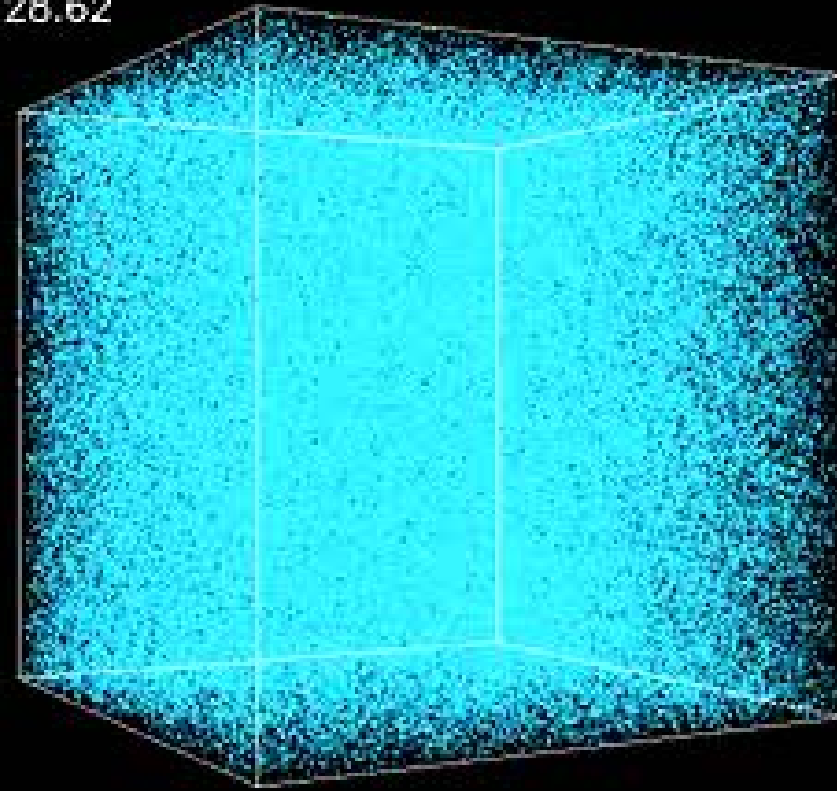




$Z=28.62$



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)



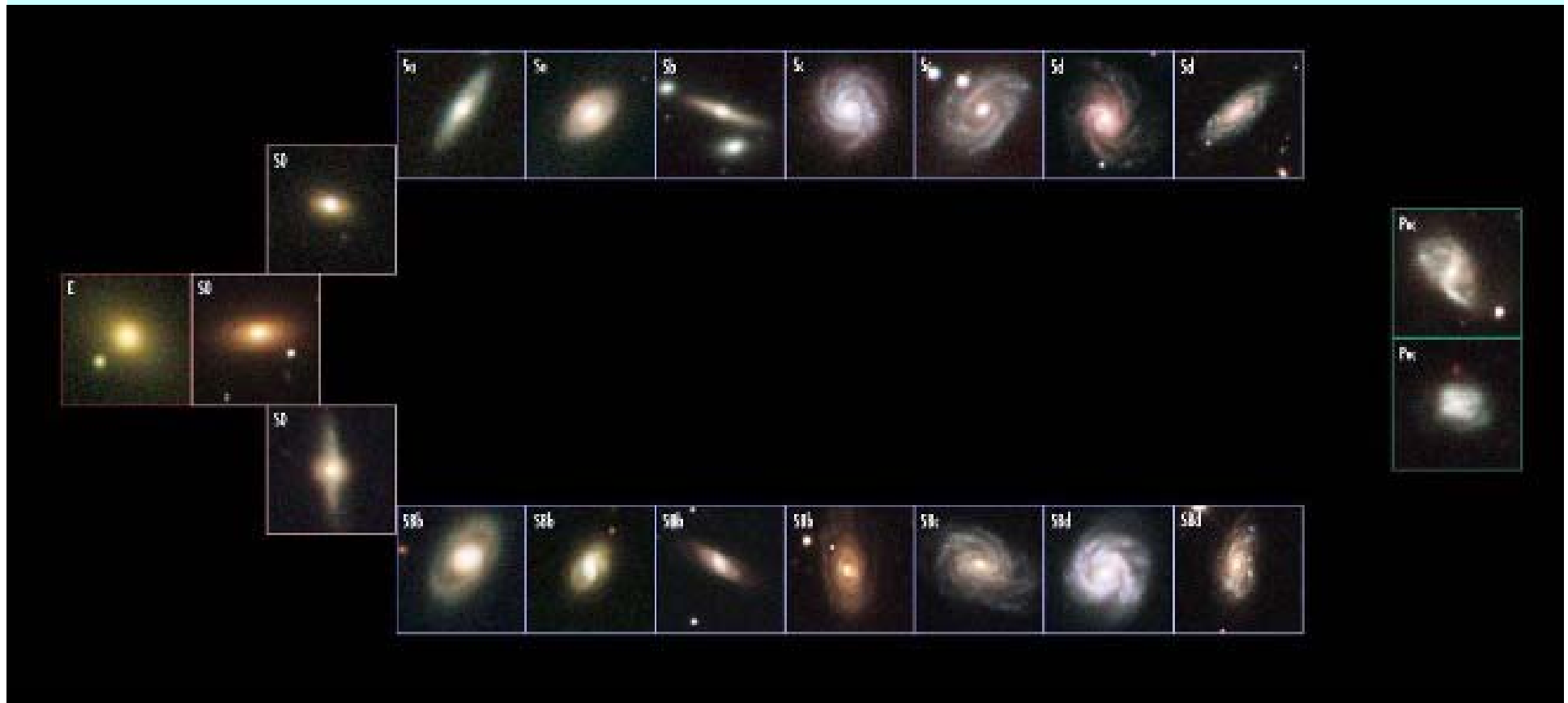
Messier 83



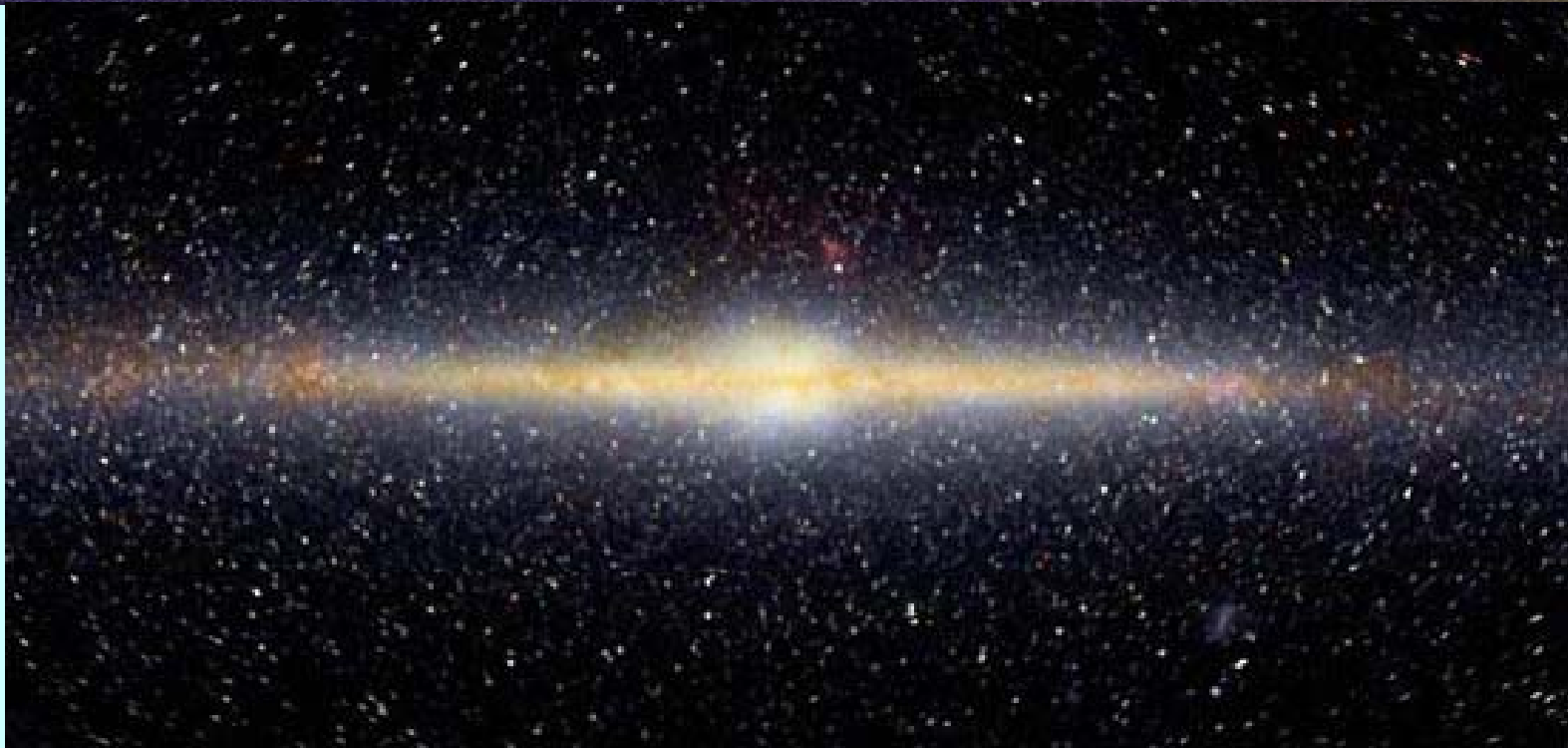
Voie Lactée

Toutes sortes de galaxies

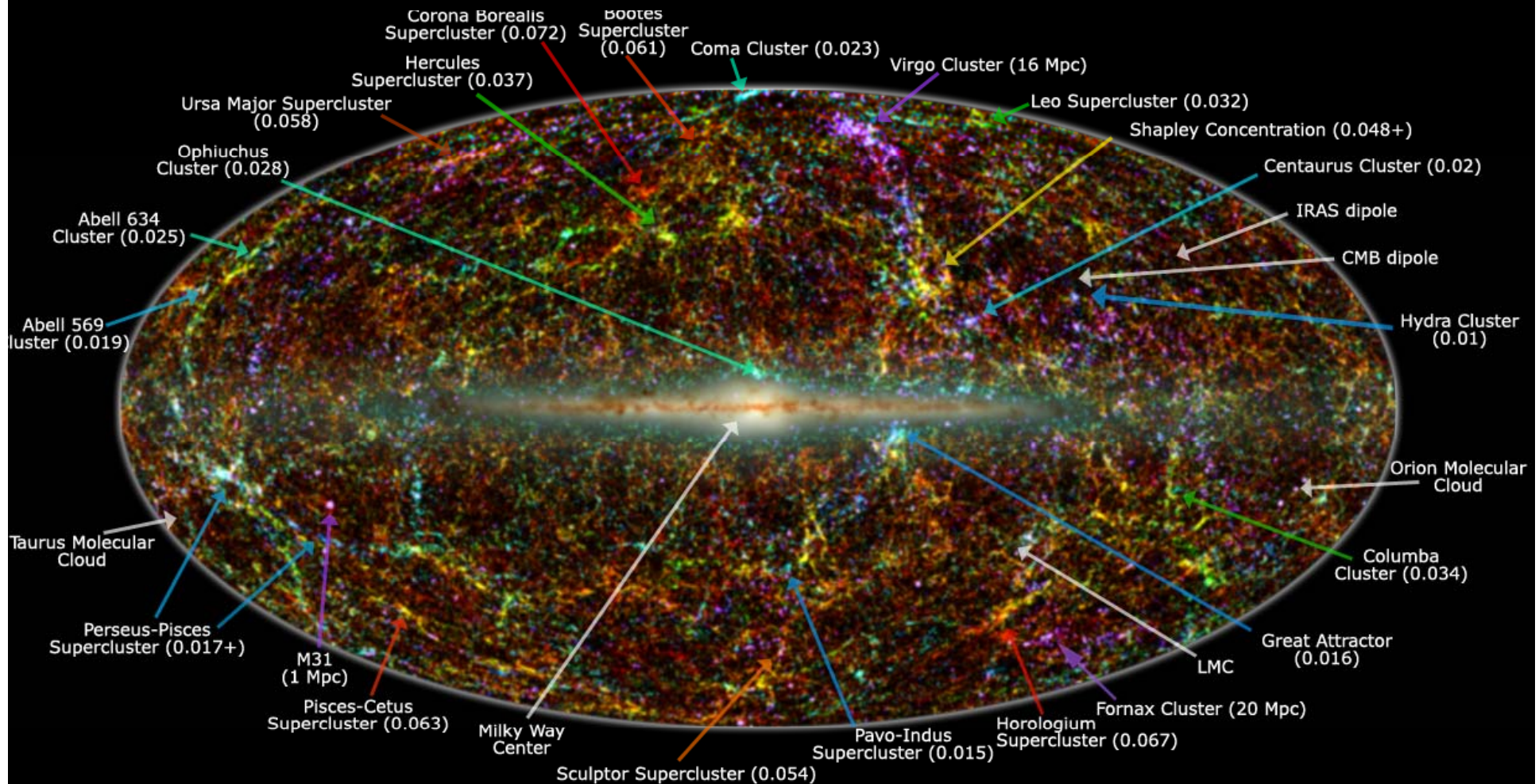
Elliptiques ... Bulbe dominant ... Spirales ... Irrégulières



Aperçu en optique, infra-rouge

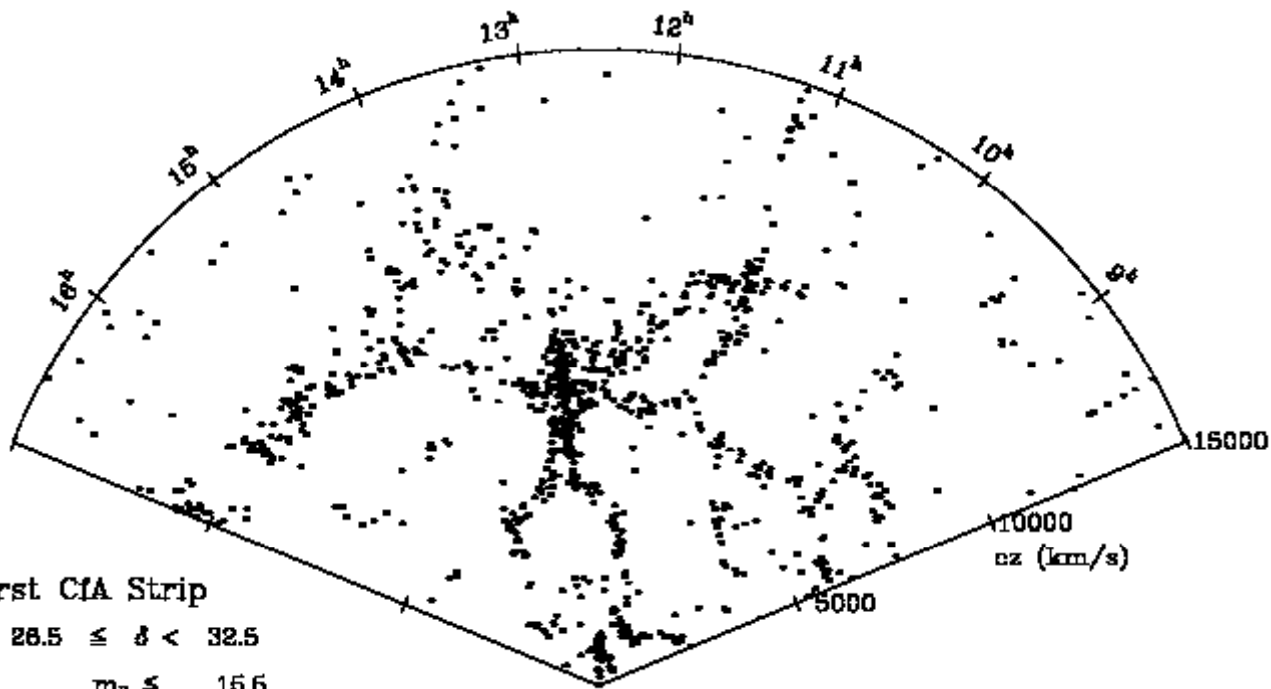


Grandes structures de l'Univers local



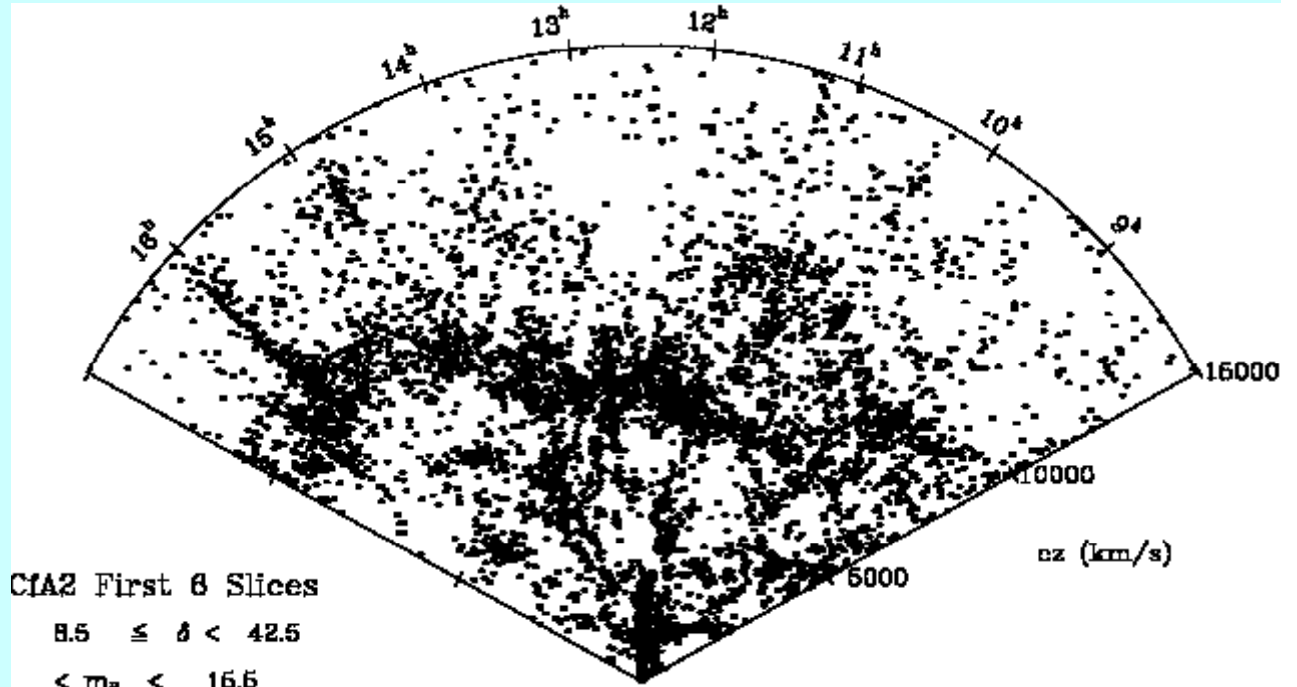
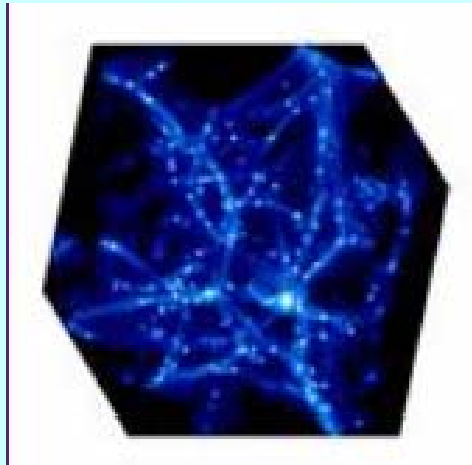
Legend: image shows 2MASS galaxies color coded by redshift (Jarrett 2004); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift). Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)

Amas et superamas proches



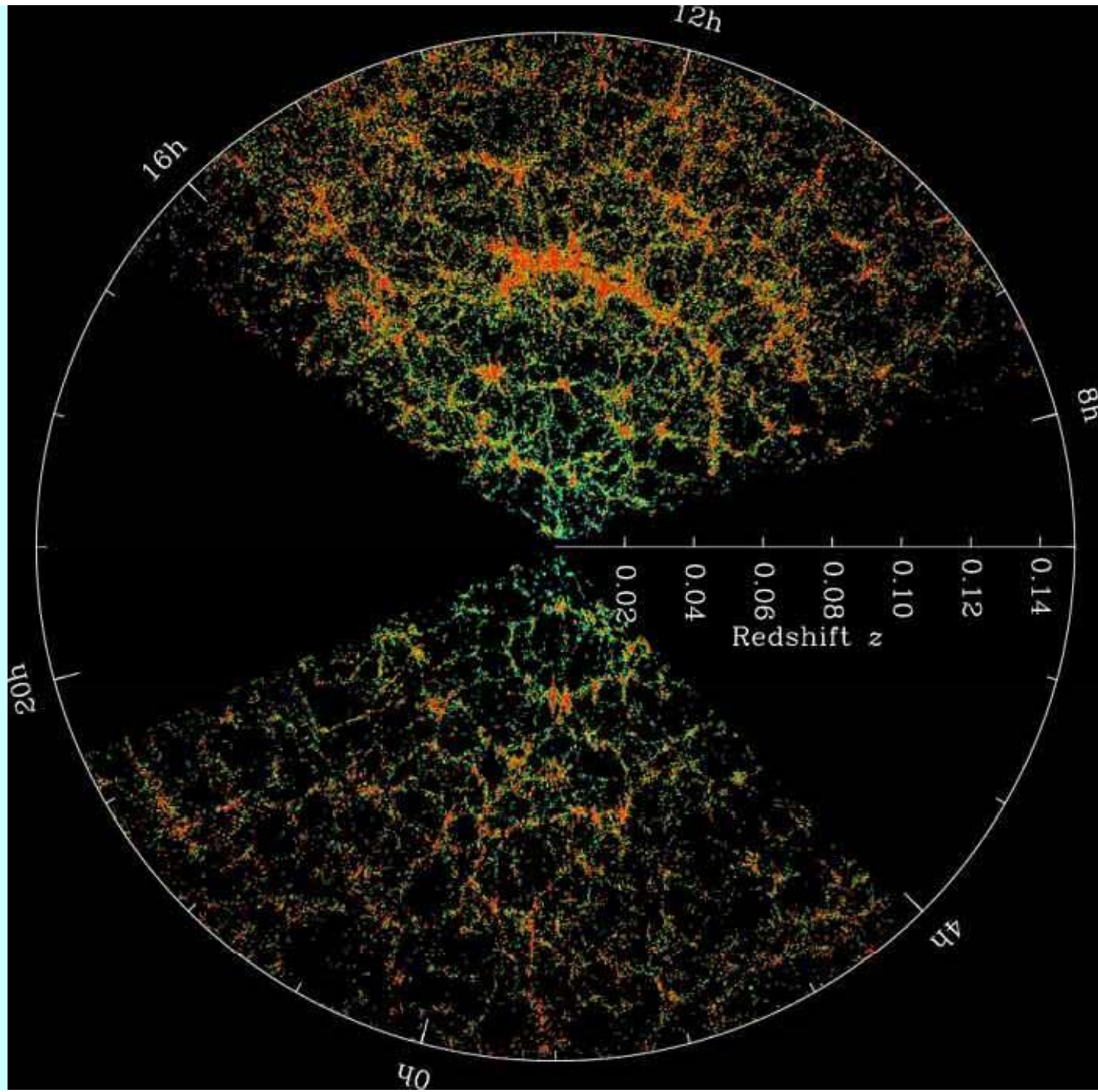
First CfA Strip

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

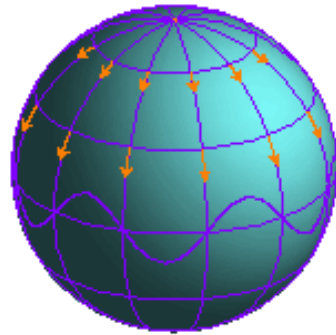


CfA2 First 6 Slices

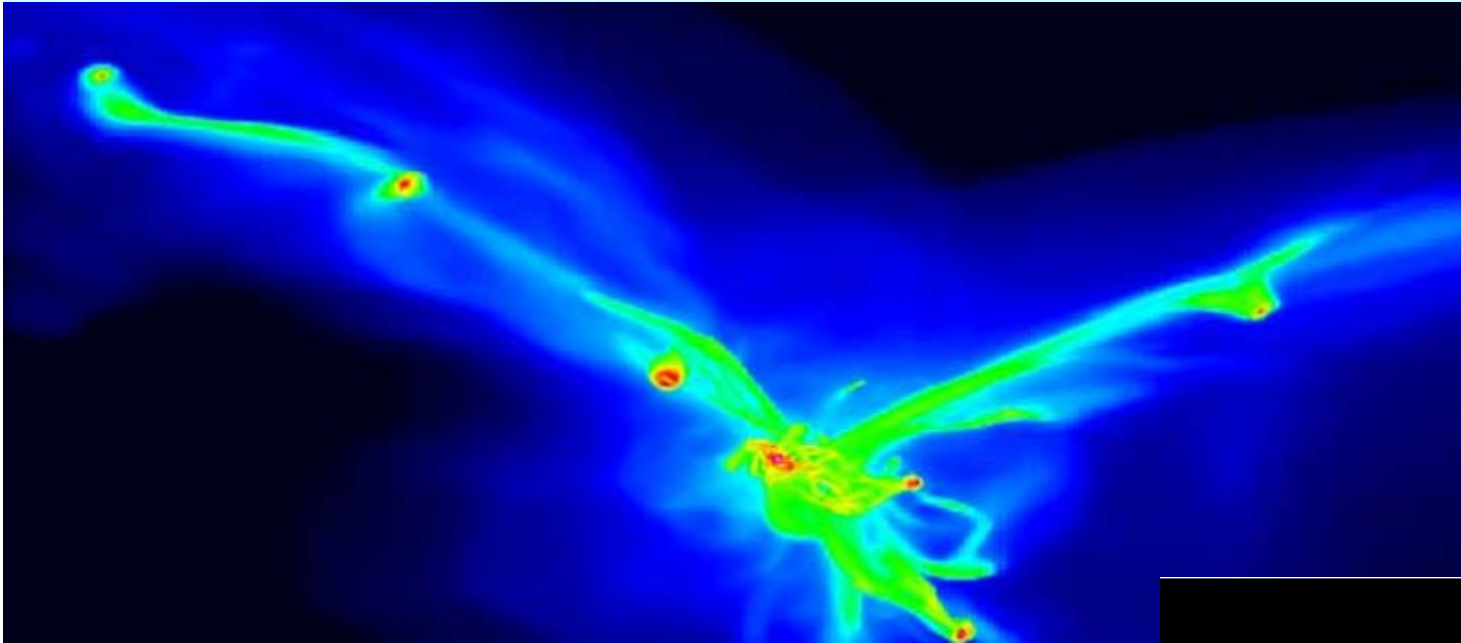
$8.5 \leq \delta < 42.5$
 $< m_B < 16.6$



