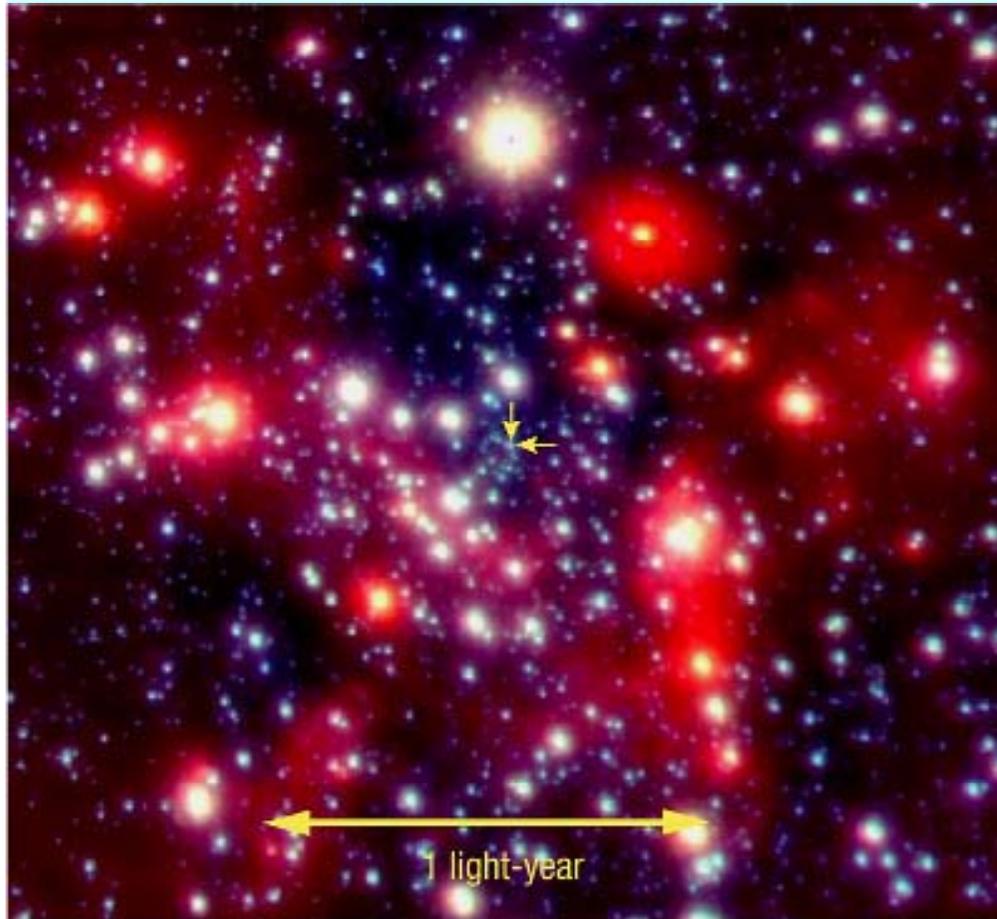


Les deux masses sont proportionnelles  $\sim 1/700$

Parfois, on arrive un peu au-dessus, dans les amas de galaxies

Galaxies cannibales au centre

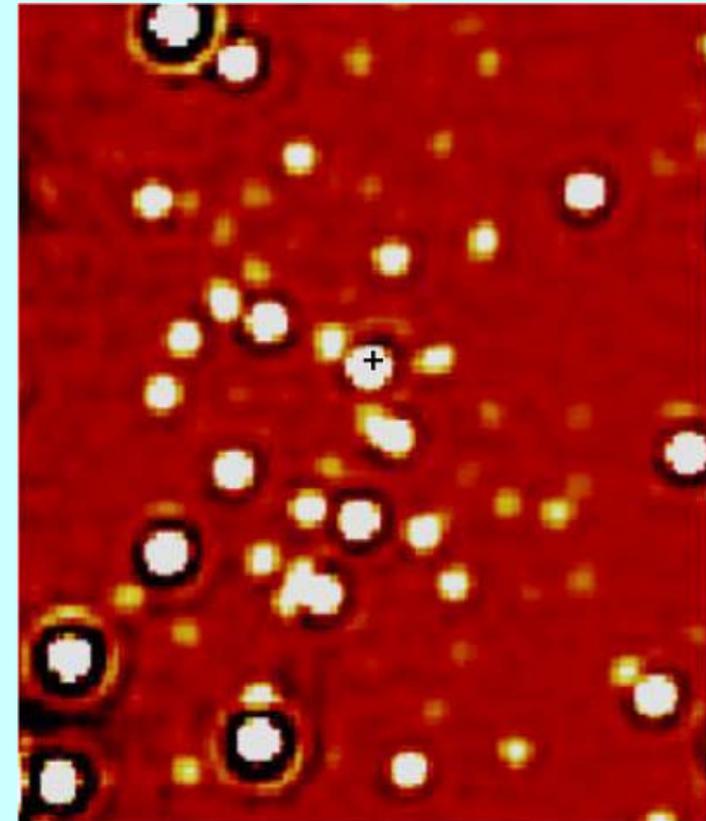
# Astrométrie et mouvements propres au centre galactique



The Centre of the Milky Way  
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

©European Southern Observatory



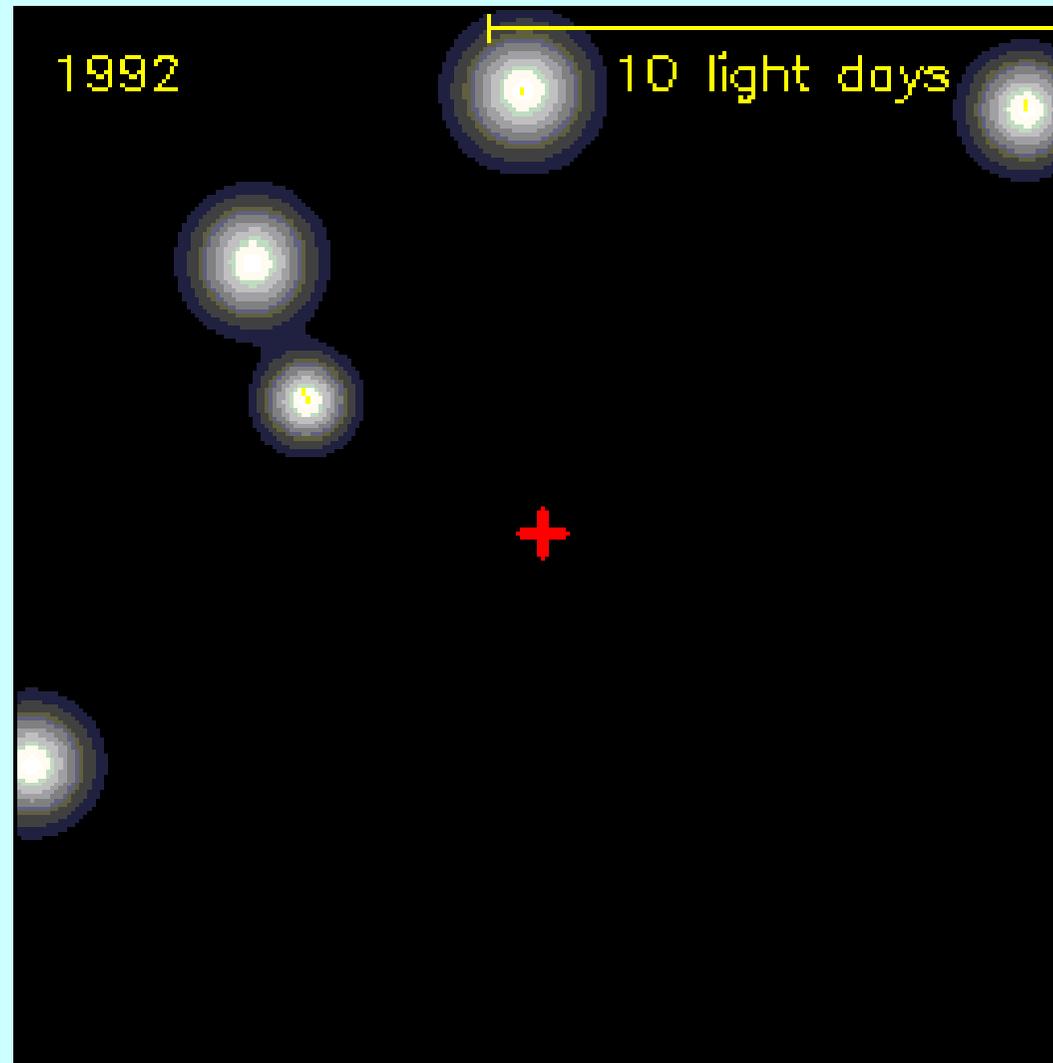
The Centre of the Milky Way (detail)  
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23b/02 (9 October 2002)

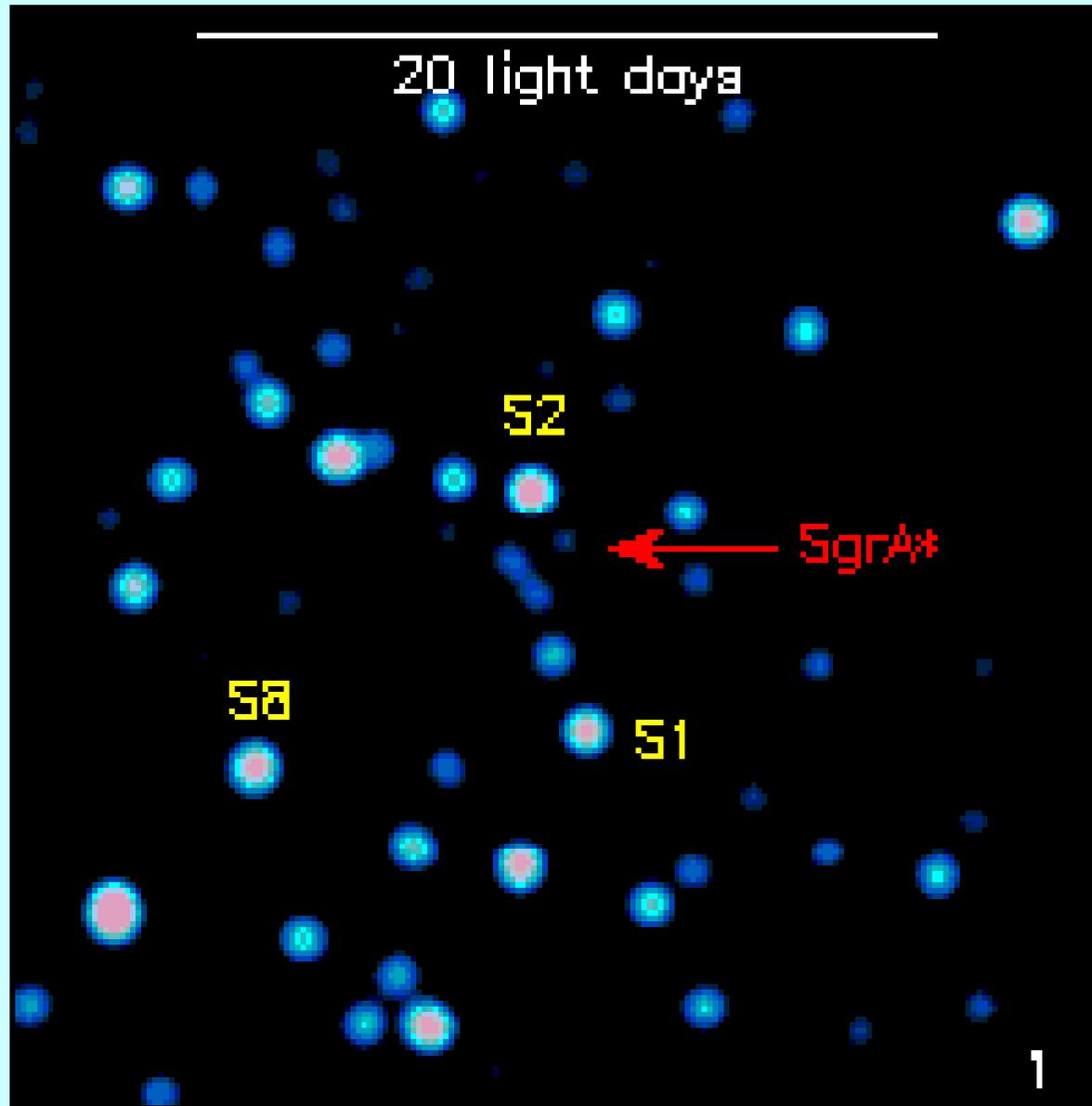
©European Southern Observatory



# Animation du mouvement des étoiles, dans le centre de la Voie Lactée

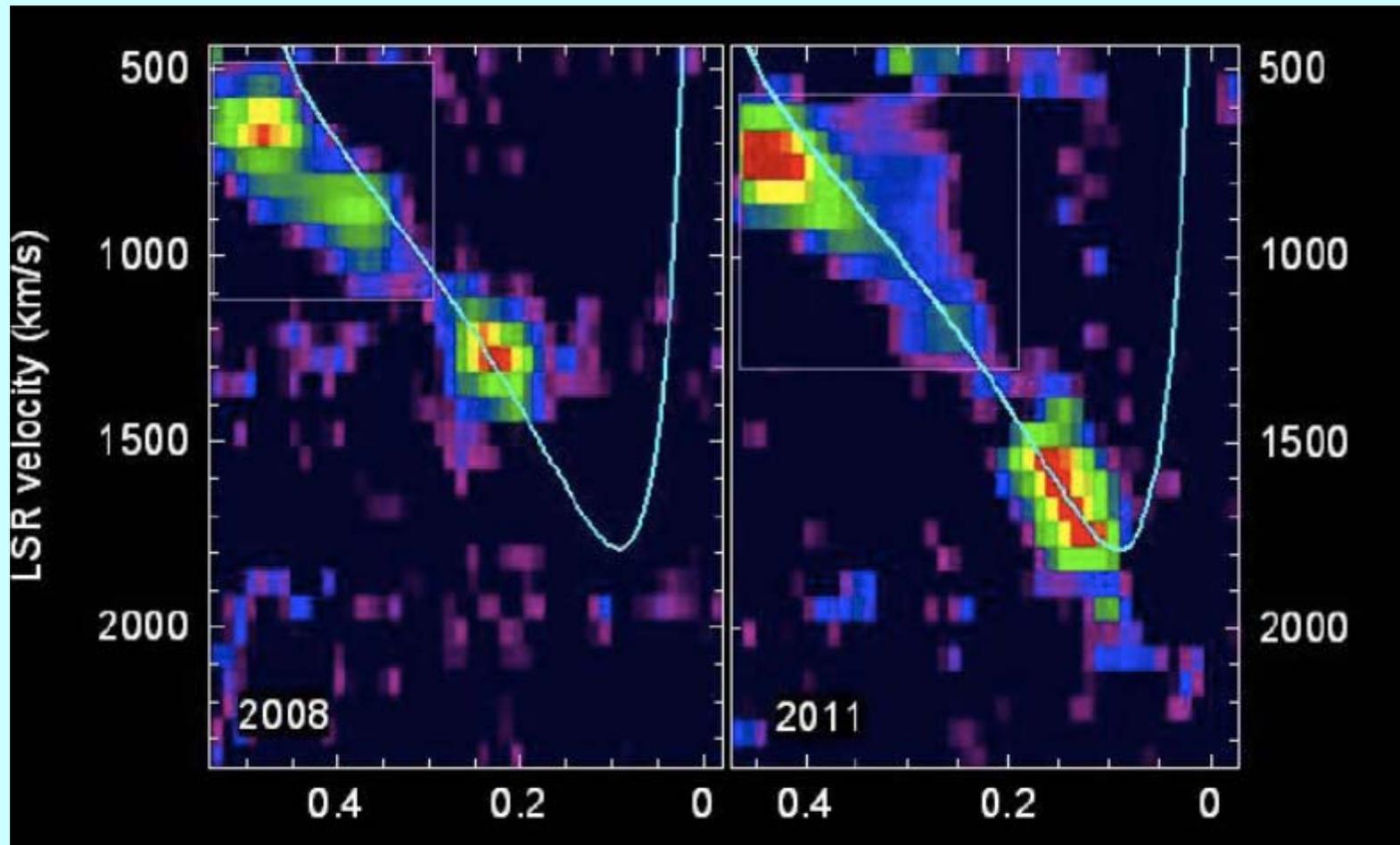


# Sursaut Infrarouge du trou noir de la Galaxie



1.7microns, NACO, VLT, 30min, May 2003

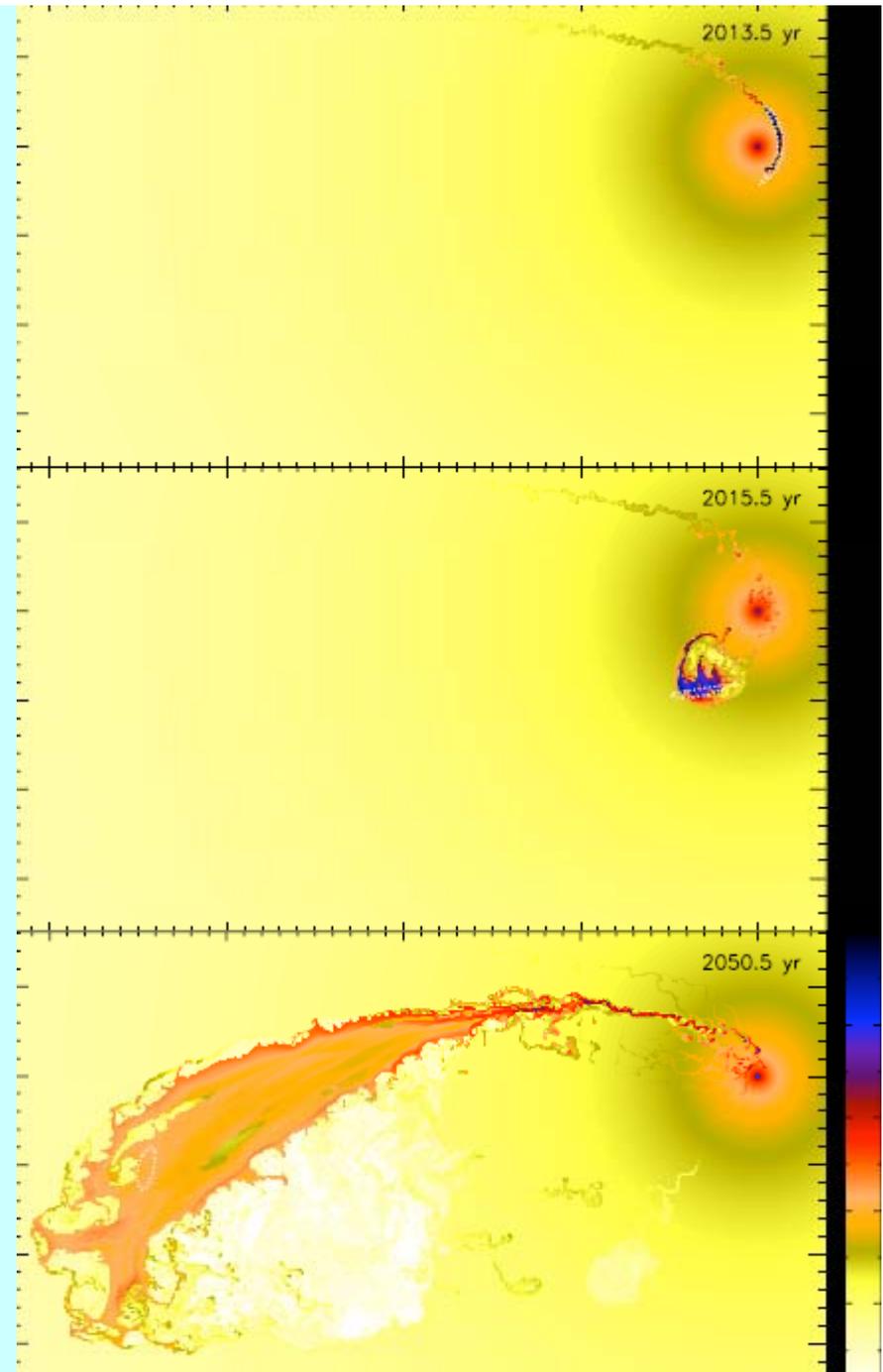
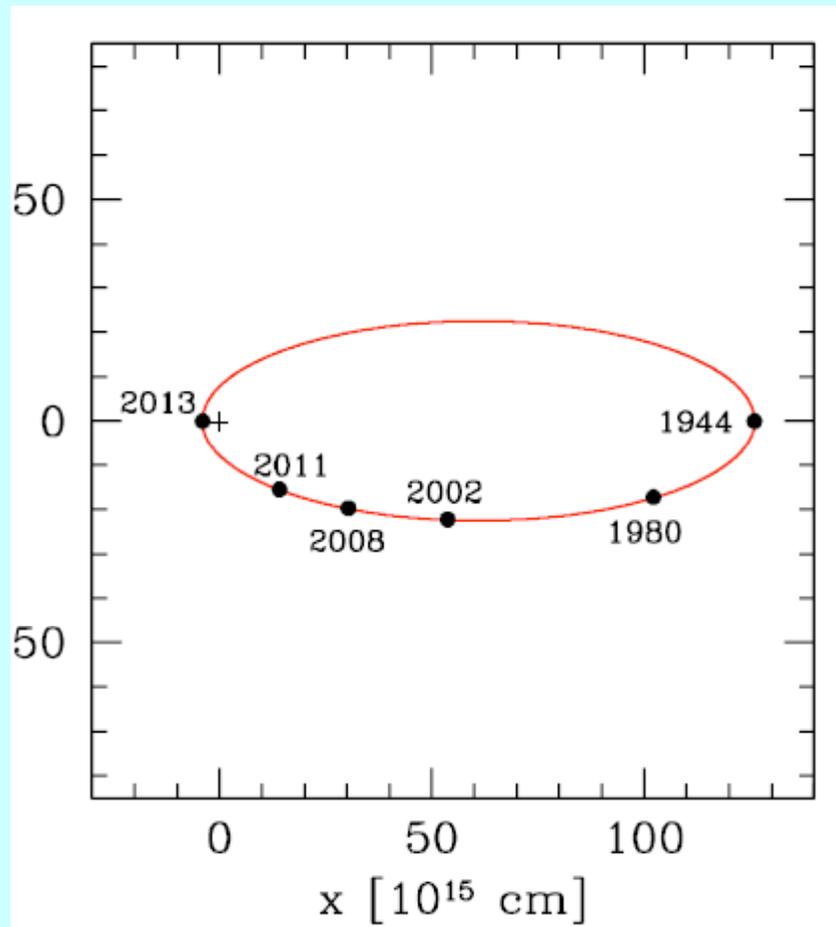
# Découverte d'un nuage de gaz (Nature 2011)



