



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Amas et Groupes de Galaxies



JWST

Abell 2744-Pandora

**Françoise Combes**



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

# Comment se forment les amas

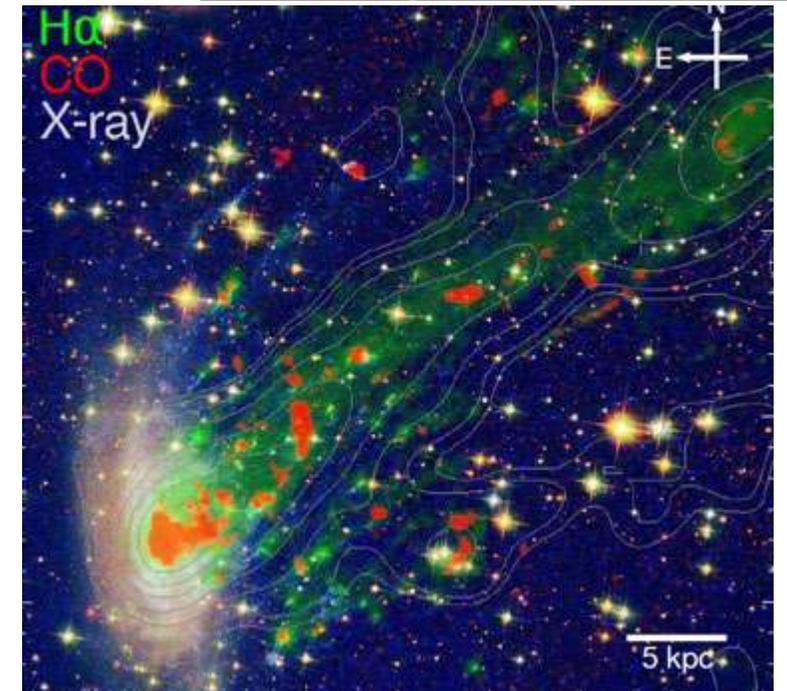
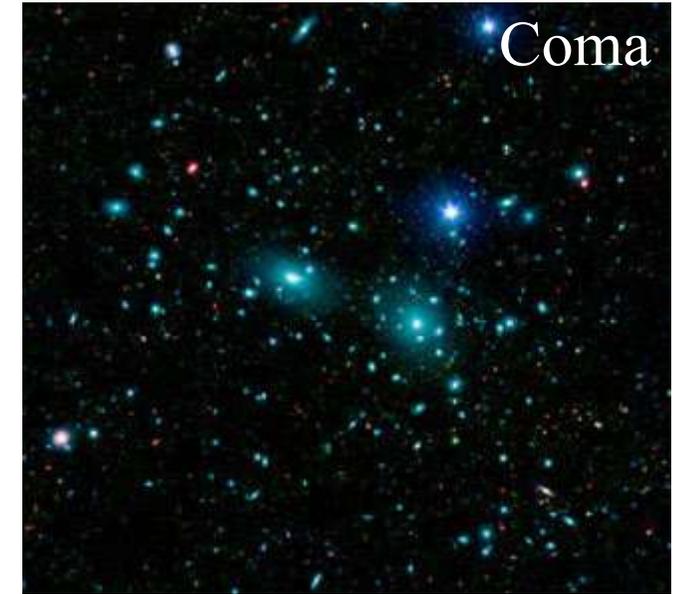
→ Proto-amas et groupes à grand redshift ( $z > 2$ )

Sur-densités et vides

→ Propriétés des amas: masse, contenu en gaz, Dynamique, fusion d'amas et groupes

→ Impact des amas sur la physique des galaxies

Galaxies ultra-diffuses



*Norma Jachym et al 2019*

# Amas et groupes de galaxies

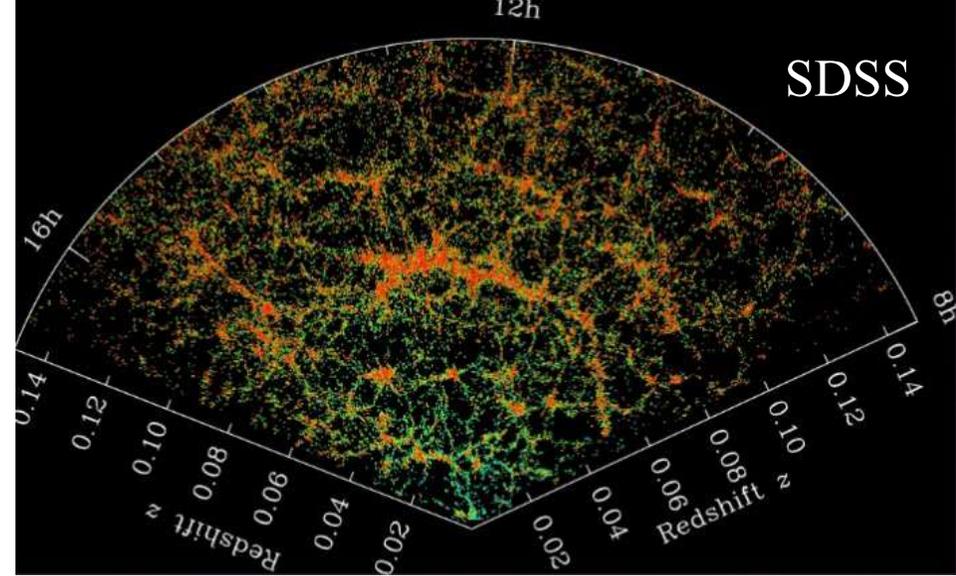
**La moitié des galaxies sont dans des groupes ou amas:**

Les groupes: peu denses--  $M < 10^{14} M_{\odot}$

→ plus de Spirales et Irr

Les amas:  $M > \text{qq } 10^{14} \text{ à } 10^{15} M_{\odot}$

→ Surtout E-gal et S0



**Amas de galaxies <10% masse de l'Univers**

de qq 100 à 1000 galaxies massives, liées, qq Mpc

Le Coeur (Mpc central) contient 50 à 100 galaxies ( $L > 2 \times 10^{10} L_{\odot}$ )

## Moyens de detection

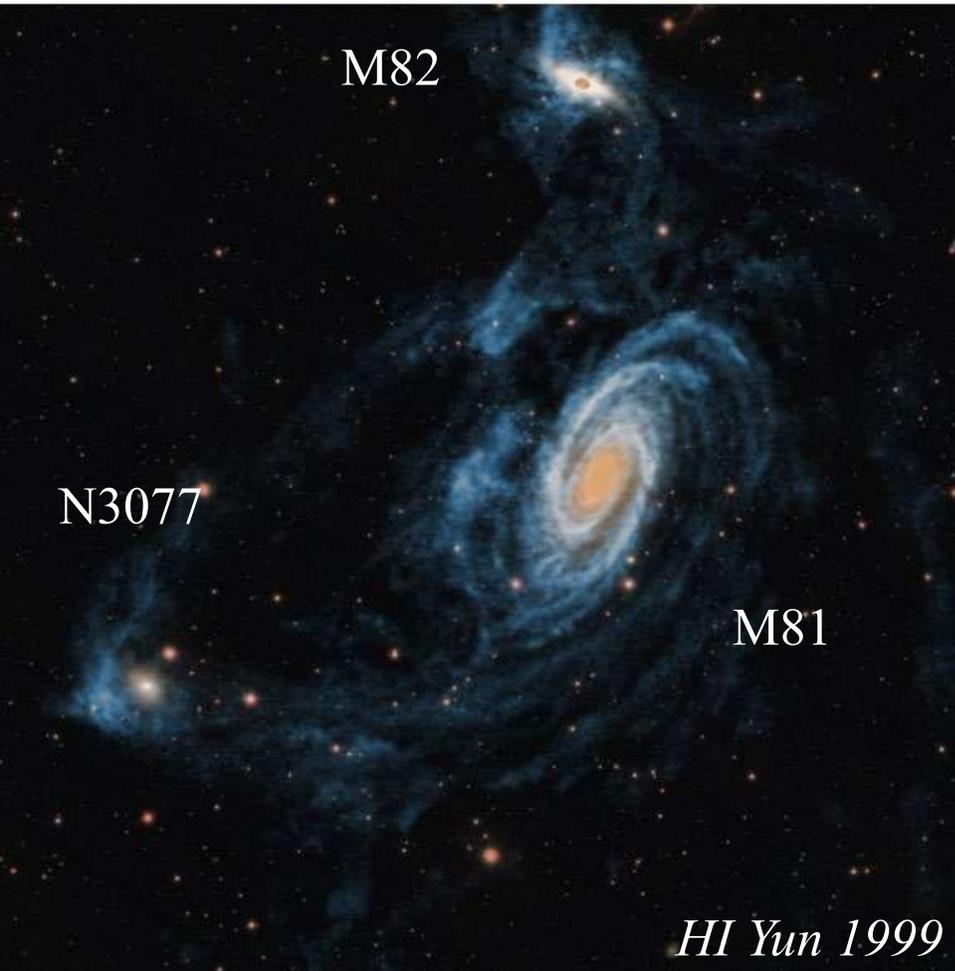
Observations optiques + redshifts

**Gaz très chaud** ( $T=10^7 - 10^8$  K → rayons X)

Effet SZ (Planck, SPT-SZ)