Expansion de l'Univers et décalage vers le rouge

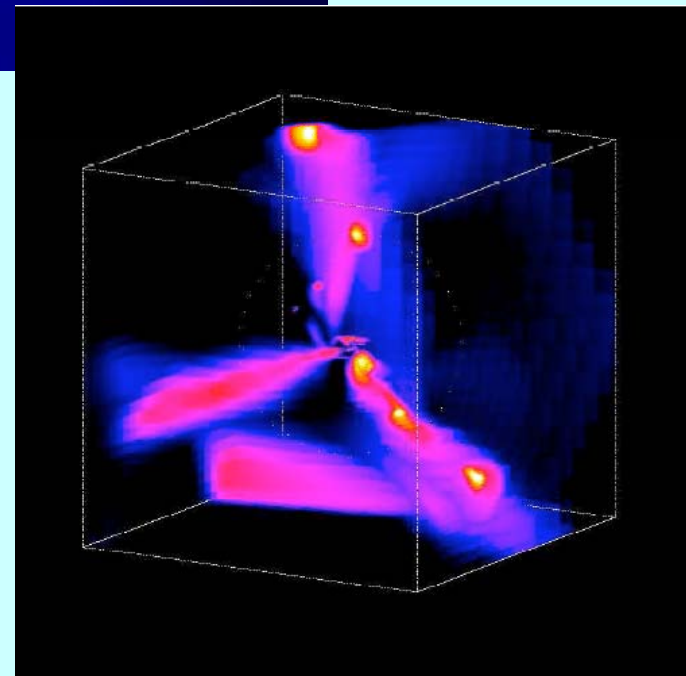


Filaments Cosmiques



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

→ Accrétion de gaz



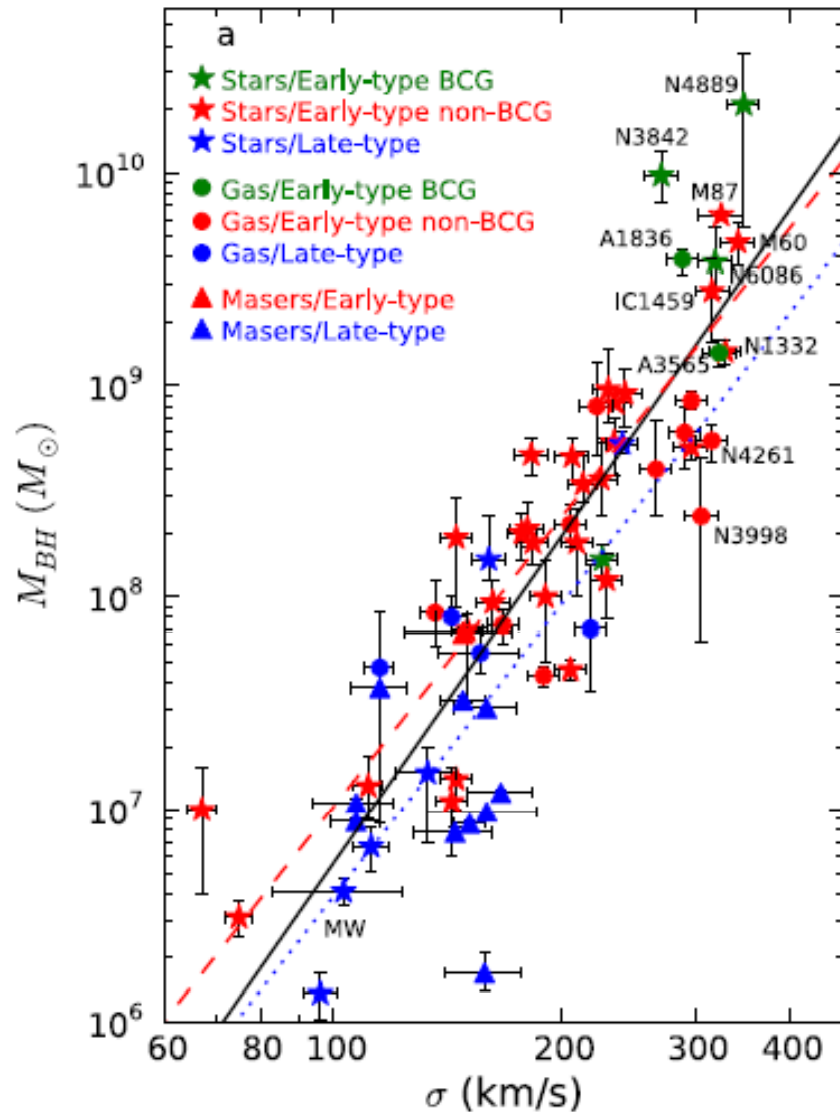
Dans chaque galaxie, un trou noir massif

- Trous noirs de quelques millions à qq milliards de M_{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

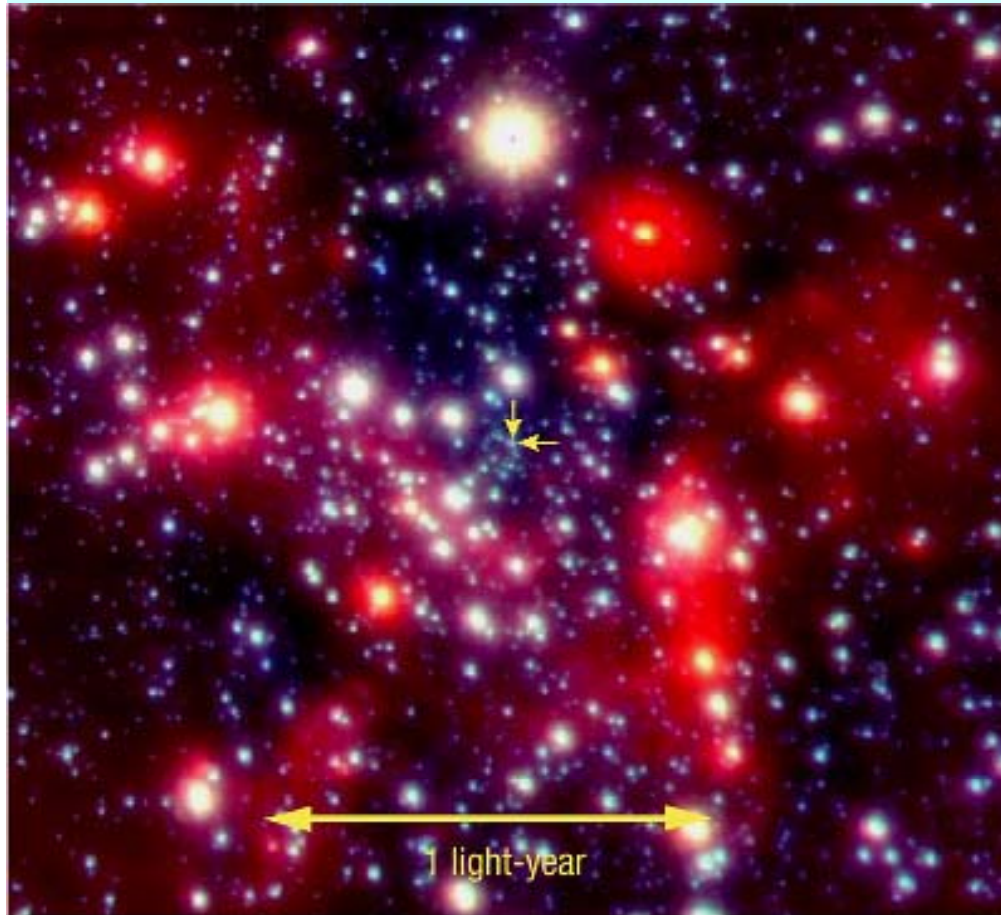


Les deux masses sont proportionnelles $\sim 1/700$

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

Galaxies cannibales au centre

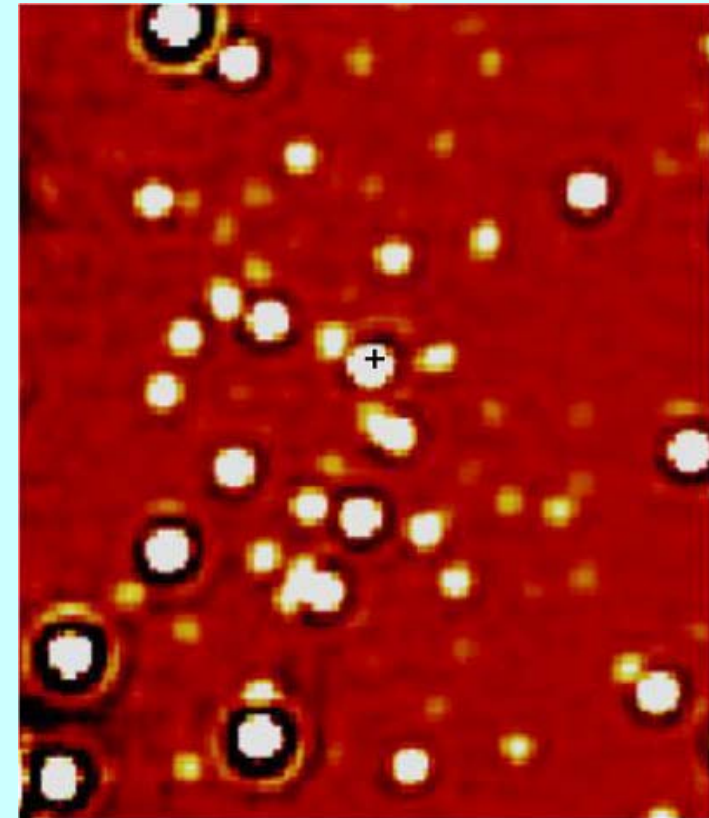
Astrométrie et mouvements propres au centre galactique



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

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

©European Southern Observatory



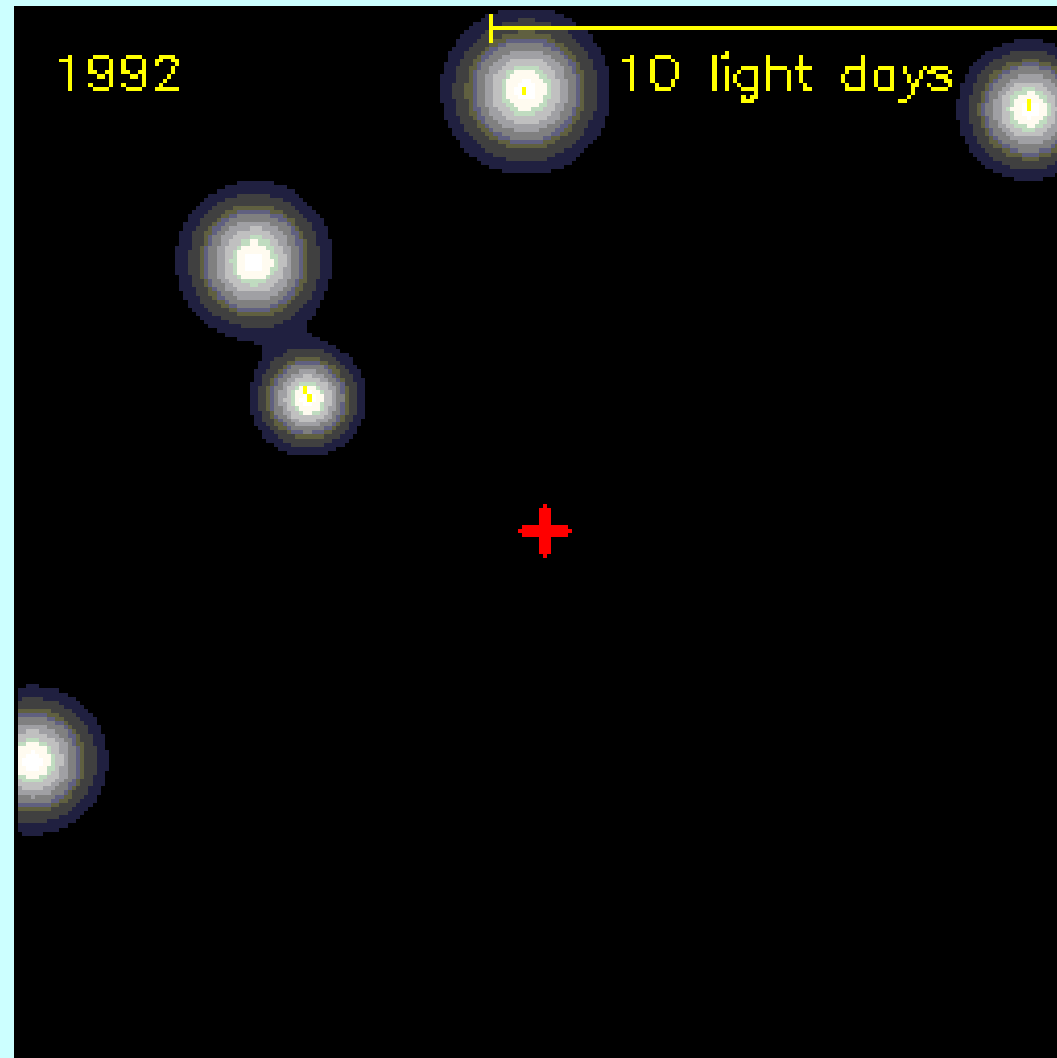
The Centre of the Milky Way (detail)
(VLT YEPUN + NACO)

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

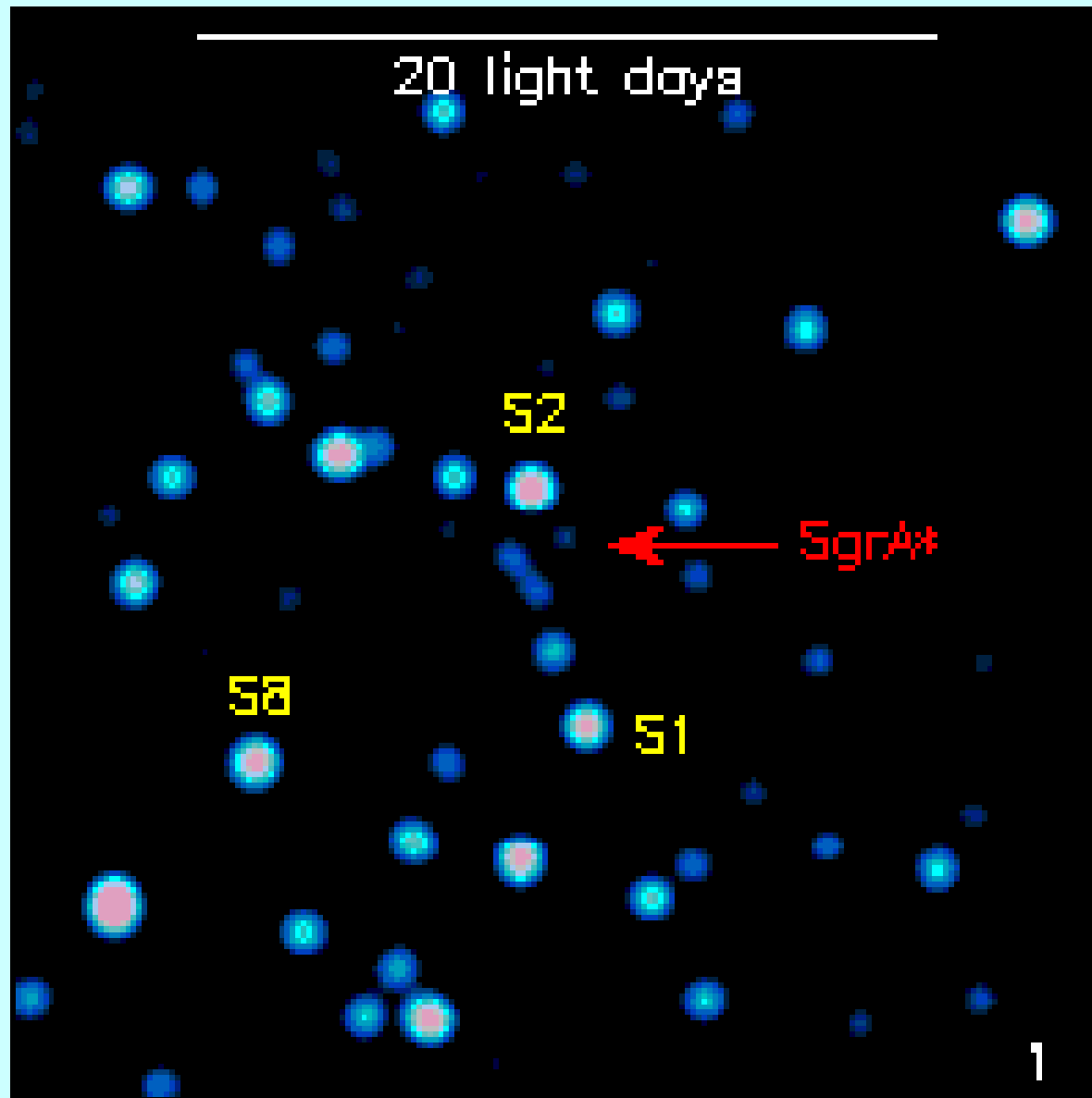
©European Southern Observatory



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

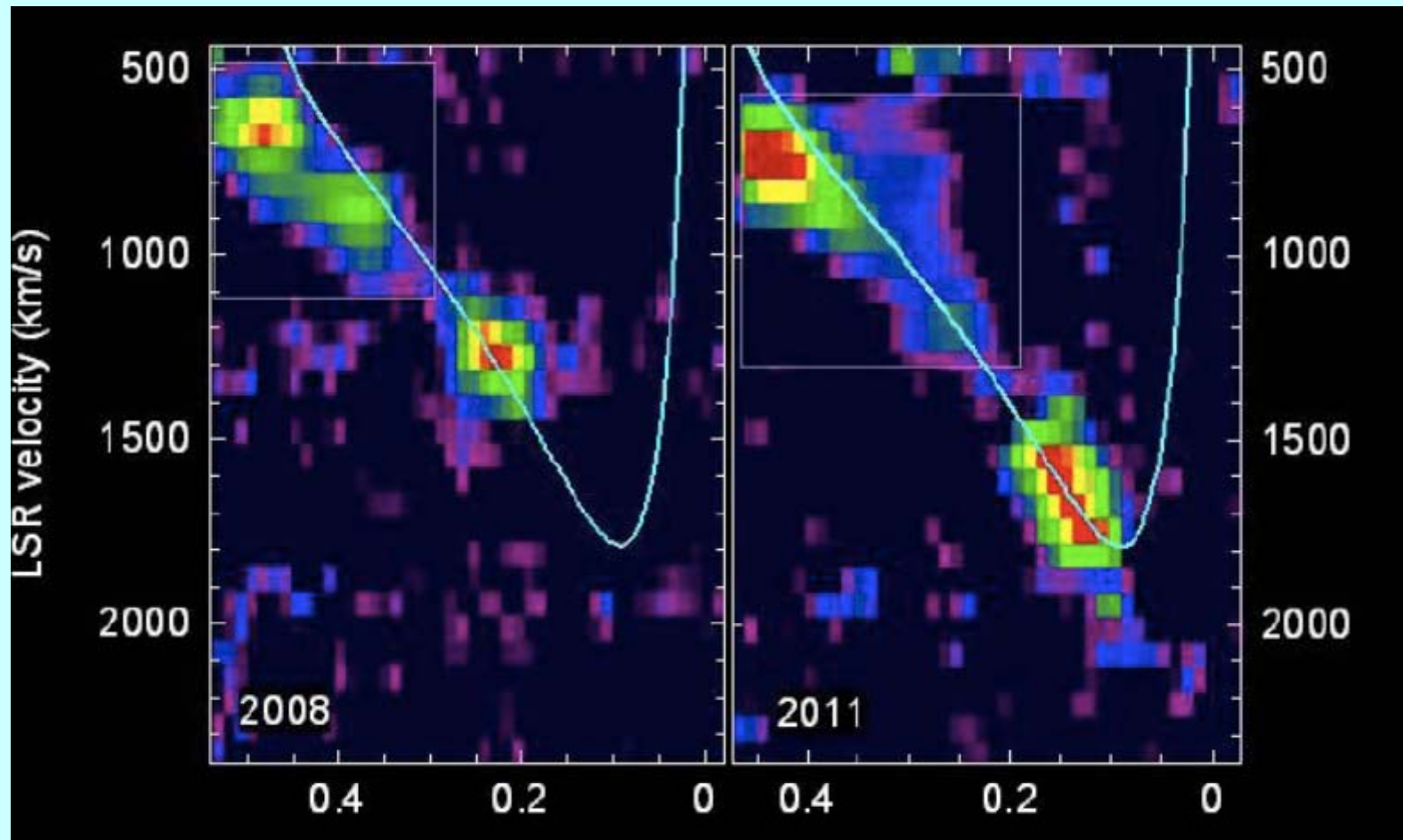


Sursaut Infrarouge du trou noir de la Galaxie



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

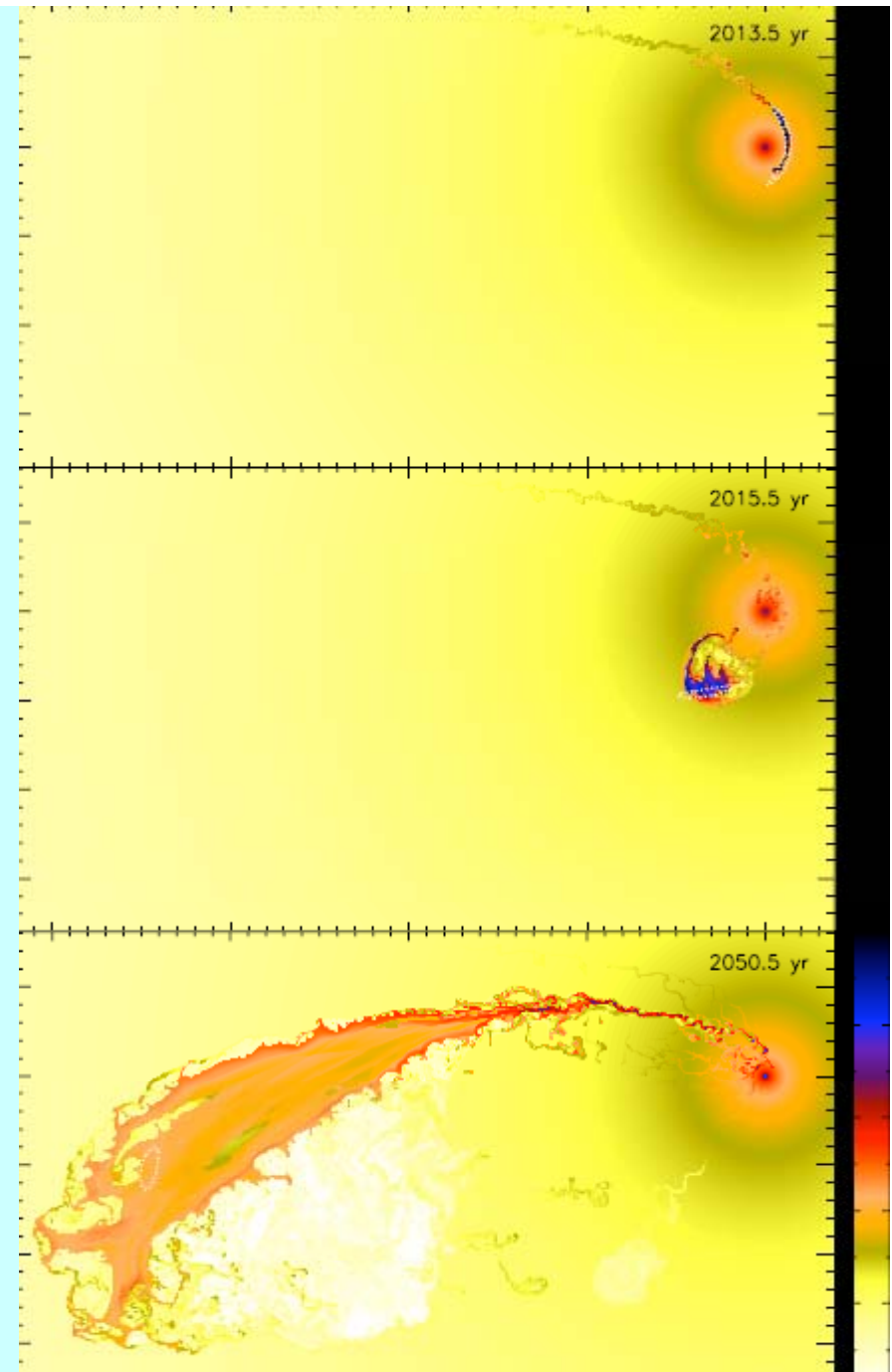
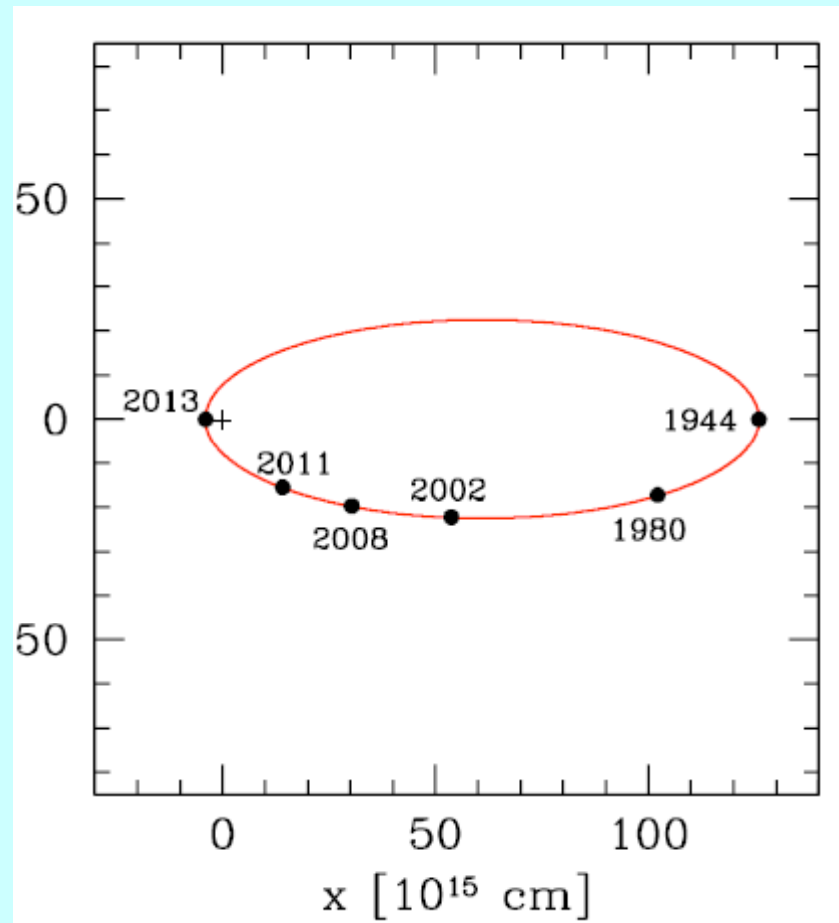
Découverte d'un nuage de gaz (Nature 2011)