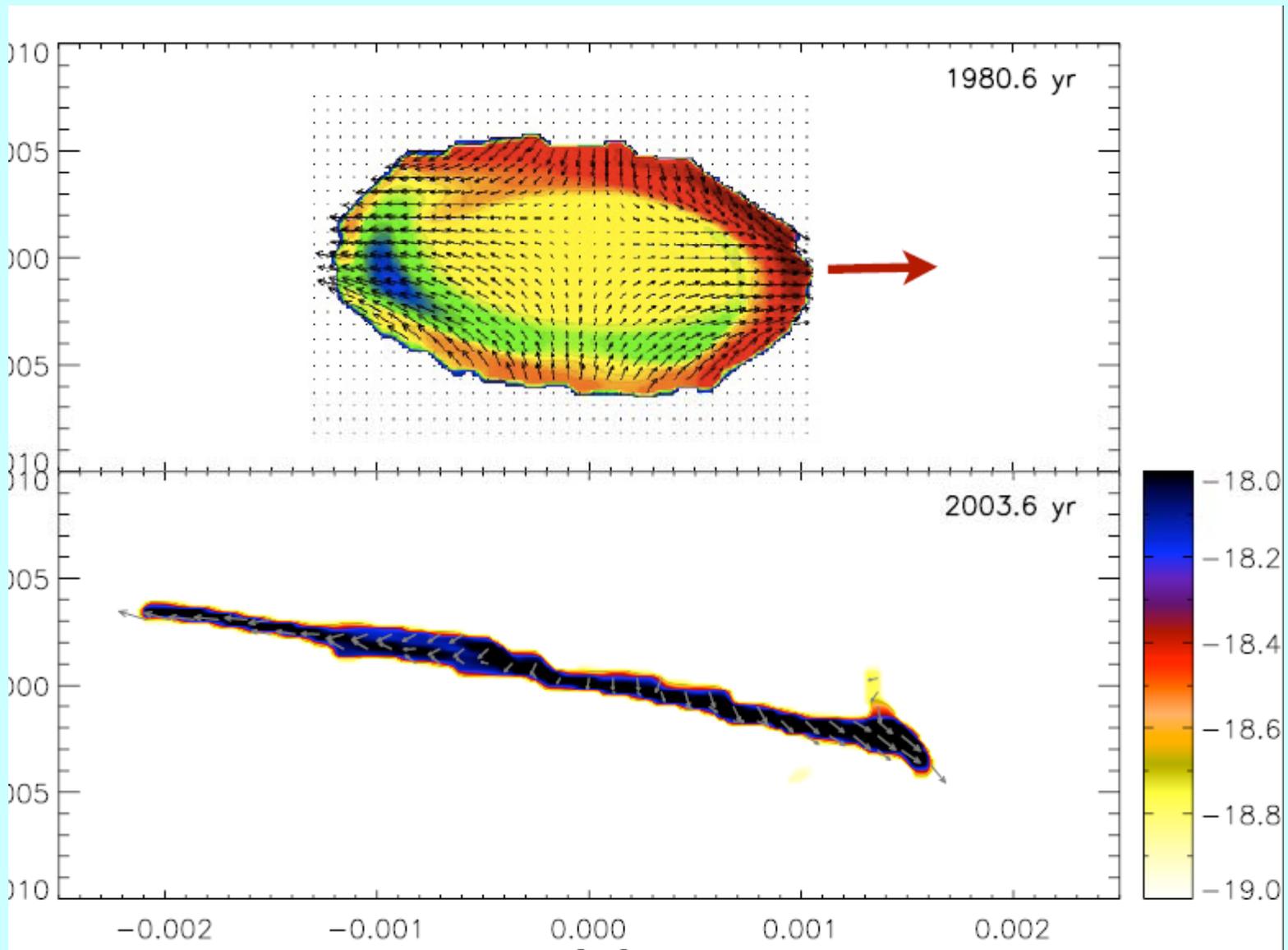
Distance au trou noir en arcsec (=0.1 al)

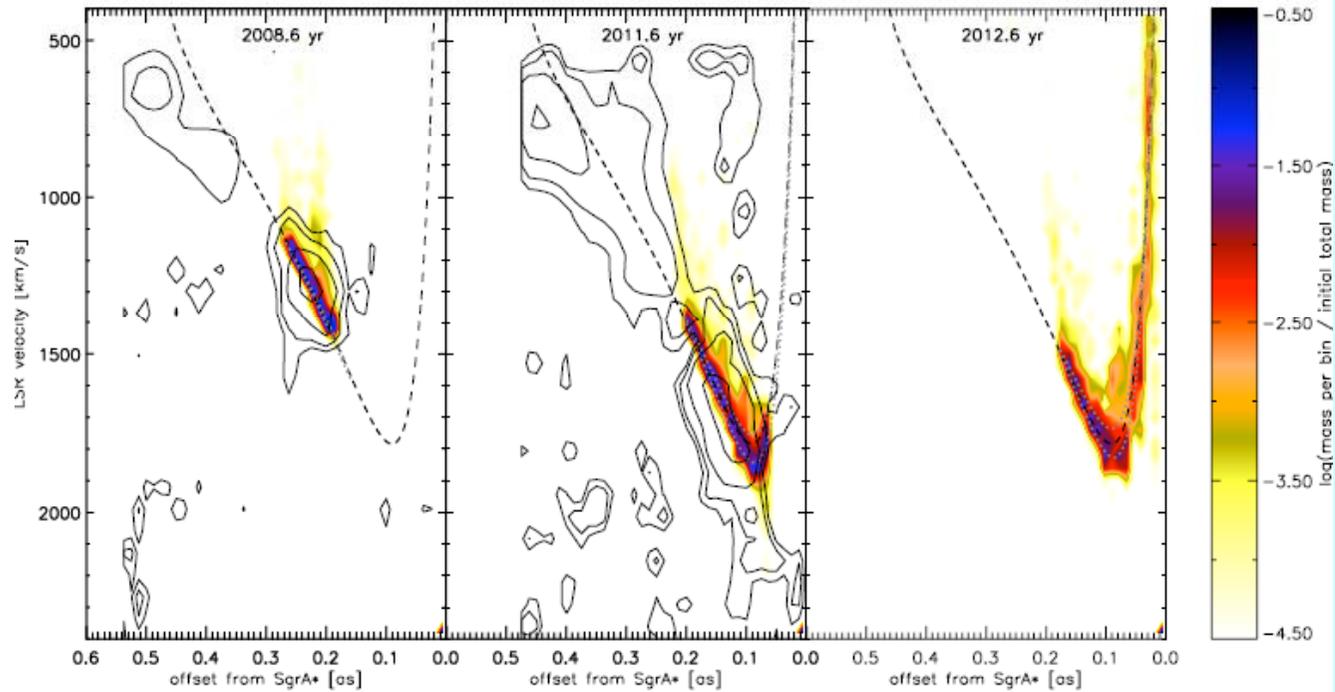
# Orbite du nuage de gaz ( $10^{-5} M_{\odot}$ )

137 ans de période



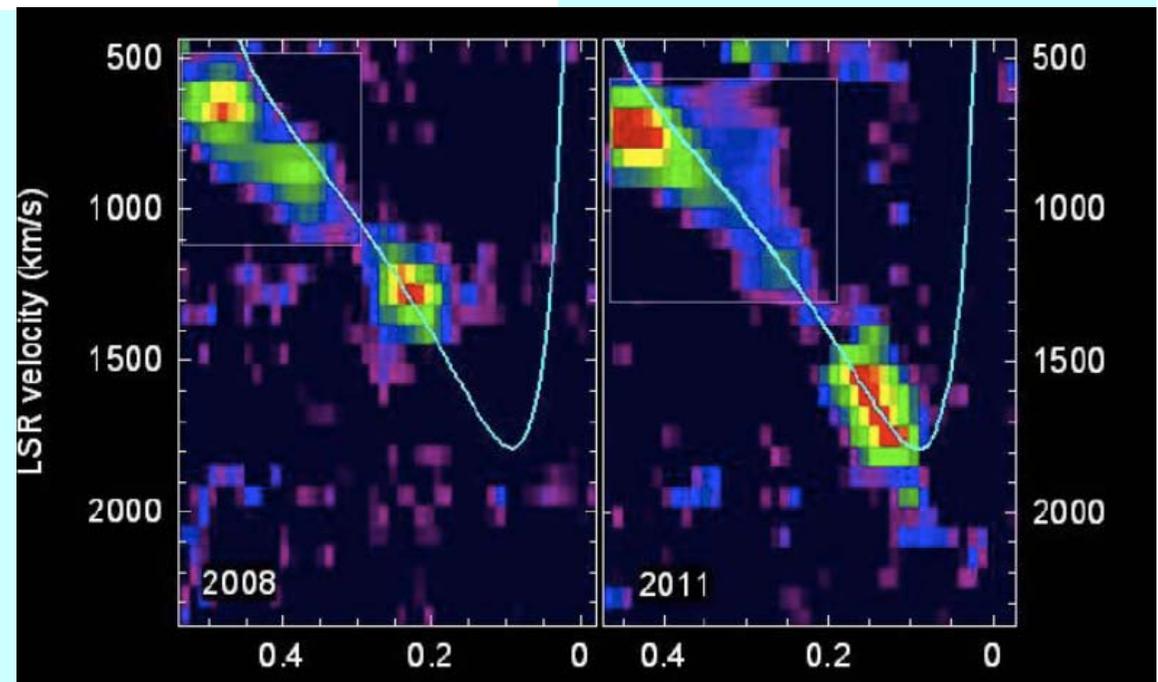
# Comment le gaz est arrivé?

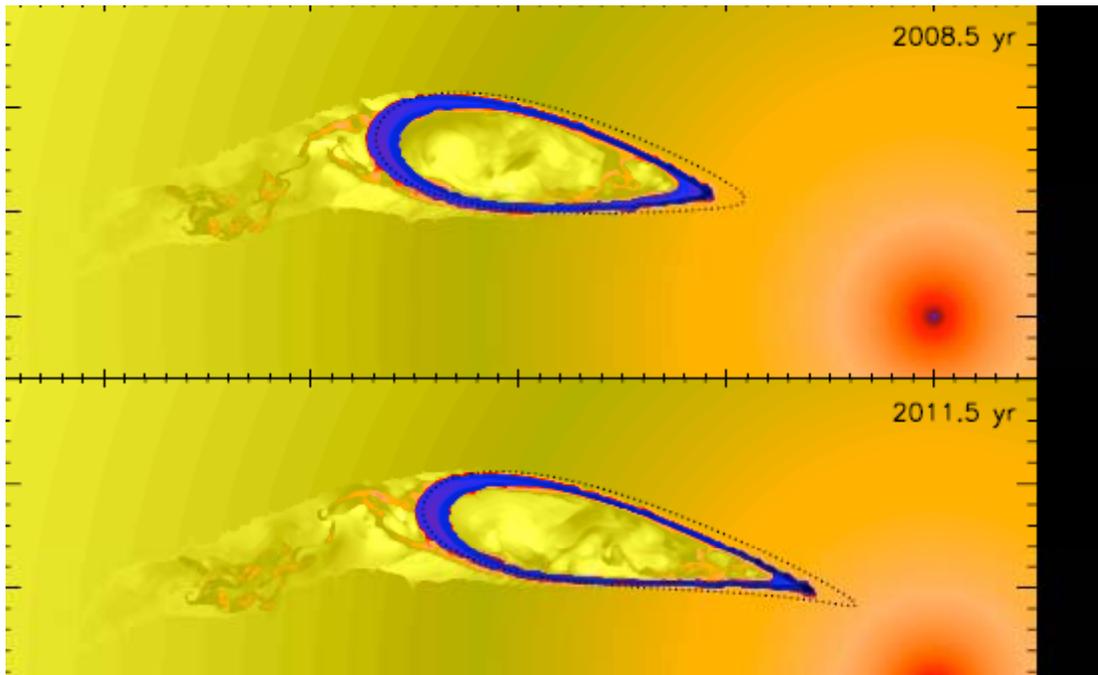




Un seul nuage?

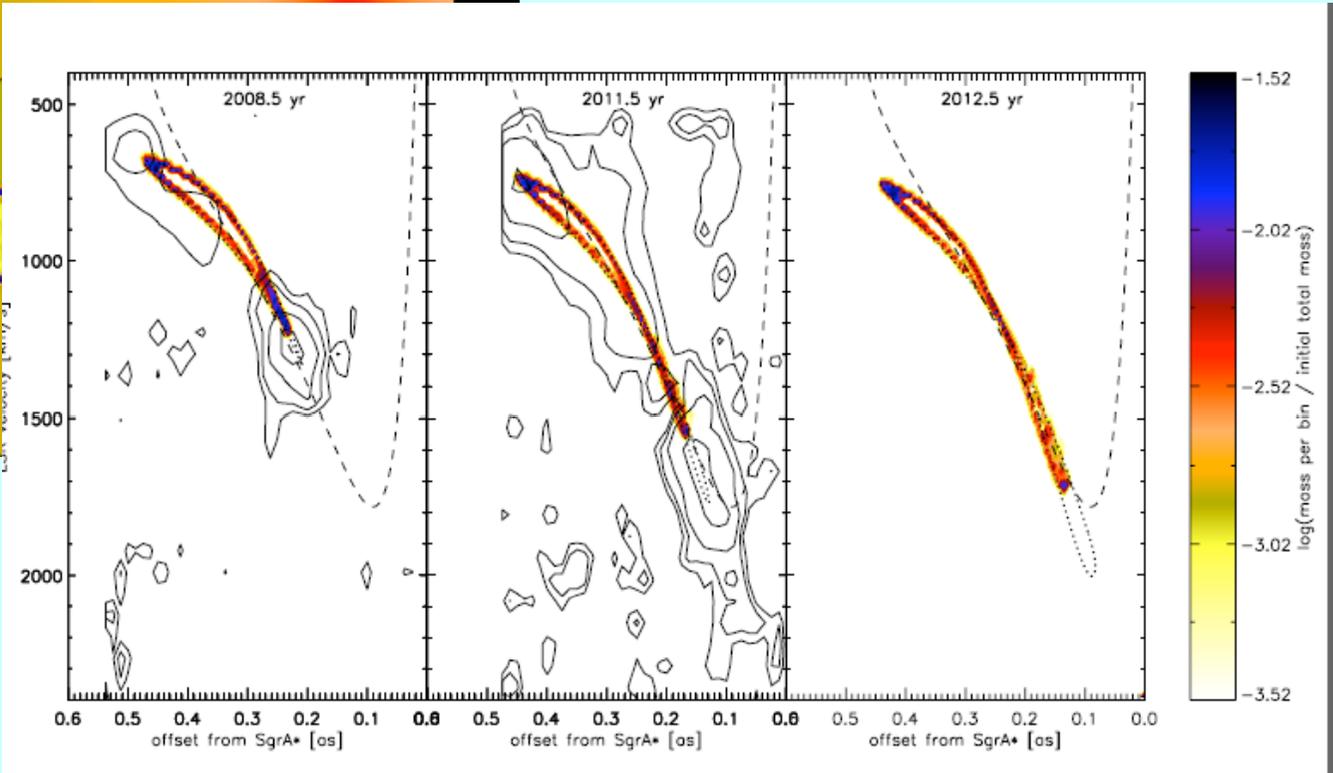
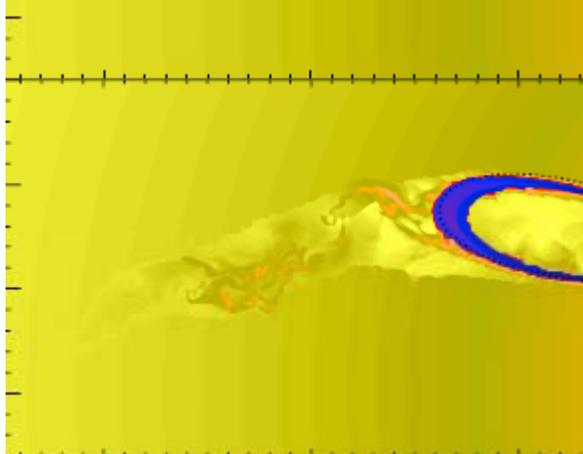
Ne semble pas  
ressembler aux  
observations





Peut-être provient d'un anneau (supernovae?)

Ou résonance de Lindblad?

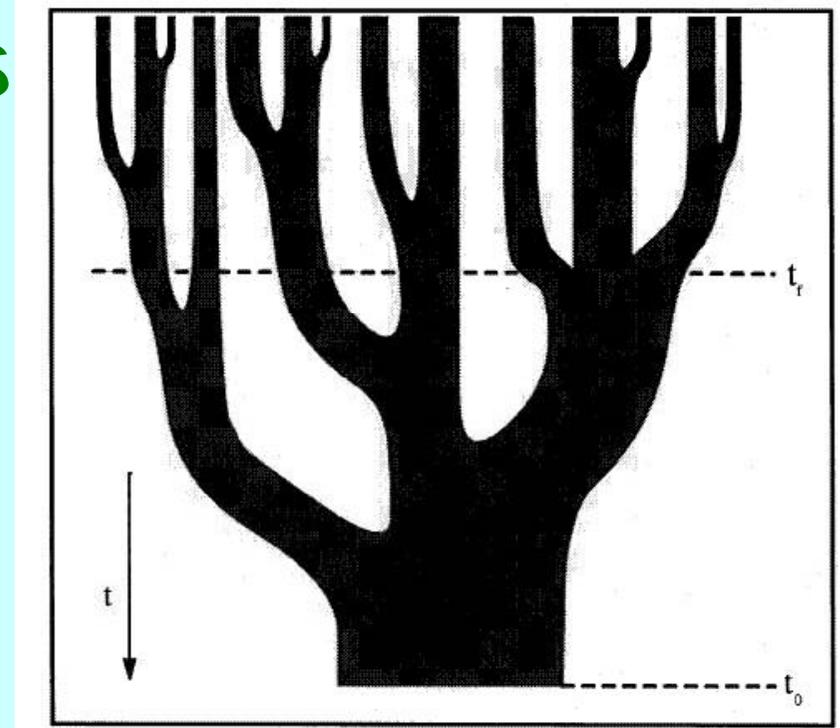


# Formation hiérarchique des galaxies

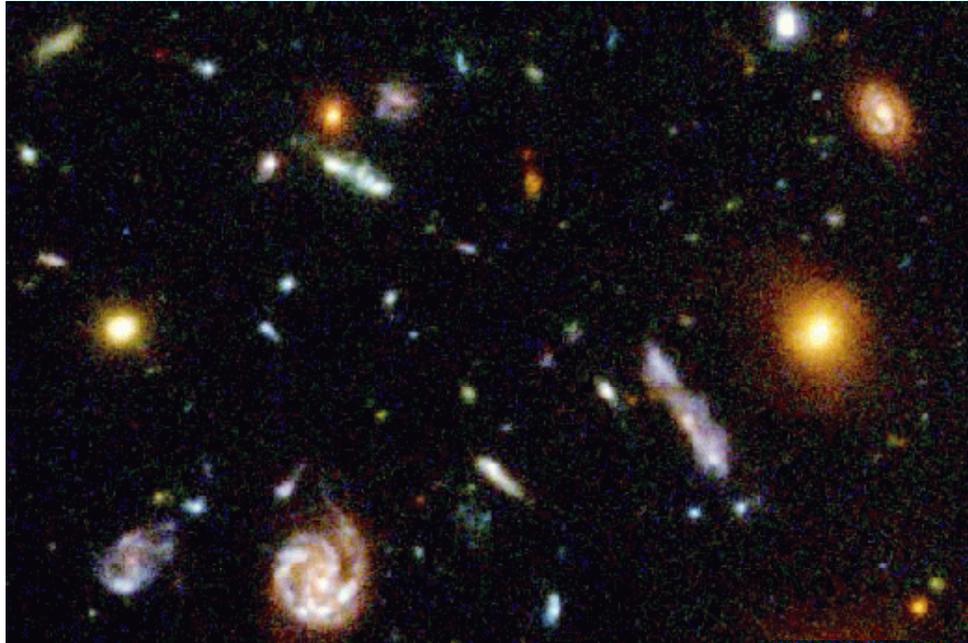
Les plus petites structures se forment en premier, de la taille de galaxies naines ou amas globulaires

Par **fusion successive et accréation** les systèmes de plus en plus massifs se forment

Ils sont de moins en moins denses



# Galaxies dans l'Univers jeune



Voir plus loin, et remonter dans le temps

Aujourd'hui jusqu'à  $z \sim 6$   
(ou 95% de l'âge de l'Univers)