Lentilles gravitationnelles

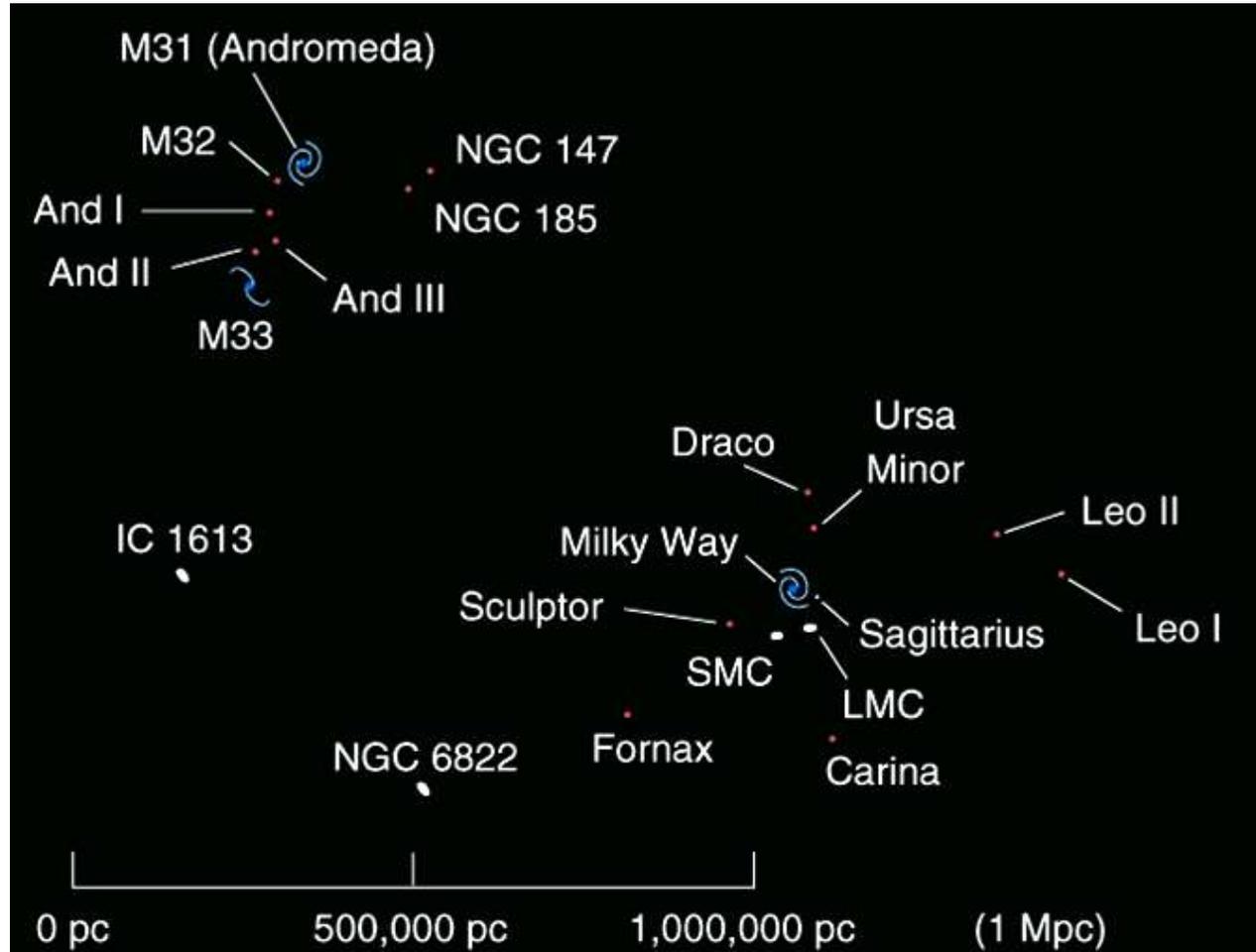




# Les groupes de galaxies

- ➔ Plus petits que les amas
- Moins de  $\sim 100$  galaxies
- ➔ moins liés gravitationnellement

## Groupe Local



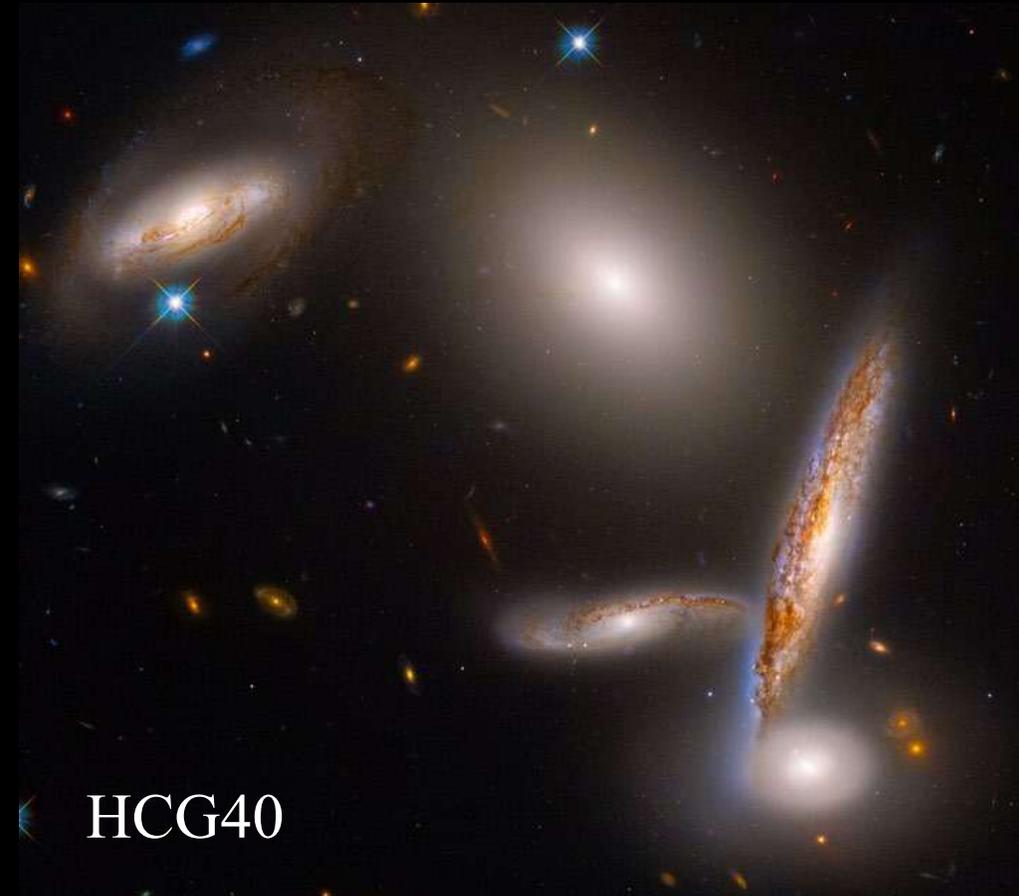
➔ Contiennent plus de spirales et Irr que les amas

Mais moins que les vides et les galaxies “de champ”

# Les groupes compacts

Certains groupes  
semblent beaucoup plus  
compacts et instables

Notamment les groupes  
de Hickson





# Caractéristiques et définitions

	<b>Groupe diffus</b>	<b>Compact</b>	<b>Amas</b>
Nombre de galaxies	~20	~5	~100-10 <sup>3</sup>
Contraste $\rho / \langle \rho \rangle$	20	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>
Dispersion de vitesse	~150	~150	~700-10 <sup>3</sup>
Température $T_x$	<1keV	<1keV	10keV