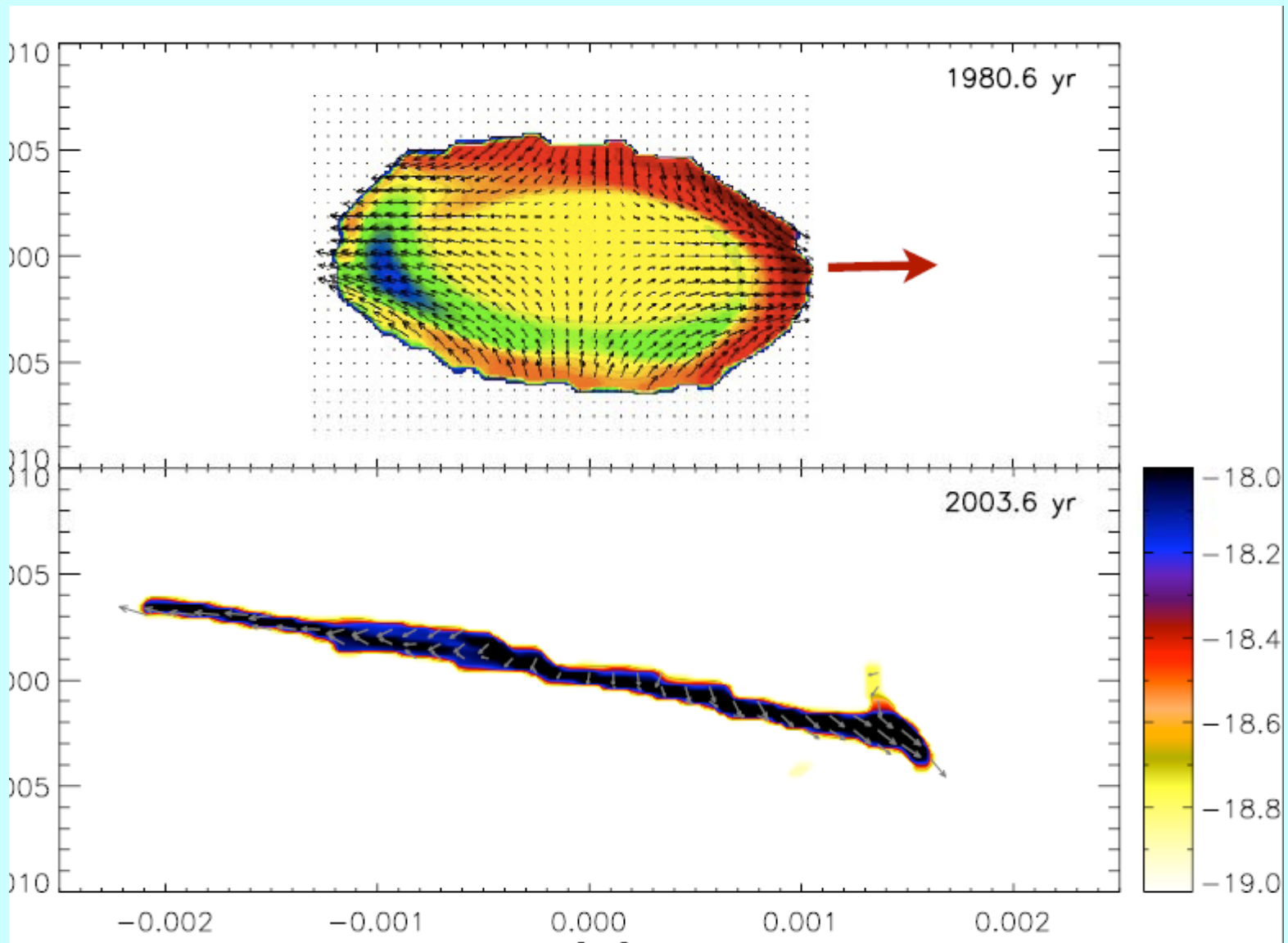
Distance au trou noir en arcsec (=0.1 al)

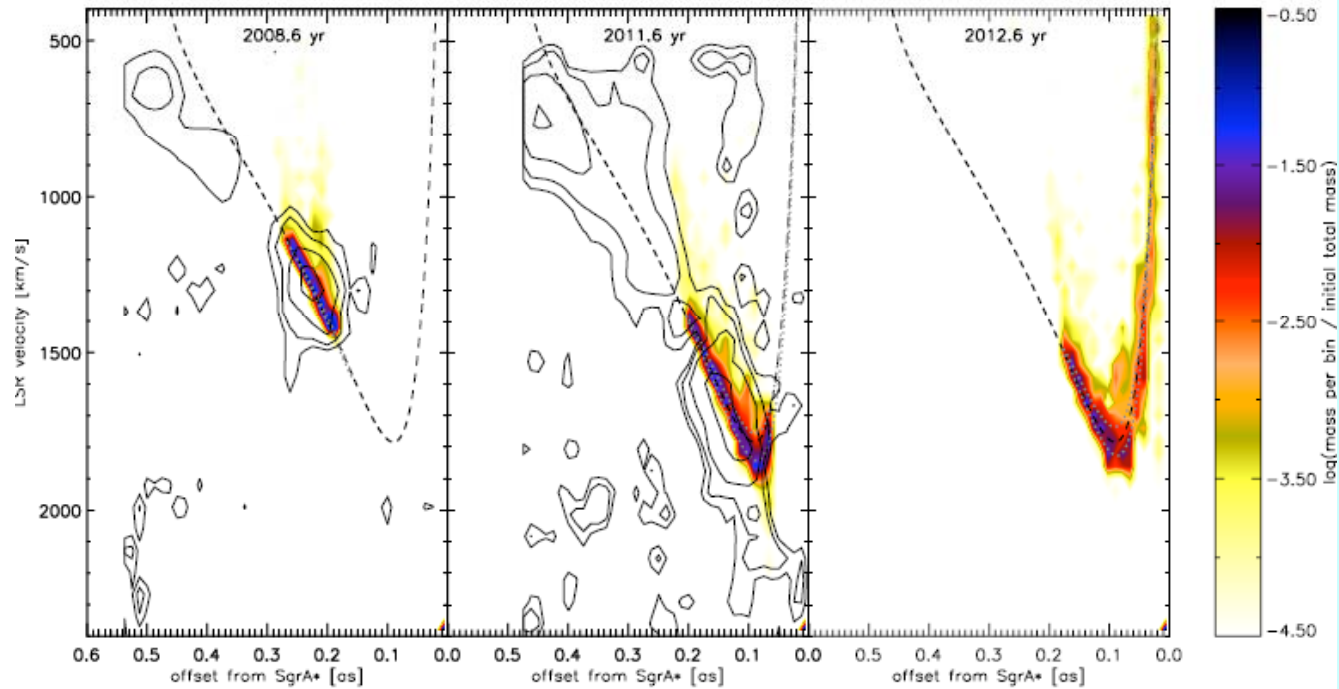
Orbite du nuage de gaz ($10^{-5} M_{\odot}$)

137 ans de période



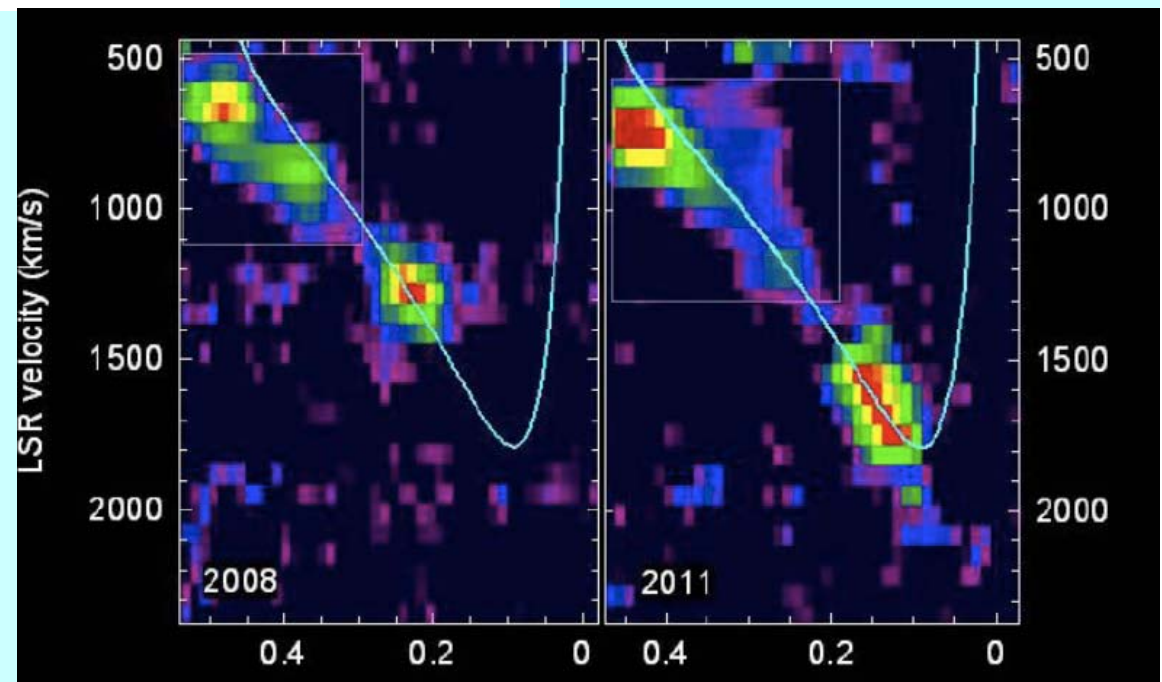
Comment le gaz est arrivé?

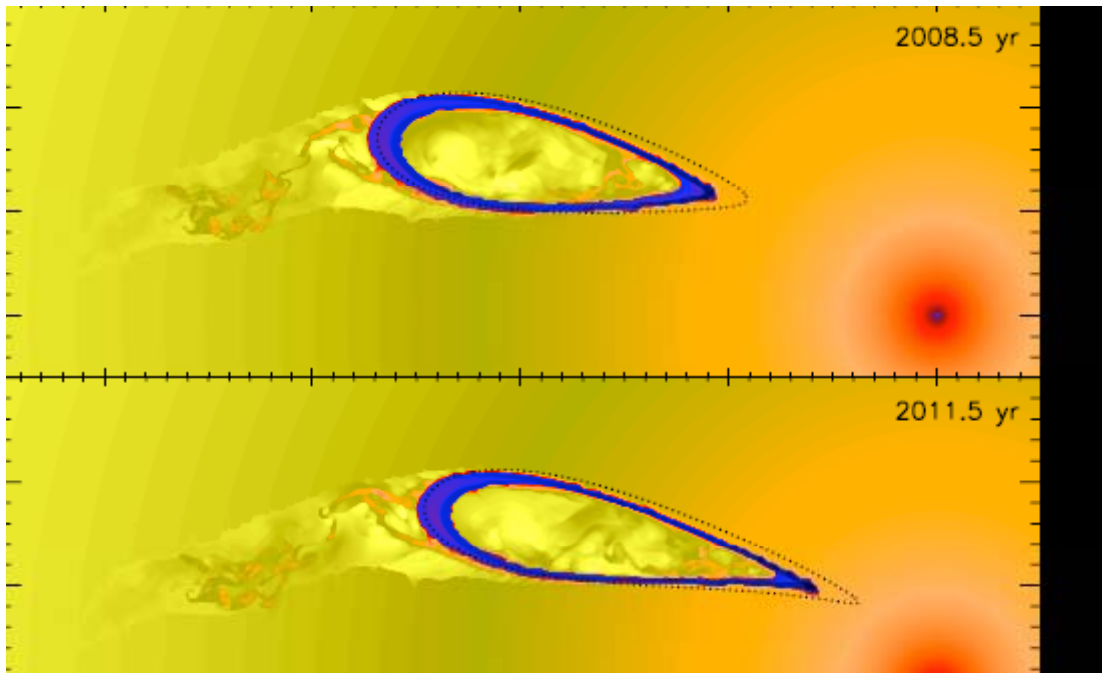




Un seul nuage?

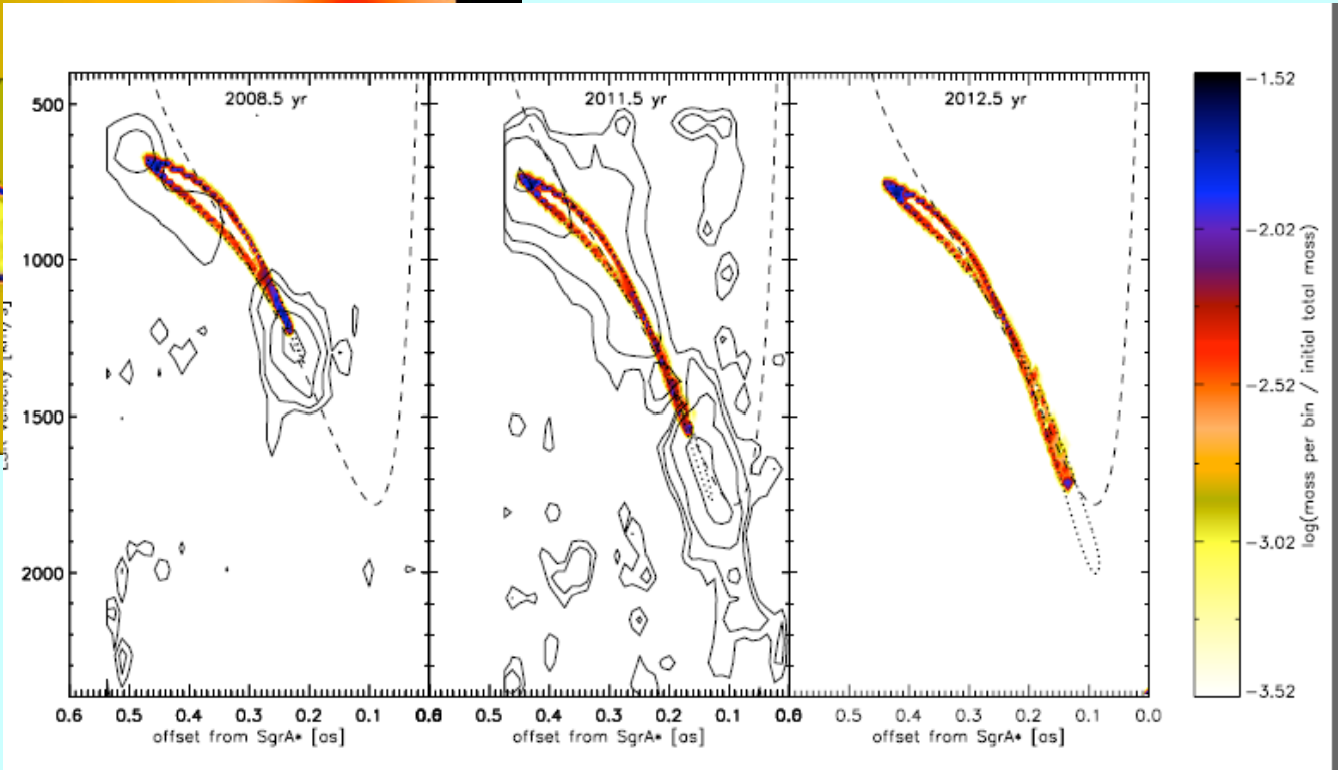
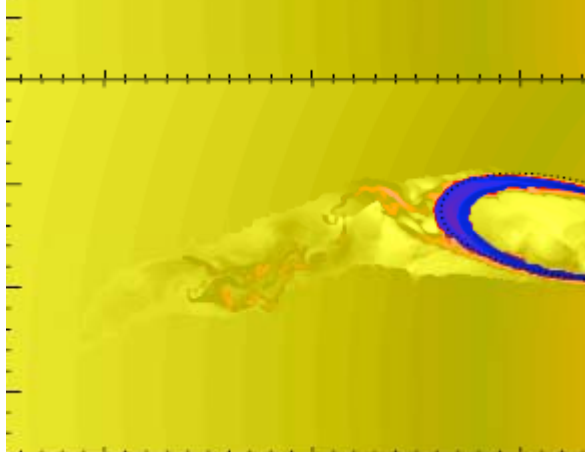
Ne semble pas
ressembler aux
observations





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

Ou résonance de Lindblad?

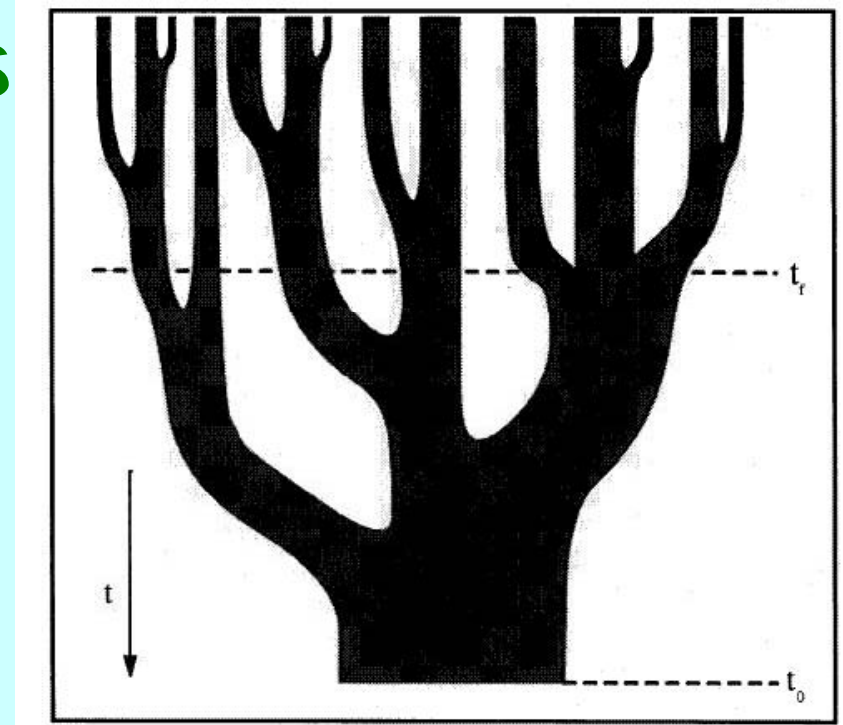


Formation hiérarchique des galaxies

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



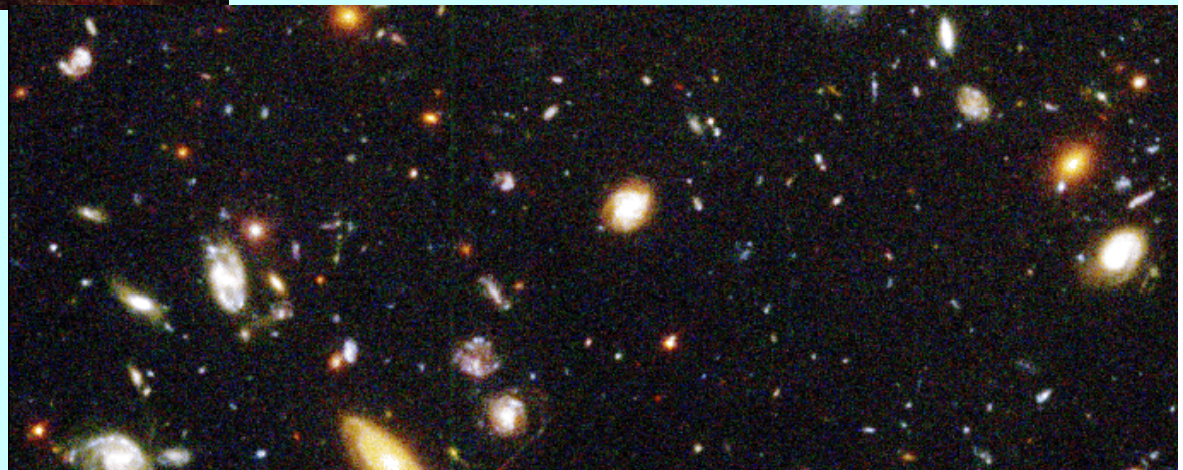
Voir plus loin, et remonter dans le temps