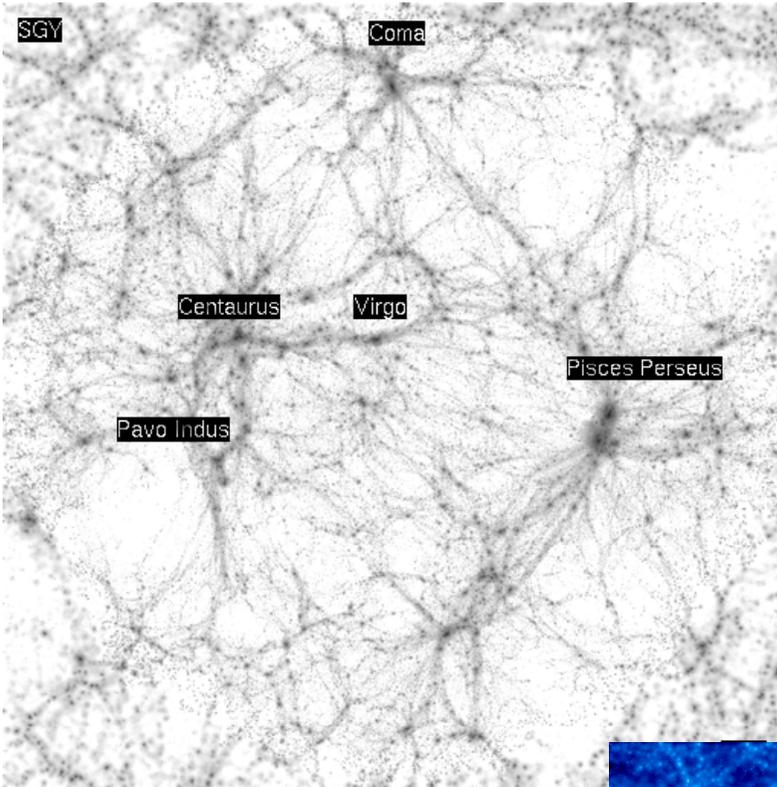
Galaxies plus nombreuses

Formation de plus d'étoiles

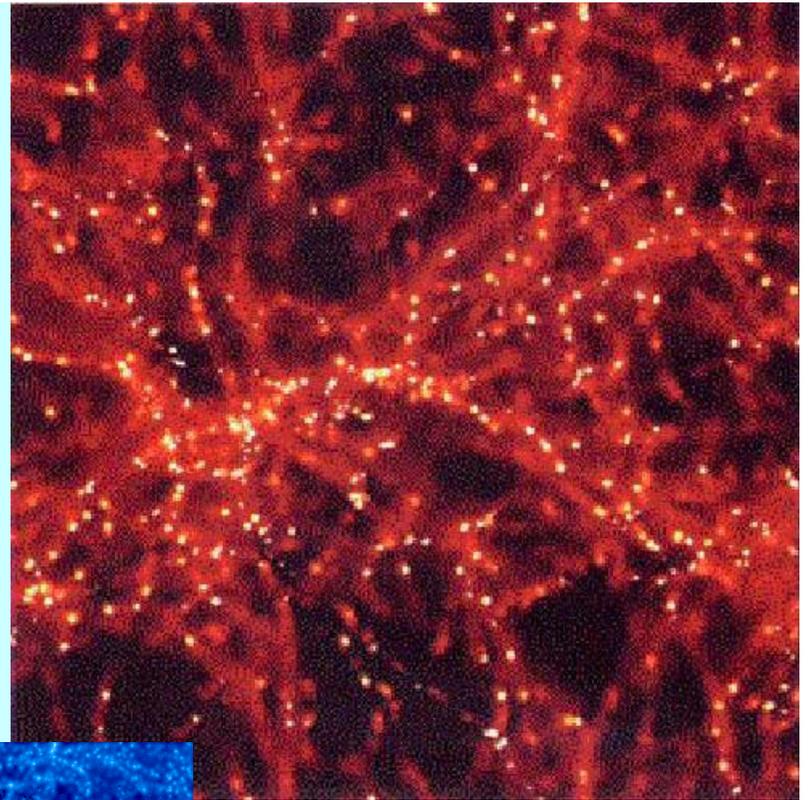
Noyaux plus actifs





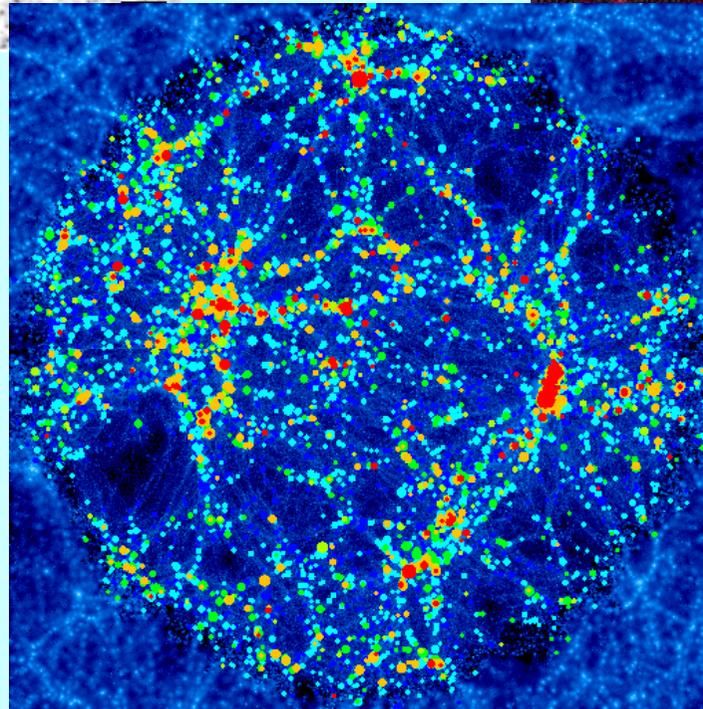


Gaz



Matière noire CDM

Simulations

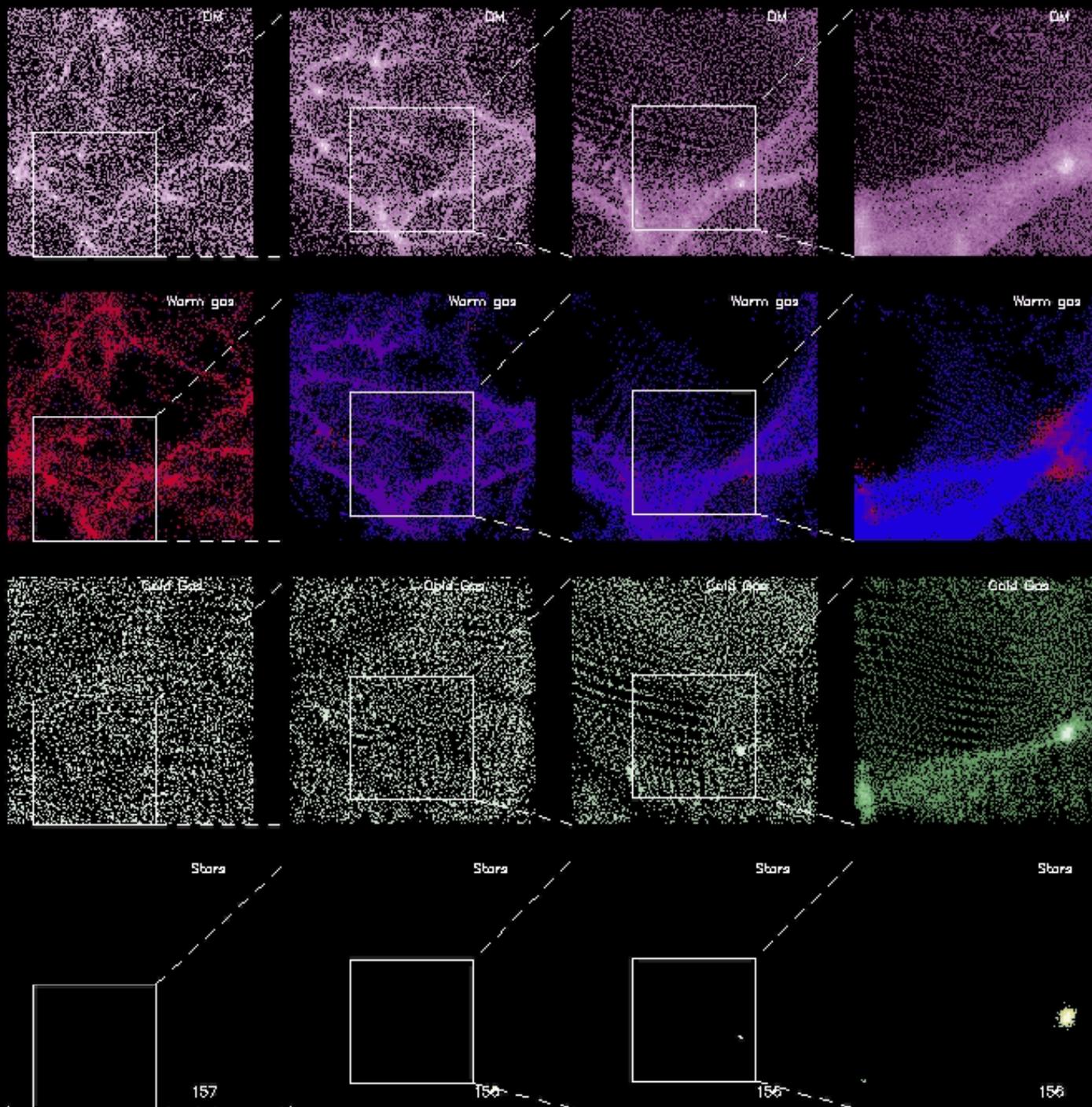


Galaxies

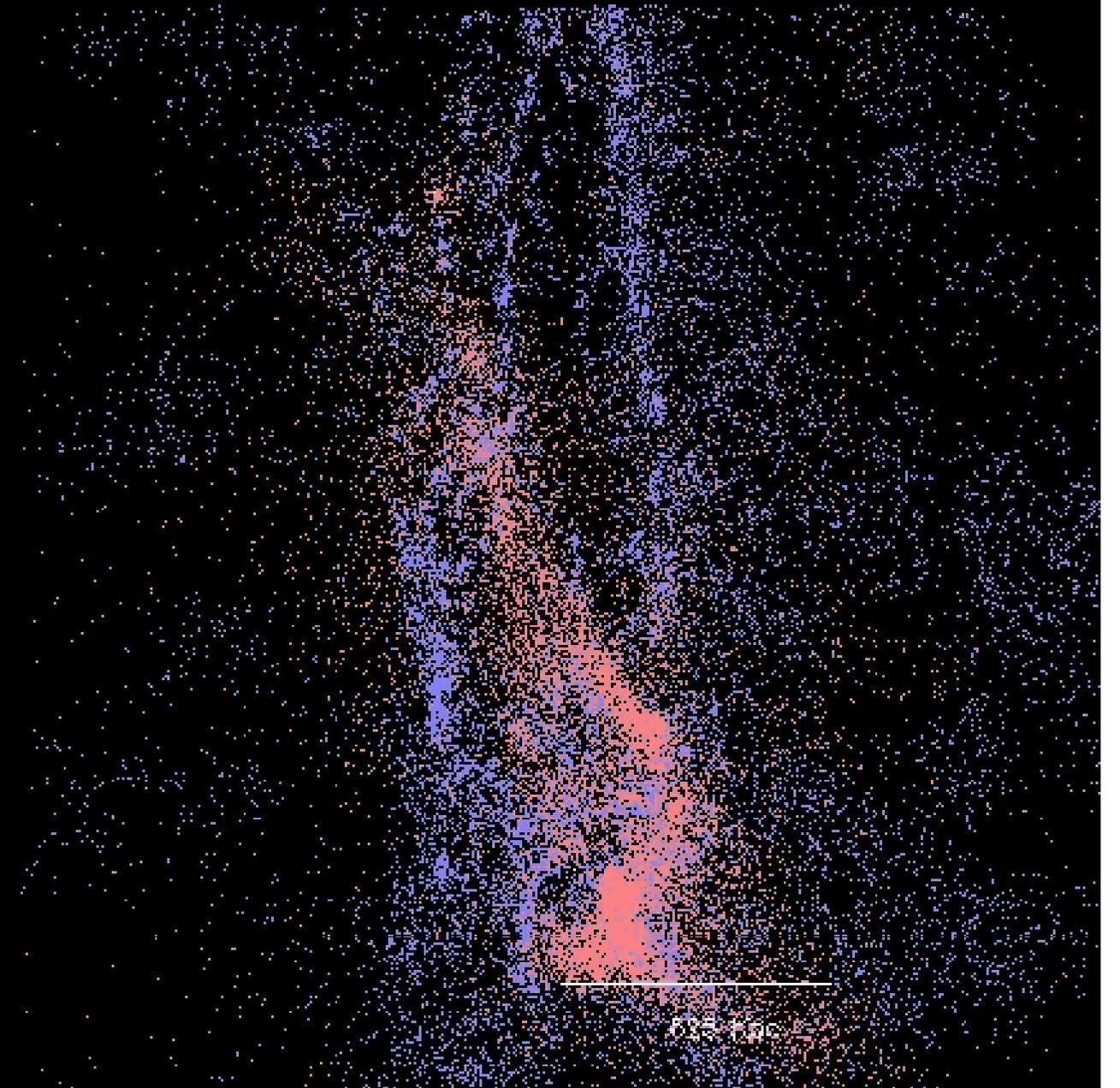
4 « phases »

4 Niveaux de zoom  
de 20 à 2.5 Mpc.

$z = 3$ . (partant  $z=10$ .)