**Quel environnement est plus susceptible de conduire à des fusions de galaxies aujourd'hui ( $z \sim 0$ ) ?**

# Les groupes compacts ne devraient pas exister

Ils devraient fusionner en une seule galaxie en un temps  $\sim 1$  Gyr

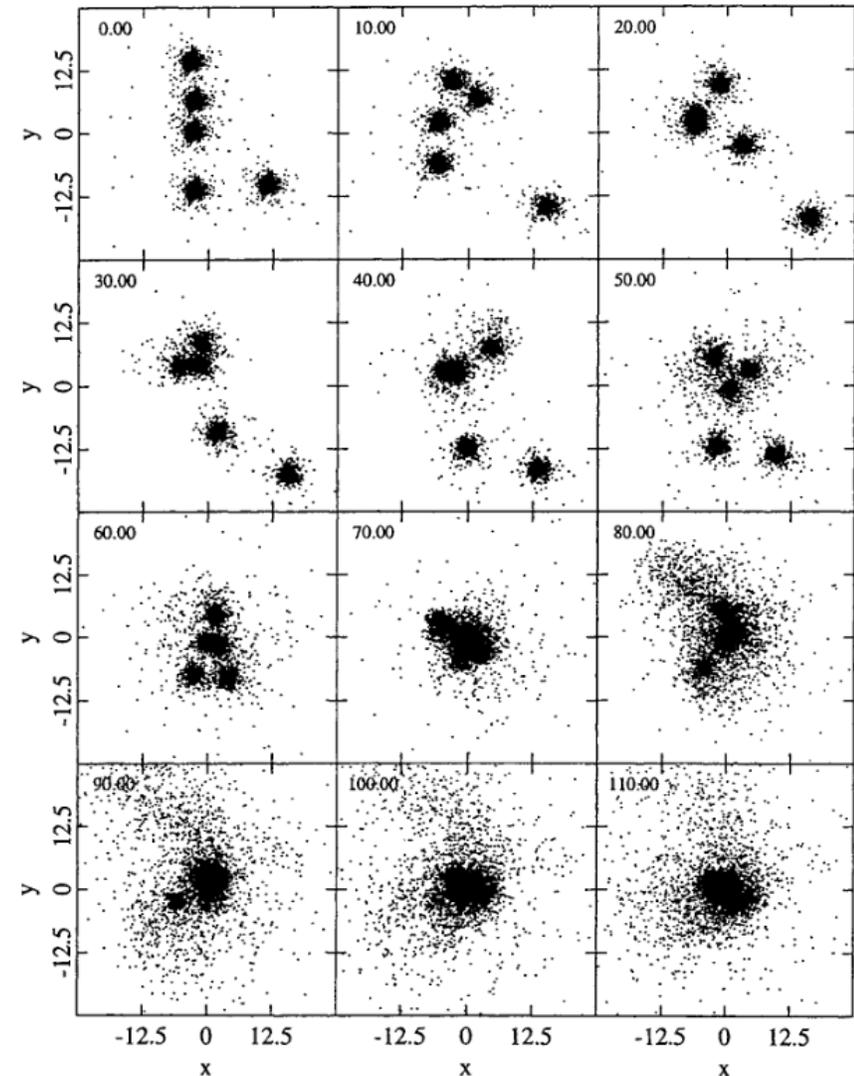
→ A  $z=0$ , tous les HCG devraient avoir disparu

**Solutions:** → les HCG ne sont pas réels (effets de projection) ?

→ Les halos noirs ont fusionné depuis longtemps, et le halo est commun (fusion en  $\sim 2-3$  Gyr, selon concentration)

→ Les groupes diffus s'effondrent en groupes compacts, et repeuplent les HCG

→ **Gravité modifiée?**



1 Gyr

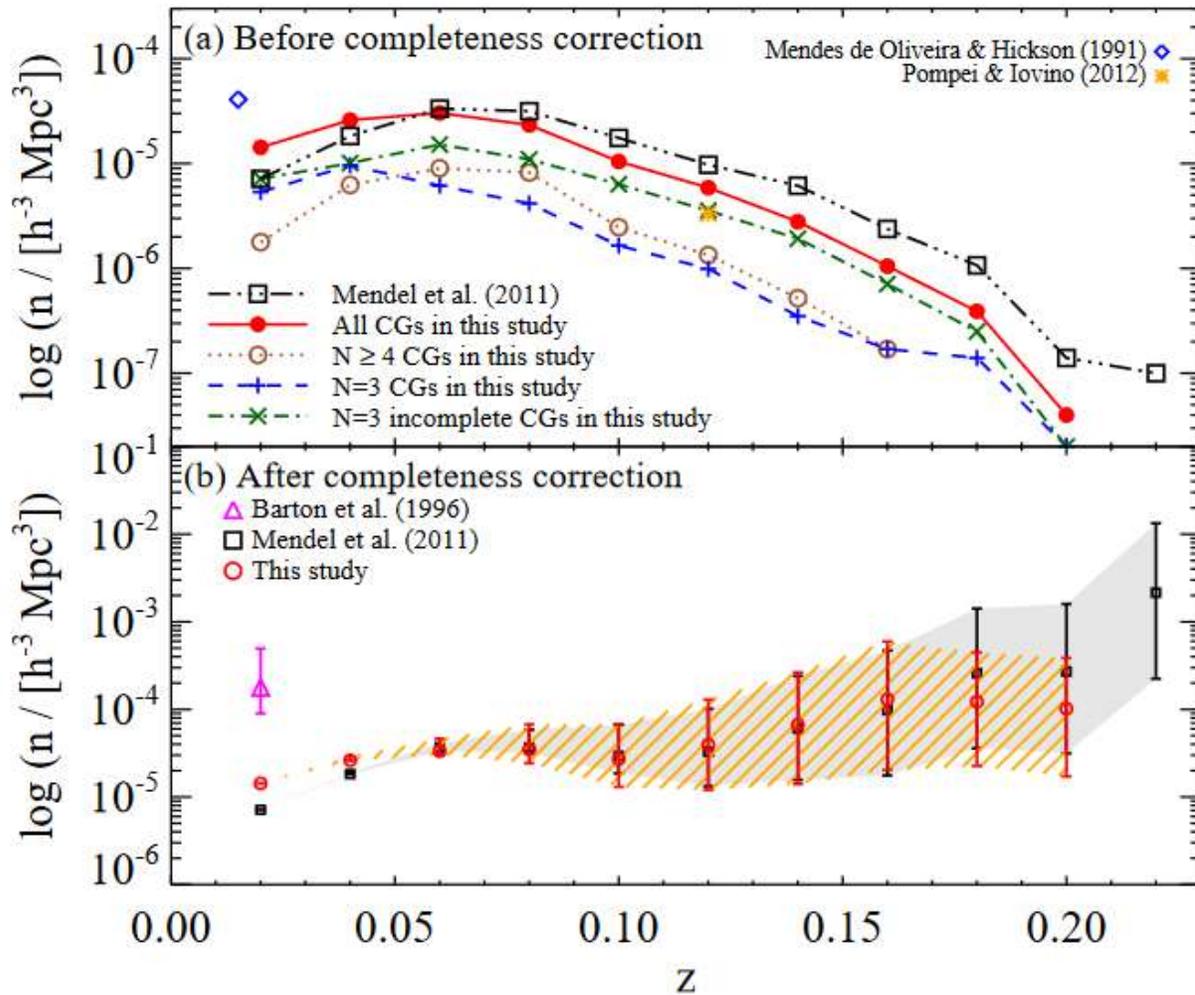
# Un mélange de toutes ces hypothèses

CG-transitoire

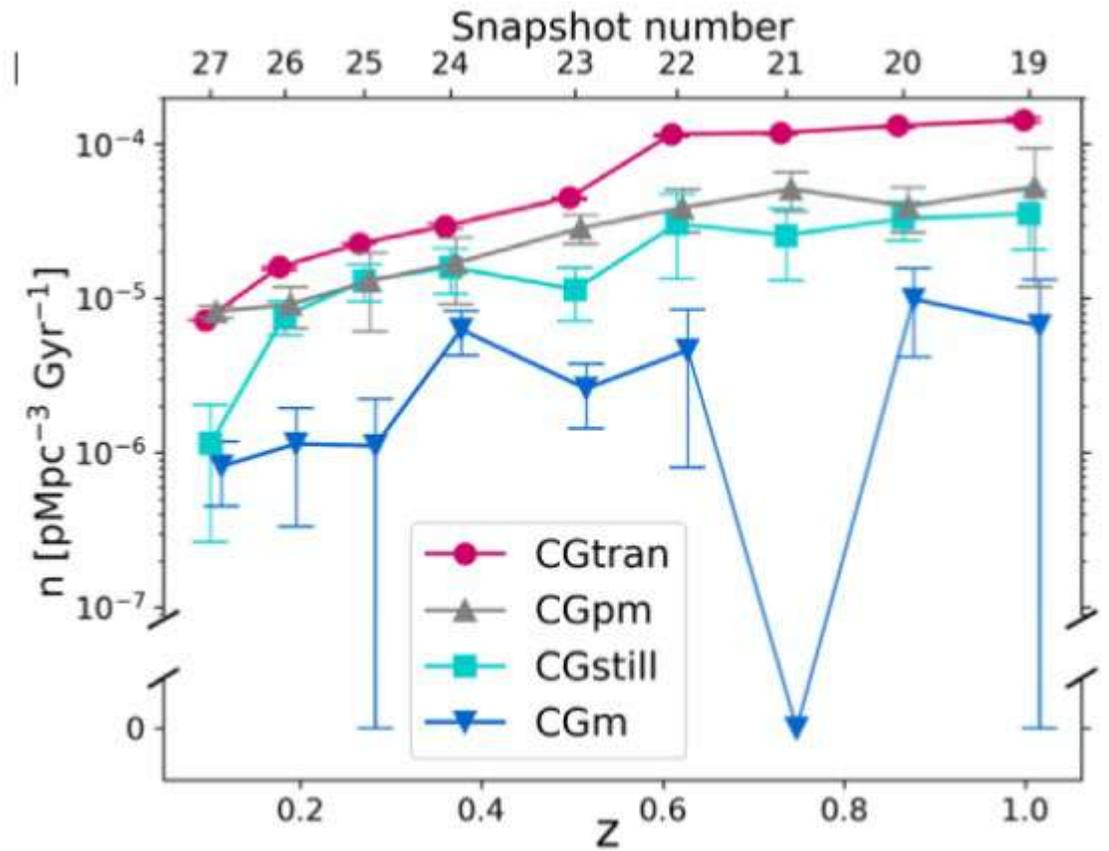
CG-merger partiel

CG-still (toujours là)