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

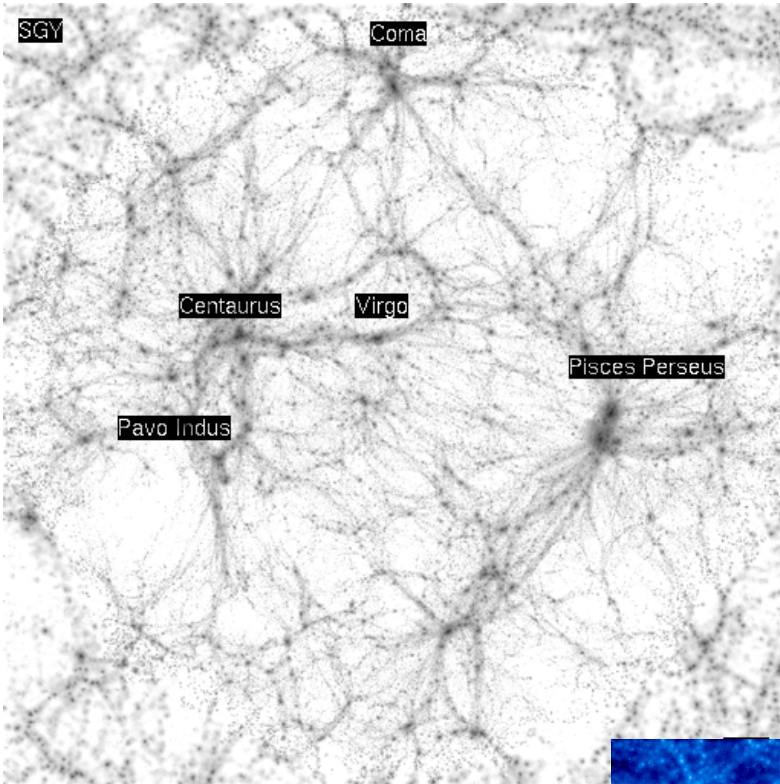
Galaxies plus nombreuses

Formation de plus d'étoiles

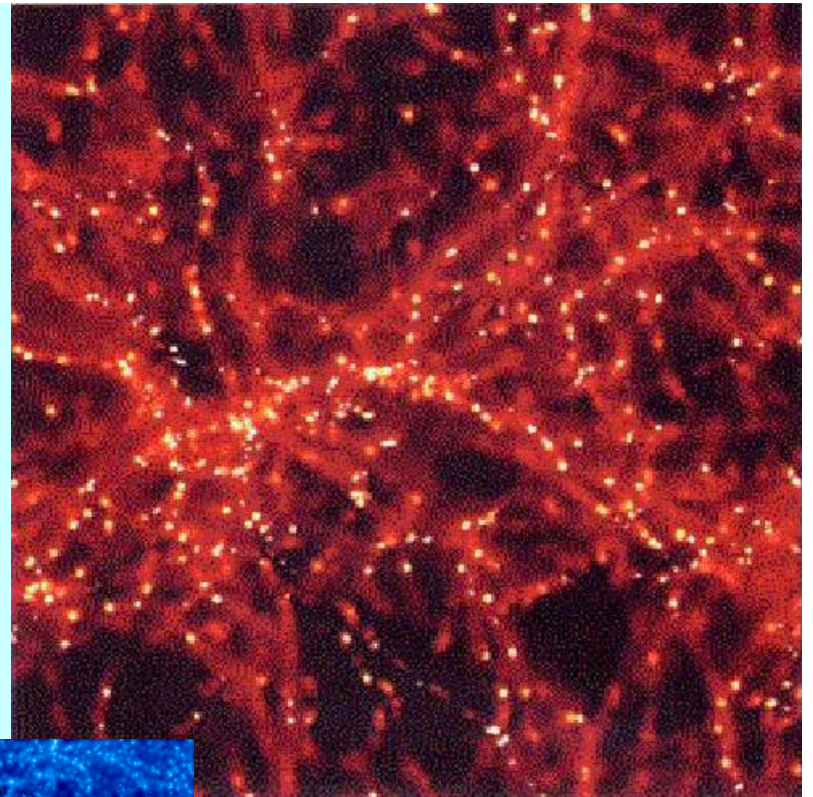
Noyaux plus actifs





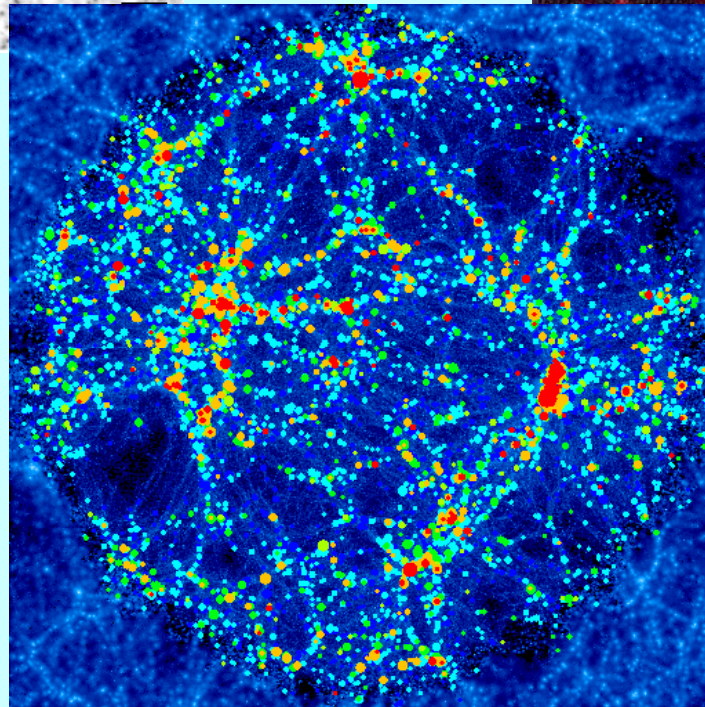


Gaz



Matière noire CDM

Simulations

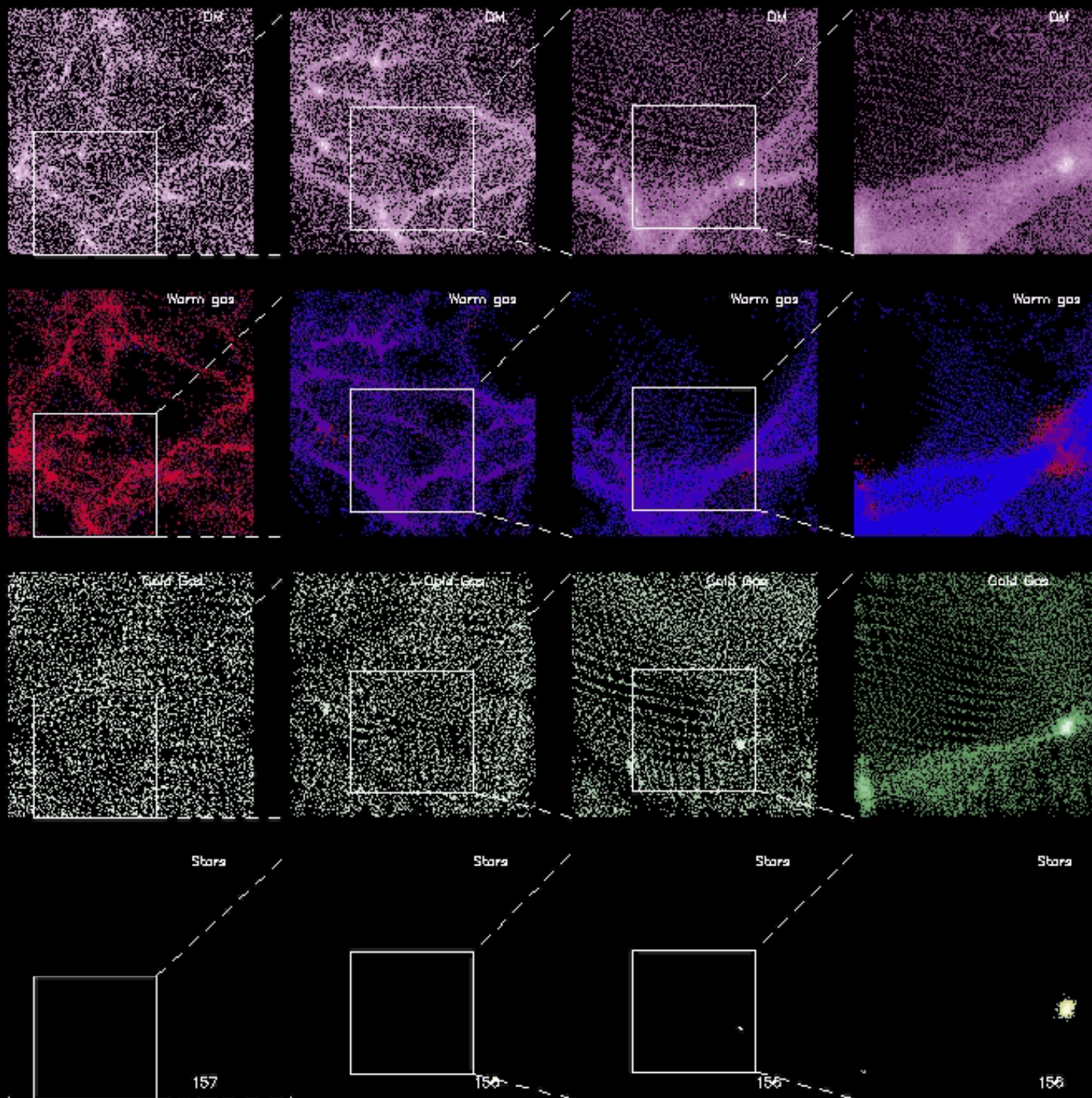


Galaxies

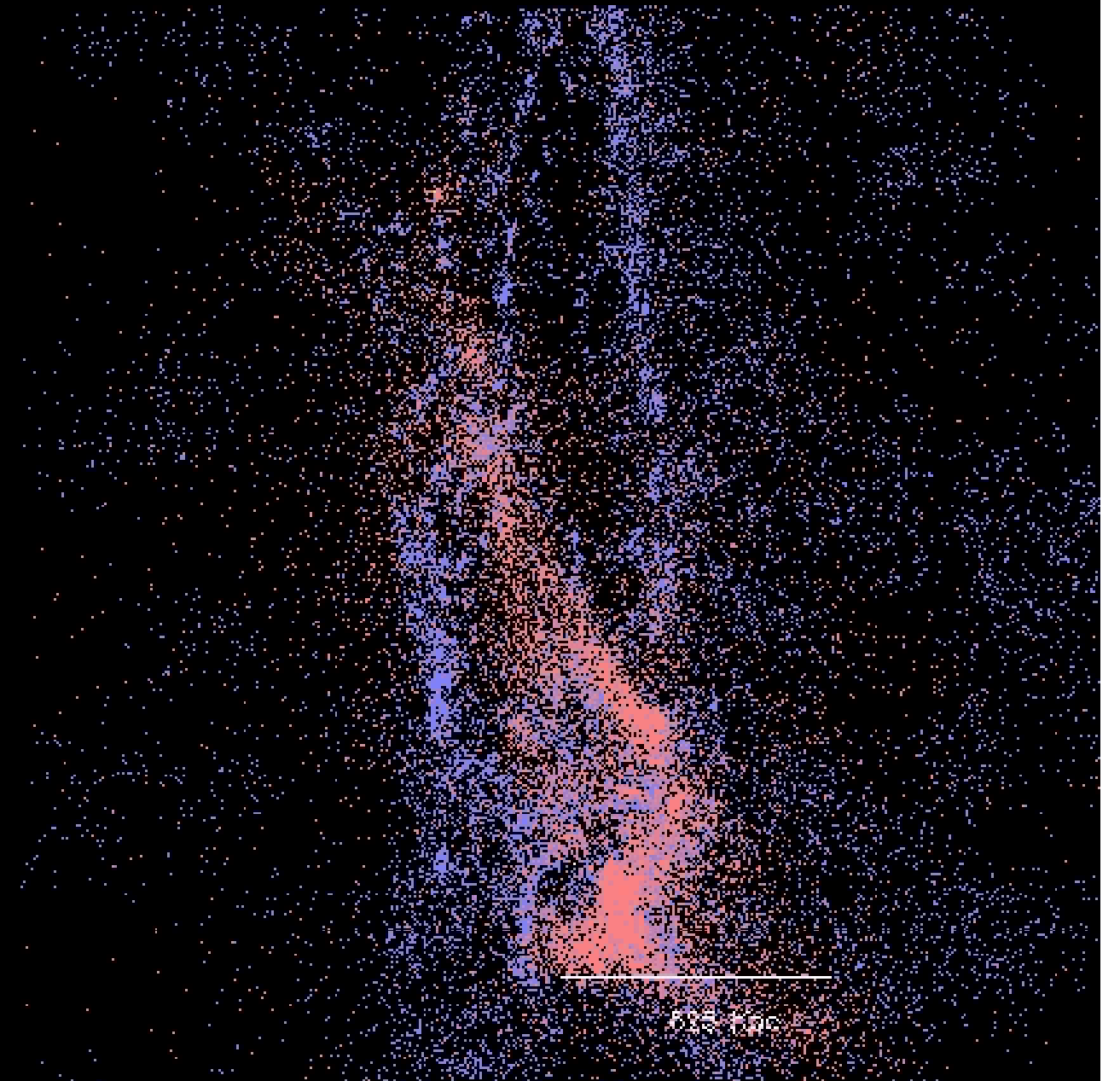
4 « phases »