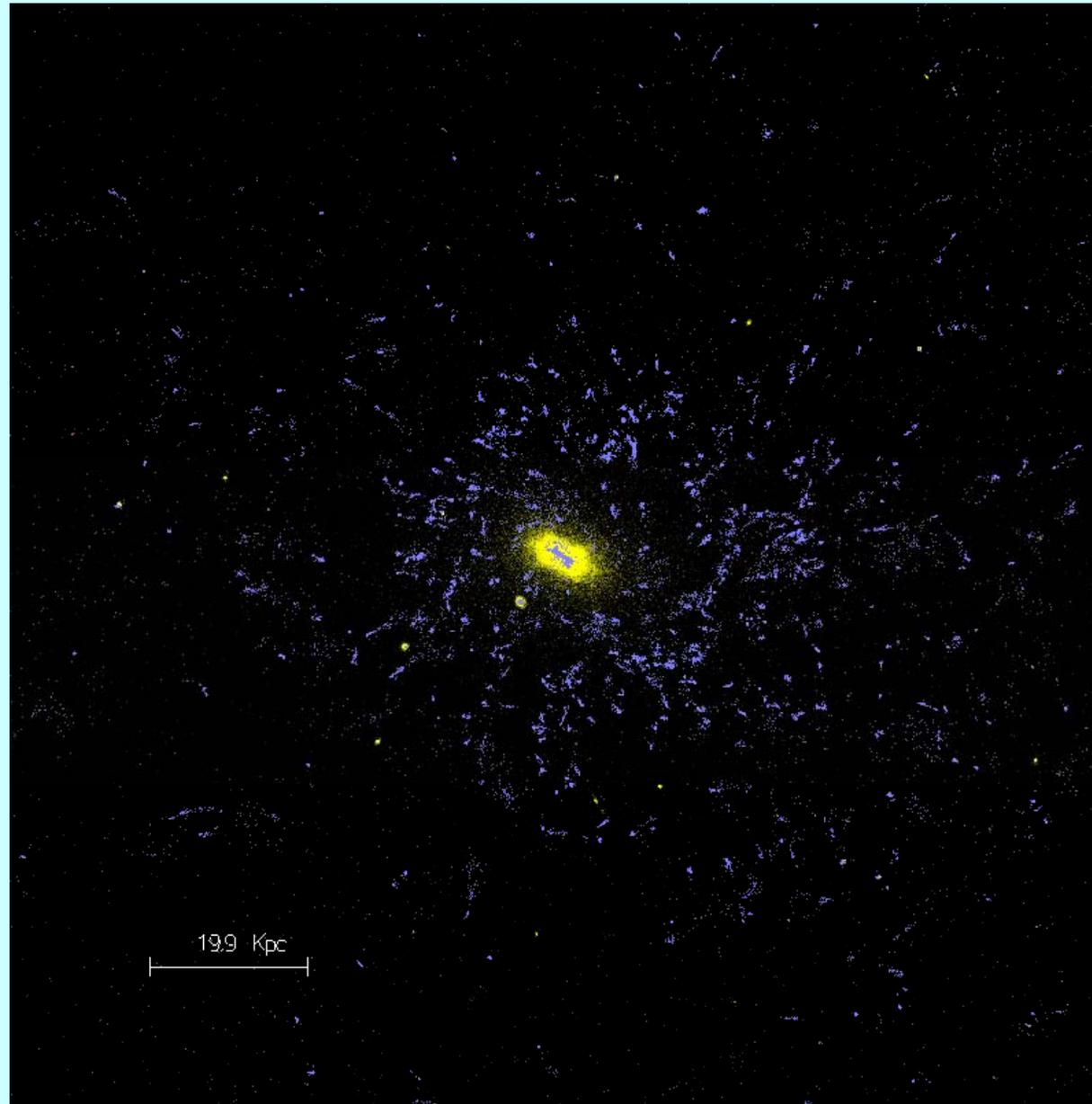
# Galaxies et Filaments



Multi-zoom

100 kpc

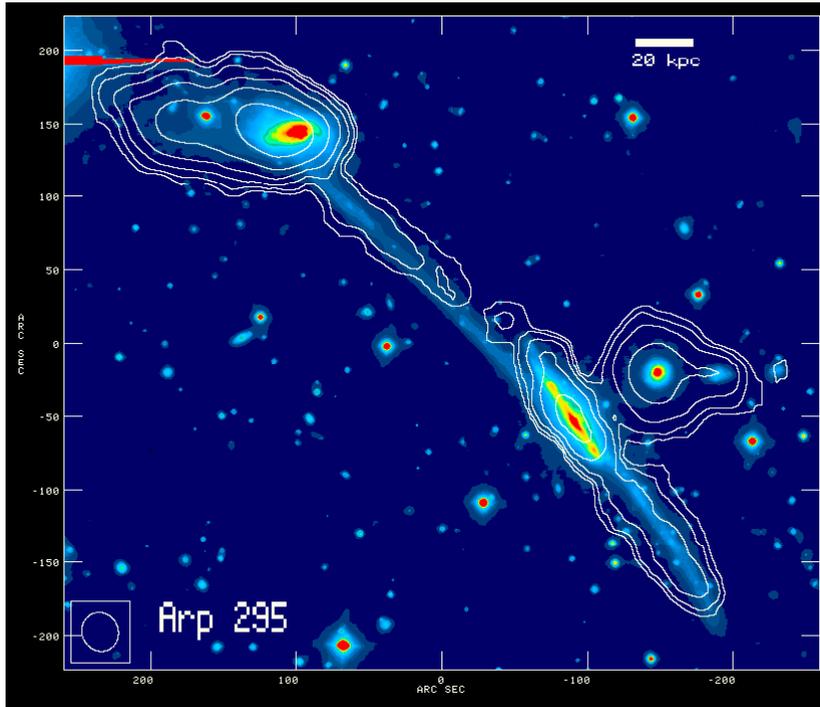
# Interactions entre galaxies → fusion



## Nombreux exemples d'interactions: Arp 188



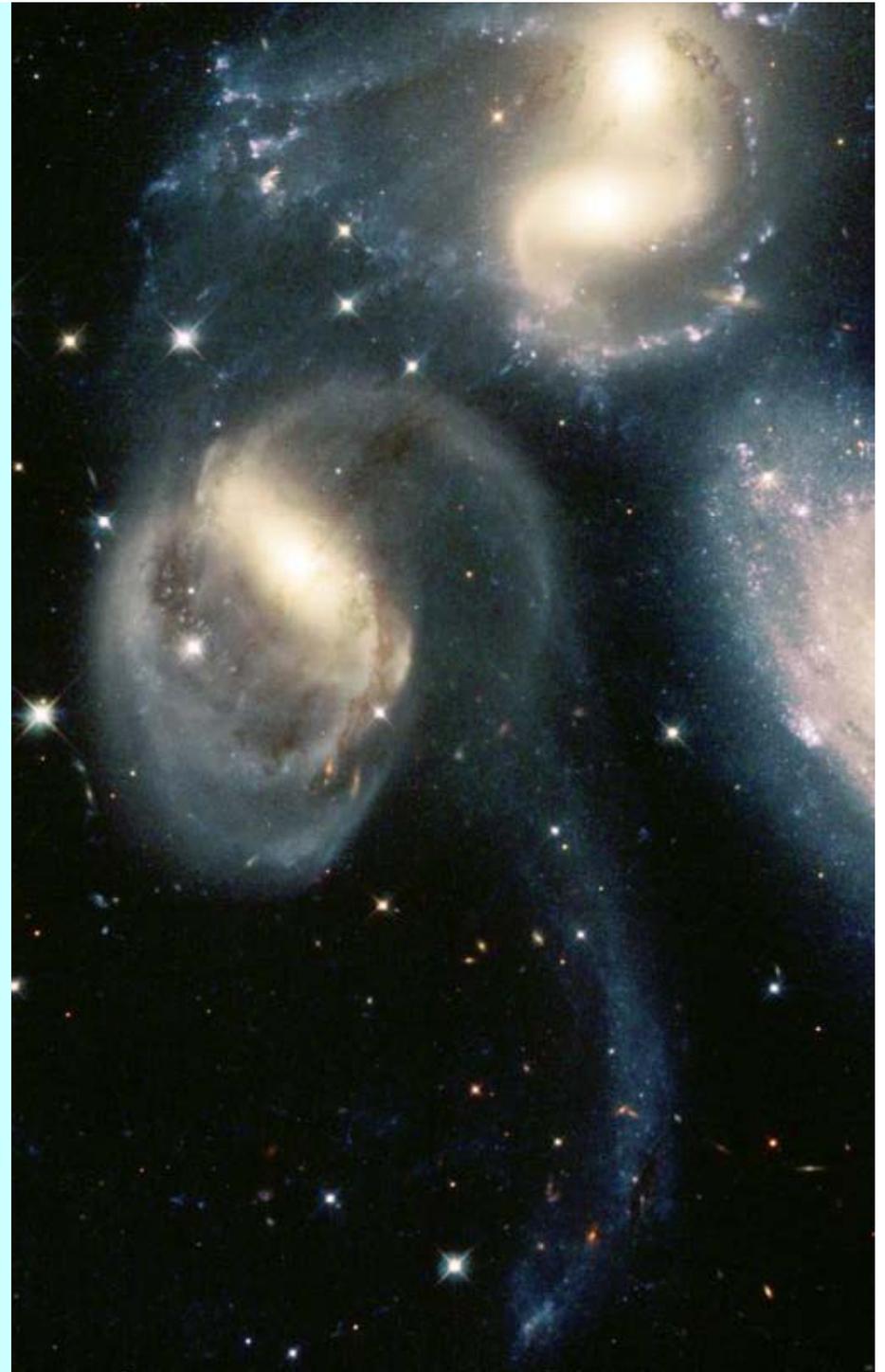
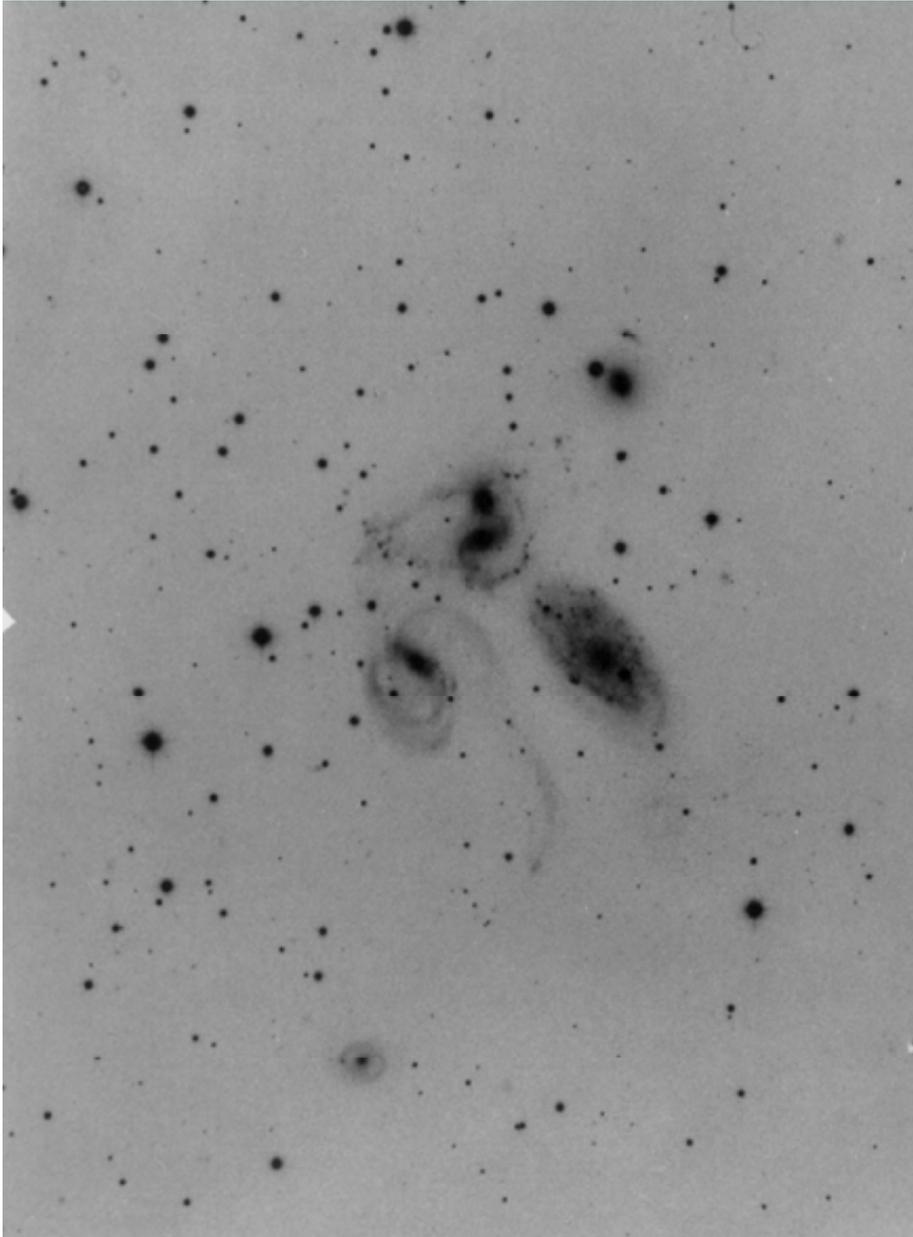
# Arp 295



Contours en blanc:  
Gaz d'hydrogène  
atomique



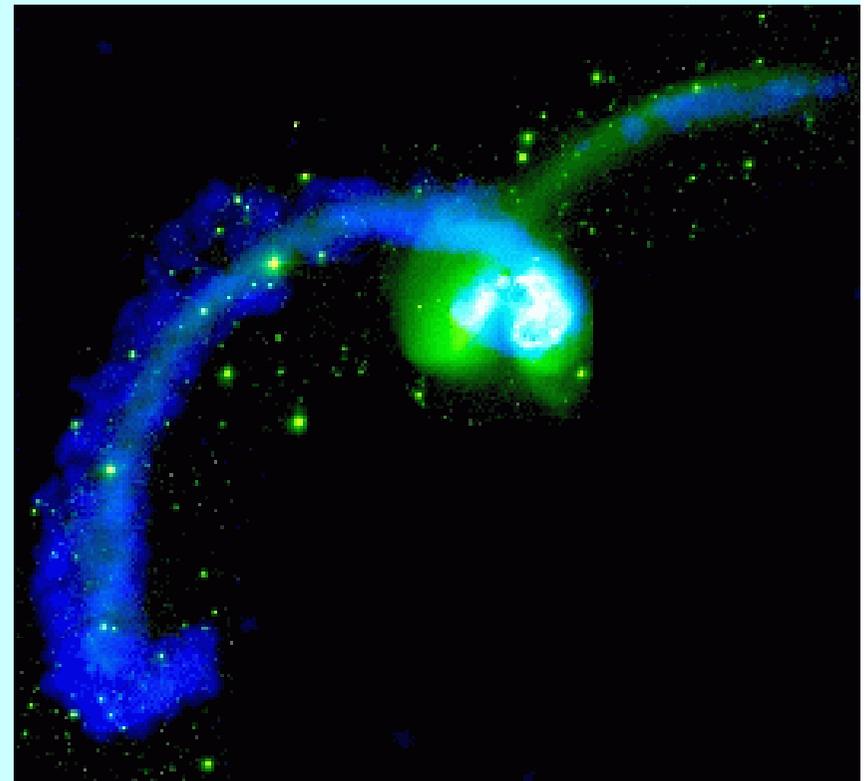
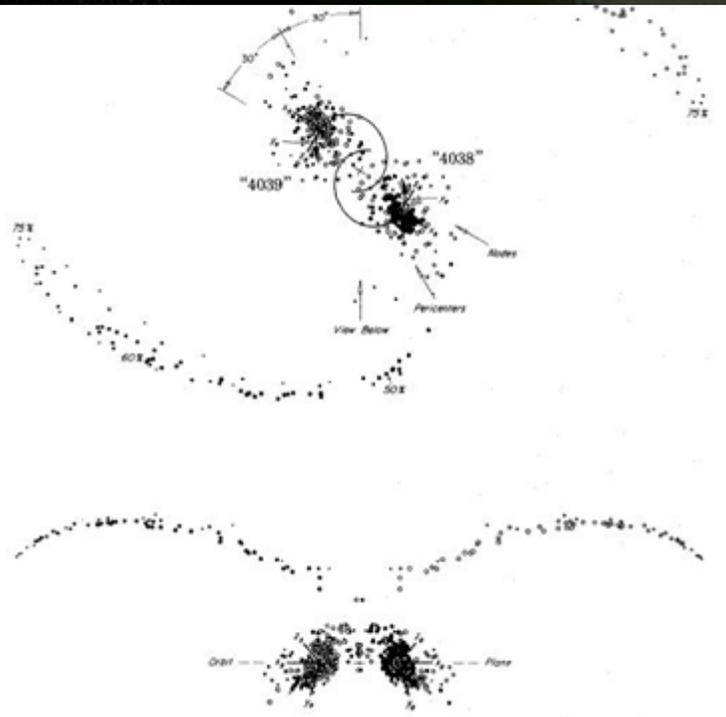
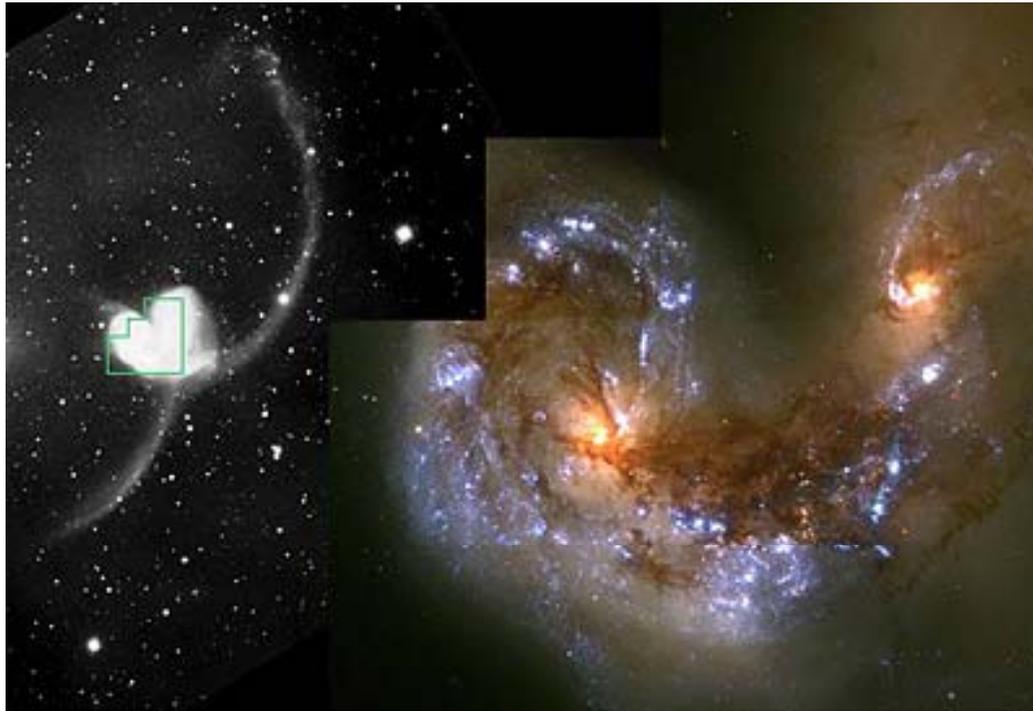
# Quintette de Stefan