CG-m merger



*Sohn et al 2015*



Simulations EAGLE  
CG alongés sur la los

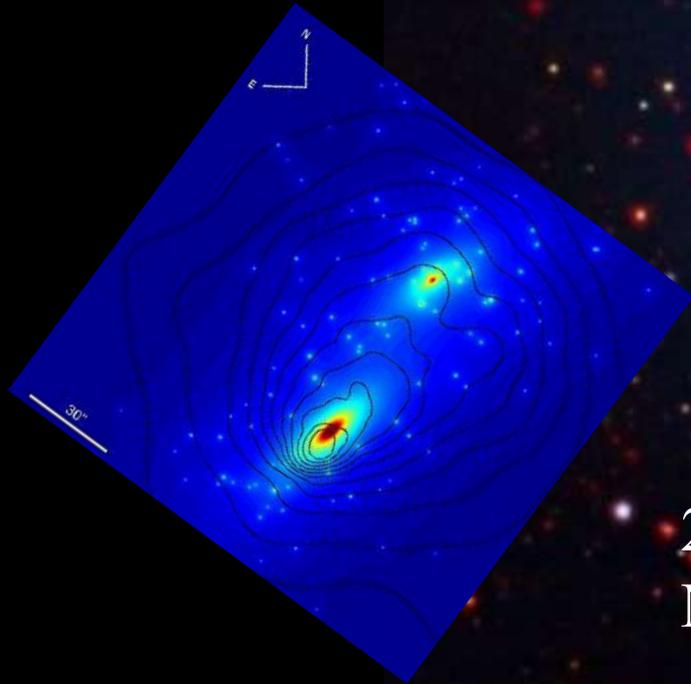
*Hartuiker + 2020*

# L'amas le plus massif: El Gordo

Découvert en X et SZ  
*Menanteau et al 2012*

$$\sigma_{\text{gal}} = 1320 \text{ km/s}$$

$$M = 1-2 \cdot 10^{15} M_{\odot}$$



2 sous-amas en collision,  $z=0.87$

$$M^* = 1\% M_{\text{tot}}$$



# Cartographie de la masse avec JWST

JWST double le nombre de lentilles (60 familles)