4 Niveaux de zoom
de 20 à 2.5 Mpc.

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



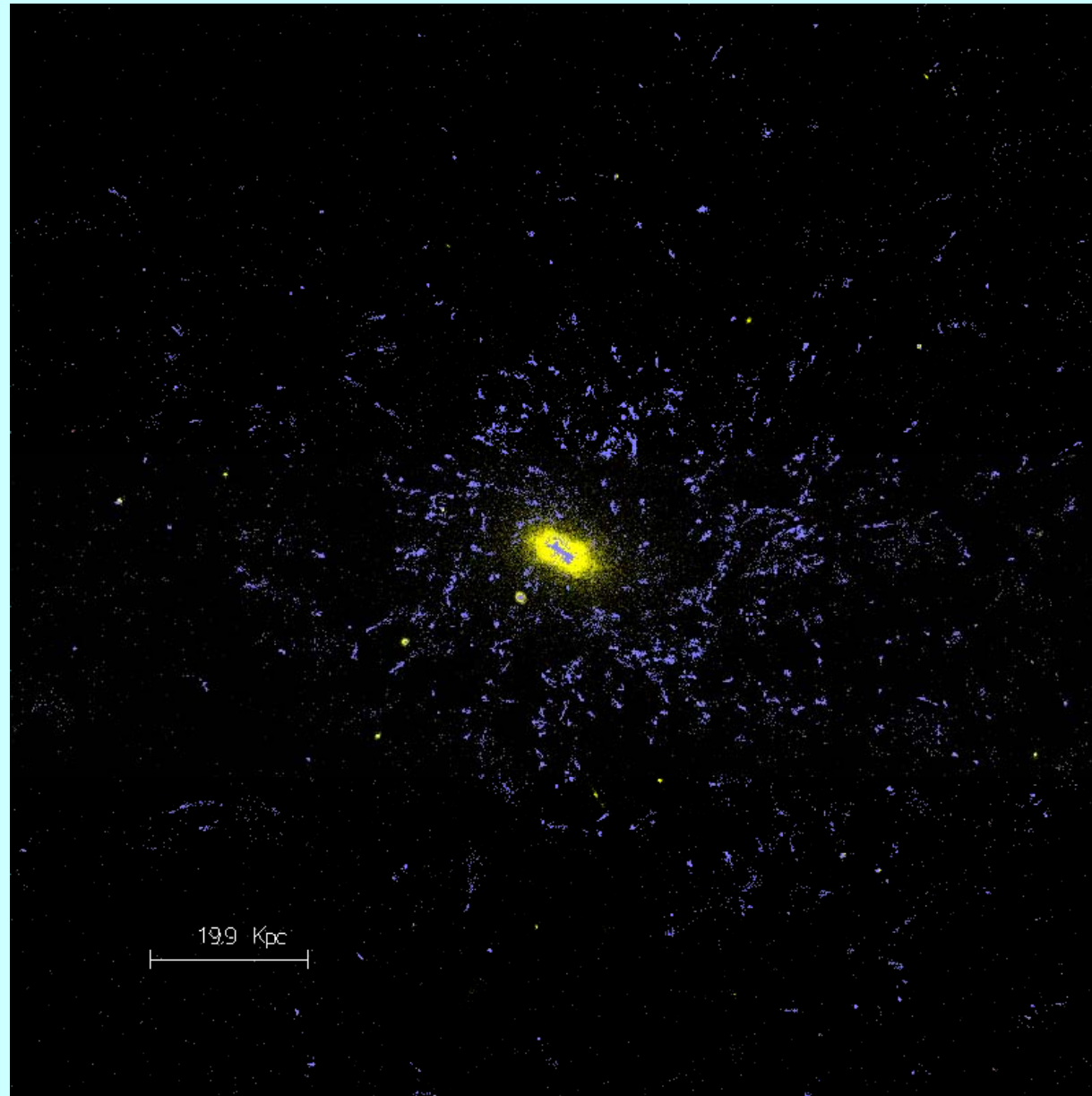
Galaxies et Filaments



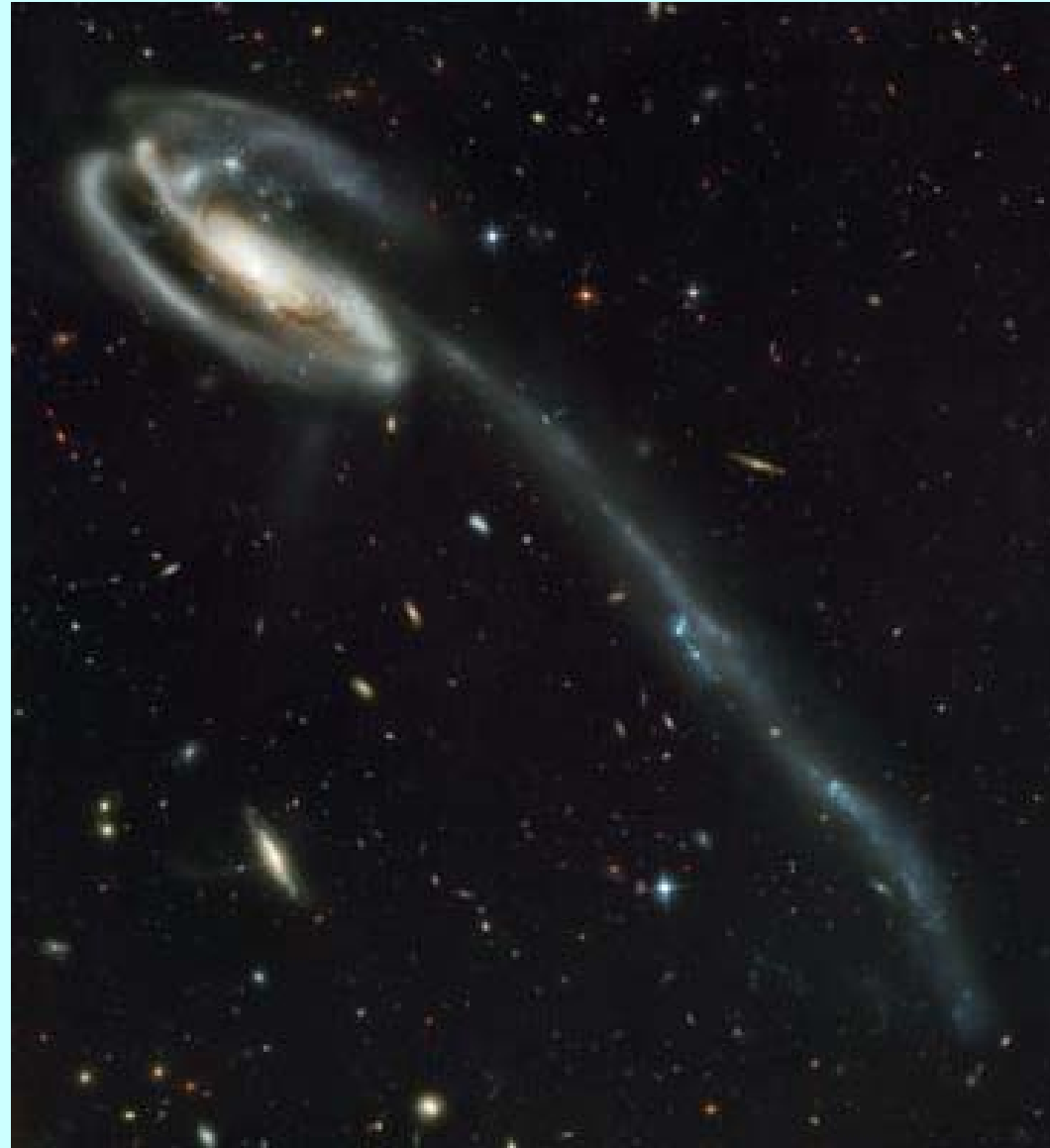
Multi-zoom

100 kpc

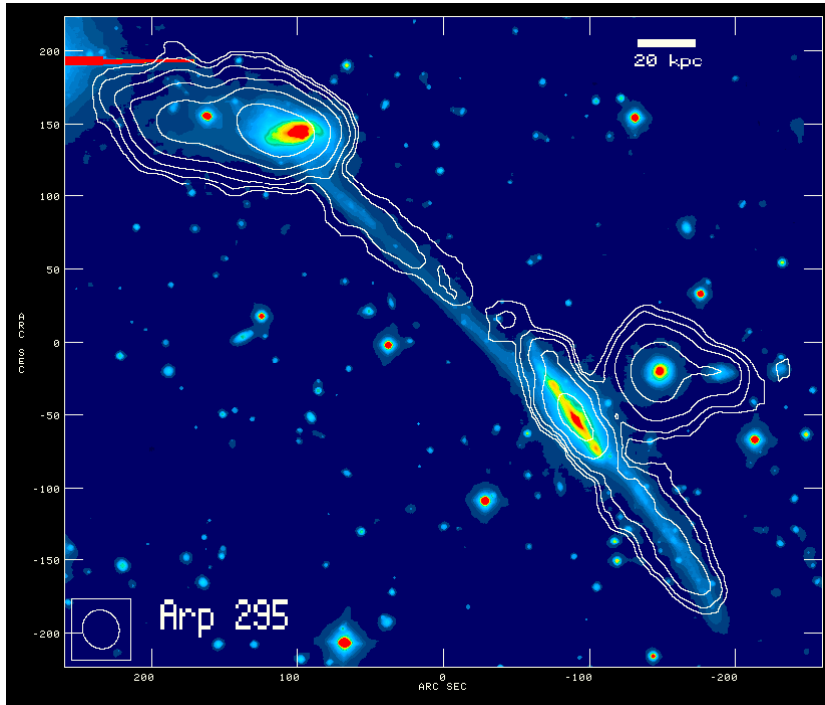
Interactions entre galaxies → fusion



Nombreux exemples d'interactions: Arp 188



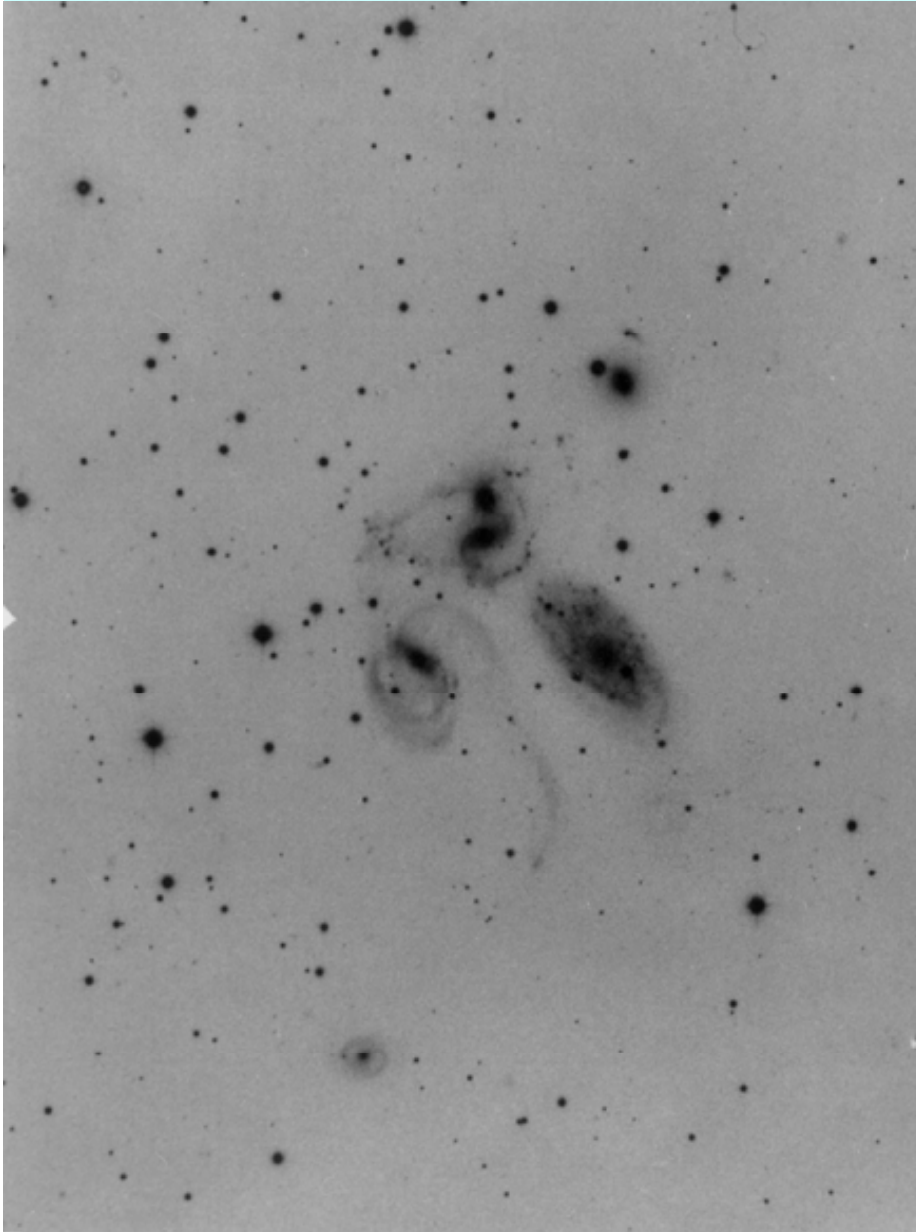
Arp 295



Contours en blanc:
Gaz d'hydrogène
atomique



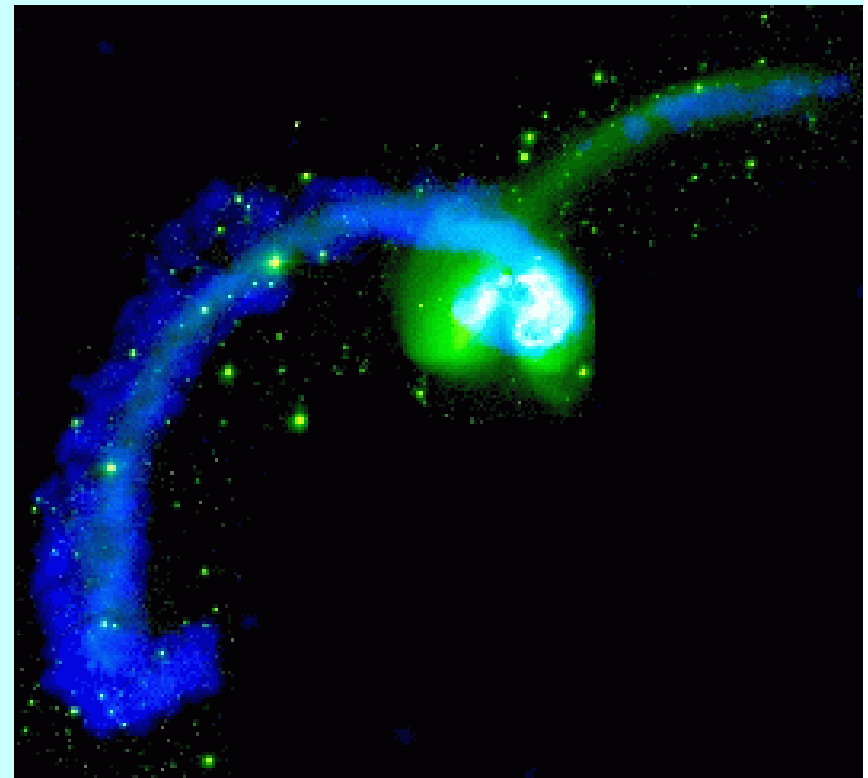
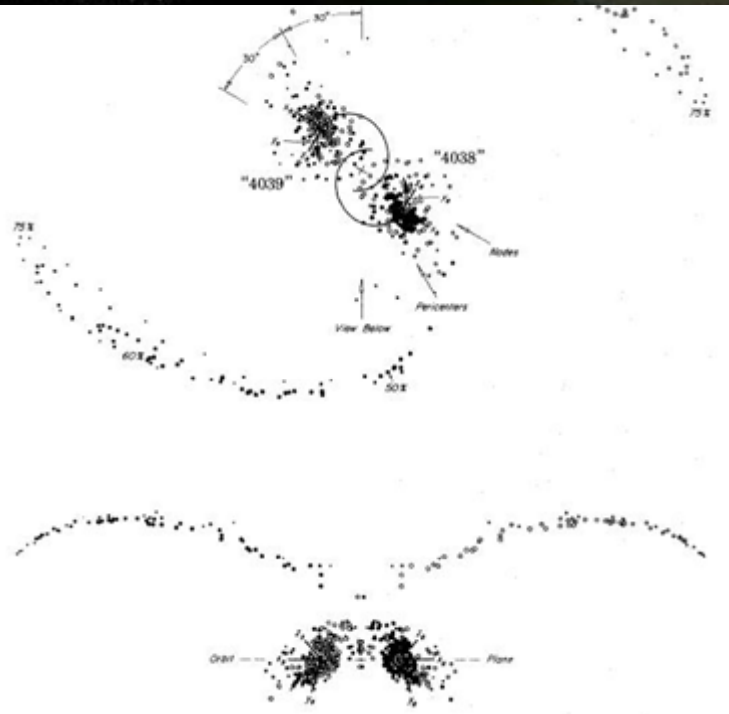
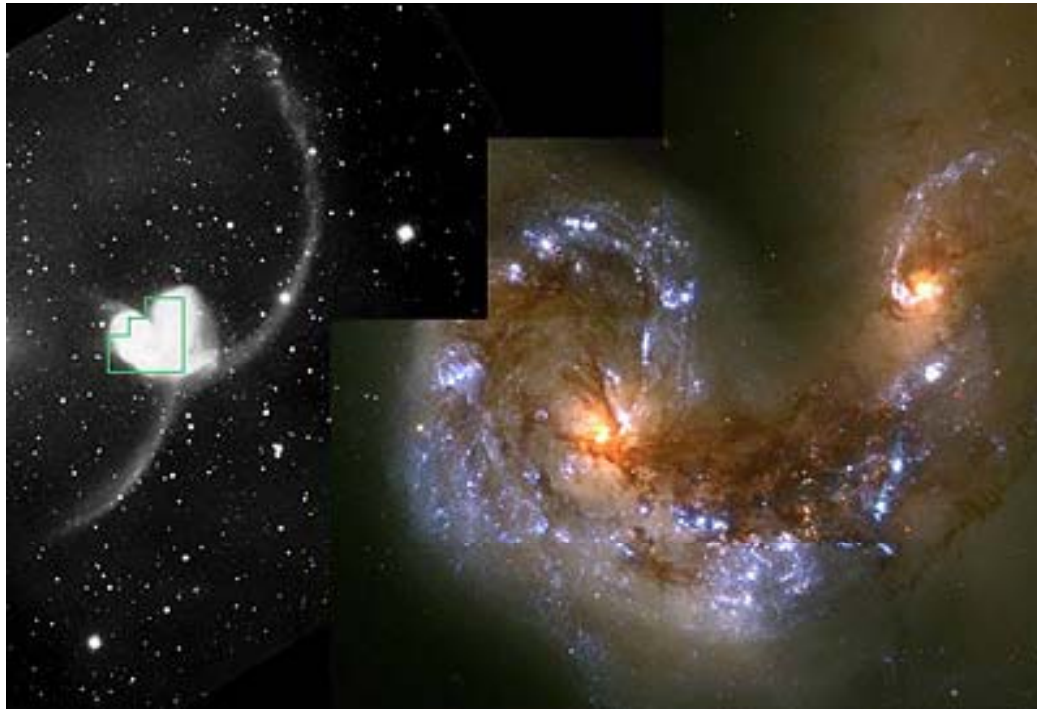
Quintette de Stefan



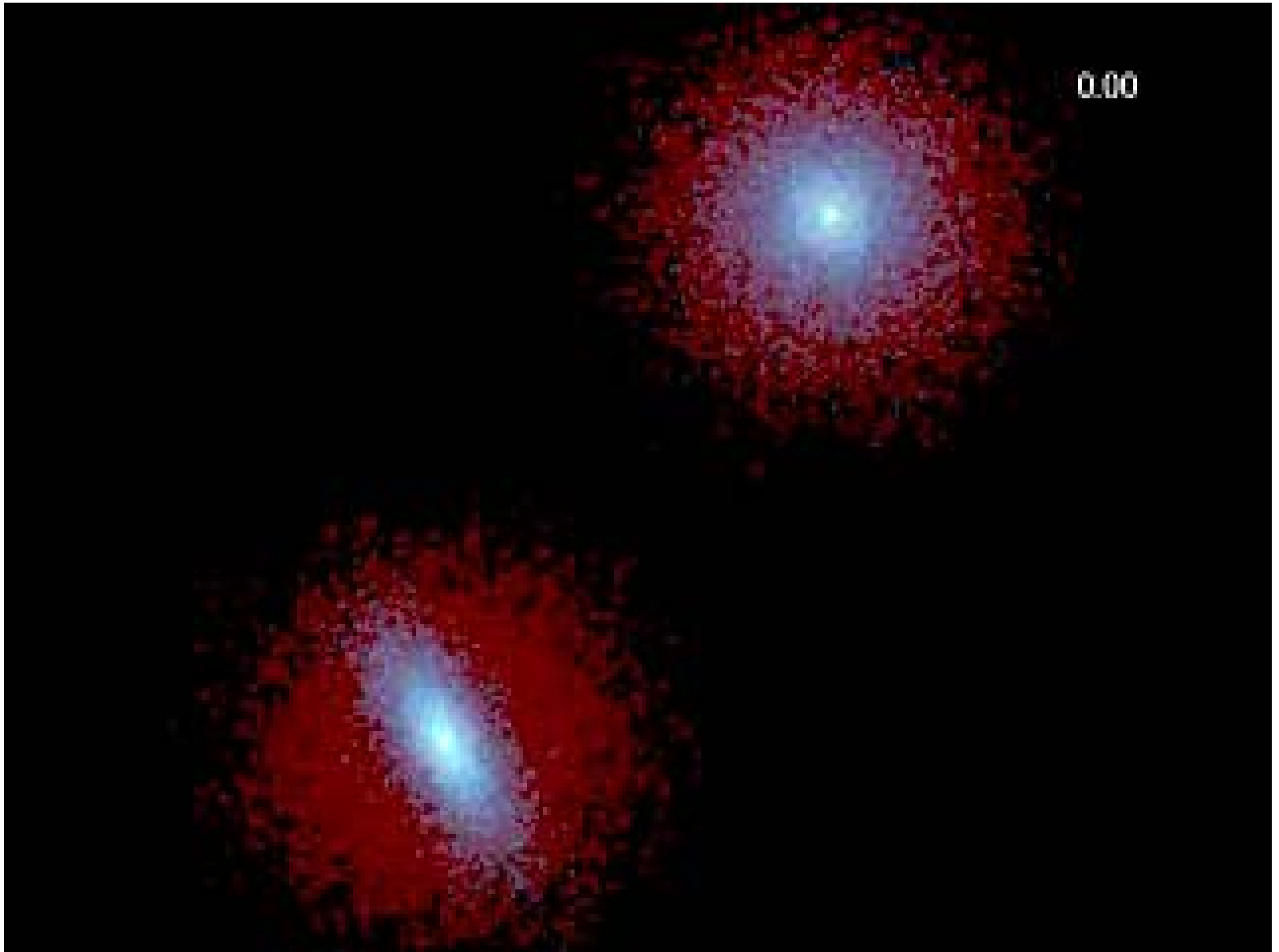
Gaz inter-galactique: Rayons X, chocs



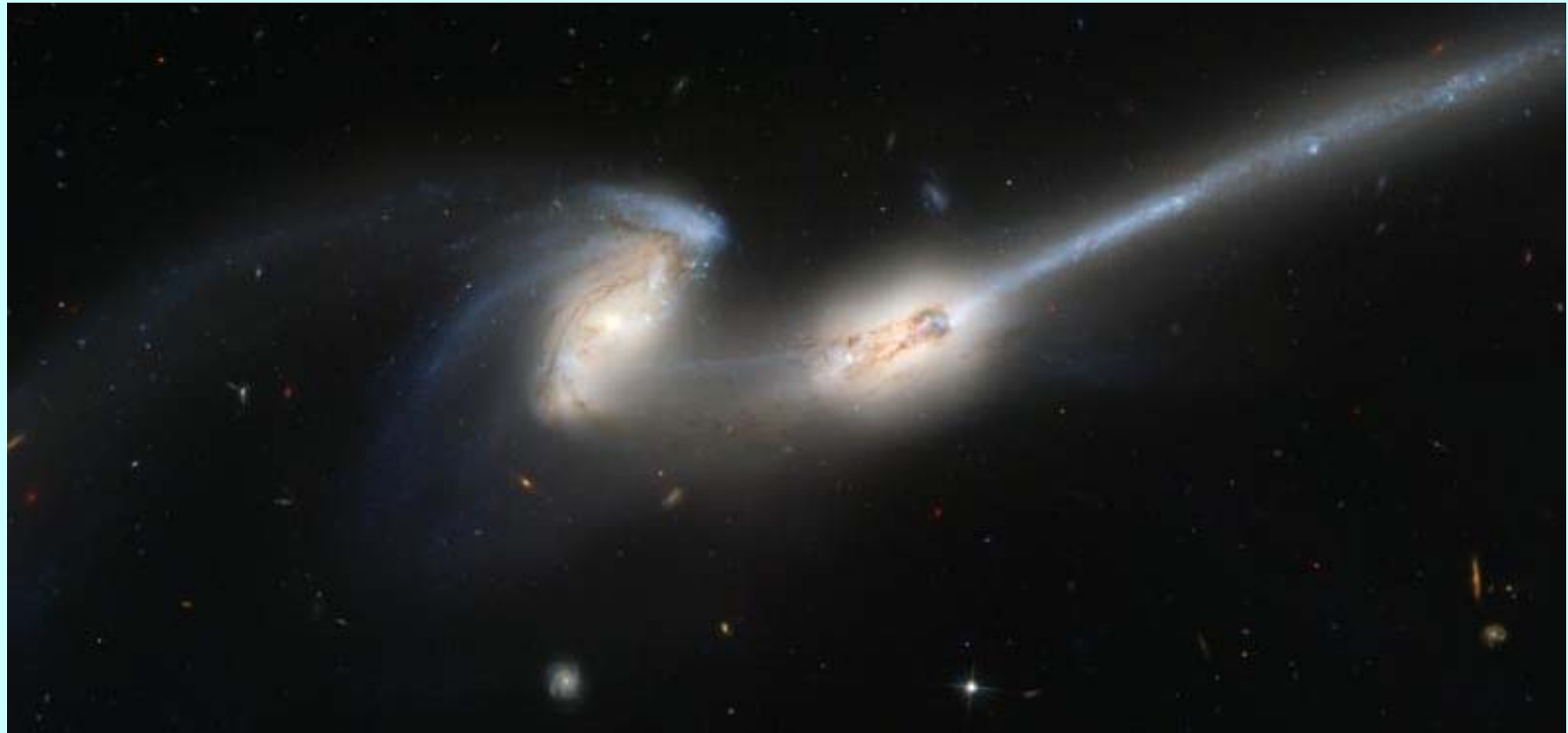
Les Antennes



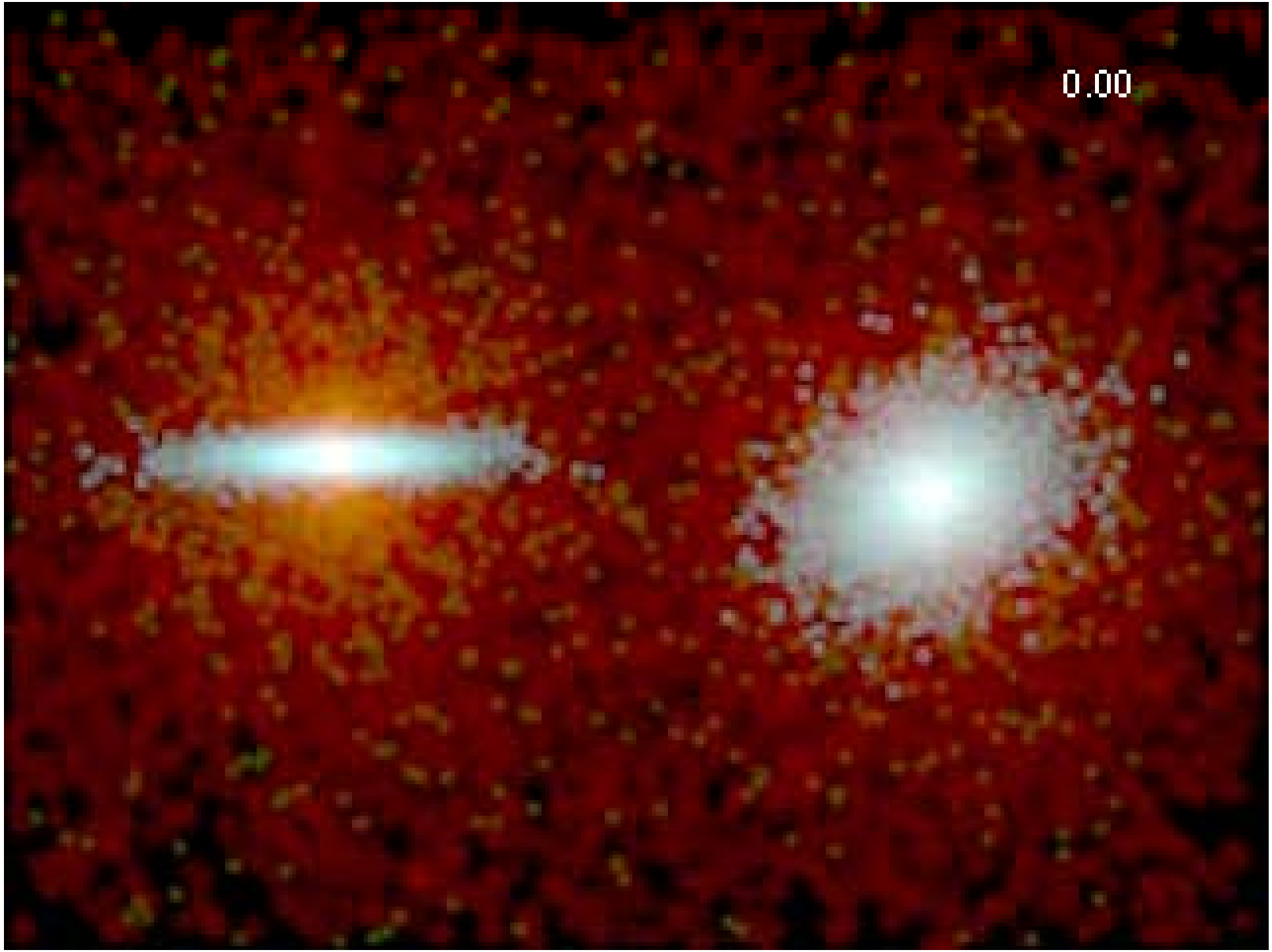
0.00

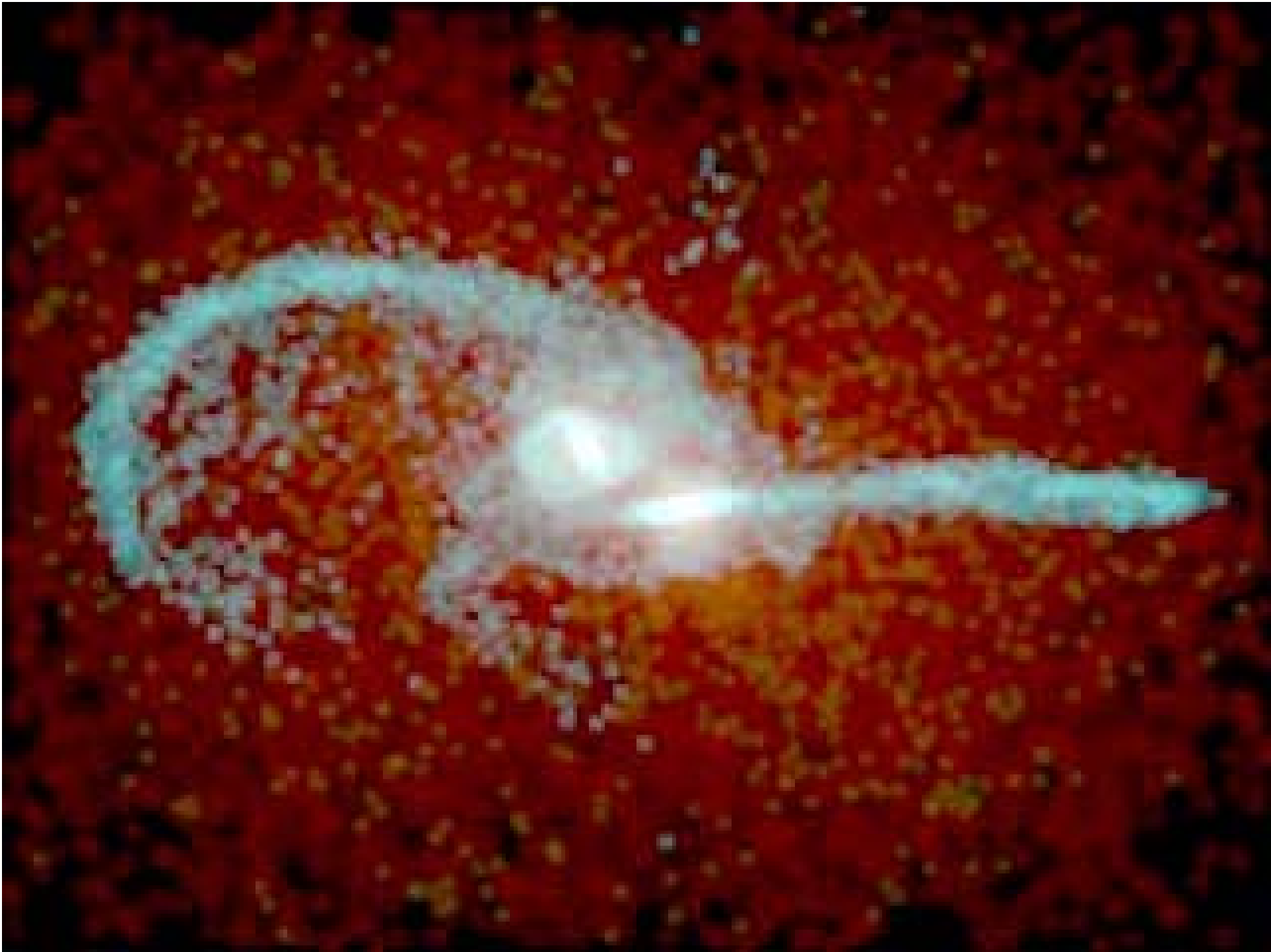


Les Souris



0.00





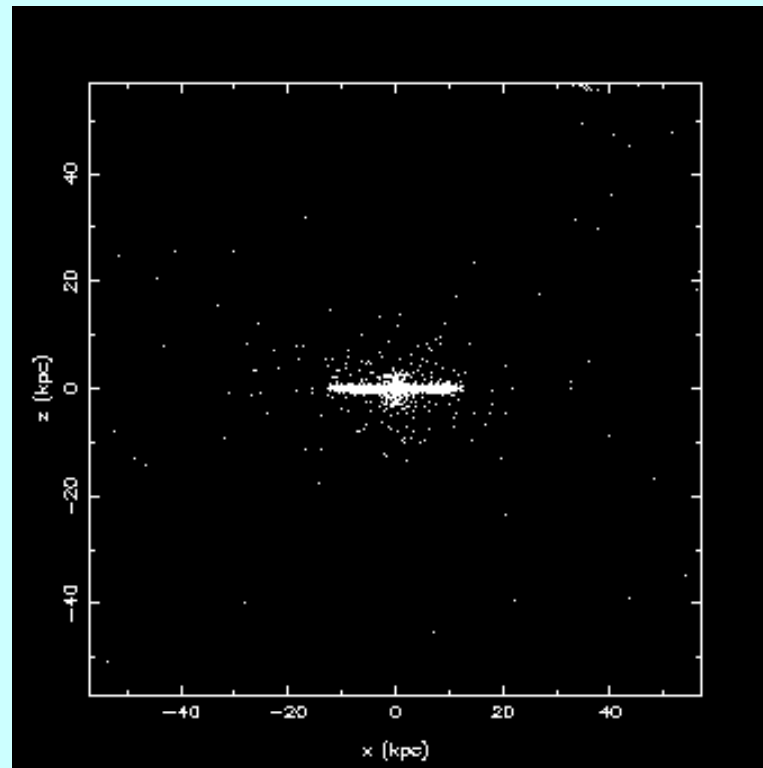


Formation des anneaux polaires

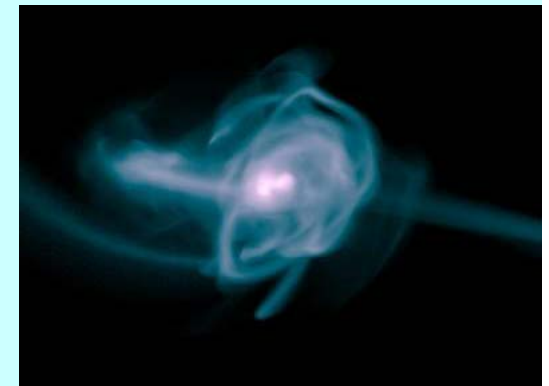
soit par fusion de galaxies
soit par accrétion de gaz



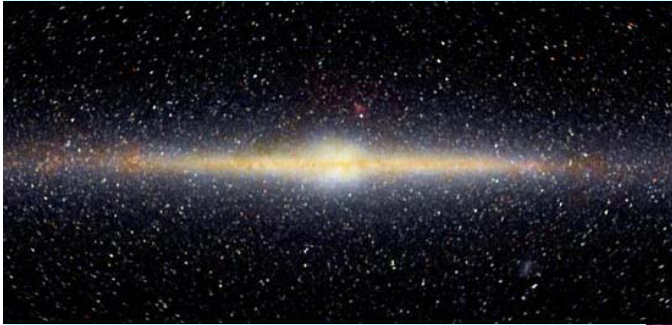
Formation par accrétion



Simulations de la rencontre avec Andromède

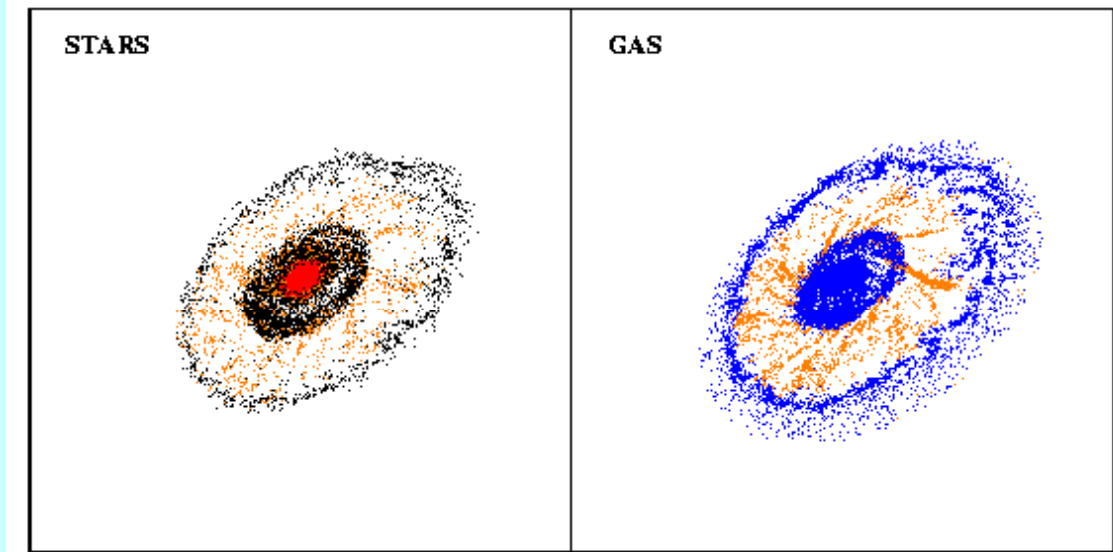
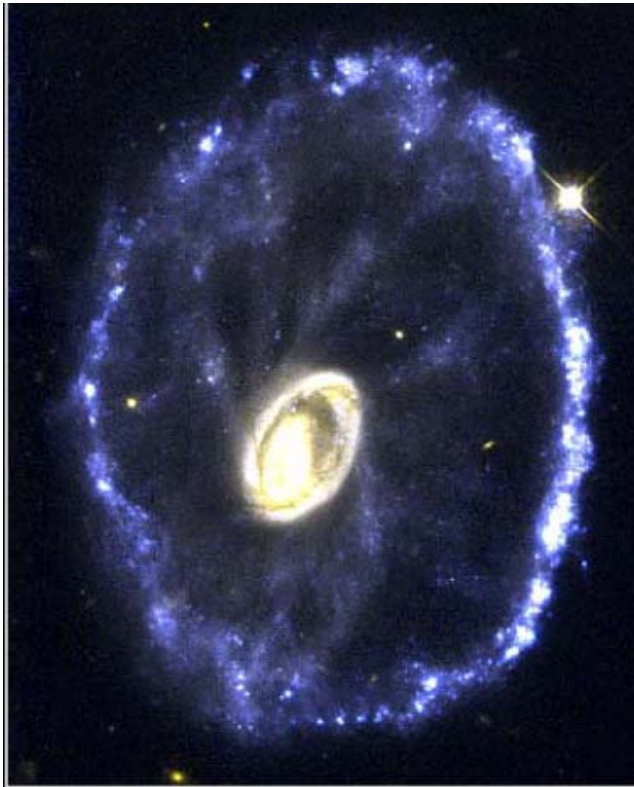