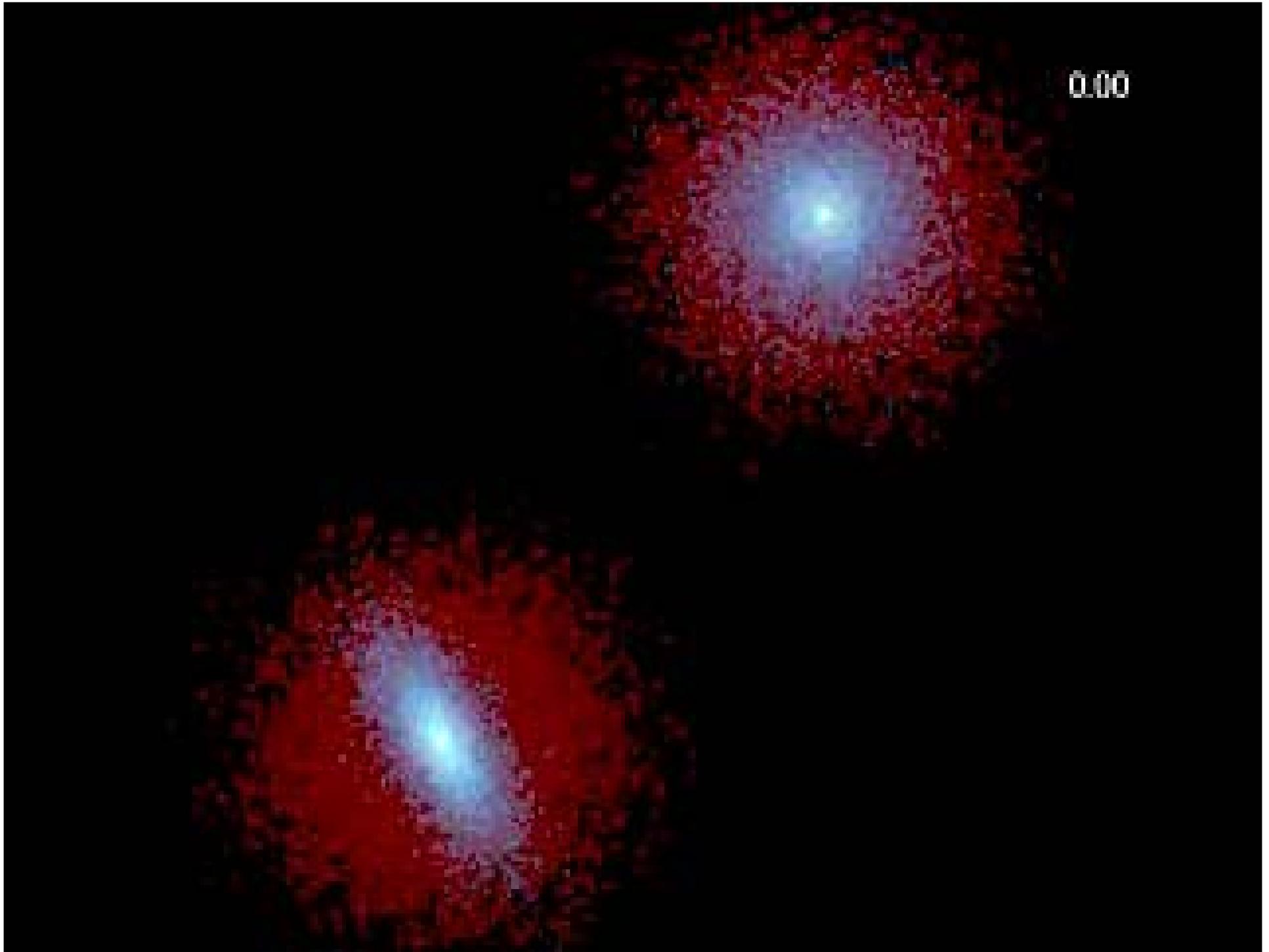
# Gaz inter-galactique: Rayons X, chocs



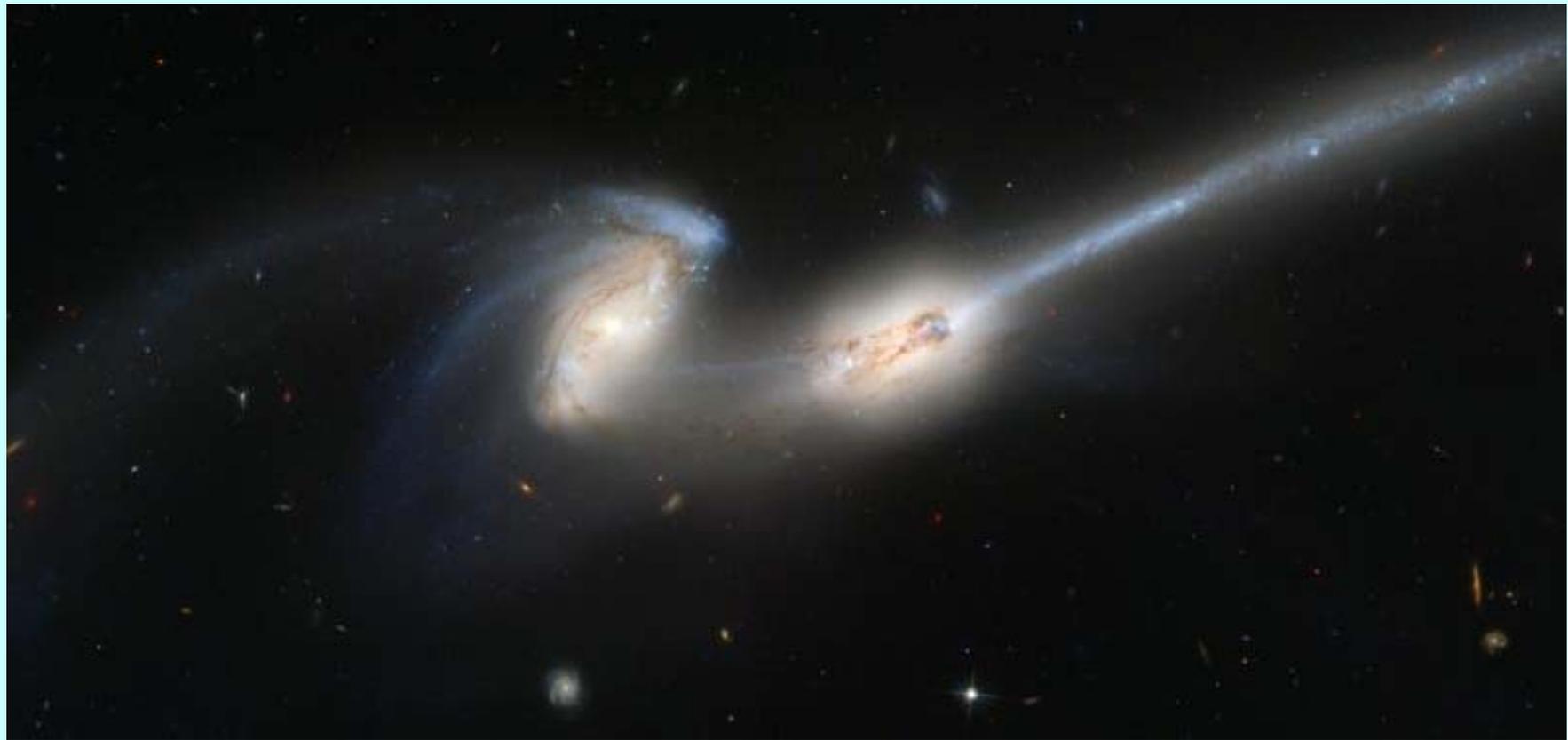
# Les Antennes



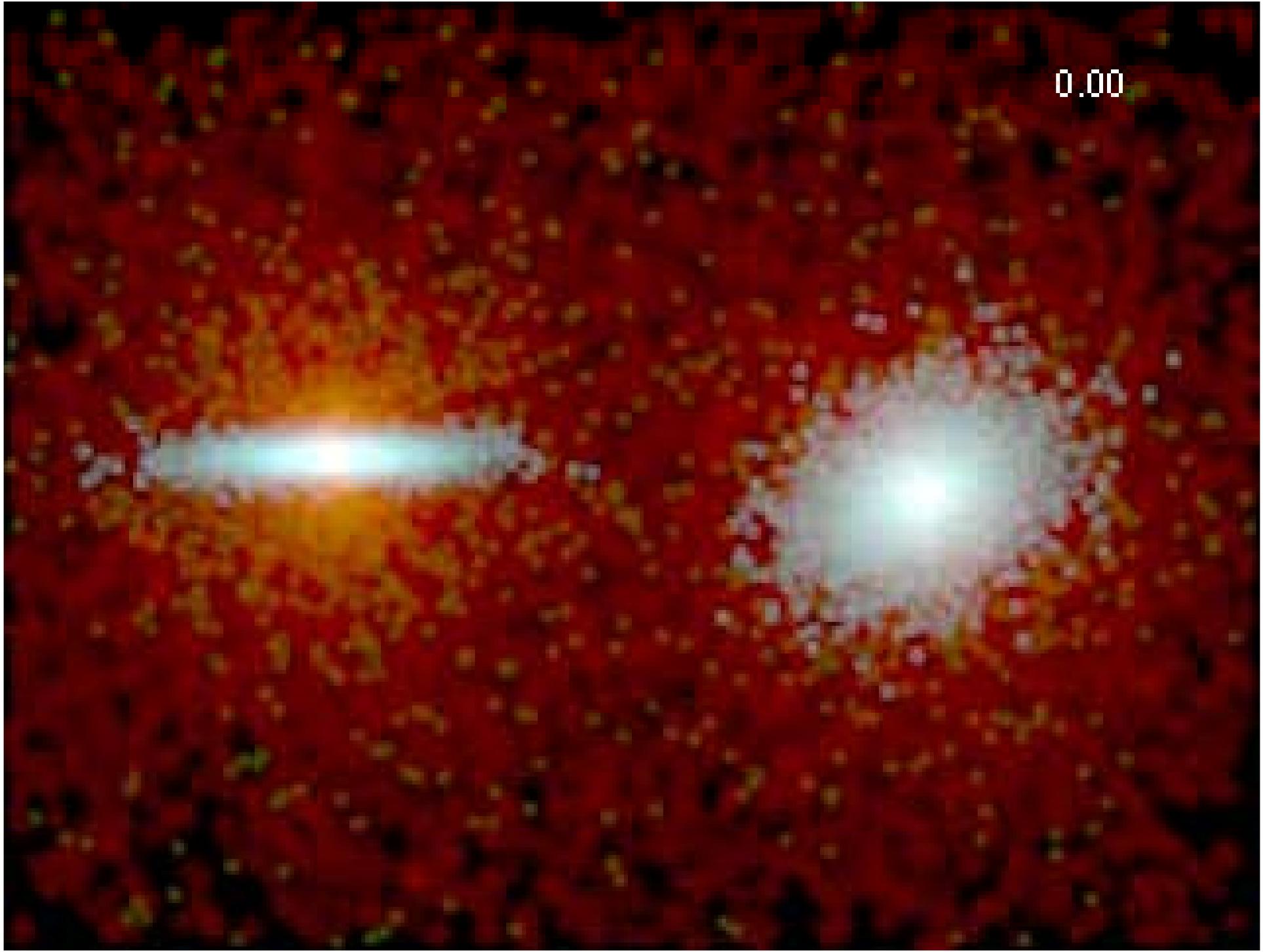
0.00



# Les Souris



0.00

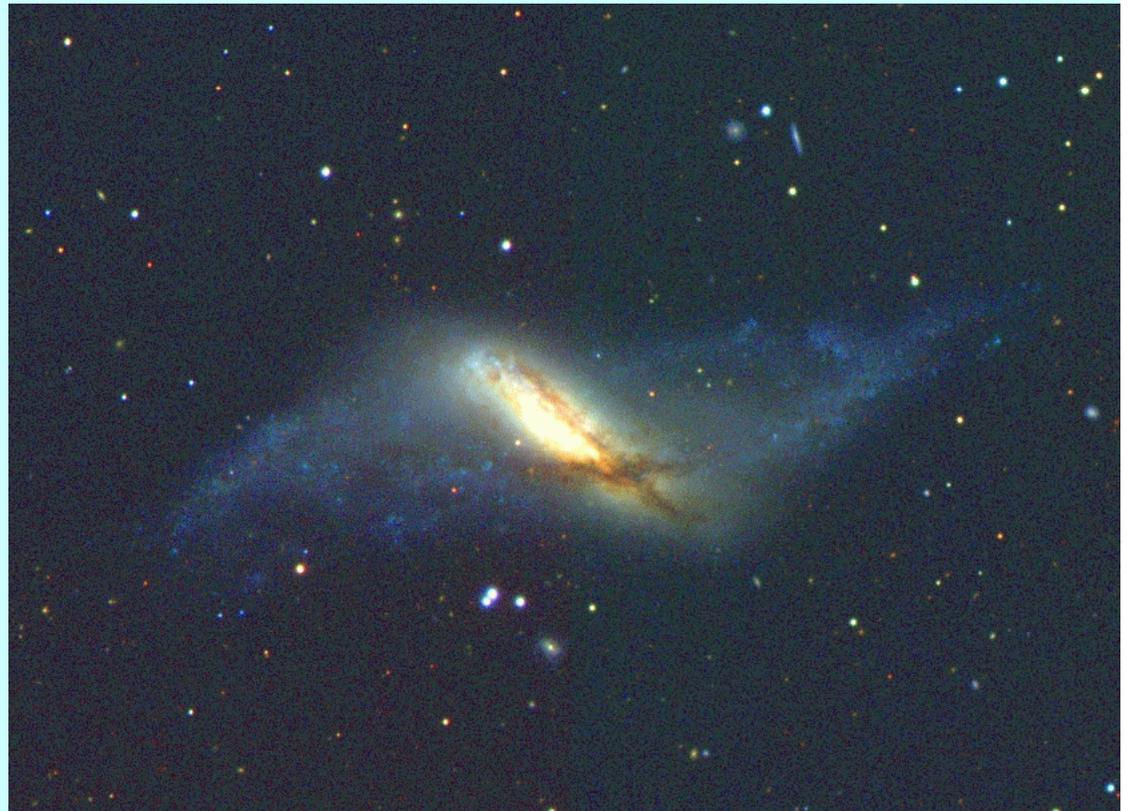




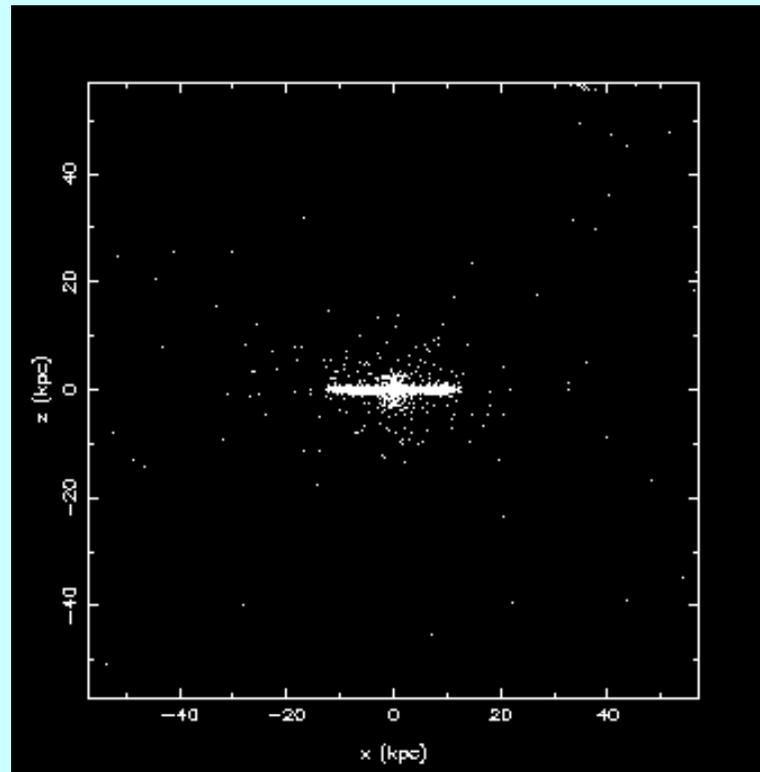


## Formation des anneaux polaires

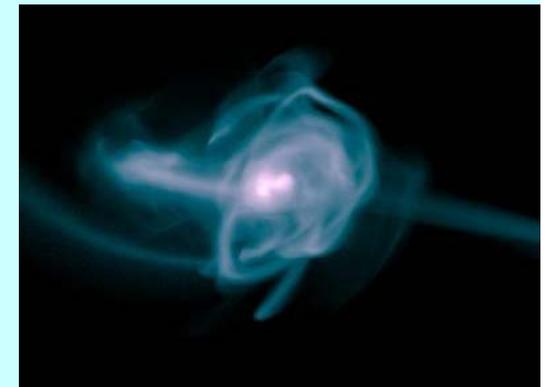
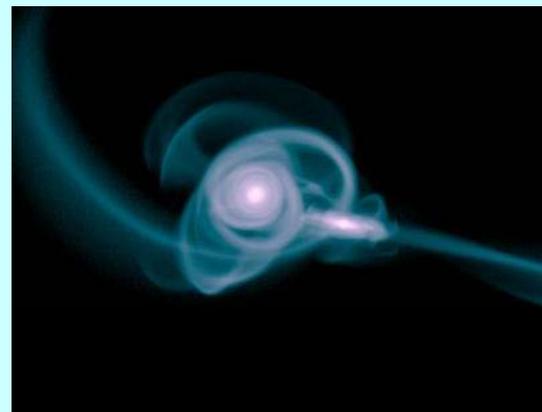
soit par fusion de galaxies  
soit par accrétion de gaz



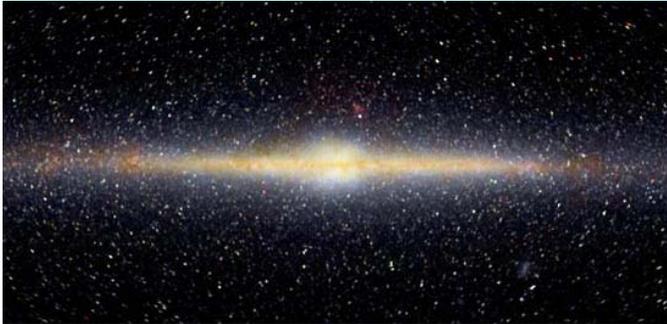
# Formation par accrétion



# Simulations de la rencontre avec Andromède

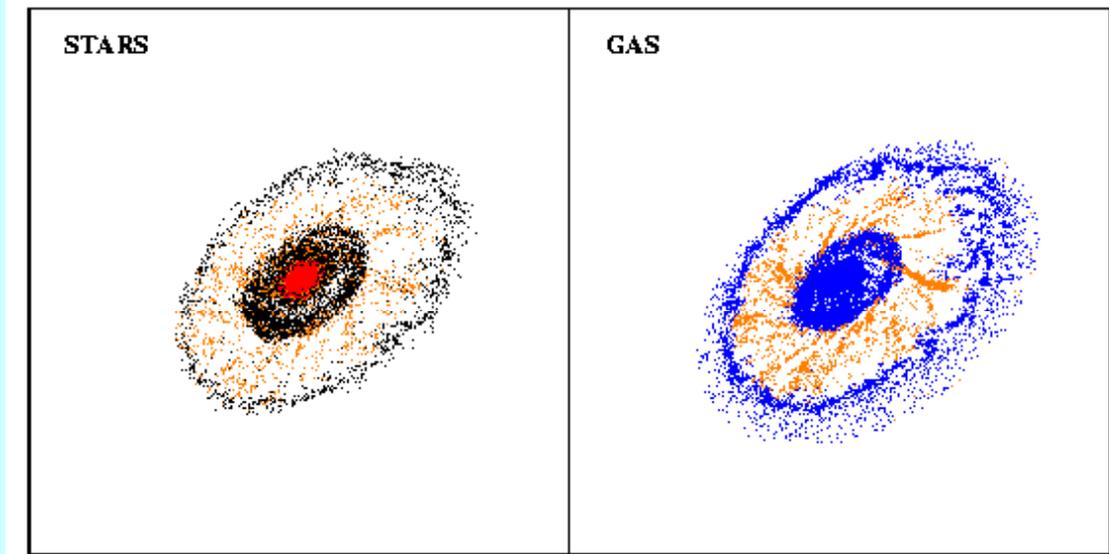


# Andromède et La Voie Lactée



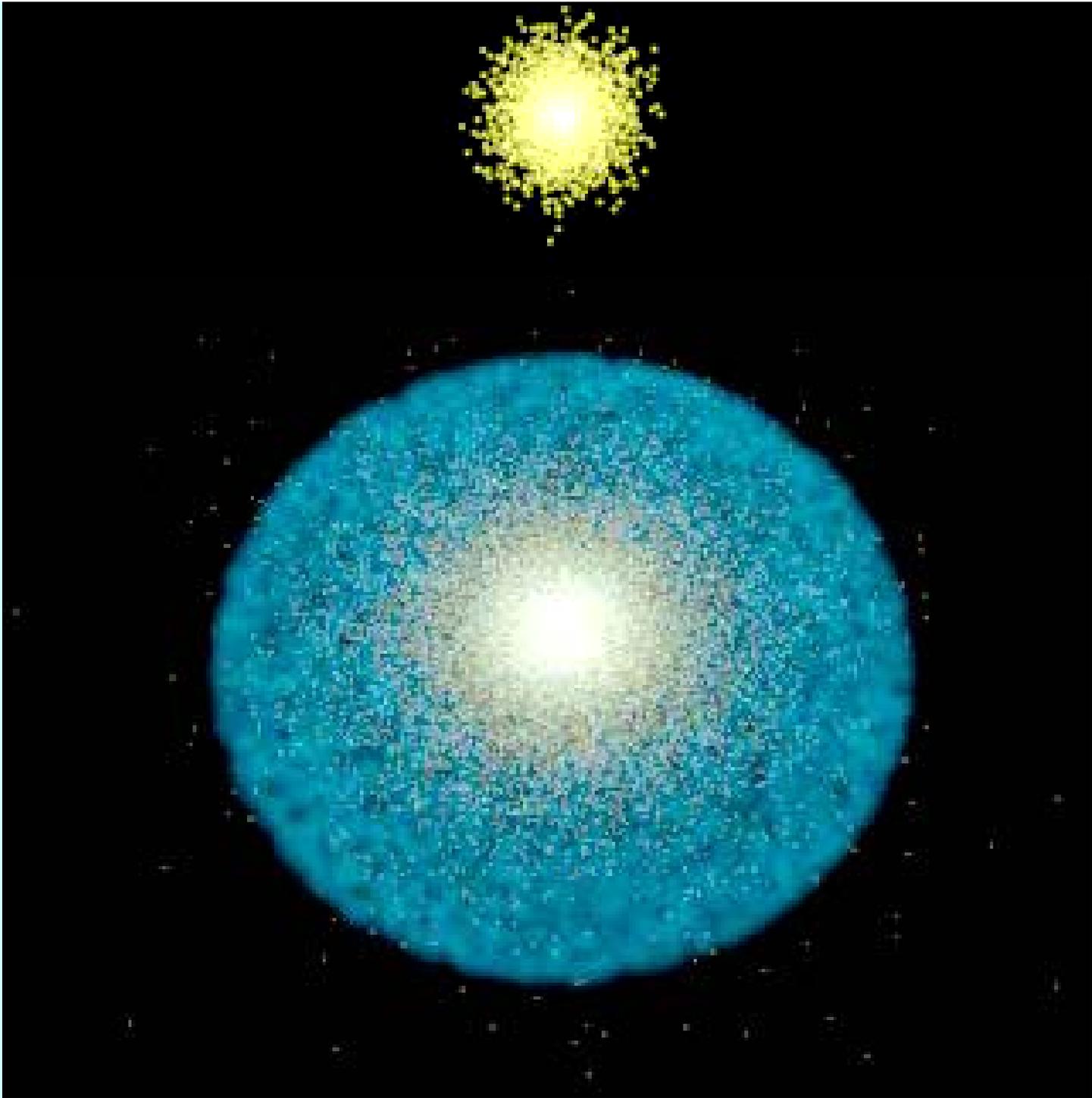
La Voie Lactée  
en infra-rouge



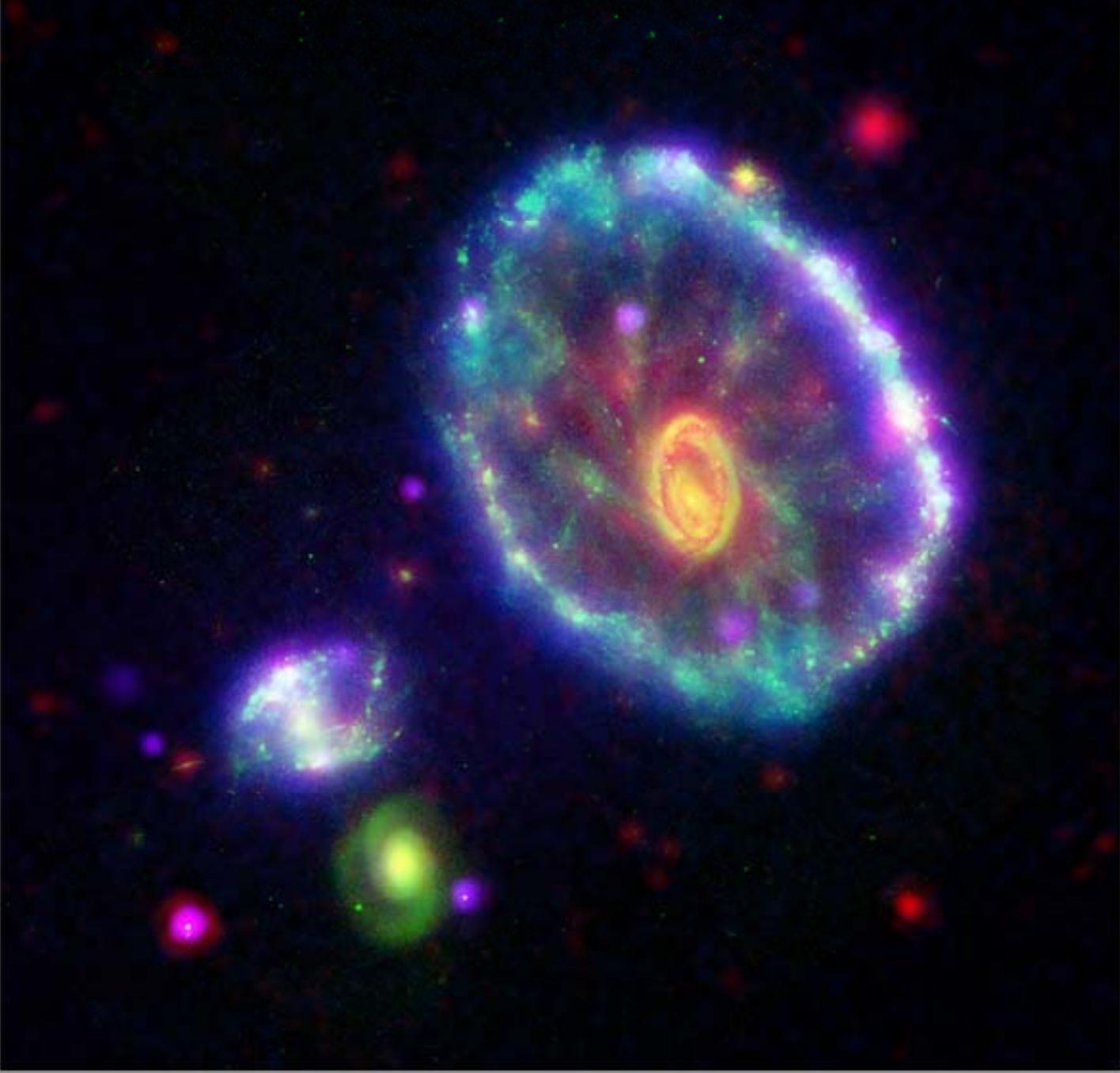


## Galaxies en anneaux

Formées dans la collision de plein fouet entre deux galaxies



CARTWHEEL GALAXY



CHANDRA X-RAY



GALEX ULTRAVIOLET



HUBBLE VISIBLE



SPITZER INFRARED

# Satellite UV: GALEX



L'image en Ultra-Violet révèle des étoiles jeunes très bleues  
Formées dans l'anneau et les bras spiraux  
Le bulbe de vieilles étoiles disparaît