$2 < z < 6$  + étoile SRG  $z=2.2$

*Diego et al 2022*

100 kpc

X-ray contours

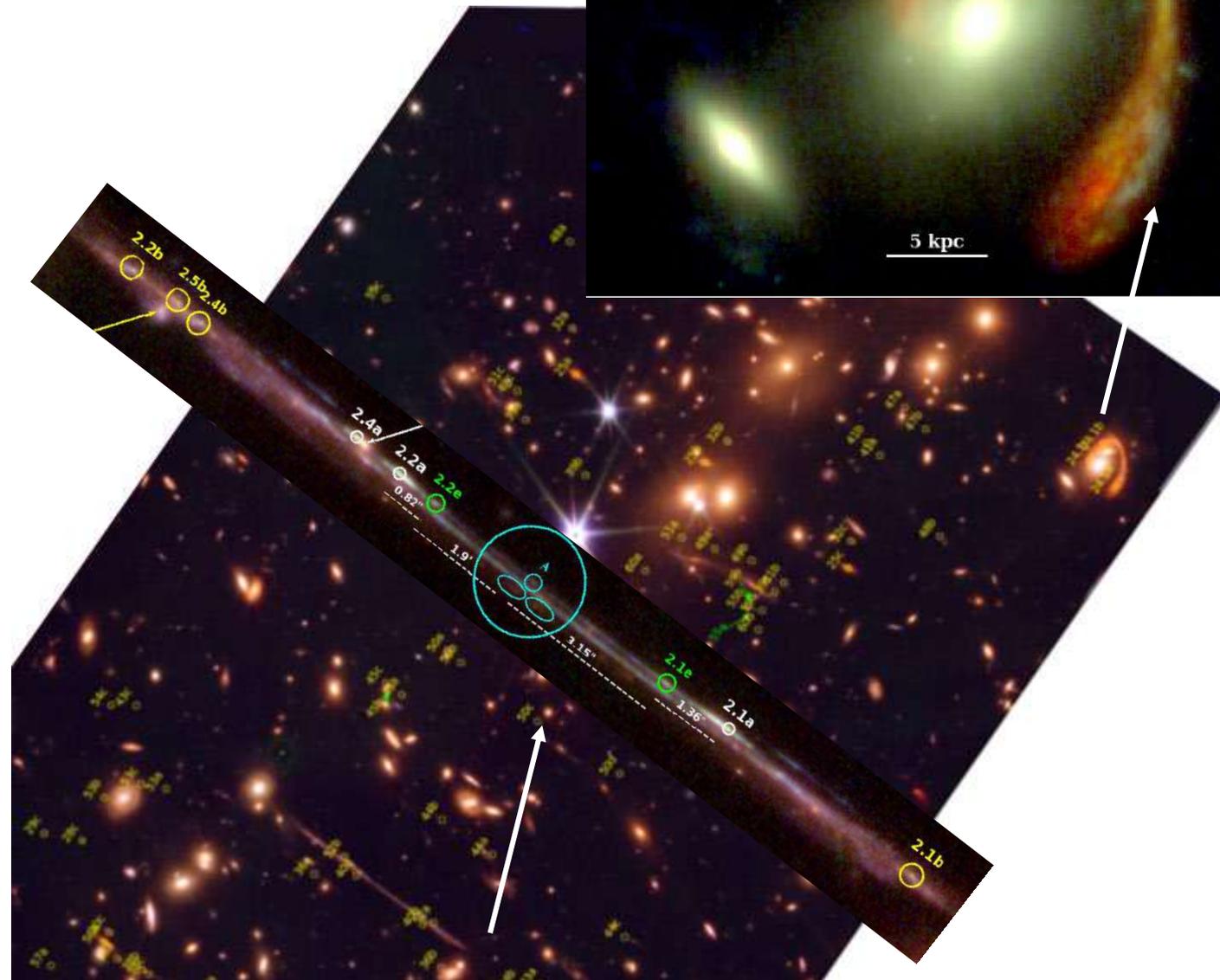
El Gordo  
 $z=0.87$

convergence  $\kappa(z=3)$

0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2

Galaxy  $z=3.54$   
3 image pairs

5 kpc

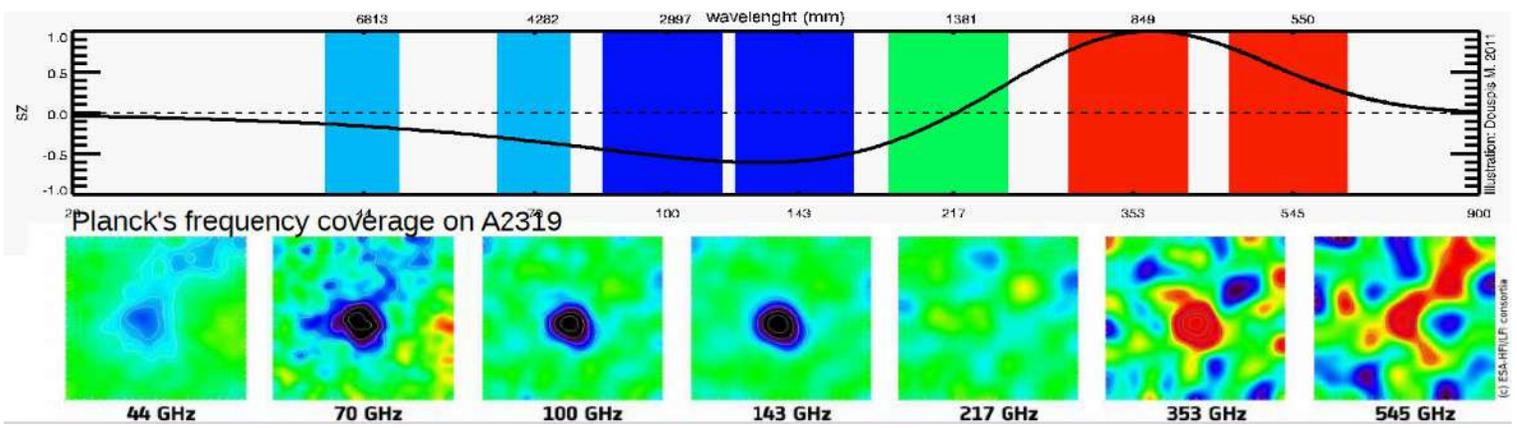
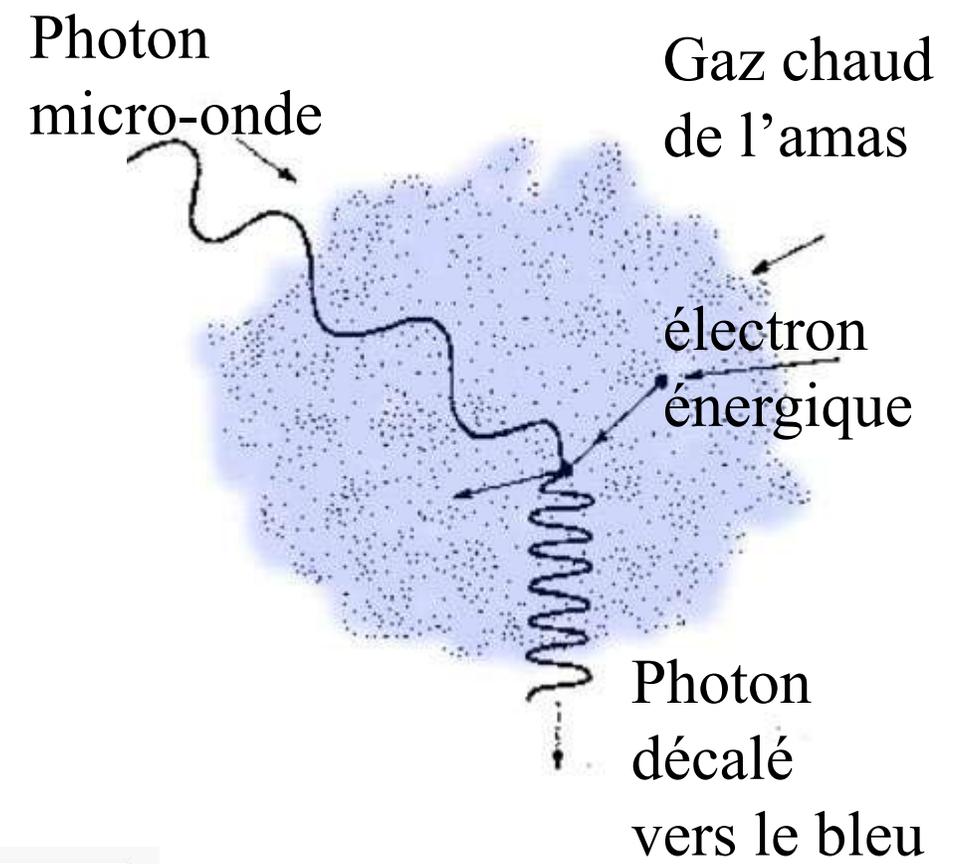
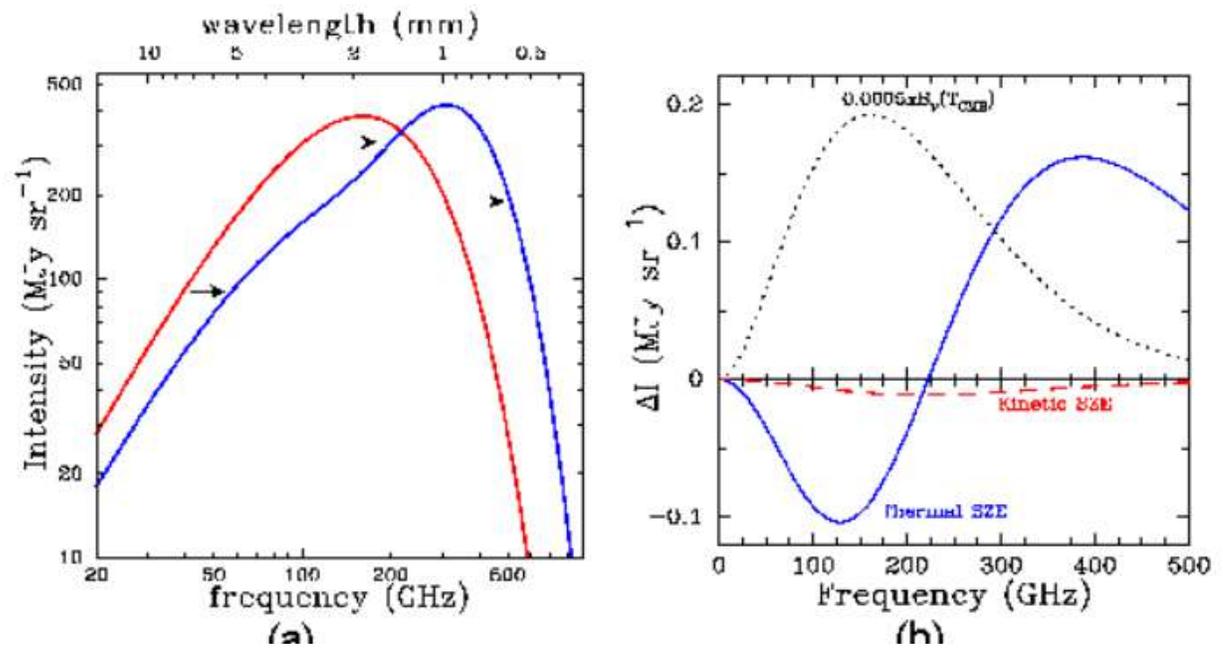