Andromède et La Voie Lactée



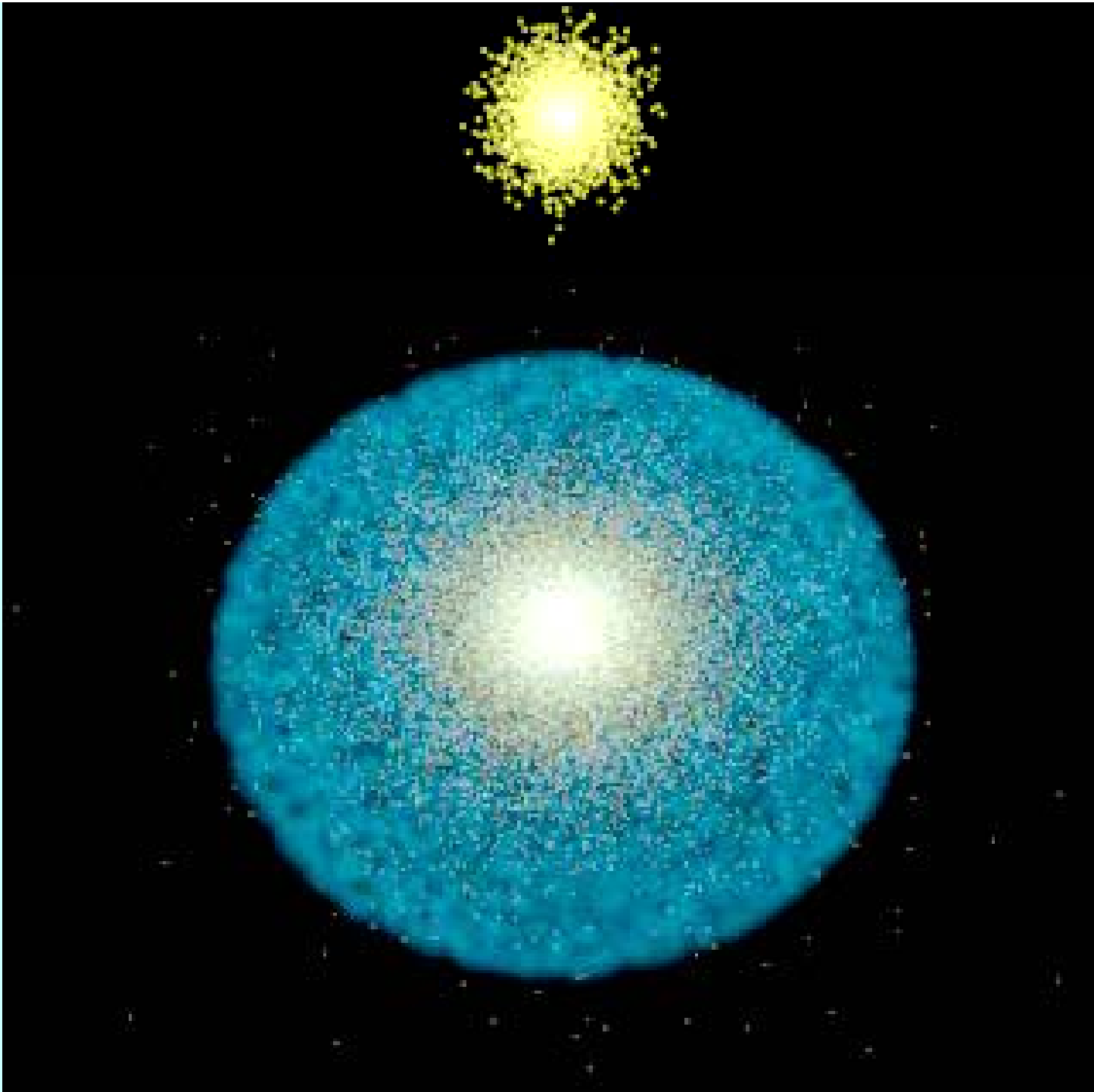
La Voie Lactée
en infra-rouge



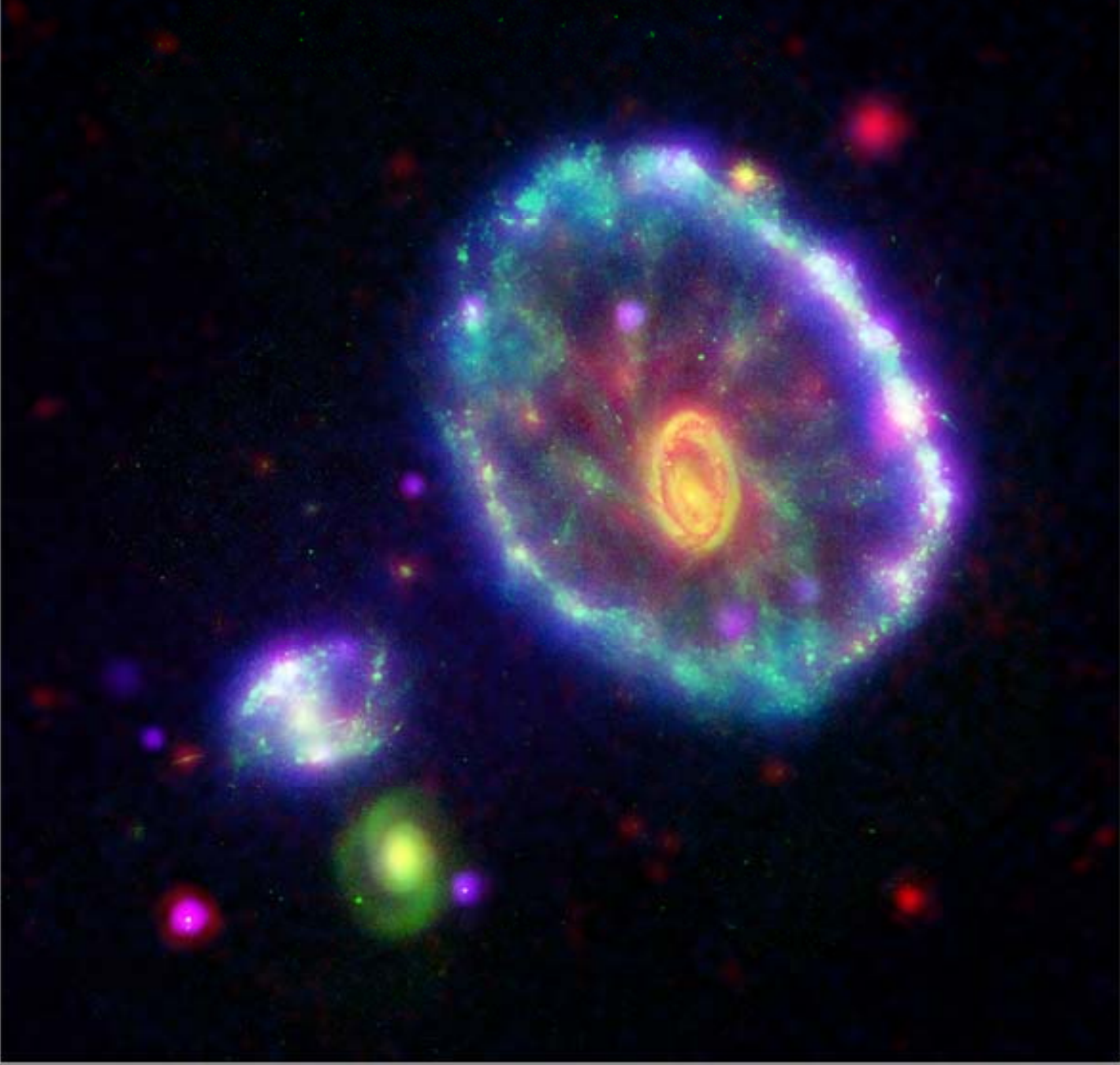


Galaxies en anneaux

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

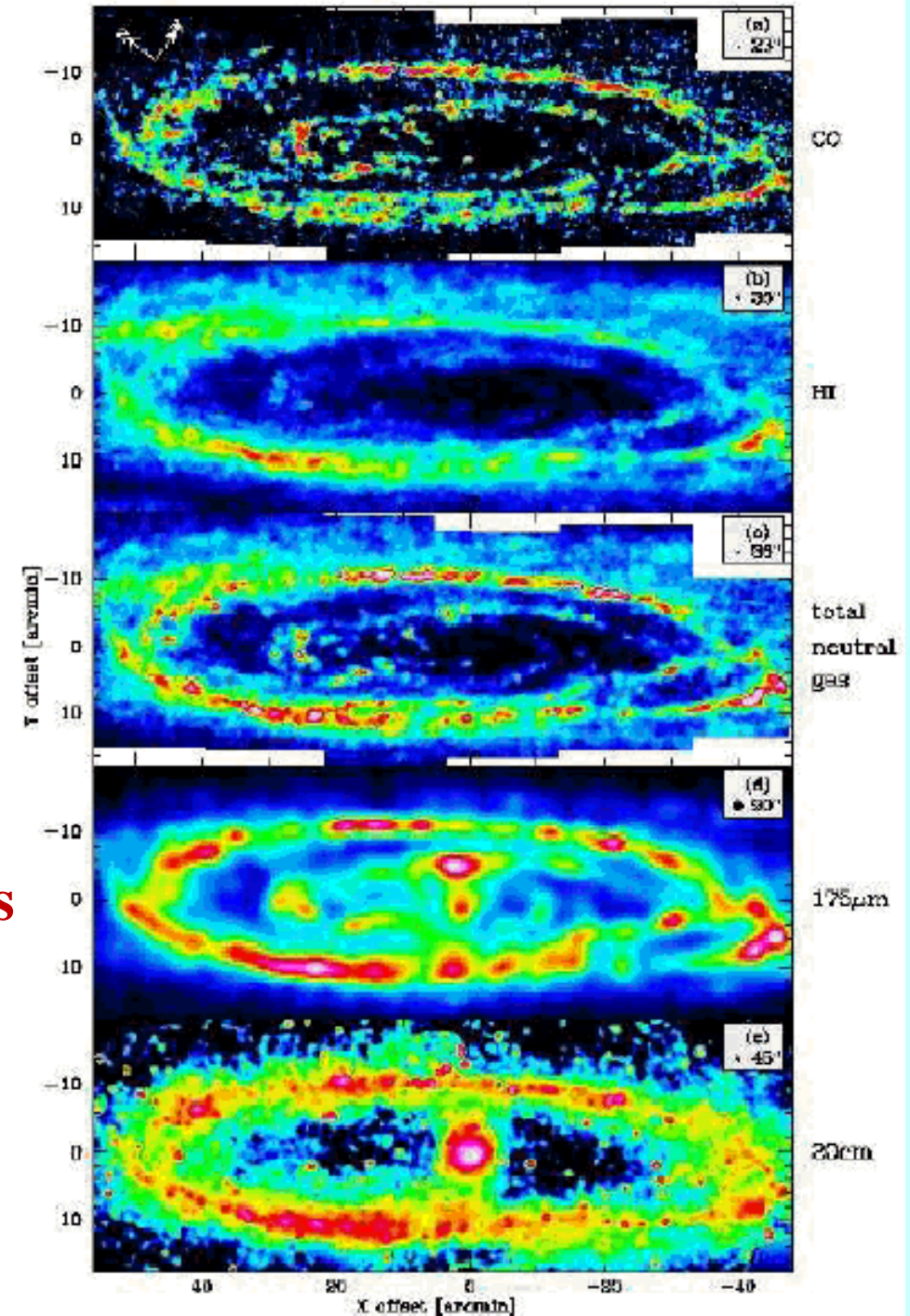
Andromède: gaz moléculaire

Gaz d'hydrogène atomique

Gaz total

Poussière chauffée par les étoiles

Radio, synchrotron, supernovae



Découverte d'un deuxième anneau

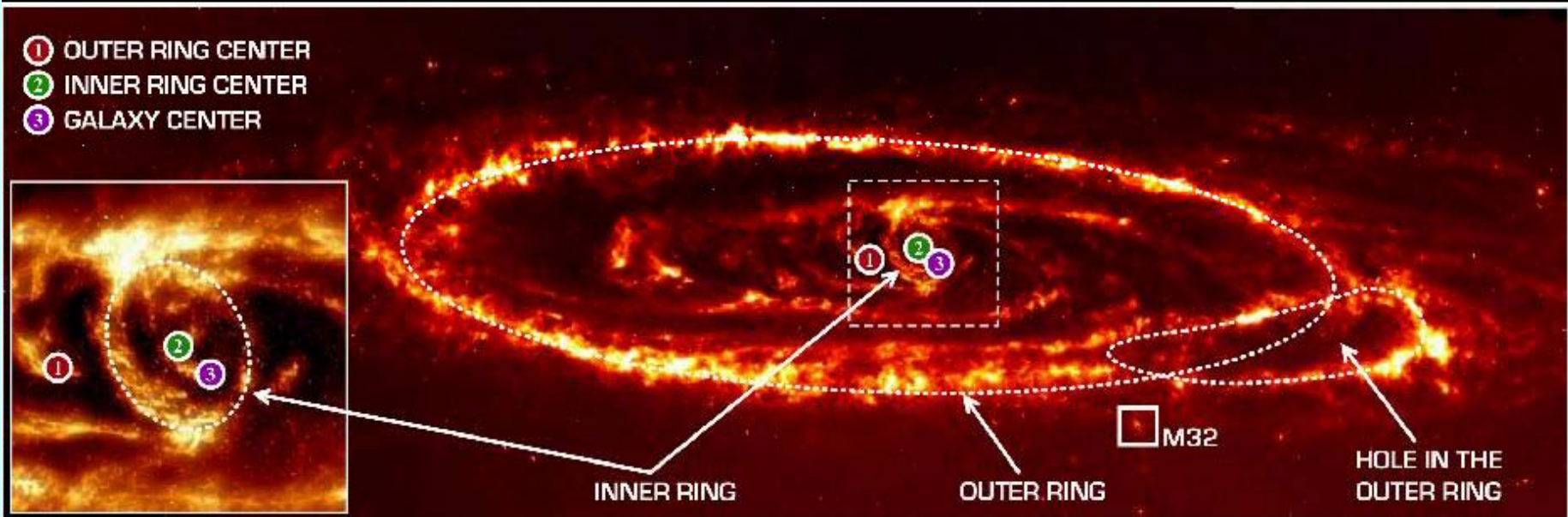
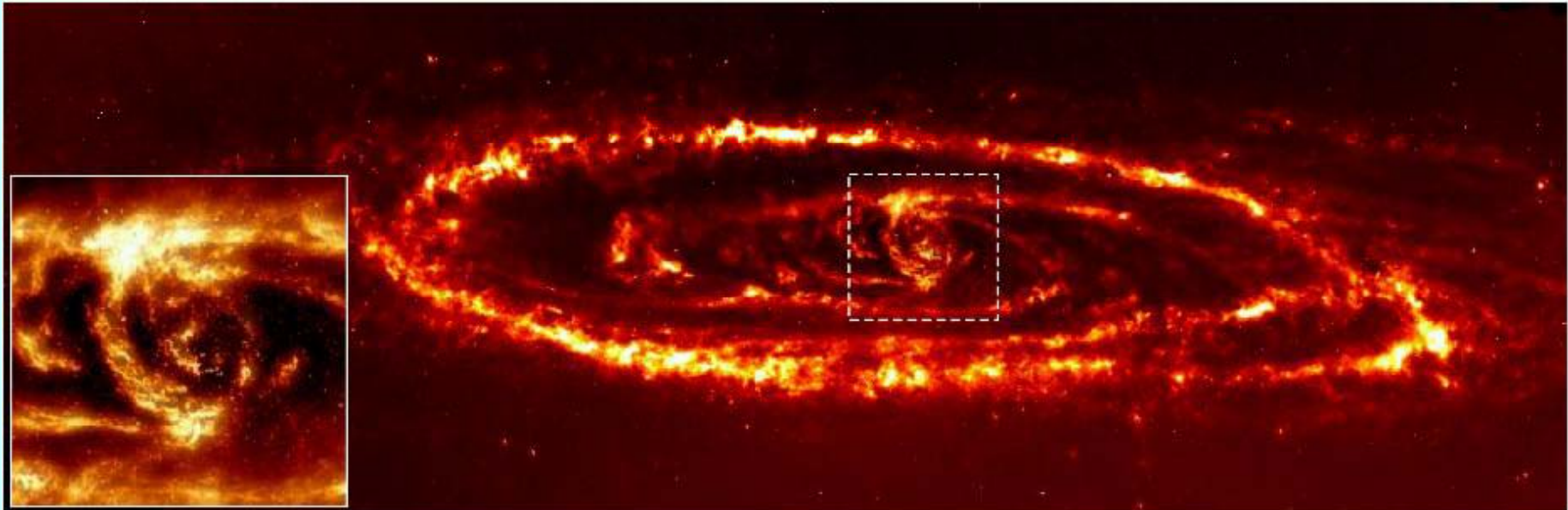
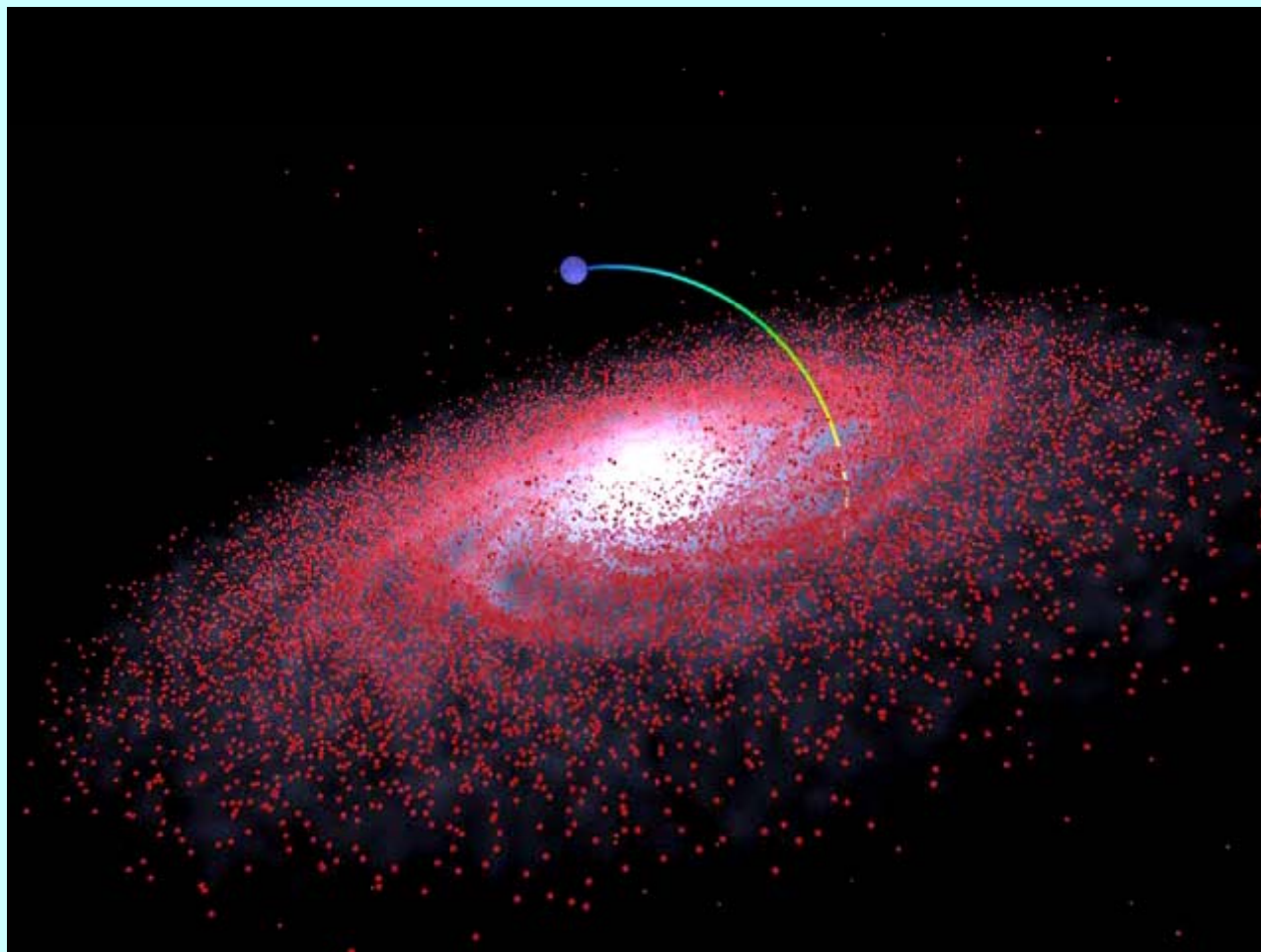