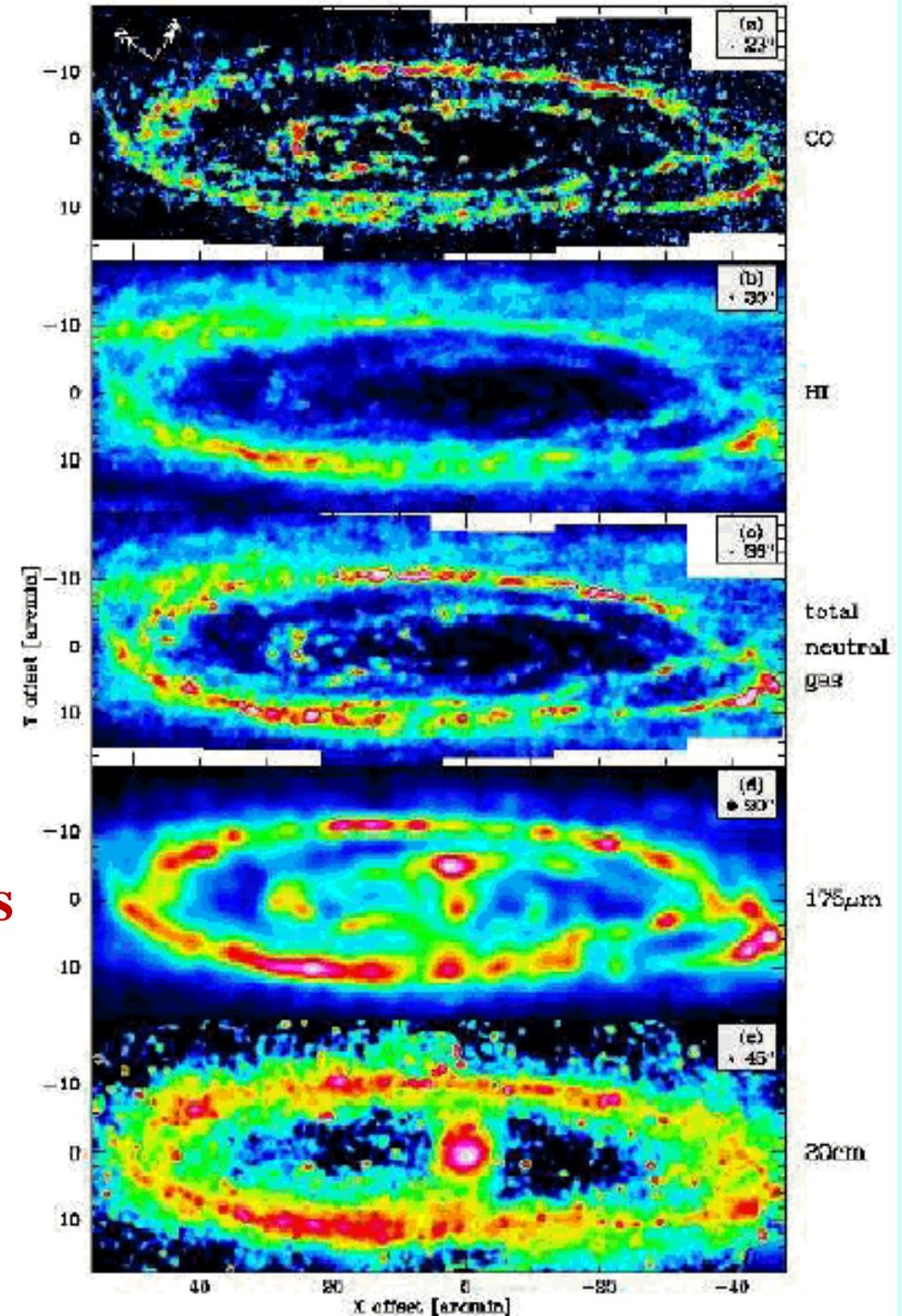
**Andromède: gaz moléculaire**

**Gaz d'hydrogène atomique**

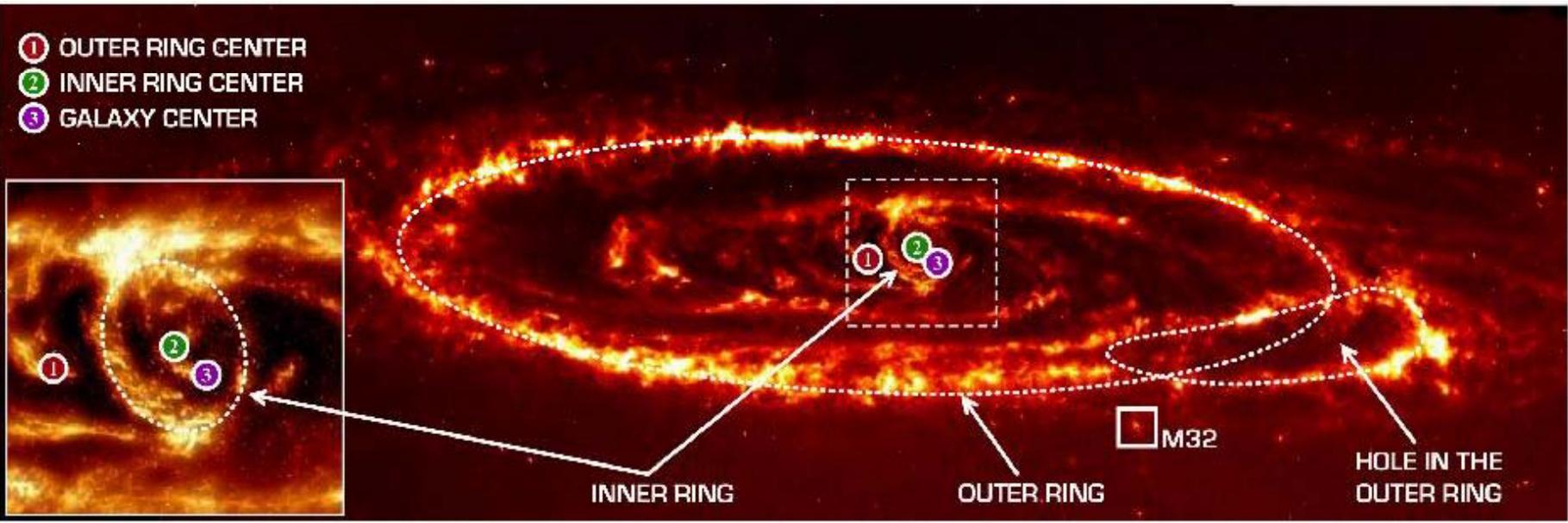
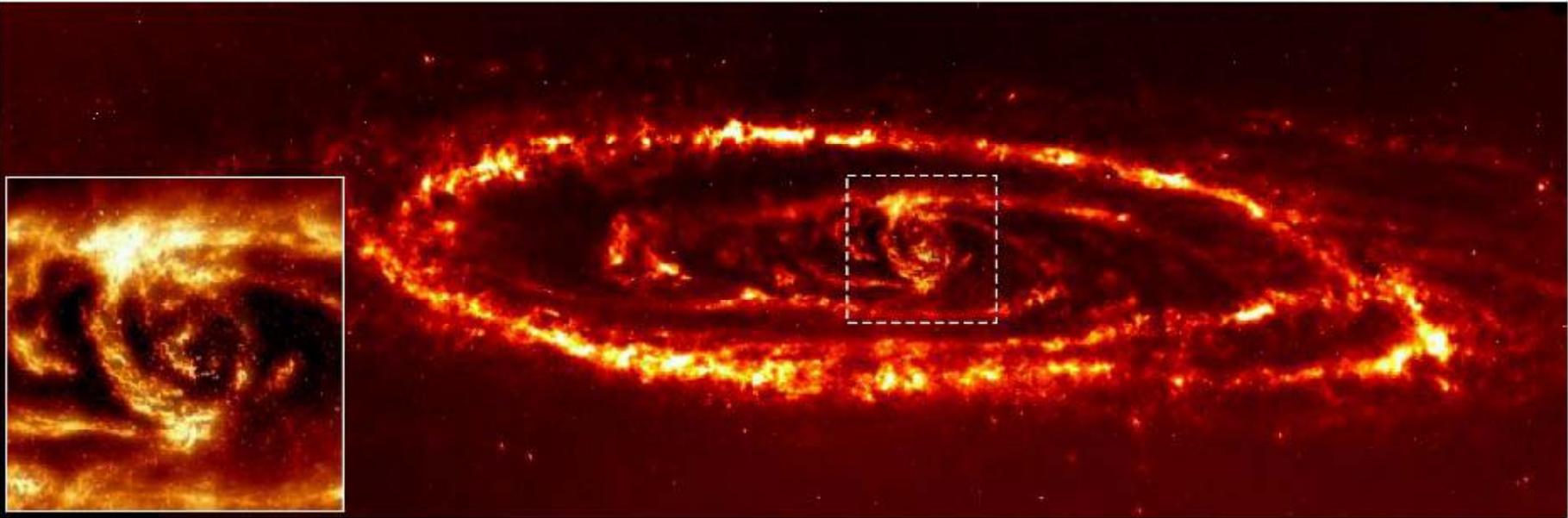
**Gaz total**

**Poussière chauffée par les étoiles**

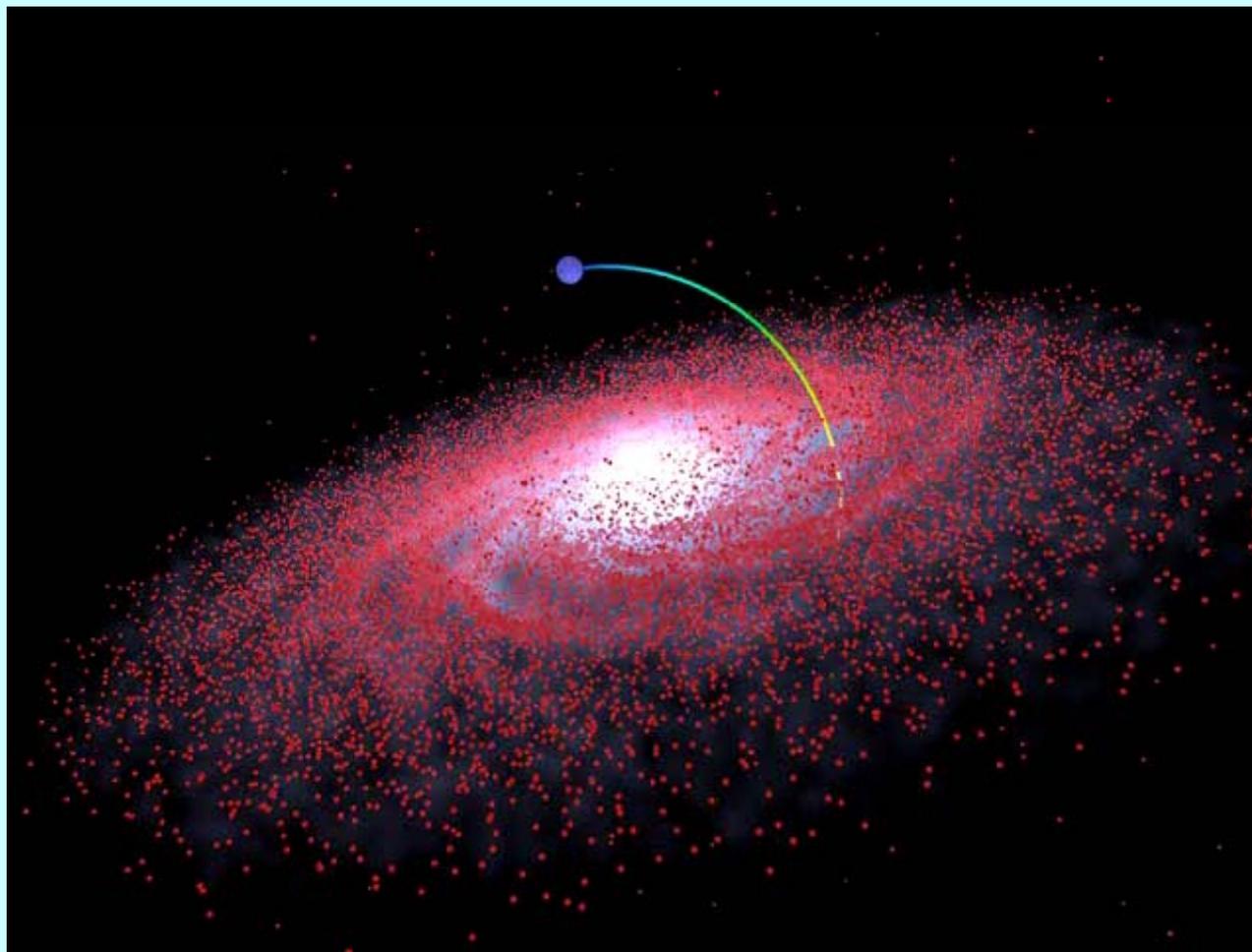
**Radio, synchrotron, supernovae**



# Découverte d'un deuxième anneau



## Schéma de l'interaction M31-M32



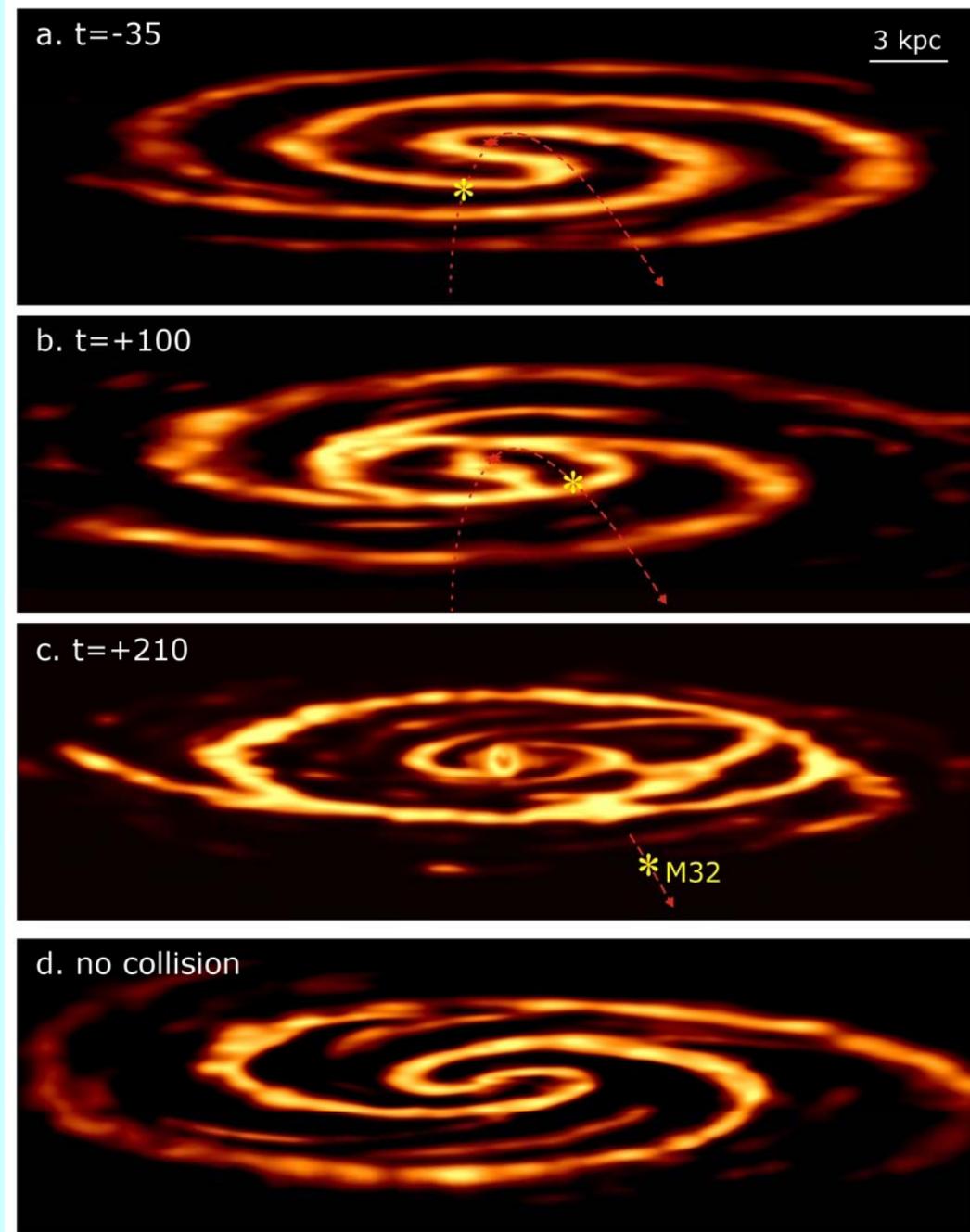
# Simulation numérique

N-corps + gaz  
 $10^6$  particules  
*350pc résolution*

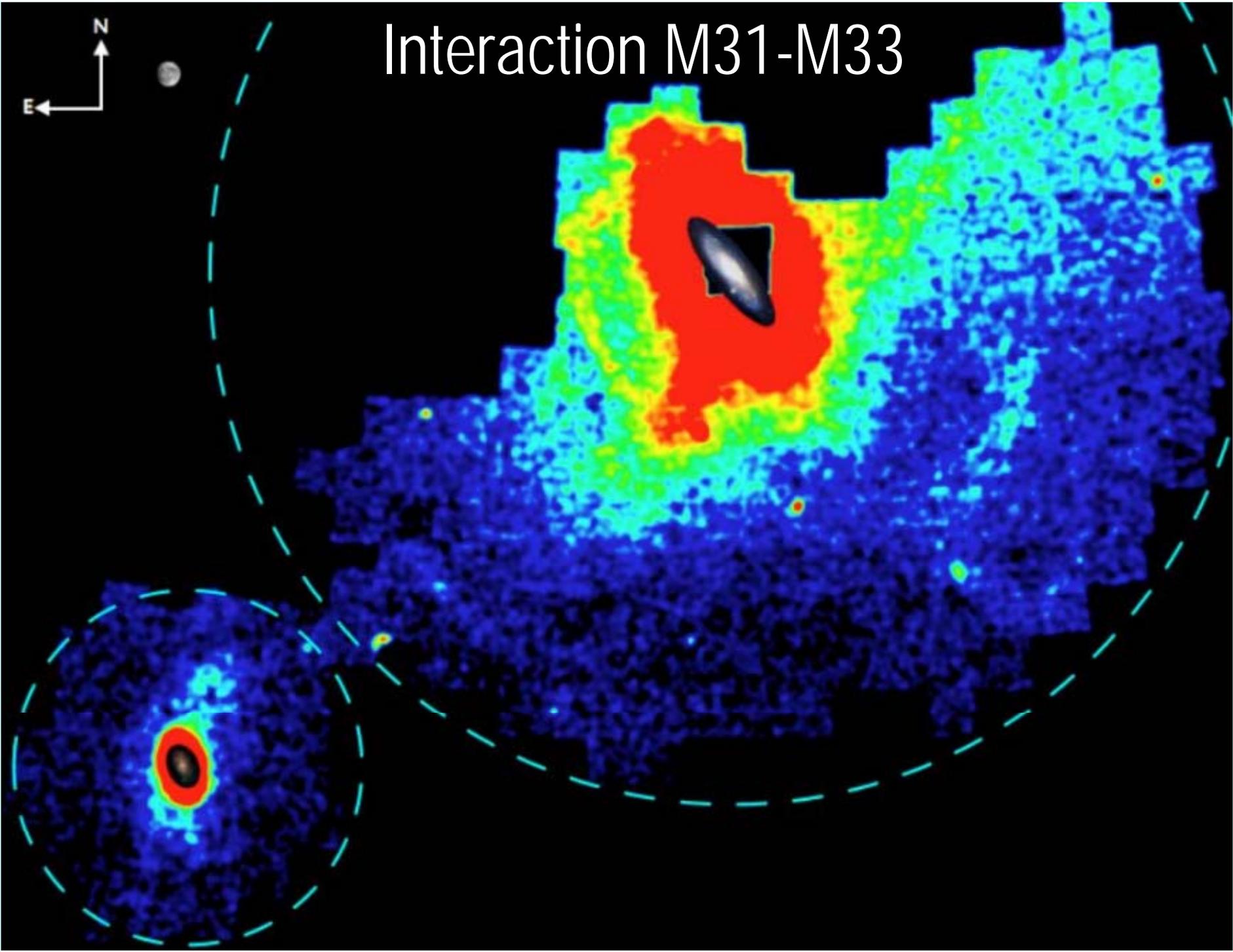
Evolution → barre  
+ spirale

Puis collision 210 Myr  
Avec M32

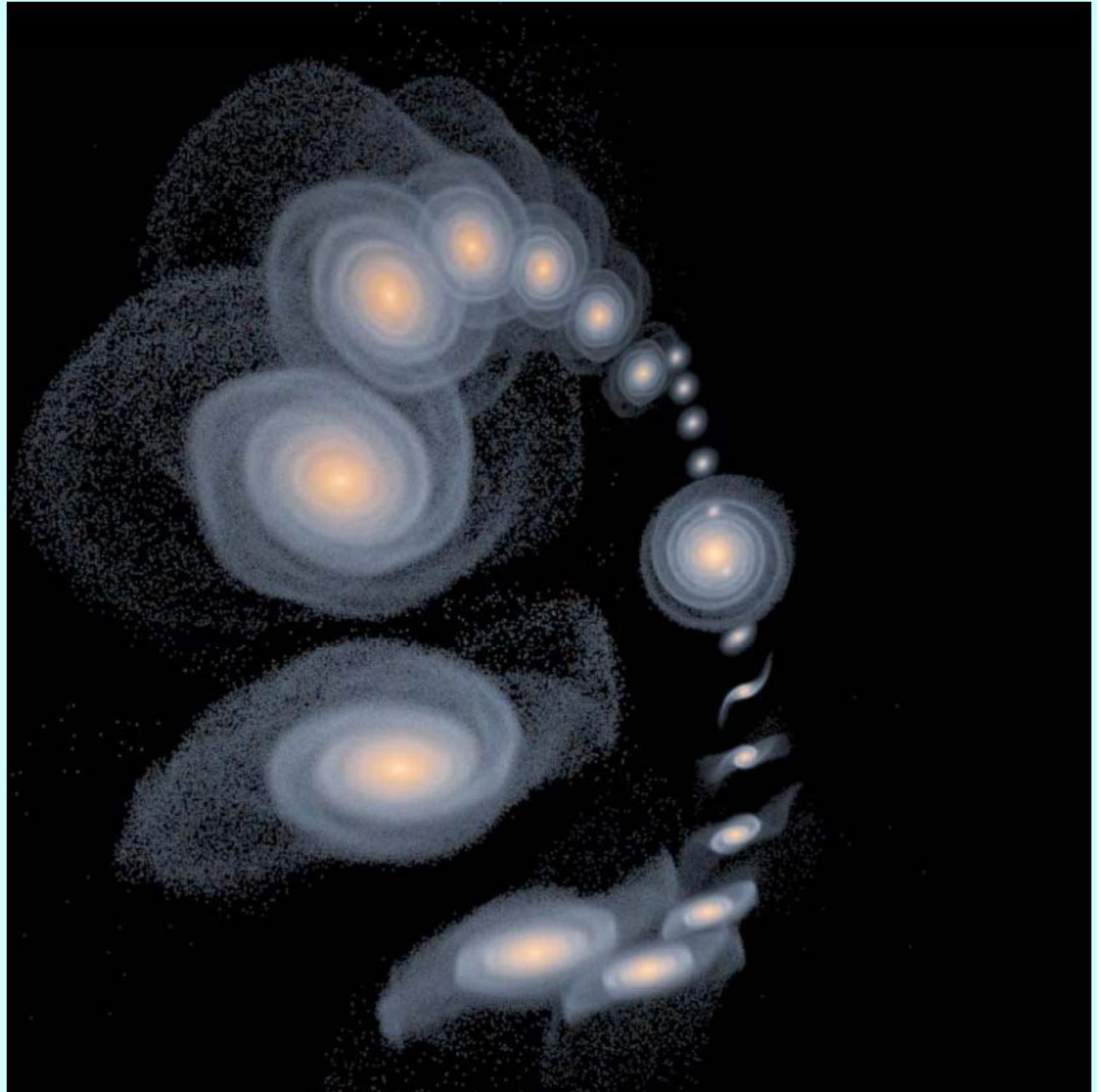
Rapport de masse 1/13



# Interaction M31-M33



Simulations  
de l'interaction  
de marée entre  
Andromède  
et la galaxie  
du triangle  
**M31-M33**



# Problèmes encore non résolus

- La matière noire dans les simulations se concentre beaucoup trop dans les galaxies
- Les disques d'étoiles sont 10 fois trop petits
- Des milliers de satellites