Diffusion Compton inverse,  
 → donne de l'énergie au photon

Indépendant de  $z$

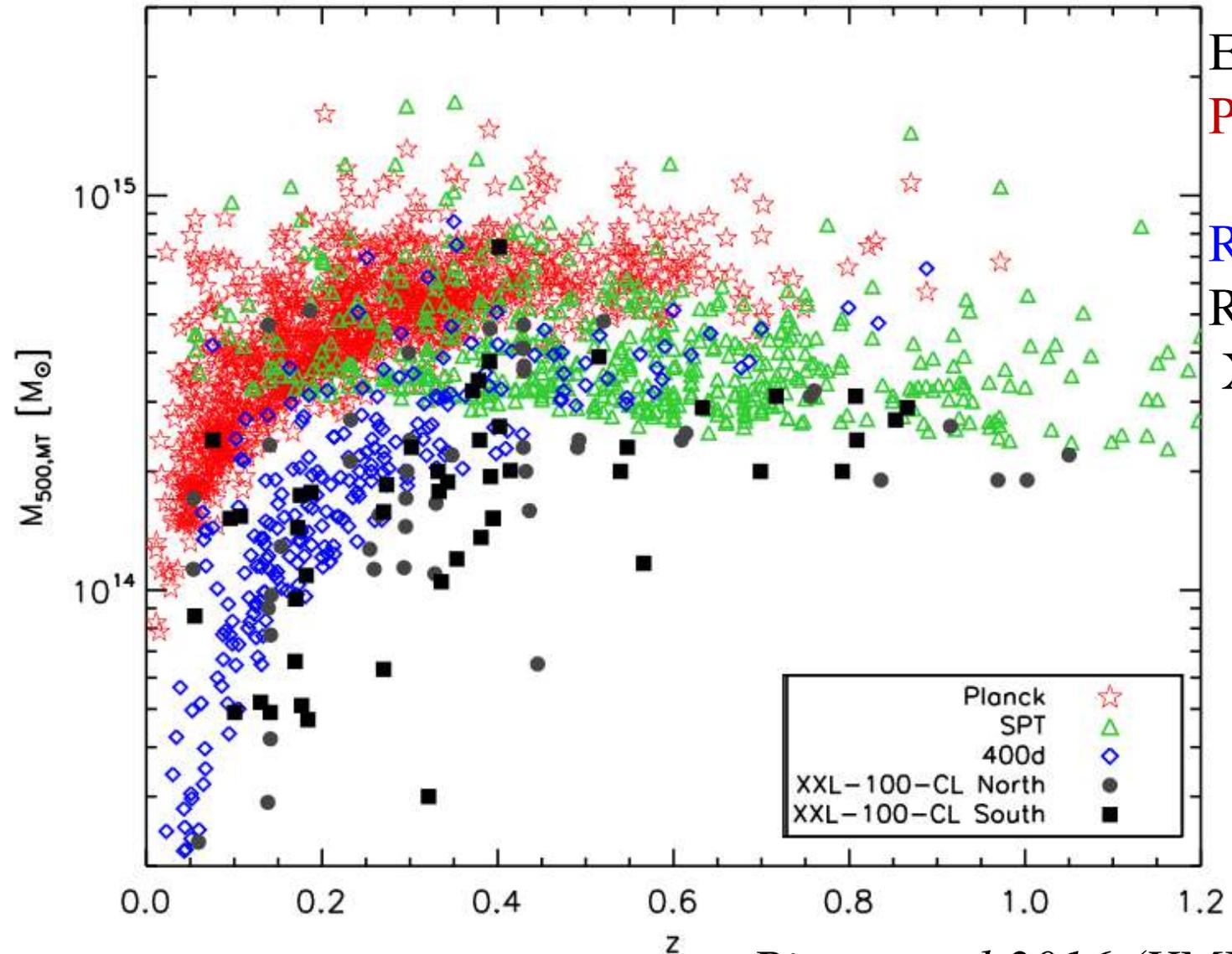
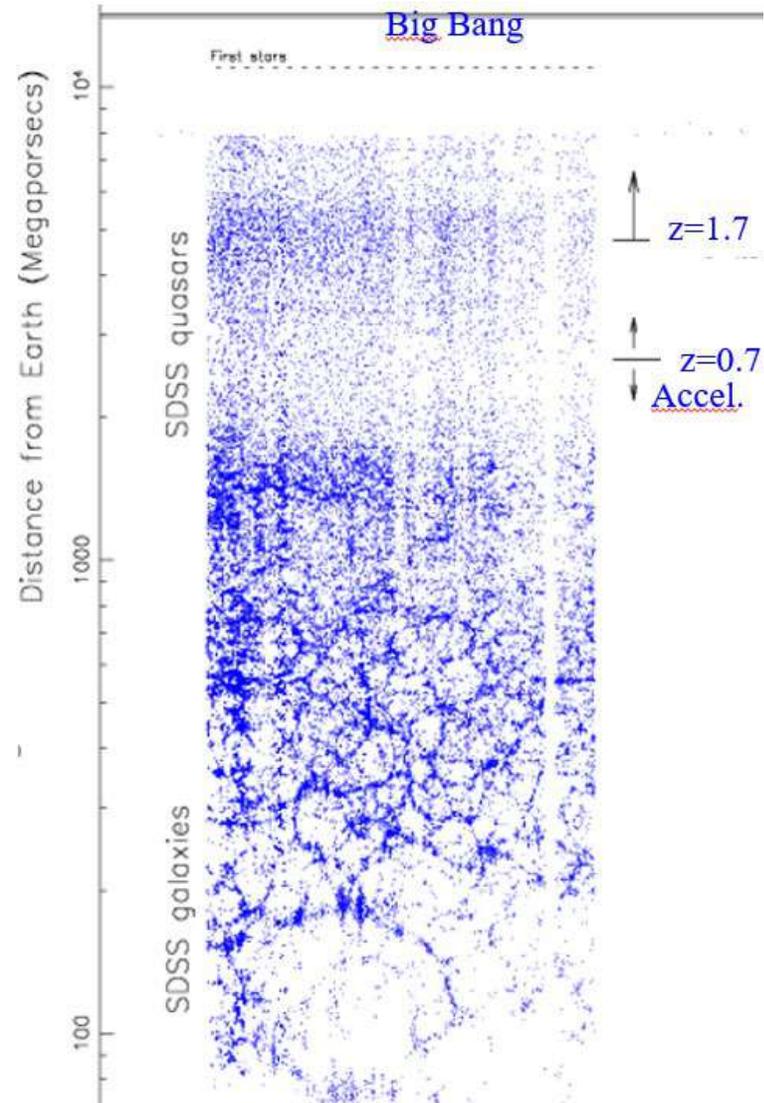
→ Plus loin qu'avec les rayons X

# Effet Sunyaev-Zeldovich (SZ)



$\lambda = 1-3mm$

# Comparaison des diverses méthodes



Effet SZ  
Planck, SPT

Rosat+Opt  
Rayons X:  
XXL

400<sup>02</sup> ◆  
ROSAT  
catalog

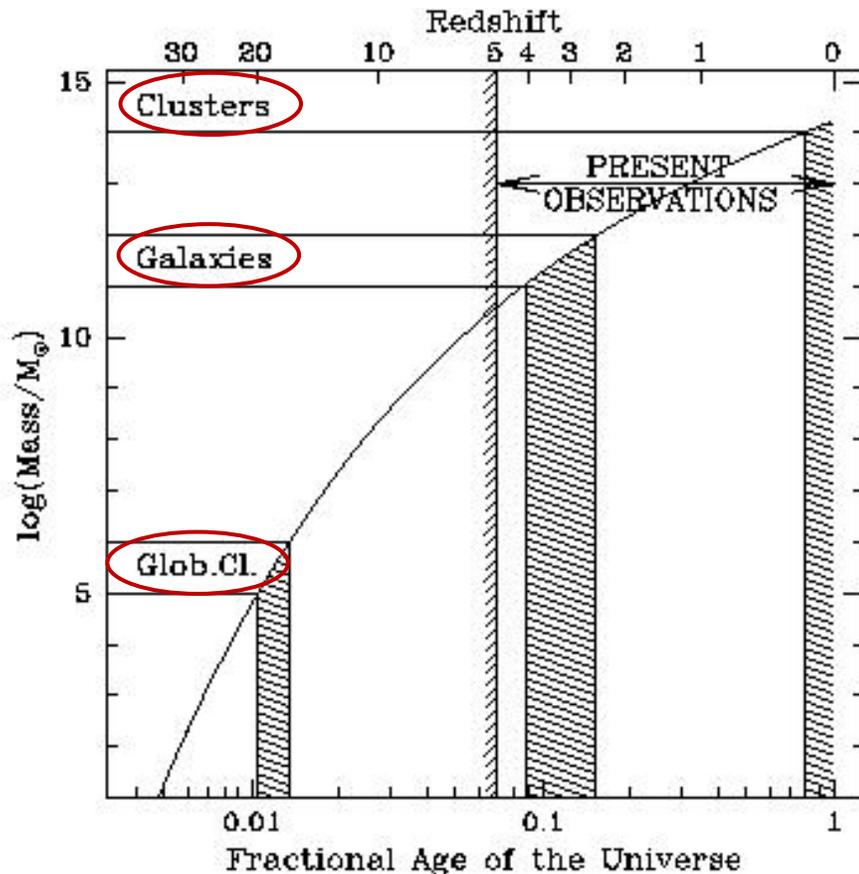
# Formation hiérarchique des structures

Dans le modèle le plus adapté aujourd'hui aux observations

CDM (cold dark matter), les premières structures à se former sont les plus petites, puis par fusion se forment les plus grandes (bottom-up)