Schéma de l'interaction M31-M32



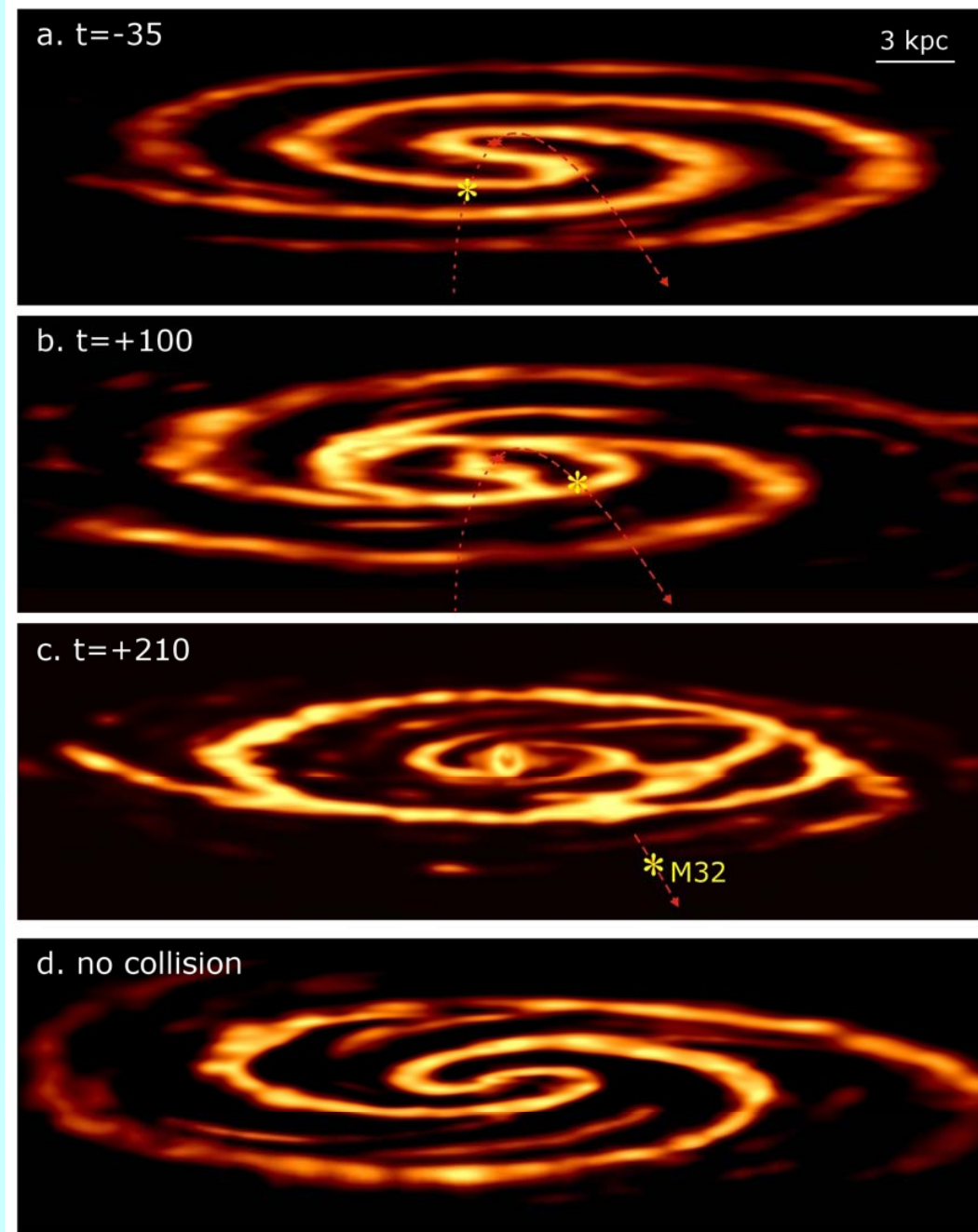
Simulation numérique

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

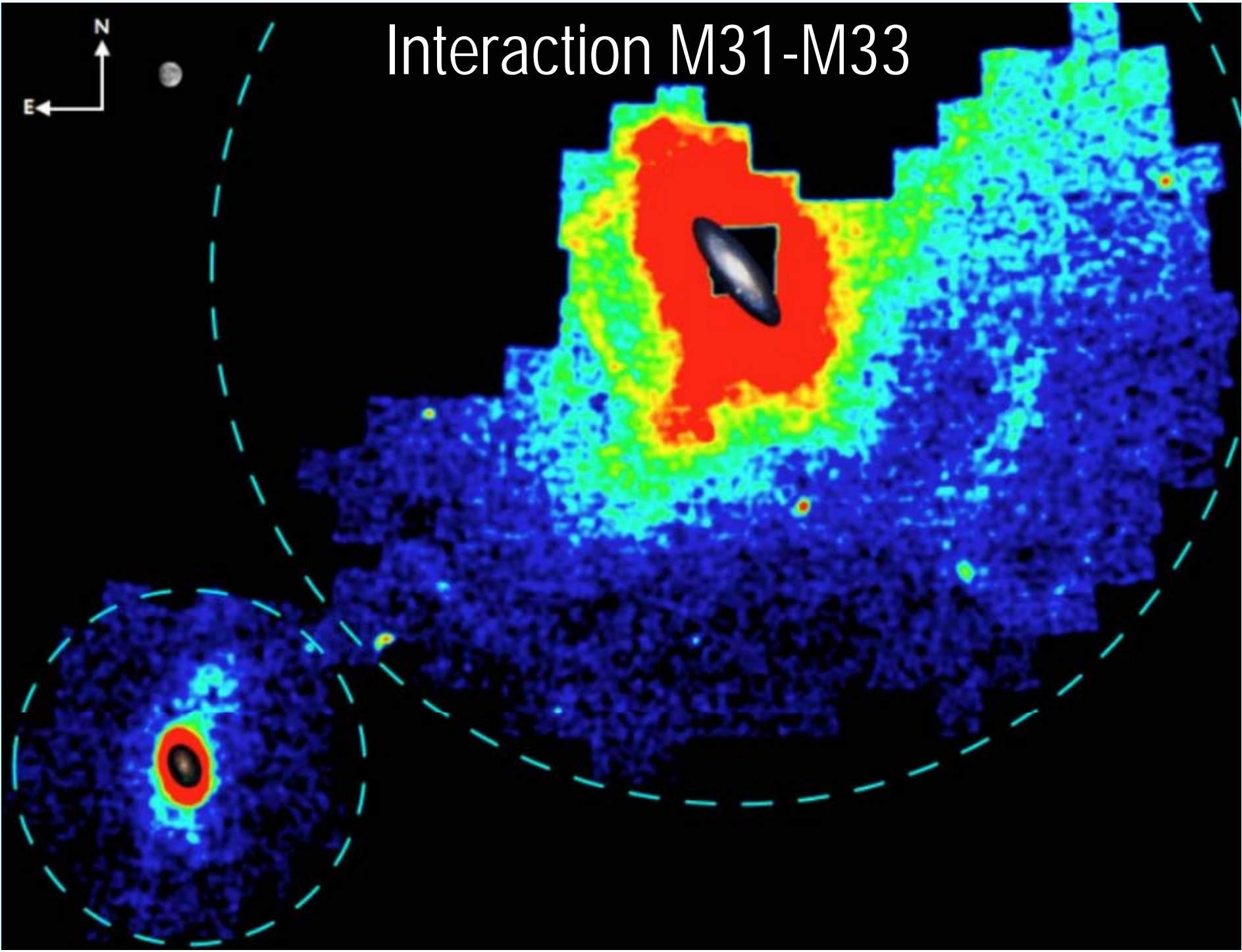
Evolution → barre
+ spirale

Puis collision 210 Myr
Avec M32

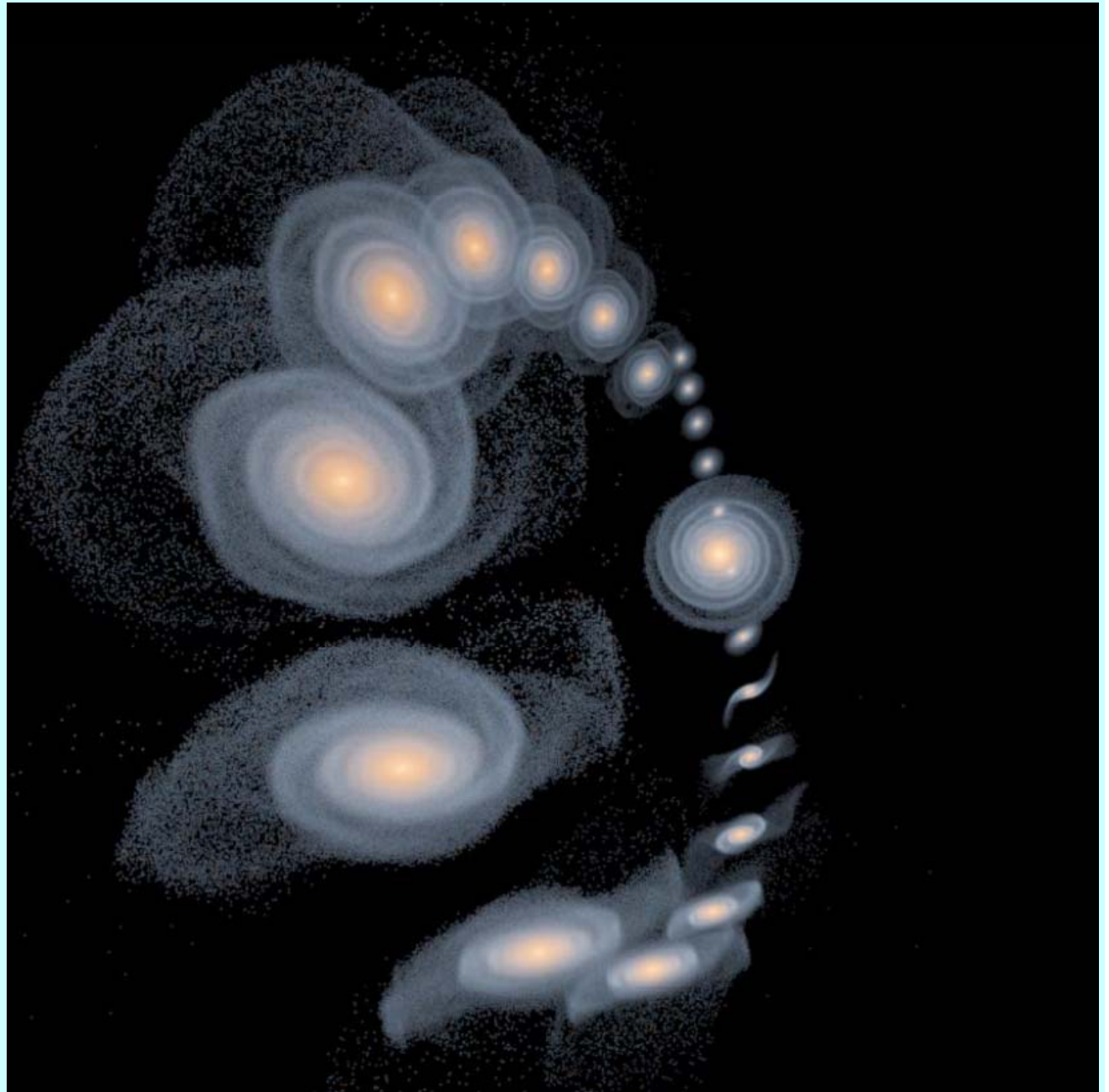
Rapport de masse 1/13



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

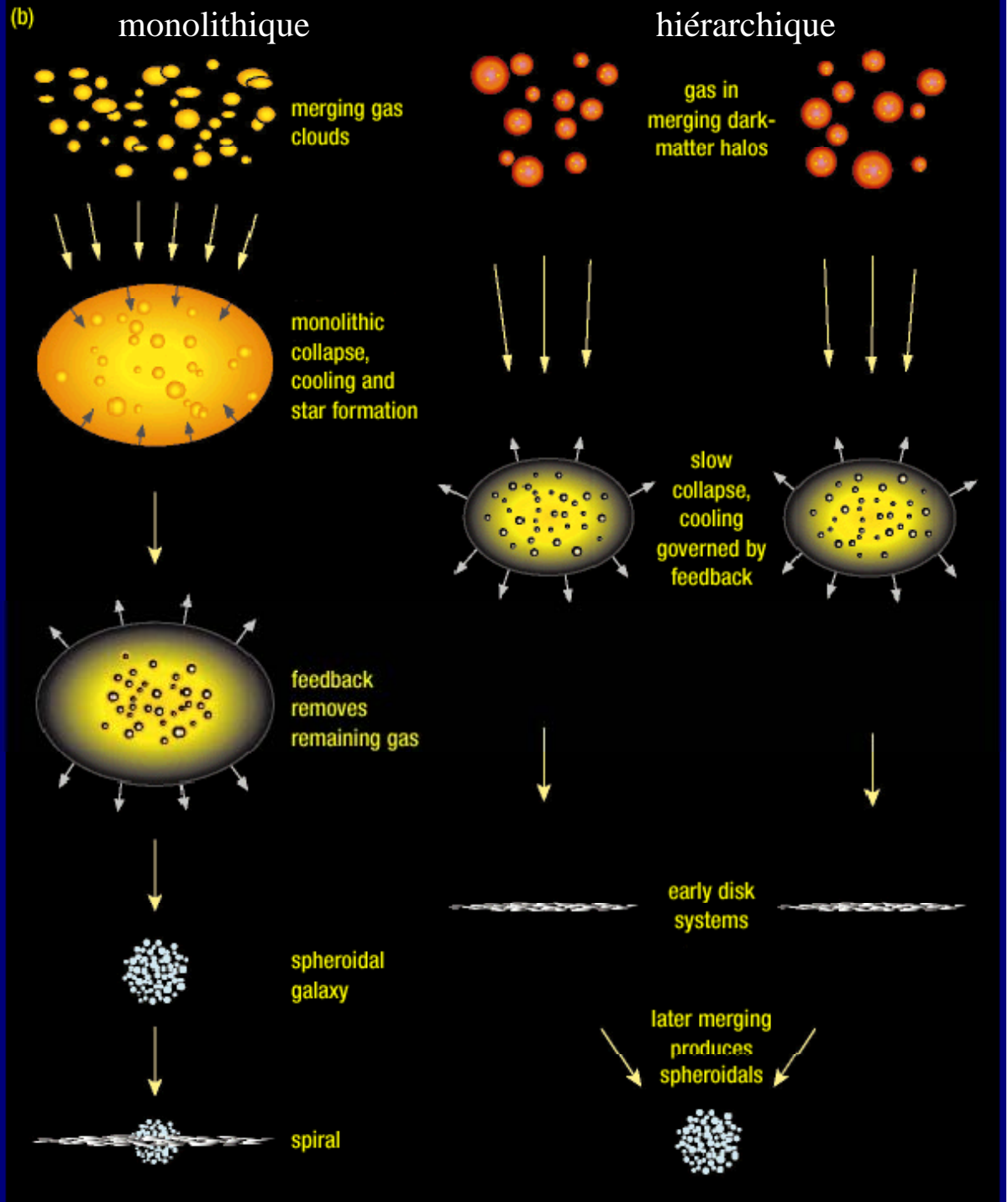
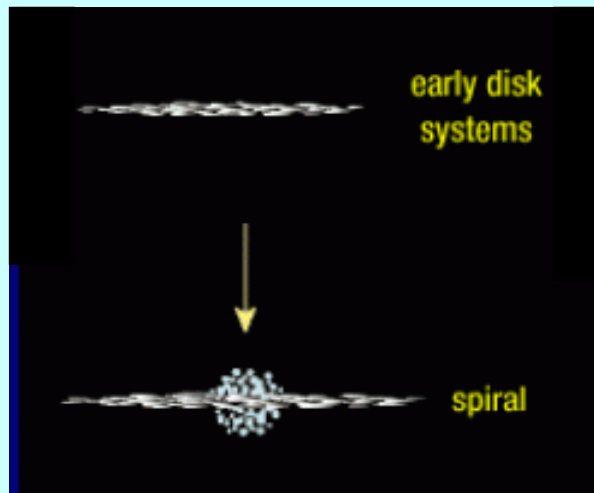
Monolithique

Disques se forment après par accrétion de gaz

Hiérarchique

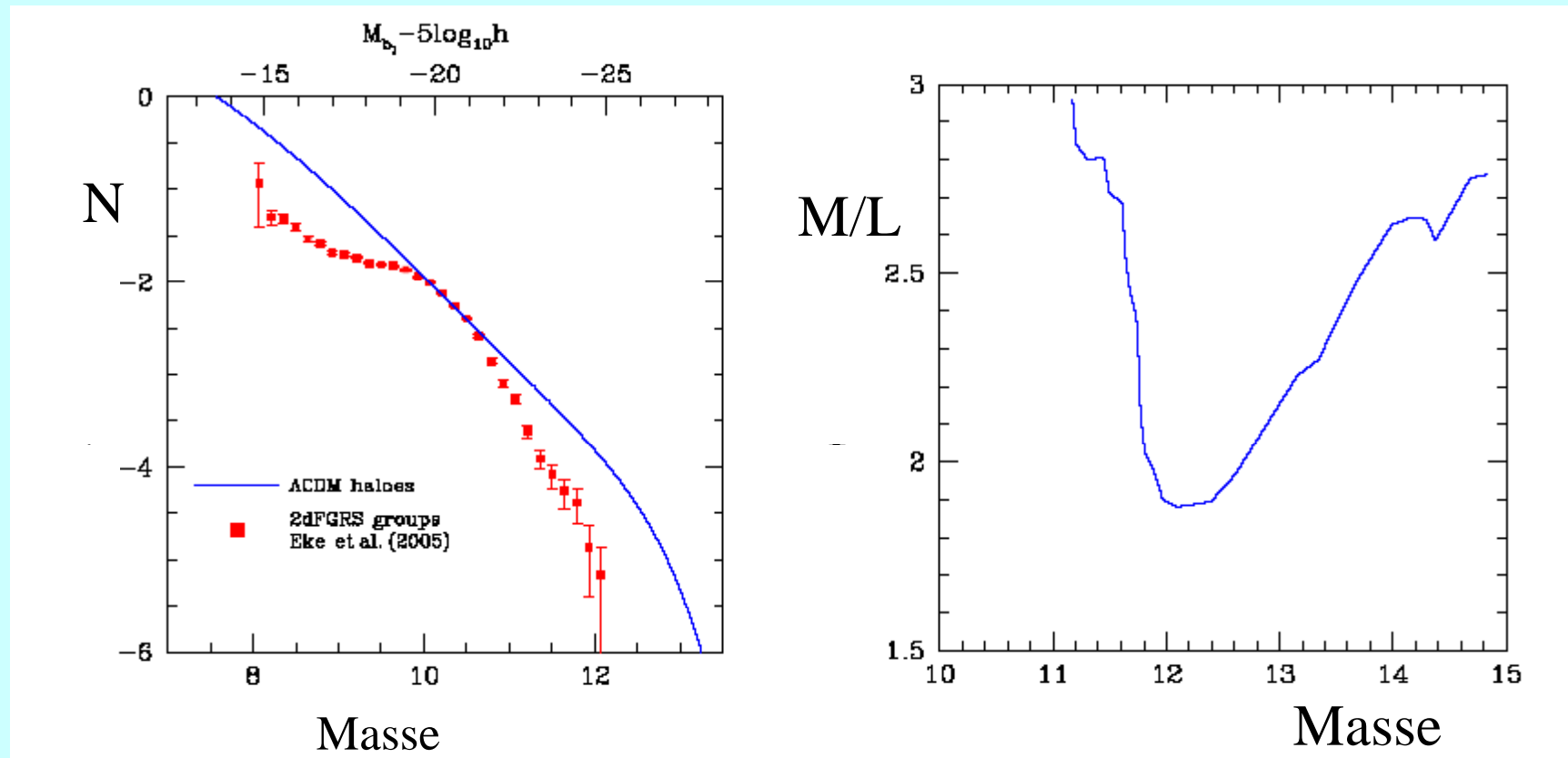
Elliptiques se forment par fusion de spirales

Evolution séculaire



Distribution en masse et luminosité

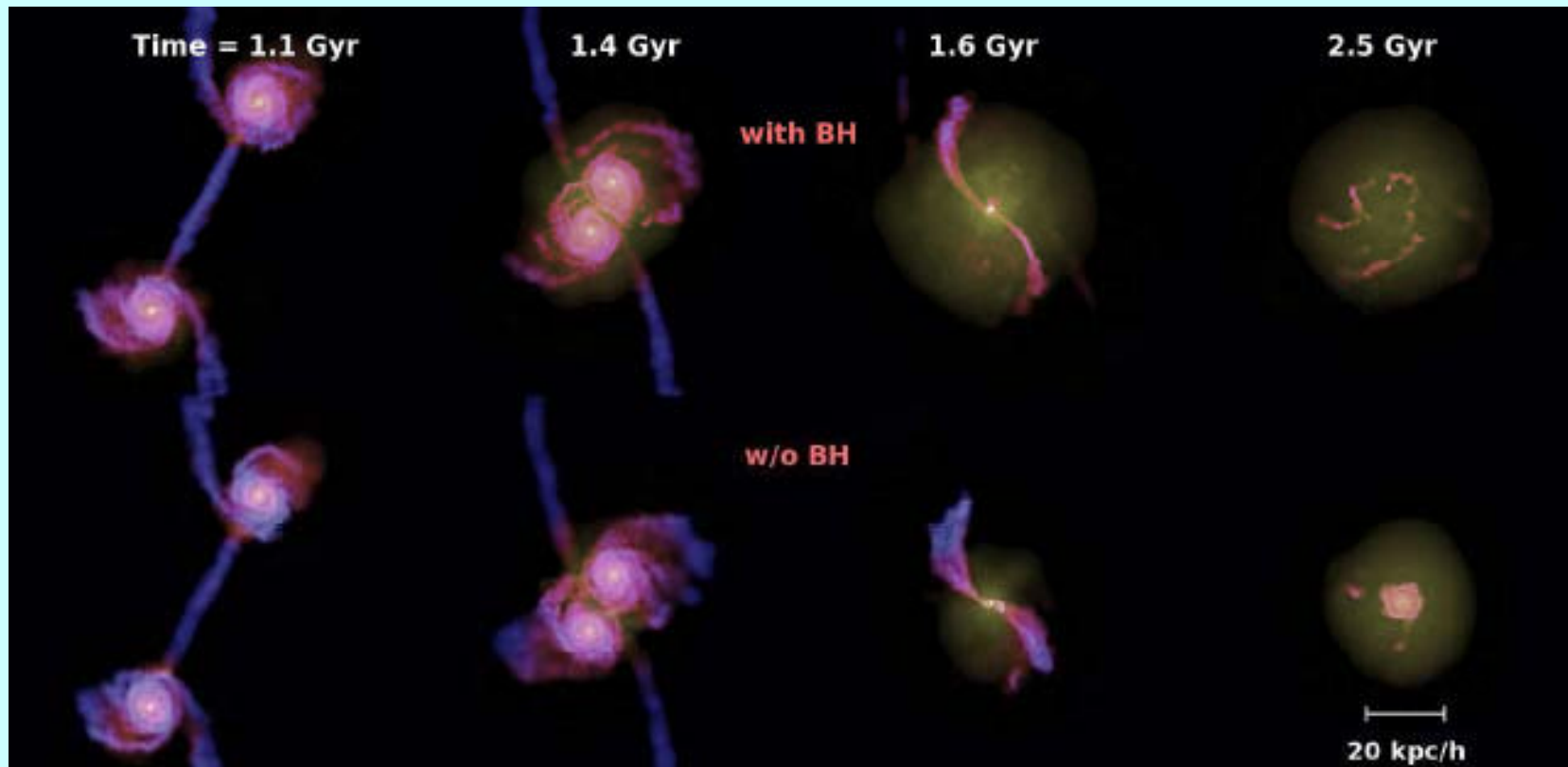
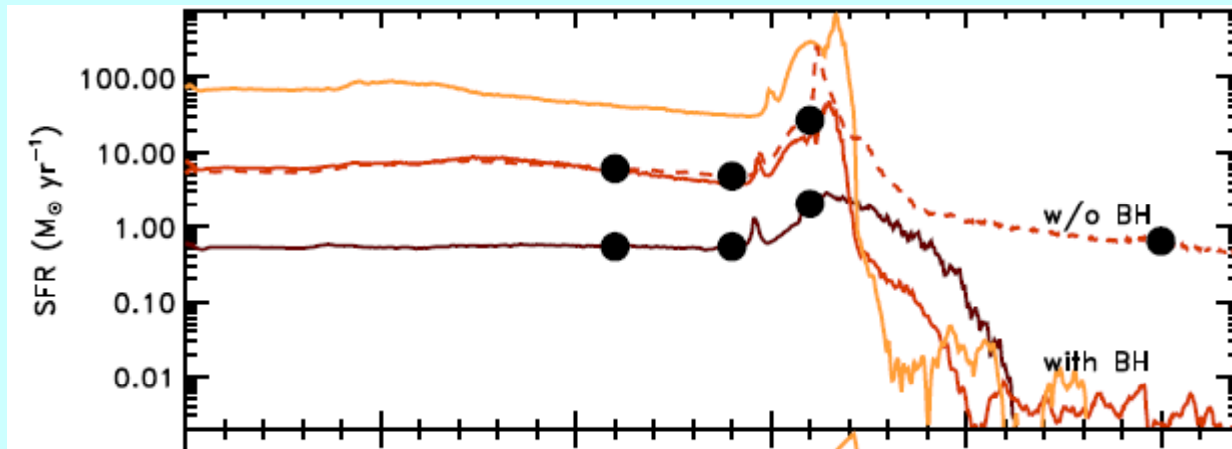
Modèle standard: Trop de galaxies aux 2 extrémités