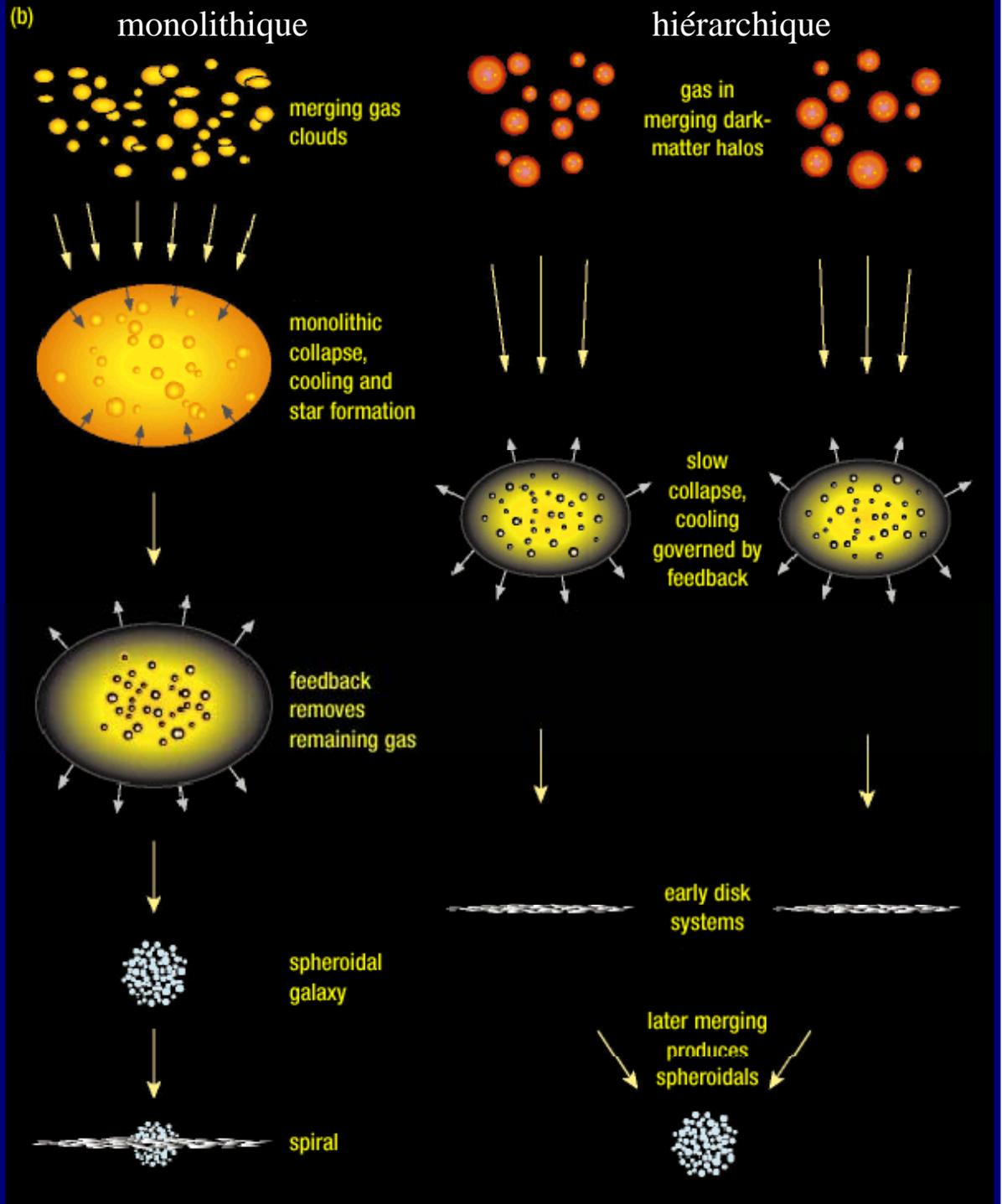
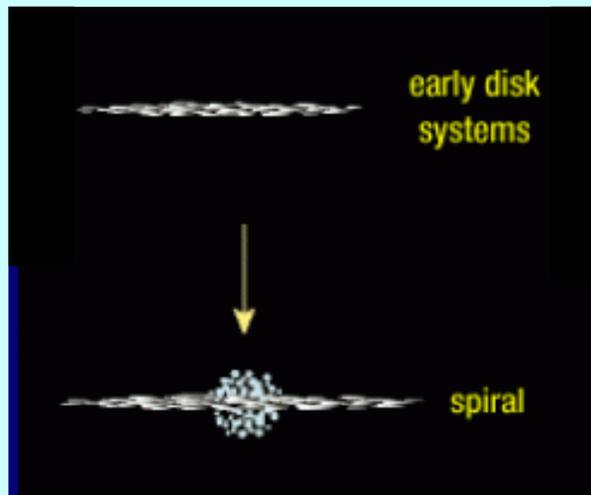
# Monolithique

Disques se forment après par accrétion de gaz

# Hiérarchique

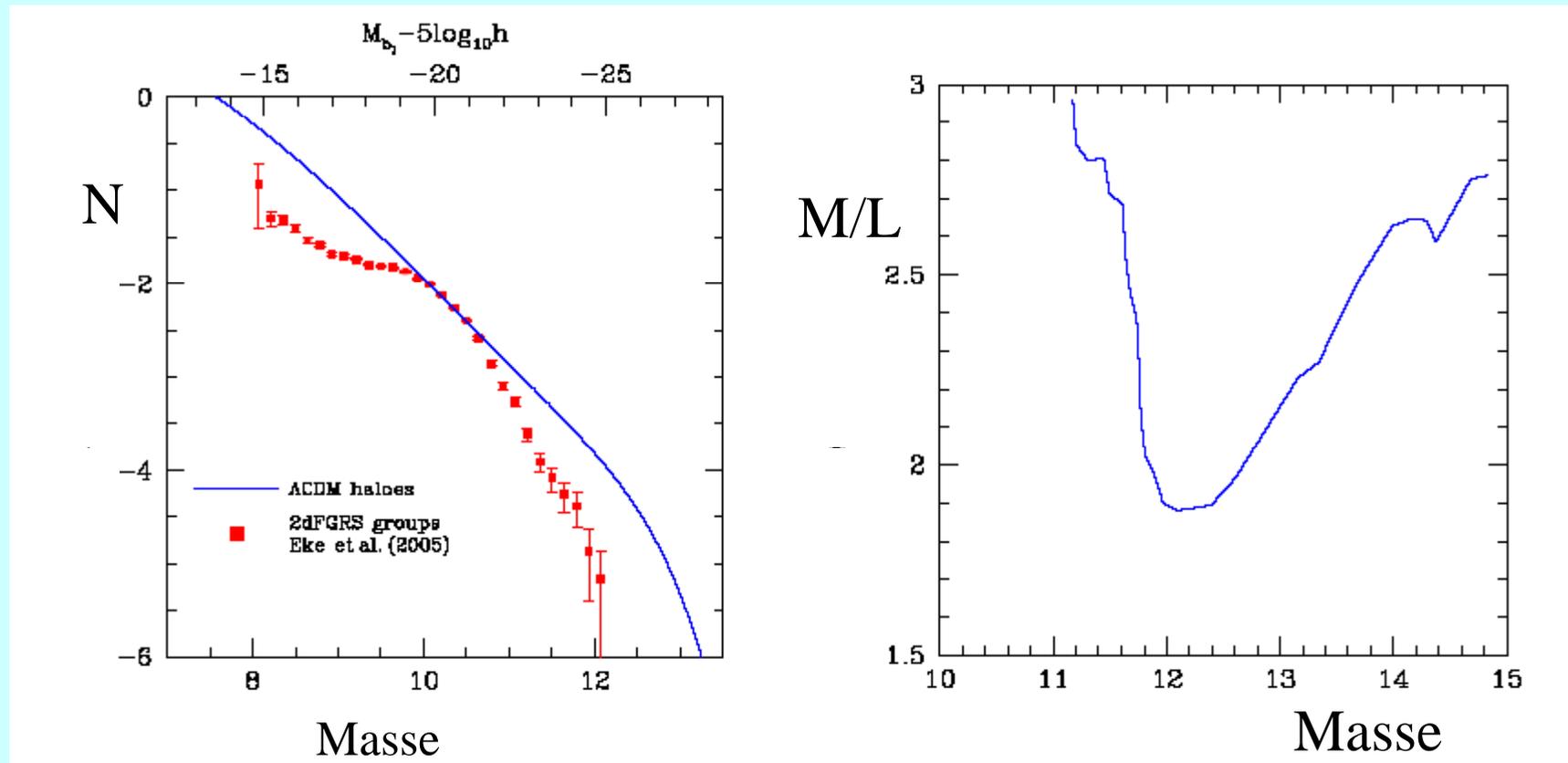
Elliptiques se forment par fusion de spirales

# Evolution séculaire



# Distribution en masse et luminosité

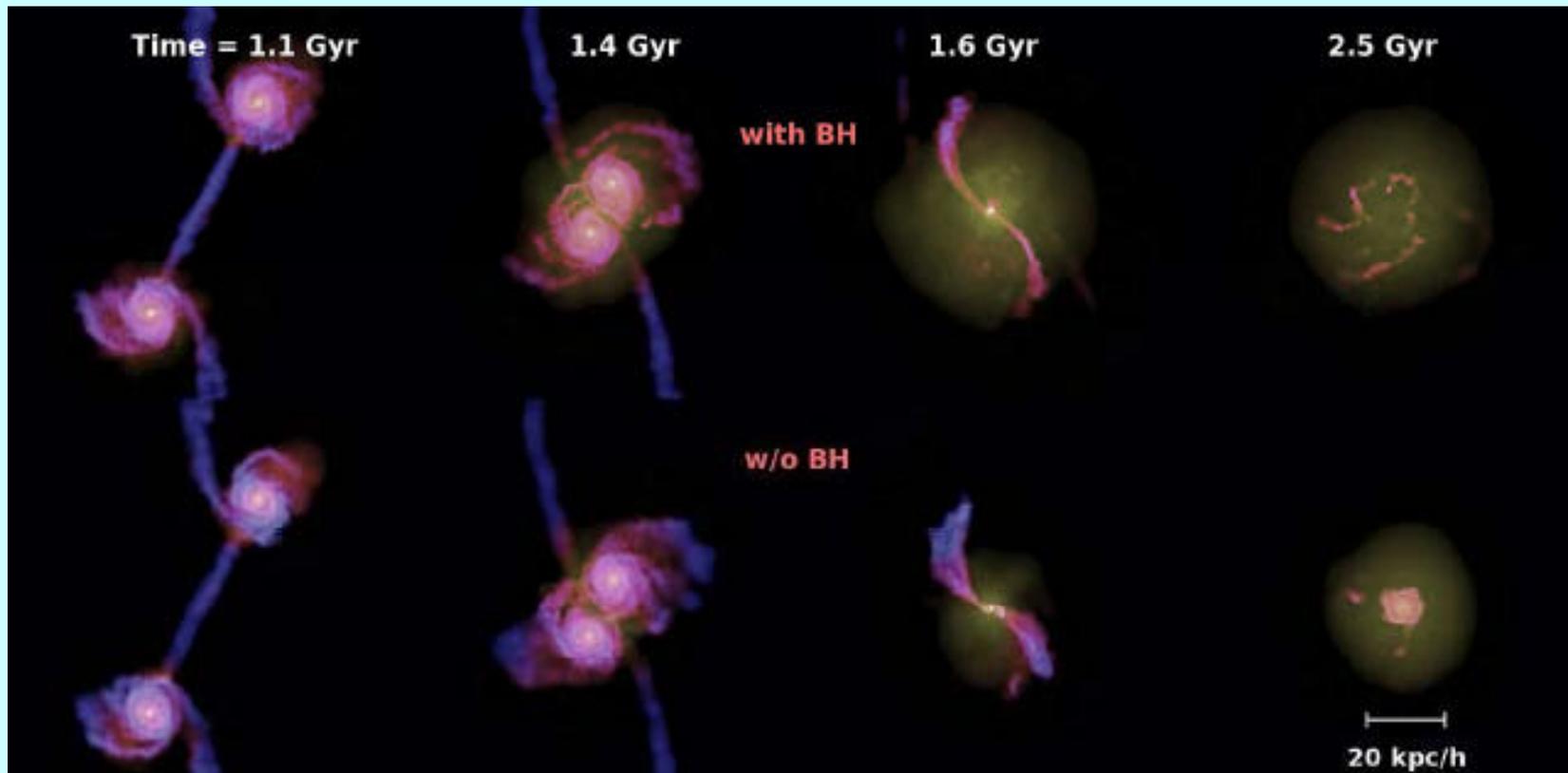
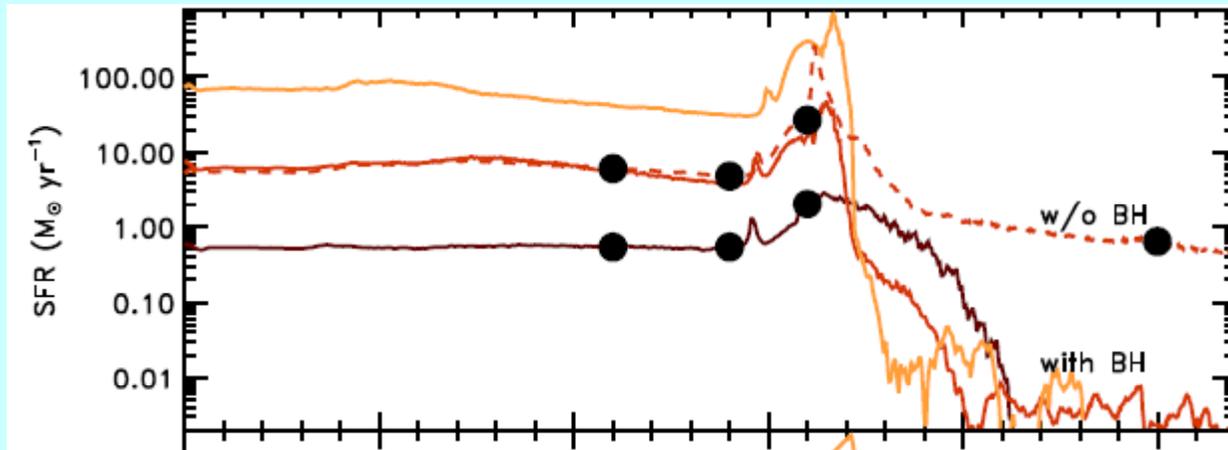
**Modèle standard:** Trop de galaxies aux 2 extrémités



**Observations:** peu de naines, peu de géantes

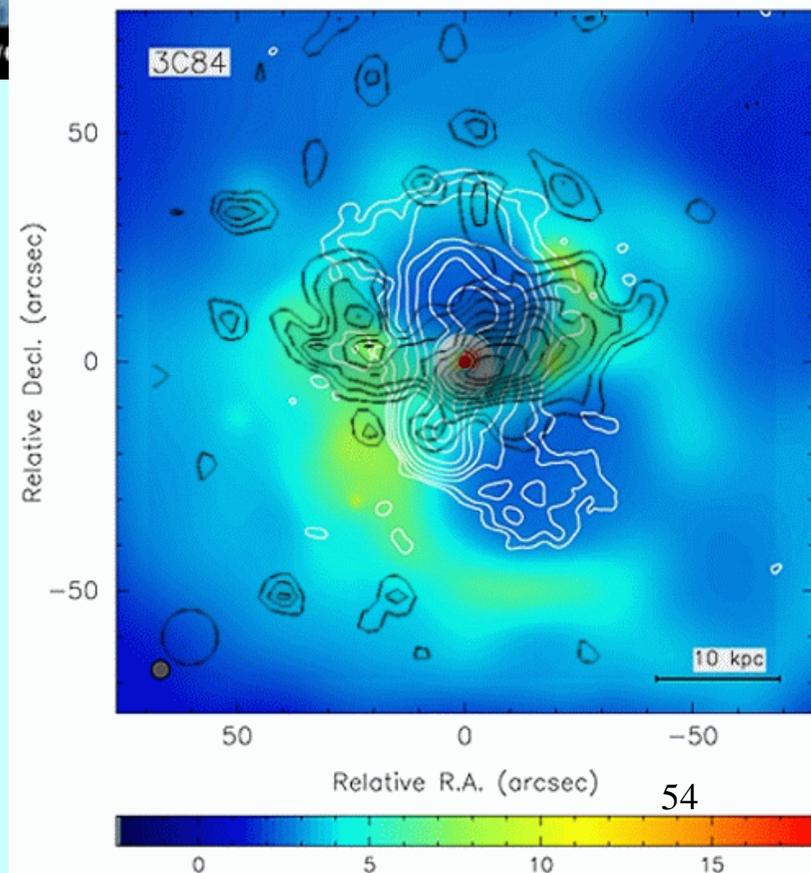
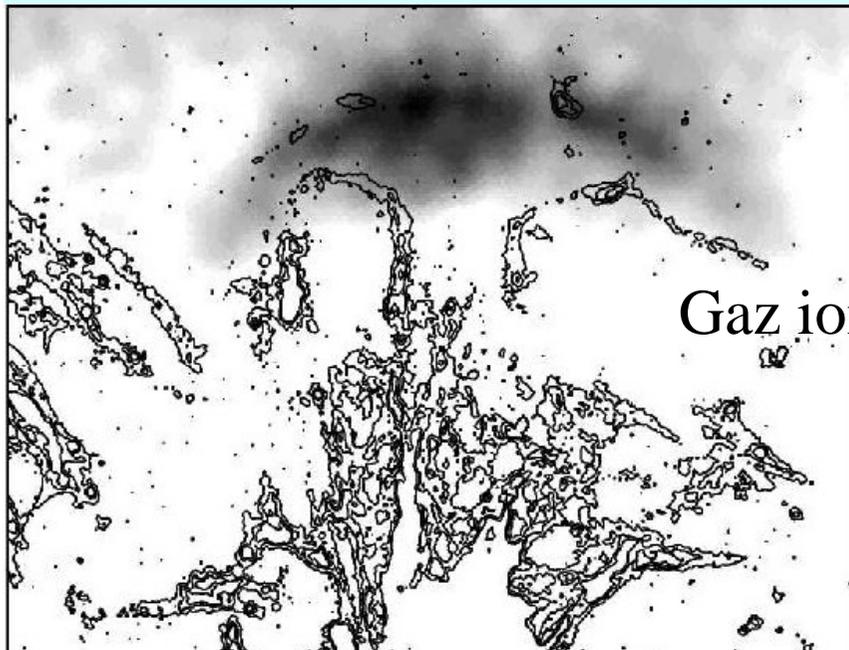
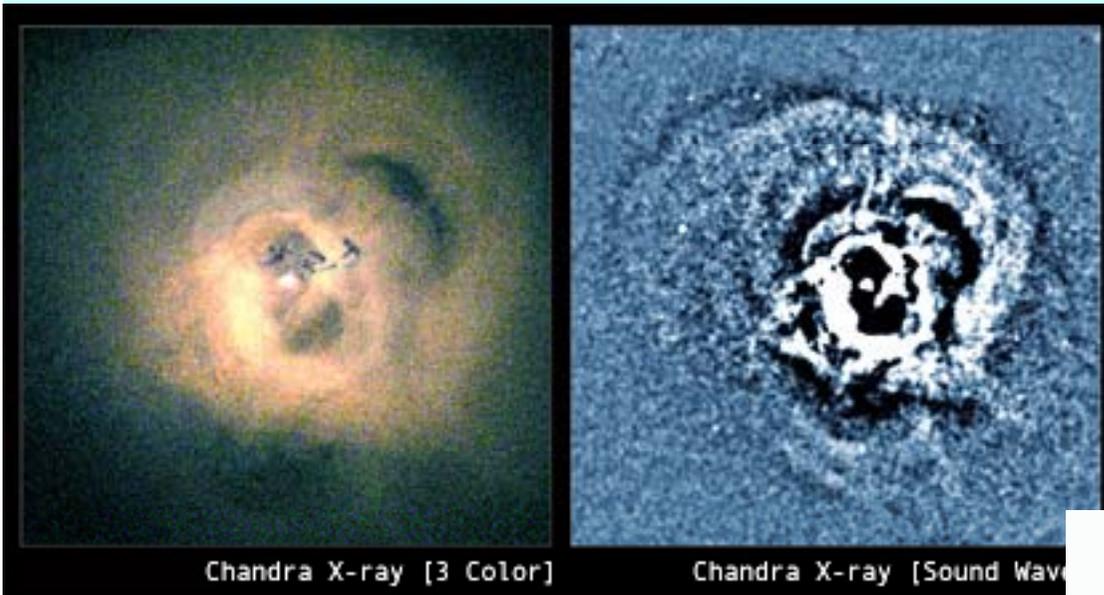
# Auto-régulation due à la formation d'étoiles

et aux trous noirs



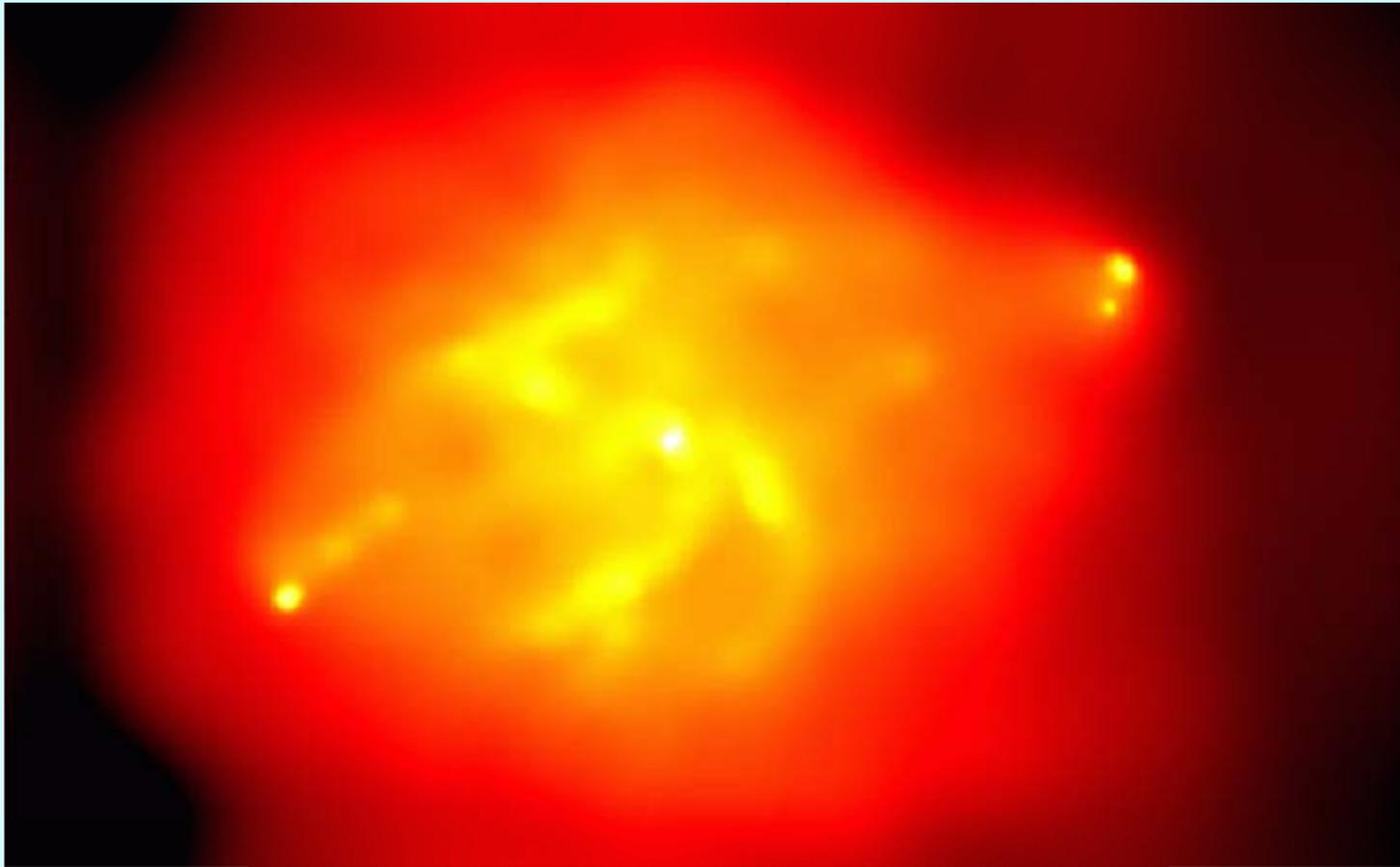
# Amas de Persée exemple de trou noir massif