Amas de galaxies

Amas globulaires

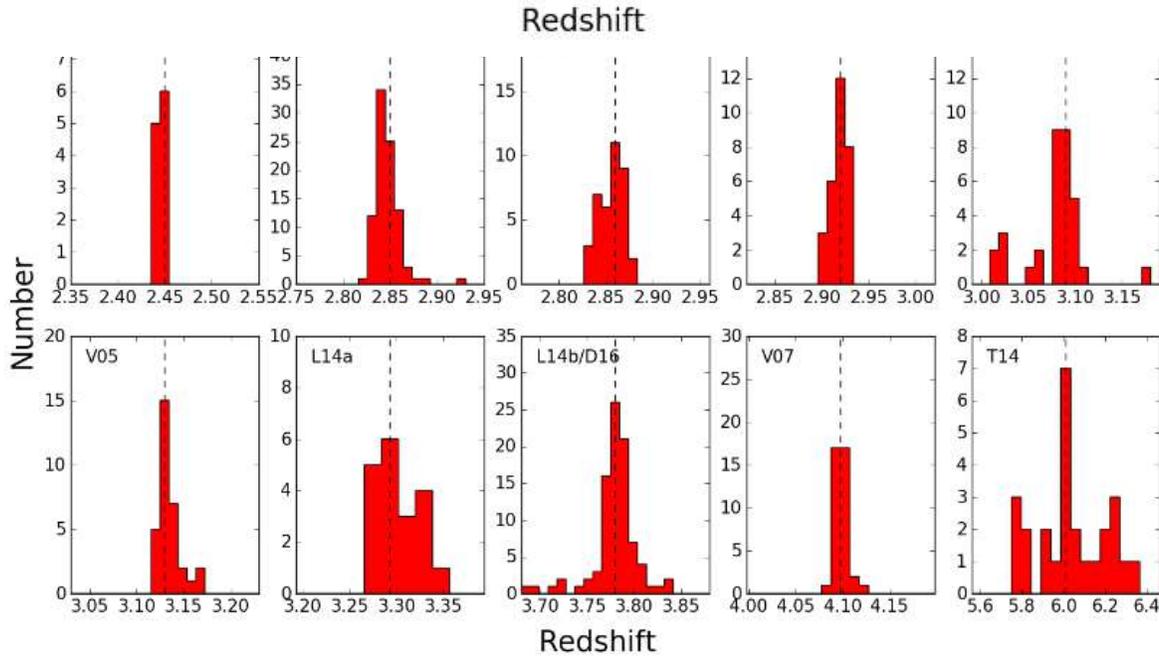
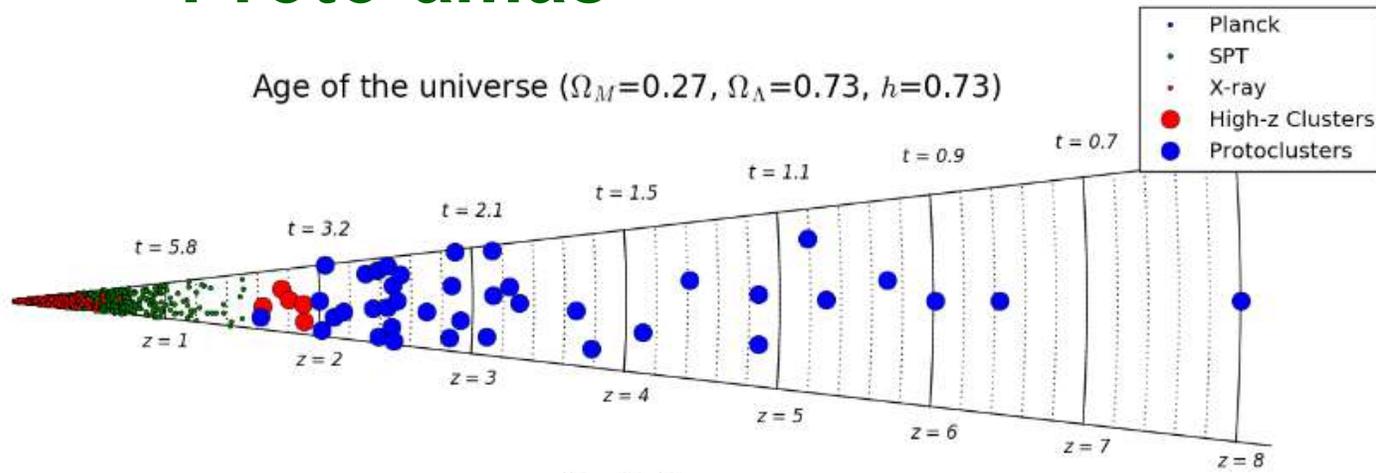


$|\delta k|^2 = P(k) \sim k^n$ , avec  $n=0.91$   
aux grandes échelles  
 $k^{-3}$  aux petites échelles  
tilt quand  $\rho_r \sim \rho_m$   
à l'échelle de l'horizon

$$\delta M/M \sim M^{-1/2 - n/6} \sim M^{-2/3}$$

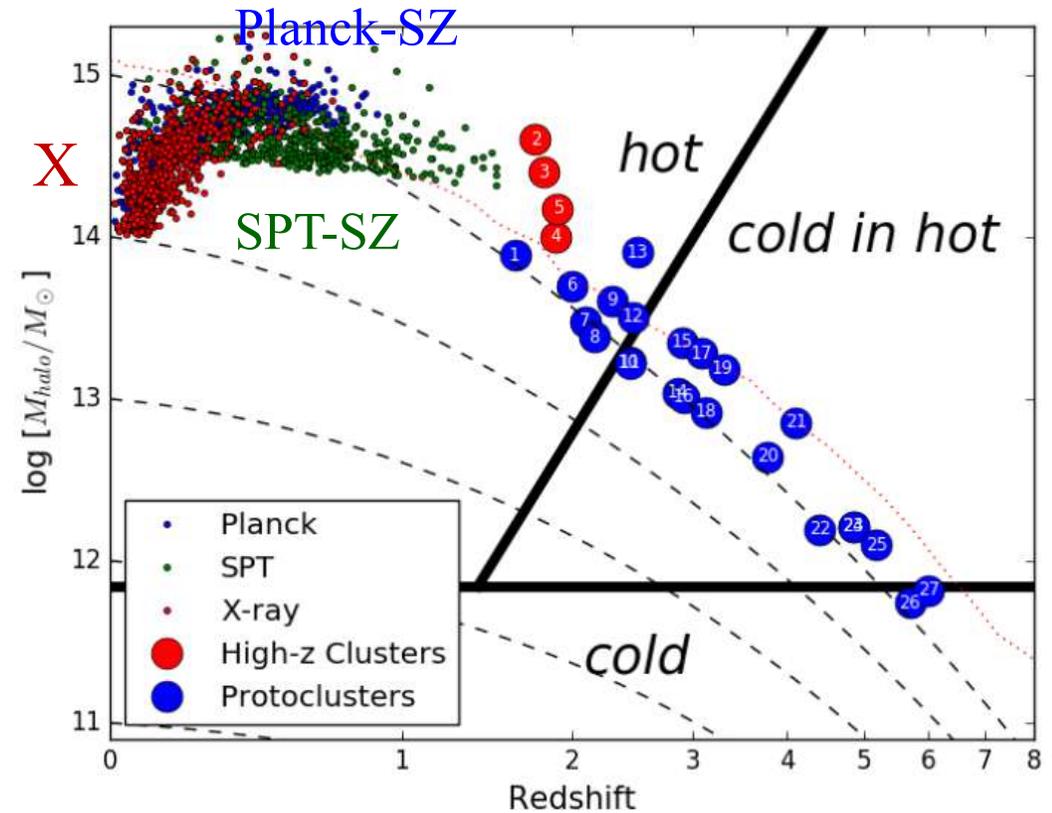
quand  $n > -3$ , formation hiérarchique ( $\delta M/M \downarrow$  avec  $M$ )  
*Abel & Haiman 2000*

# Proto-amas



Les proto-amas sont très étroits en redshifts

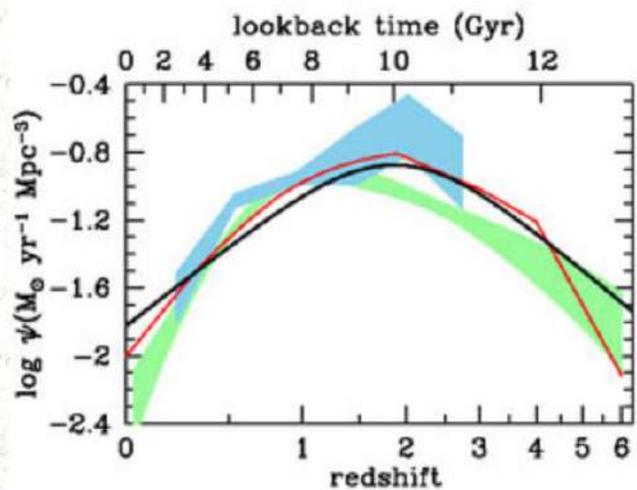
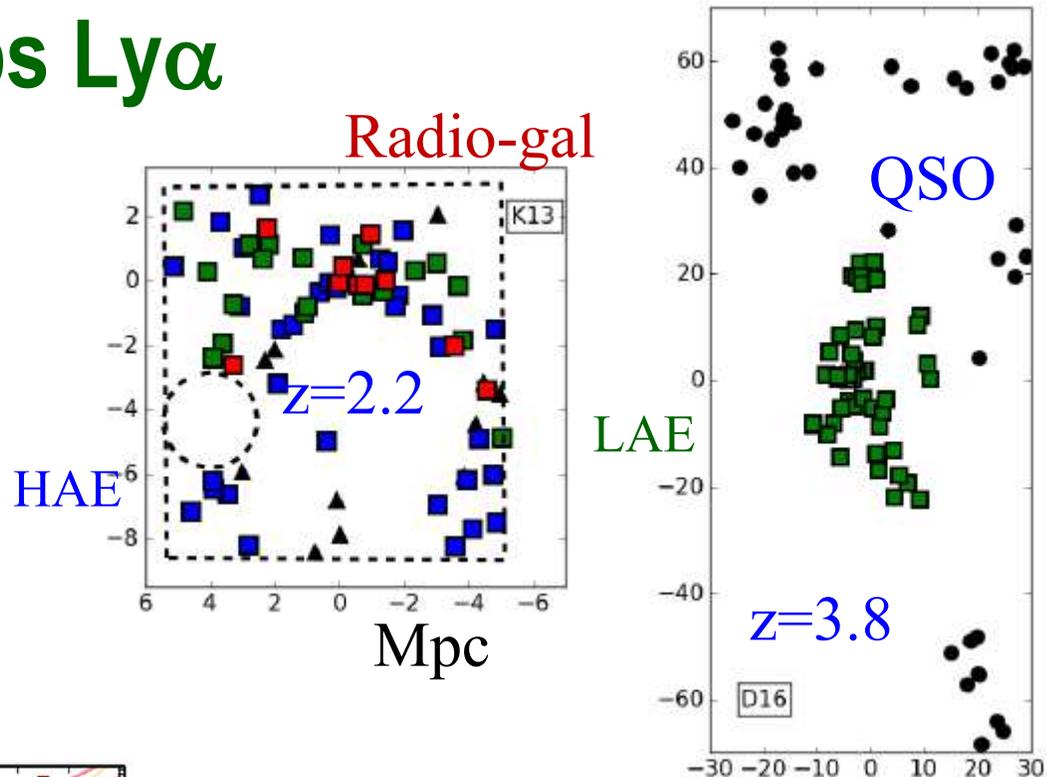
Transitions entre accrétion de gaz froid et gaz chaud, et flots de refroidissement