Observations: peu de naines, peu de géantes

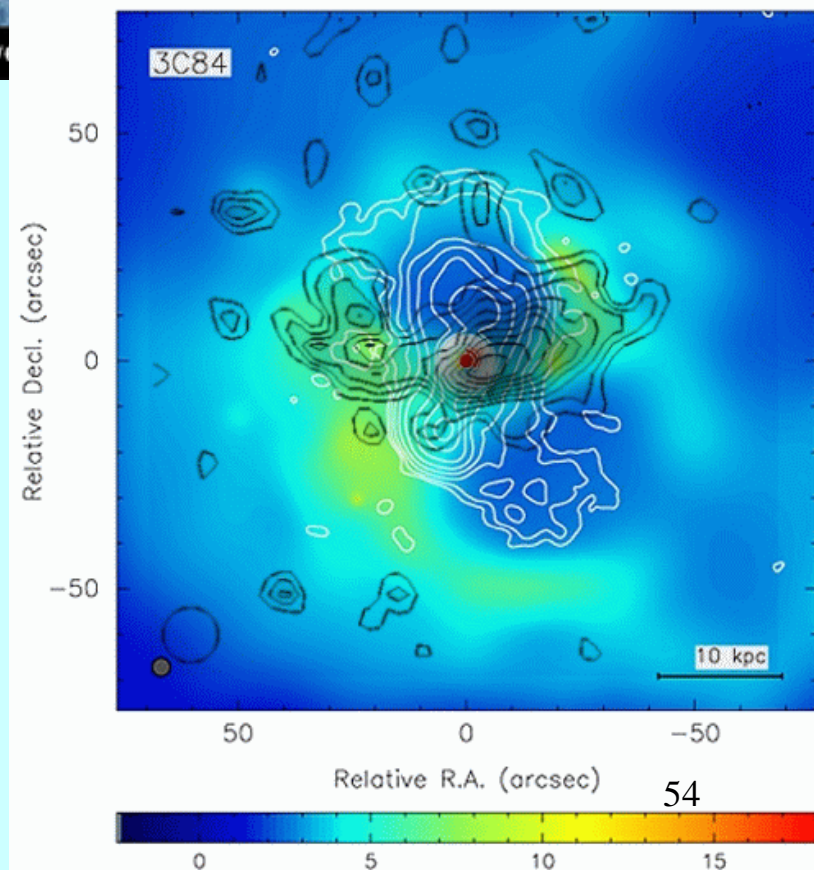
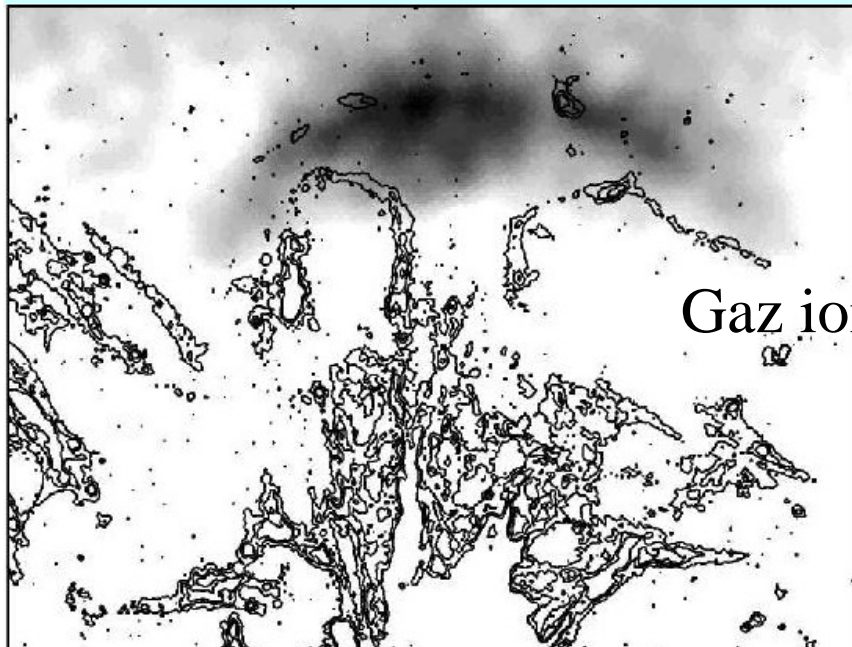
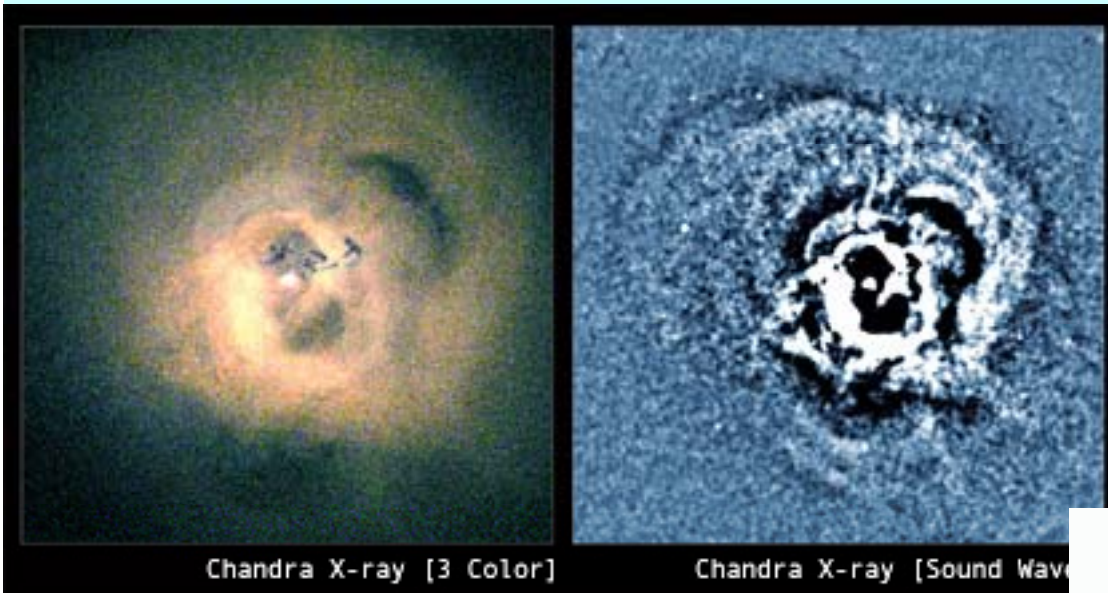
Auto-régulation due à la formation d'étoiles

et aux trous noirs



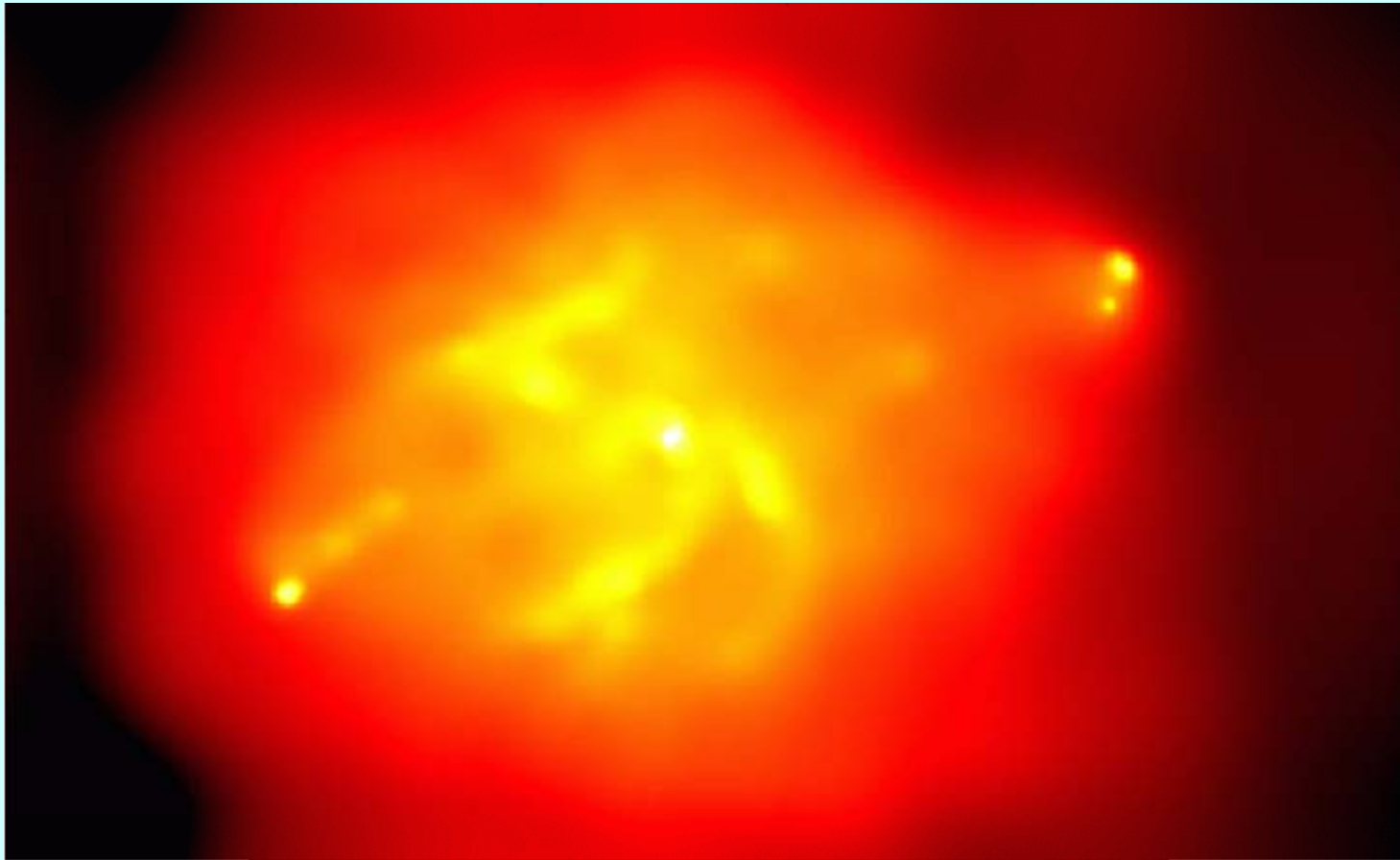
Amas de Persée exemple de trou noir massif

Gaz moléculaire froid



Amas du Cygne

Rayons X



Emission
Radio
Du jet

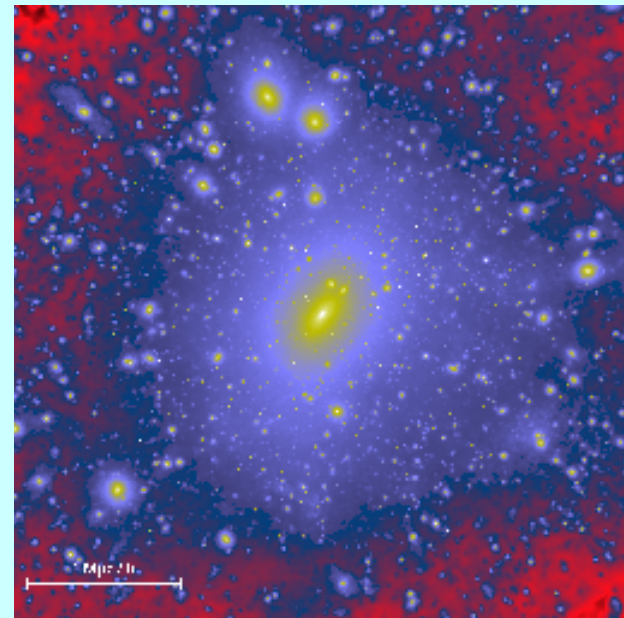
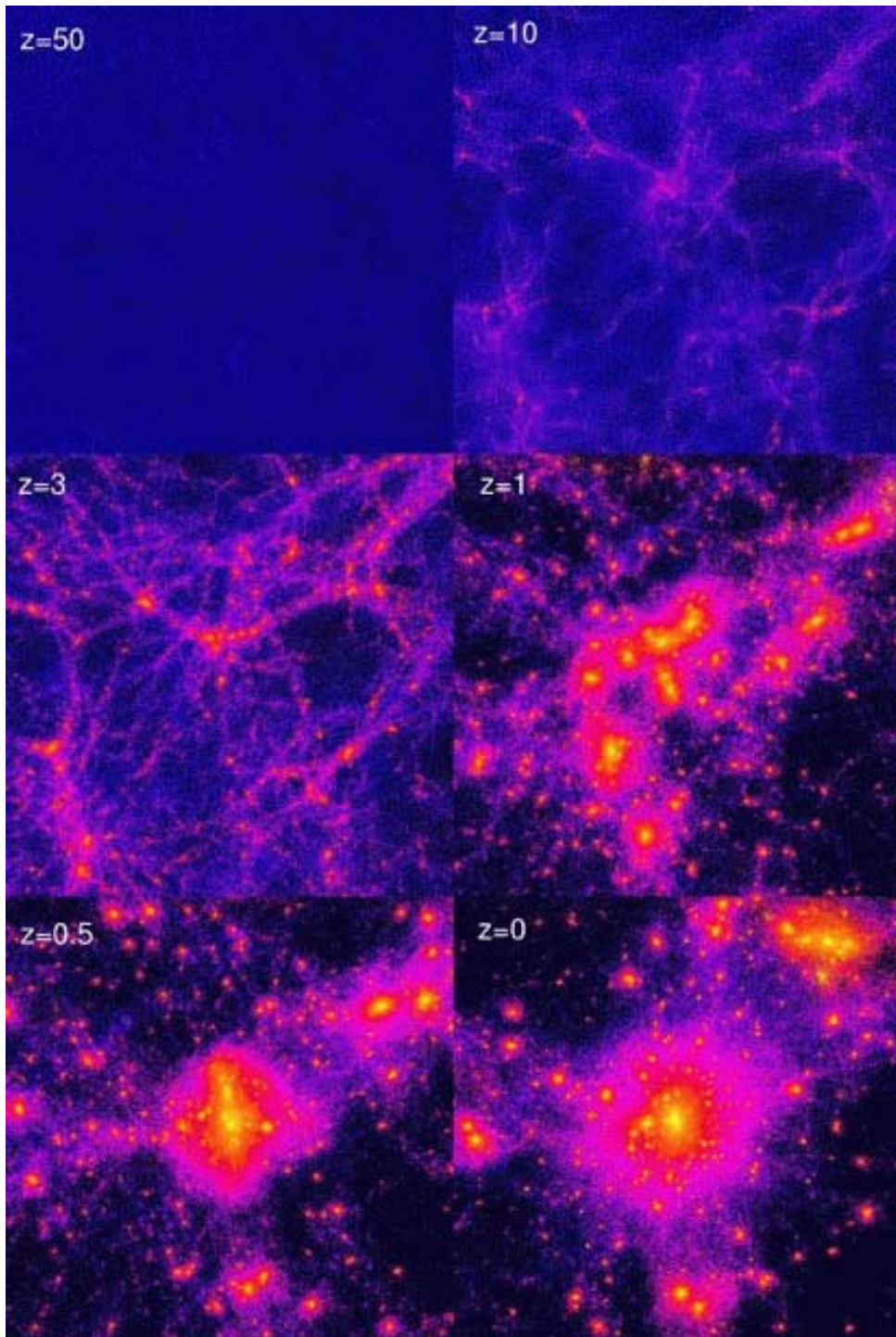


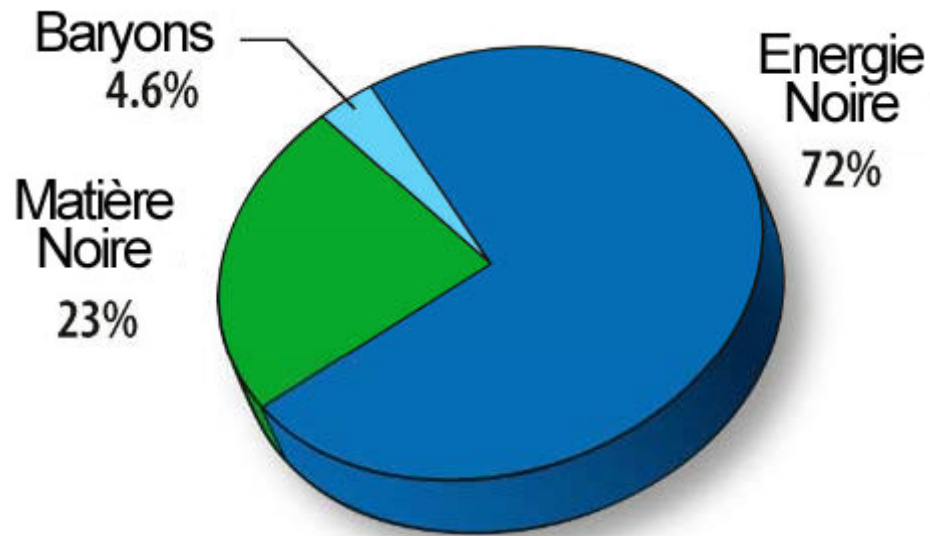
Galaxie centrale



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

$$\Omega_m = 0.28$$

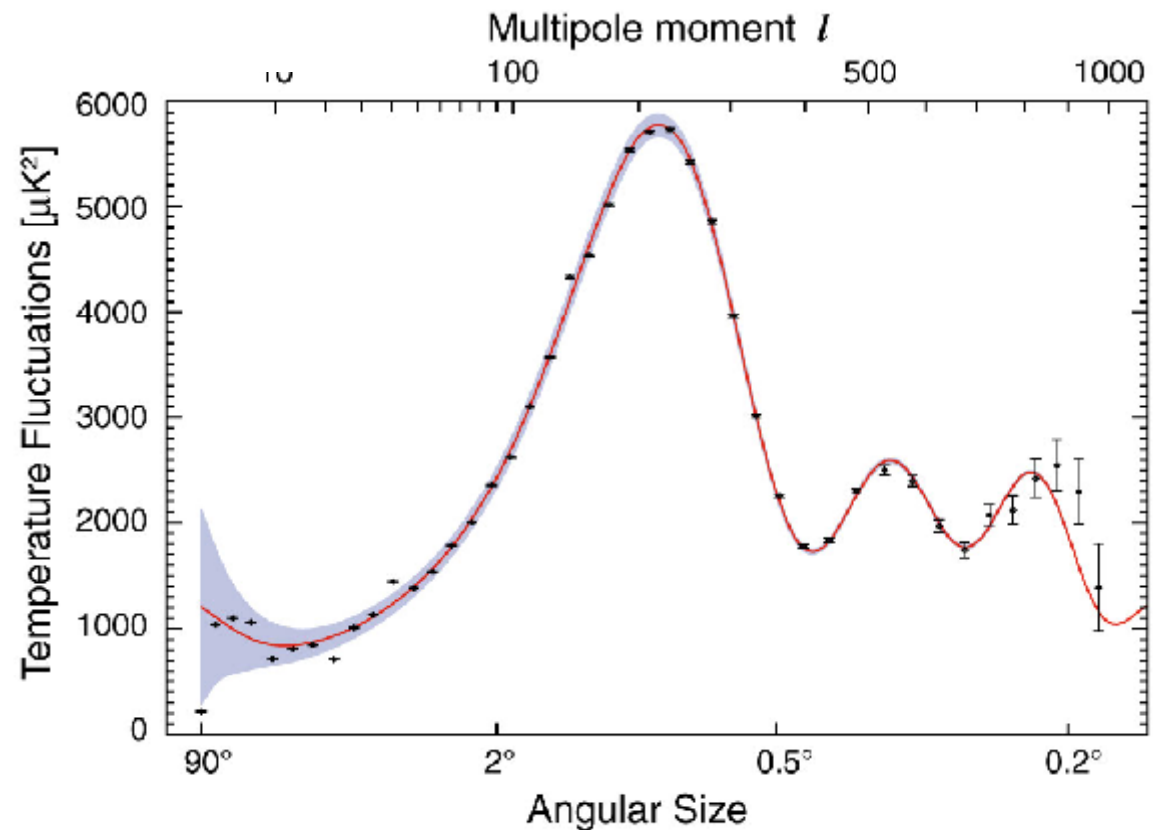
$$\Lambda = 0.72$$

$$\Omega_b = 0.05$$

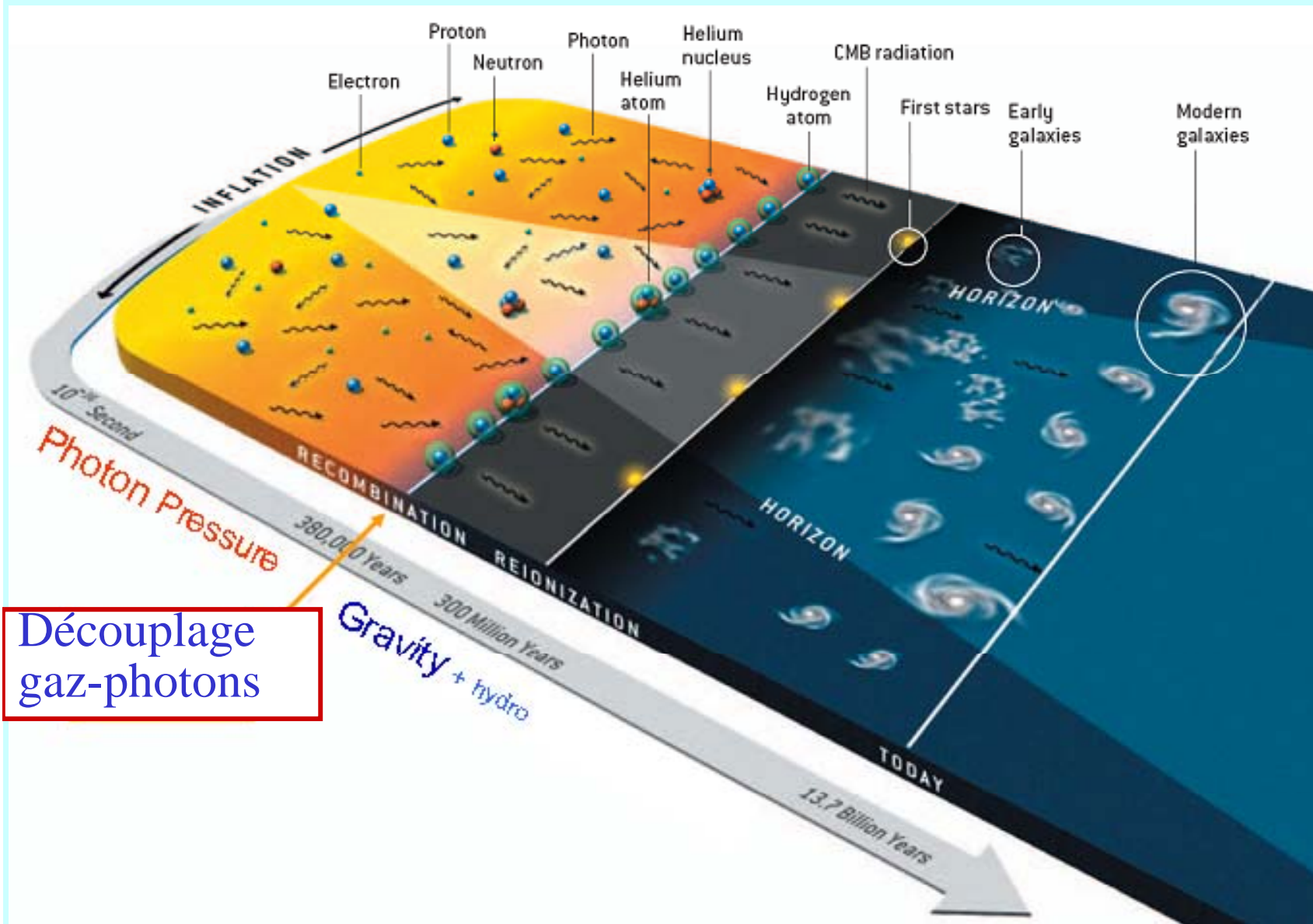
$$H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$$

Age = 13.7 Gyr

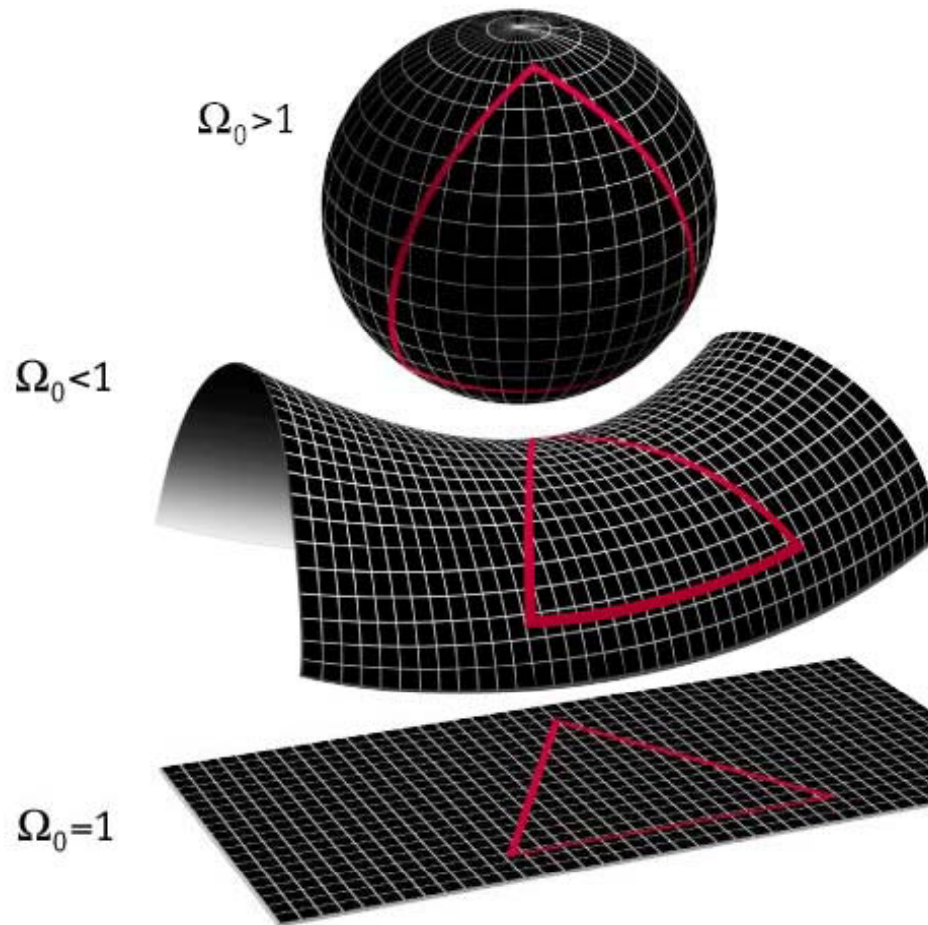
Univers plat



Histoire de l'univers



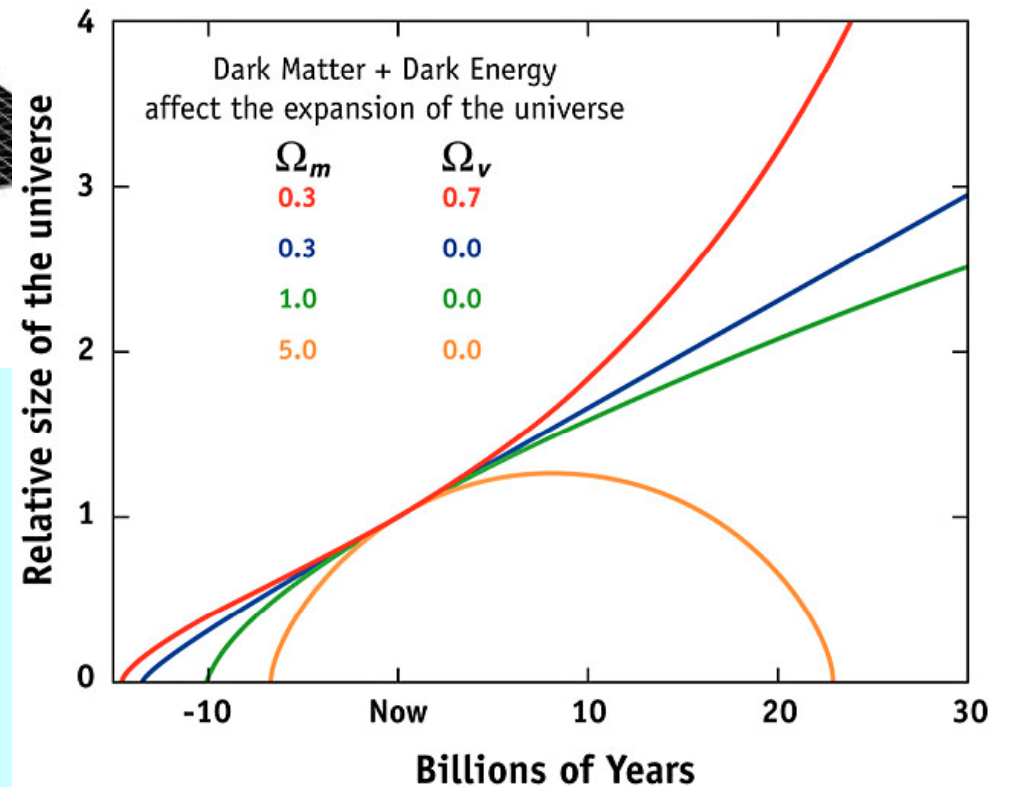
Paramètres de l'Univers



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?