Gaz moléculaire froid

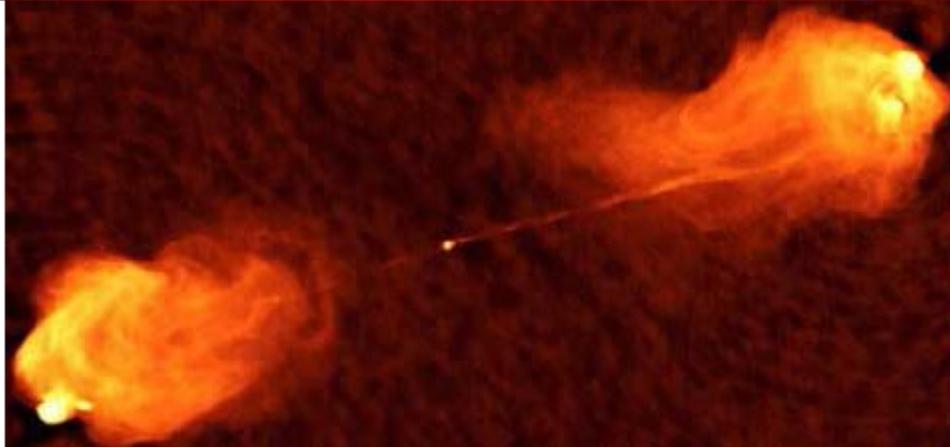


# Amas du Cygne

Rayons X



Emission  
Radio  
Du jet

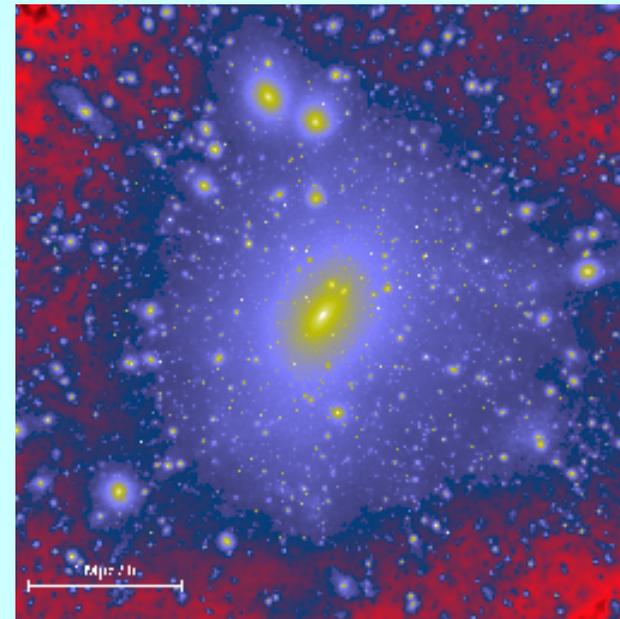
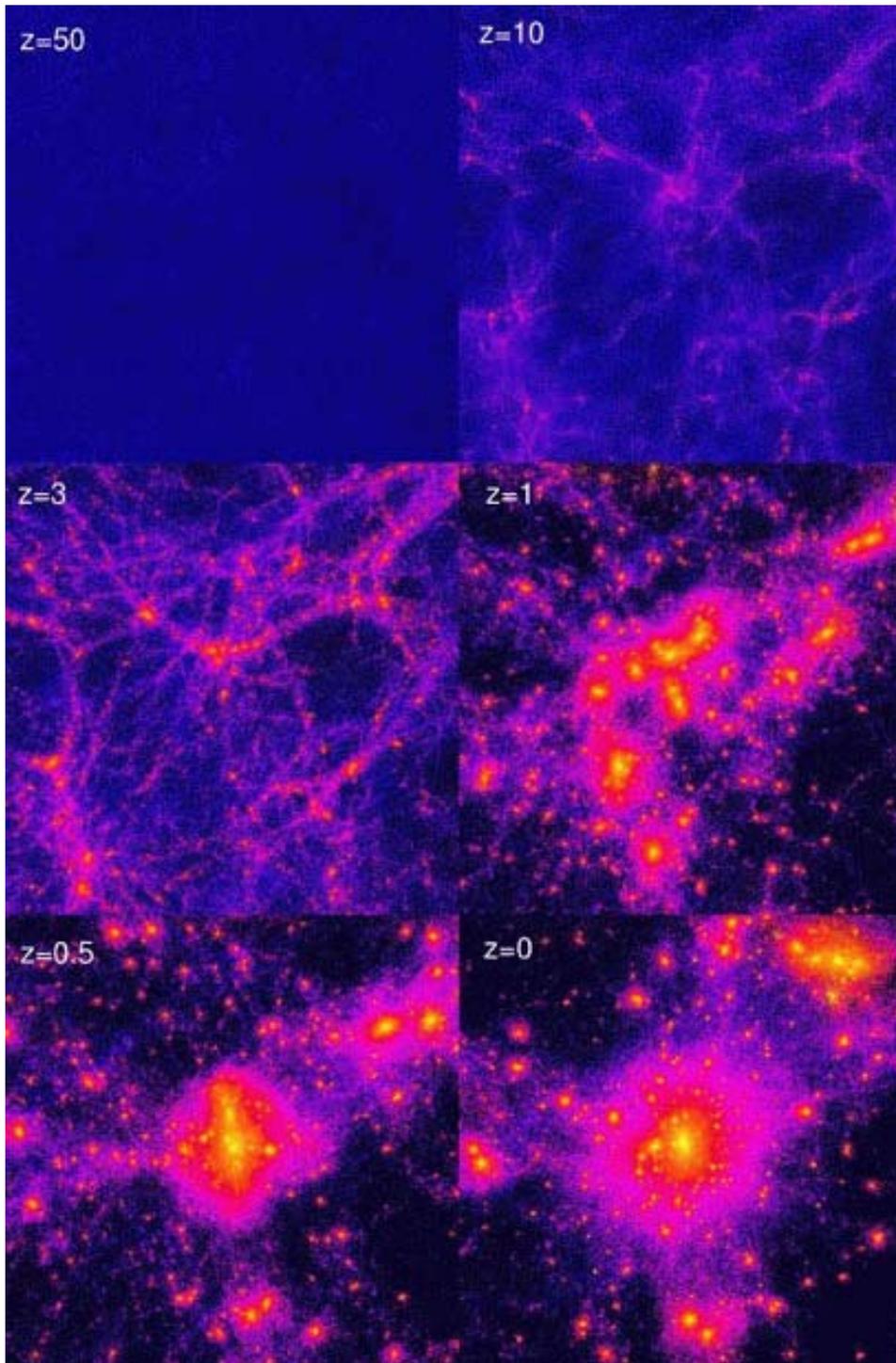


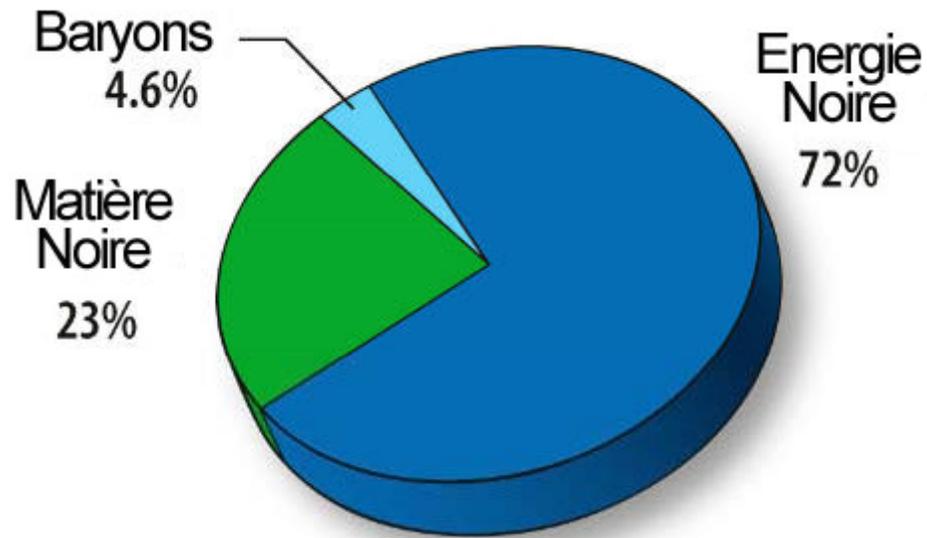
Galaxie centrale



# Trop de petites structures

Aujourd'hui, les simulations prédisent 100 fois trop de petits halos autour des galaxies comme la Voie Lactée





Résultats obtenus  
grâce au  
fonds cosmologique

$$\Omega_m = 0.28$$

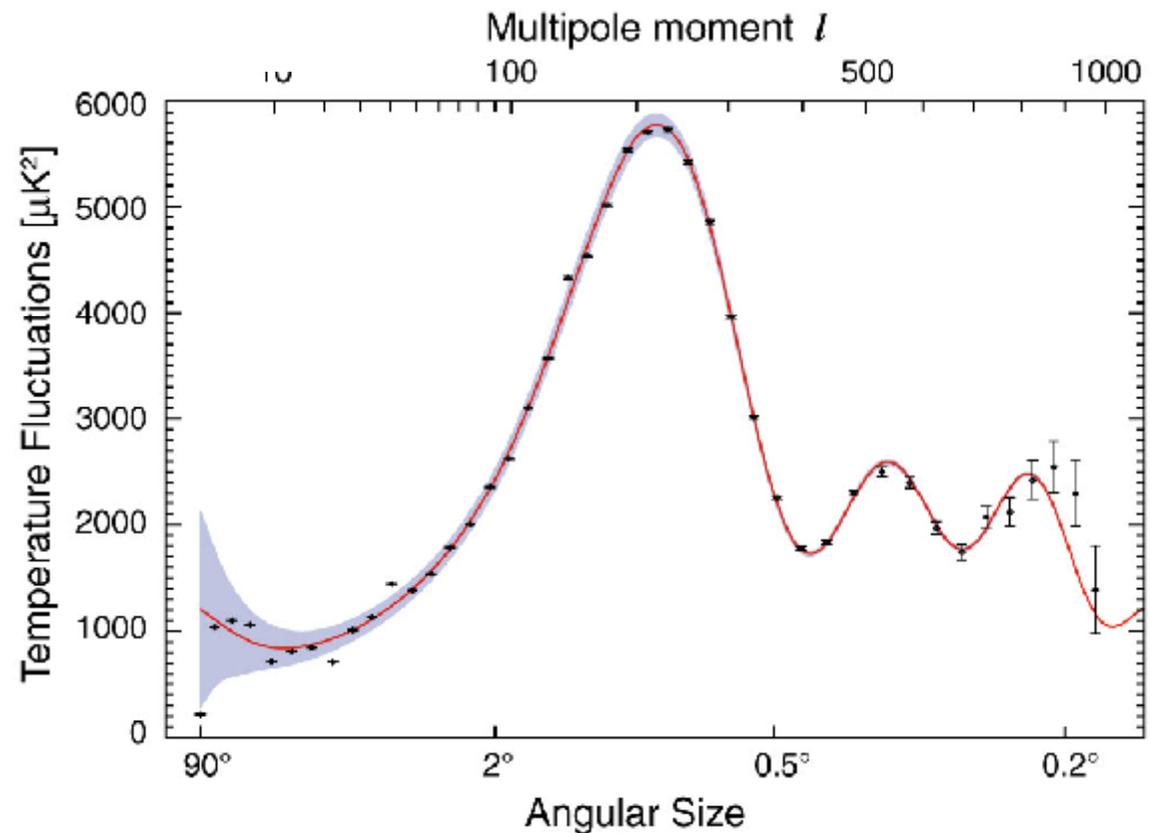
$$\Lambda = 0.72$$

$$\Omega_b = 0.05$$

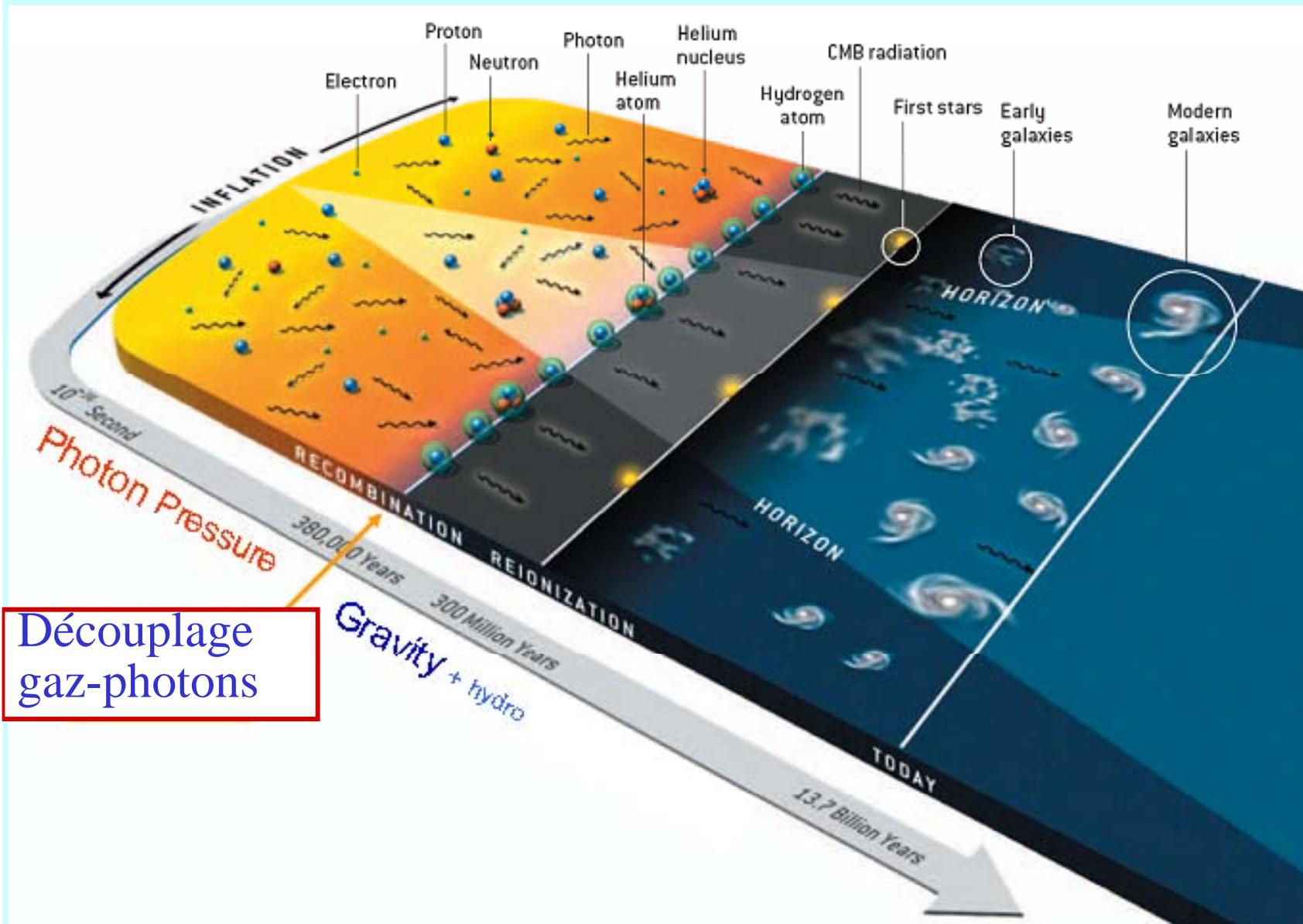
$$H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$$

Age = 13.7 Gyr

Univers plat

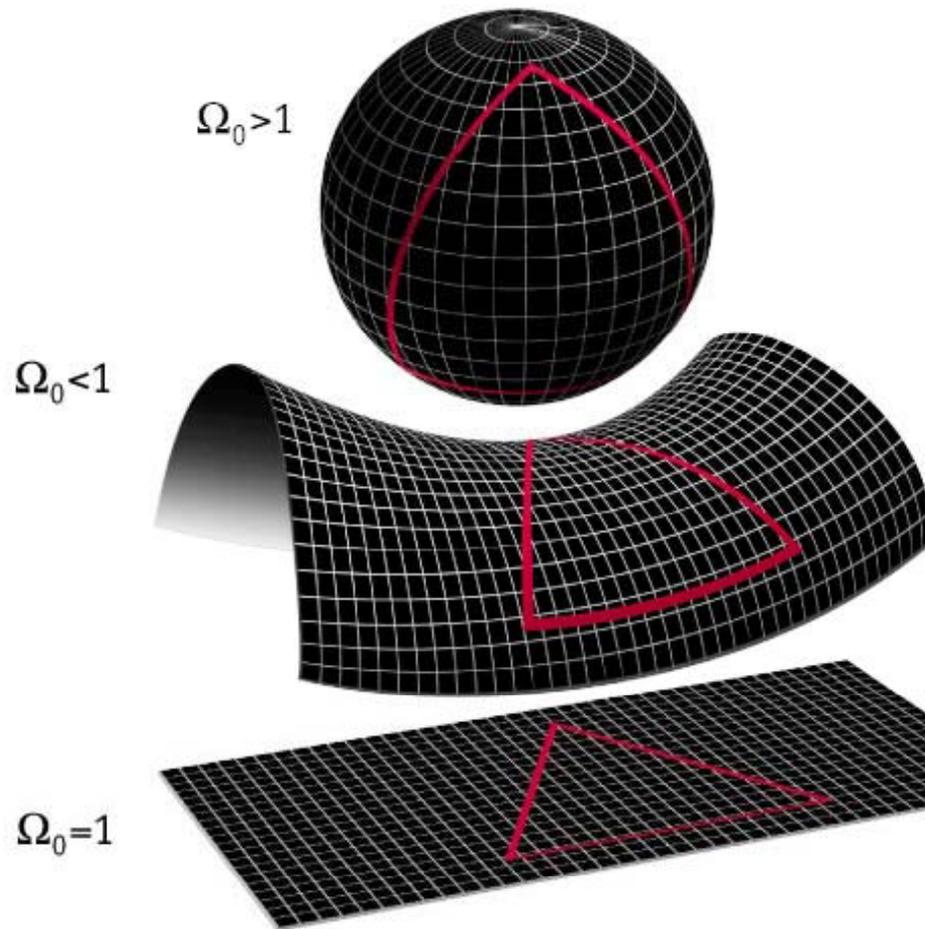


# Histoire de l'univers



Découplage gaz-photons

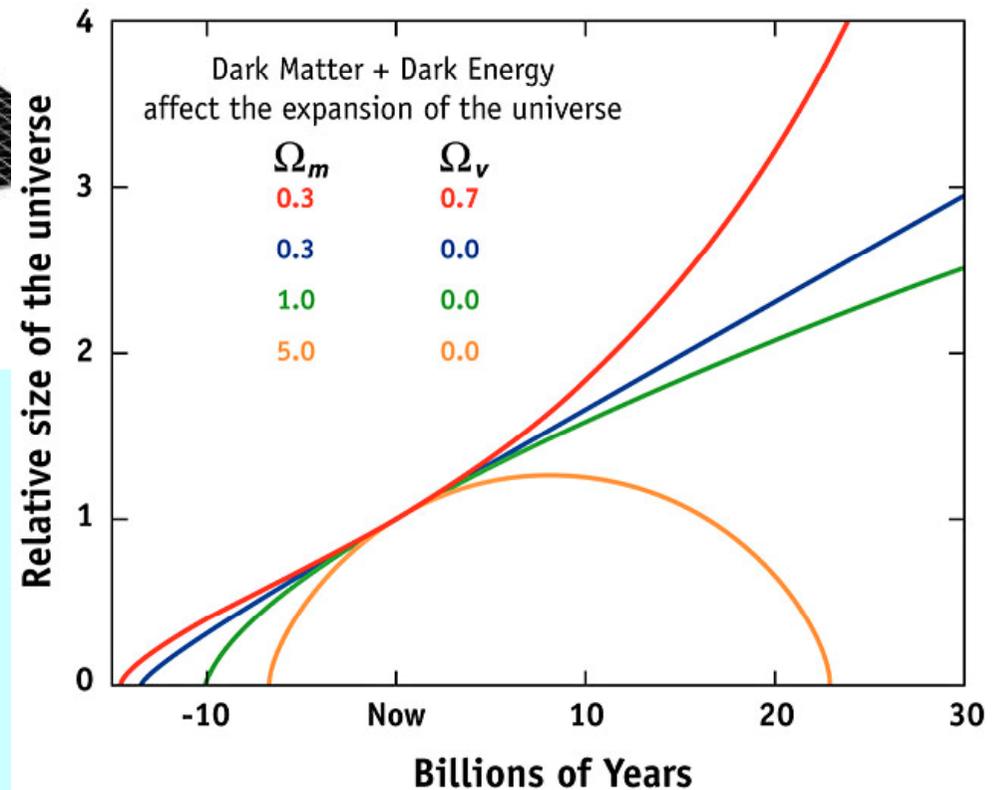
# Paramètres de l'Univers



MAP990006

$$\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}}$$

## EXPANSION OF THE UNIVERSE



# Conclusion

## Connaissances en progrès

Age de l'Univers, son contenu, sa géométrie

## Mais: encore beaucoup d'inconnu

Matière noire 24%

Energie noire 72%

Encore des **problèmes non résolus** dans la formation des galaxies

Recherche dans une extension/modification de la gravité?