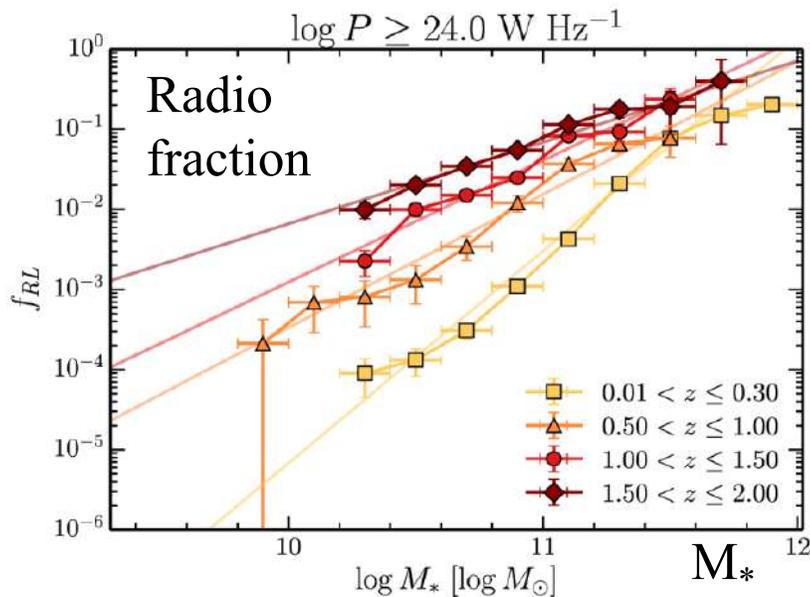
# Associations Radio-gal, QSO, blobs Ly $\alpha$

Recherche autour des galaxies radio, ou QSO  
 → Émetteurs LAE, HAE autour de ces futures BCG

Surtout vers  $z=2$ , pics de SFR et SMBH

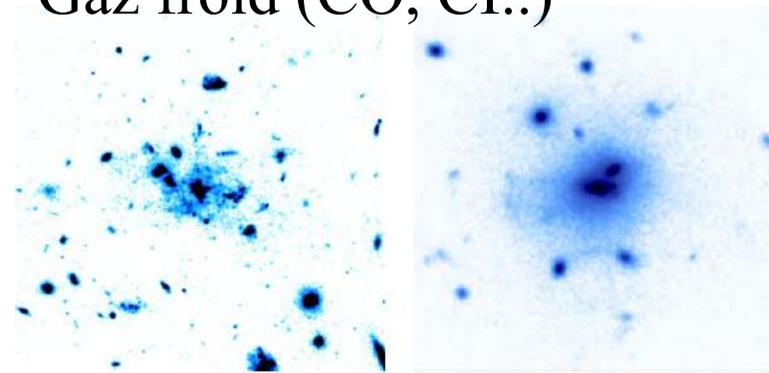


Overzier 2016



Magliocchetti 2022

Gaz froid (CO, CI..)



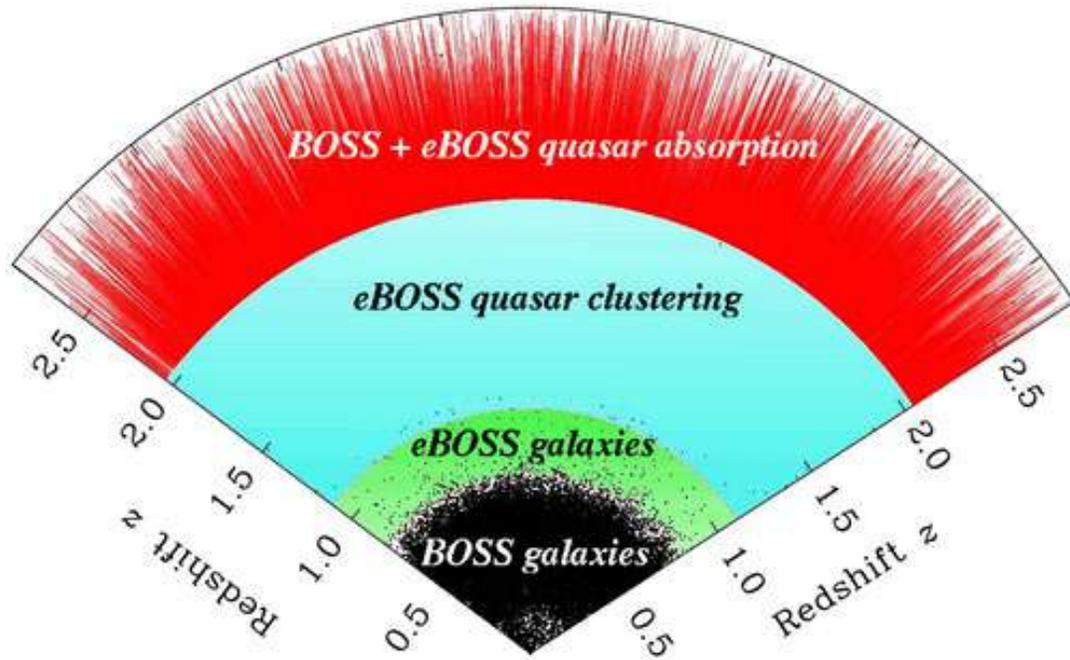
Spider web

Simulation

$z=2.2$  proto-amas (150kpc)

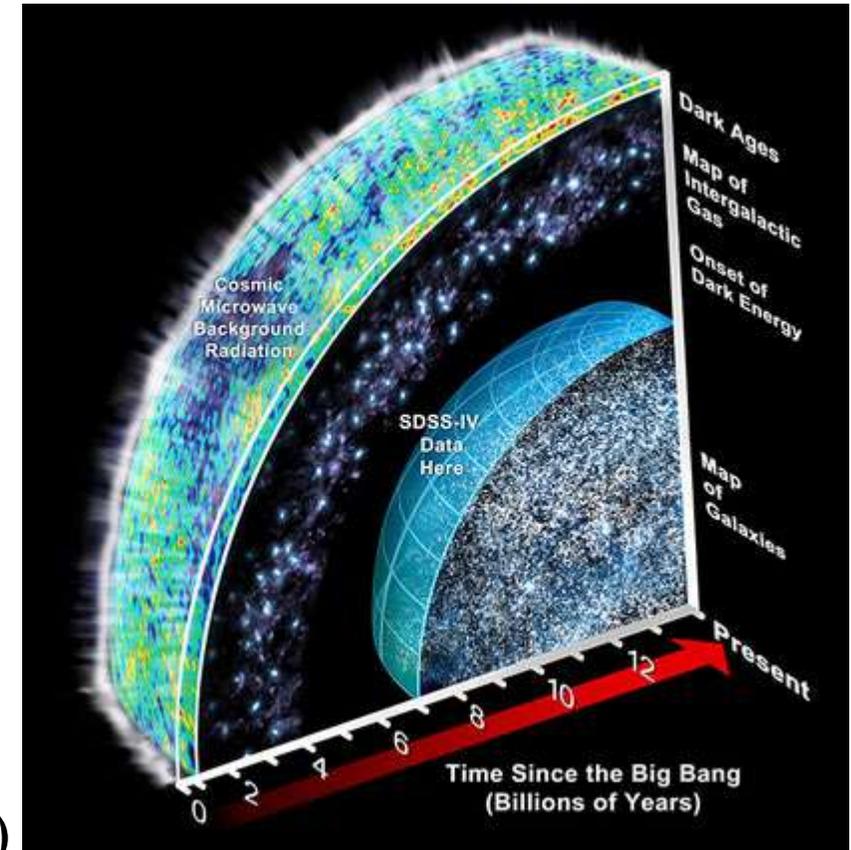
# Exploration du ciel avec le SDSS

Avec des traceurs de plus en plus lumineux,  
entre  $z=0.6$  et  $3.5$



BAO pour explorer l'expansion de l'Univers  
Energie noire, matière noire  
extended **Baryon Oscillation Spectroscopic Survey** (eBOSS)

Echantillon de Galaxies  
limité en flux jusqu'à  $z=0.1$   
Puis galaxies sélectionnées rouges  
(elliptiques lumineuses)  $z=0.5$



## SDSS-I/II

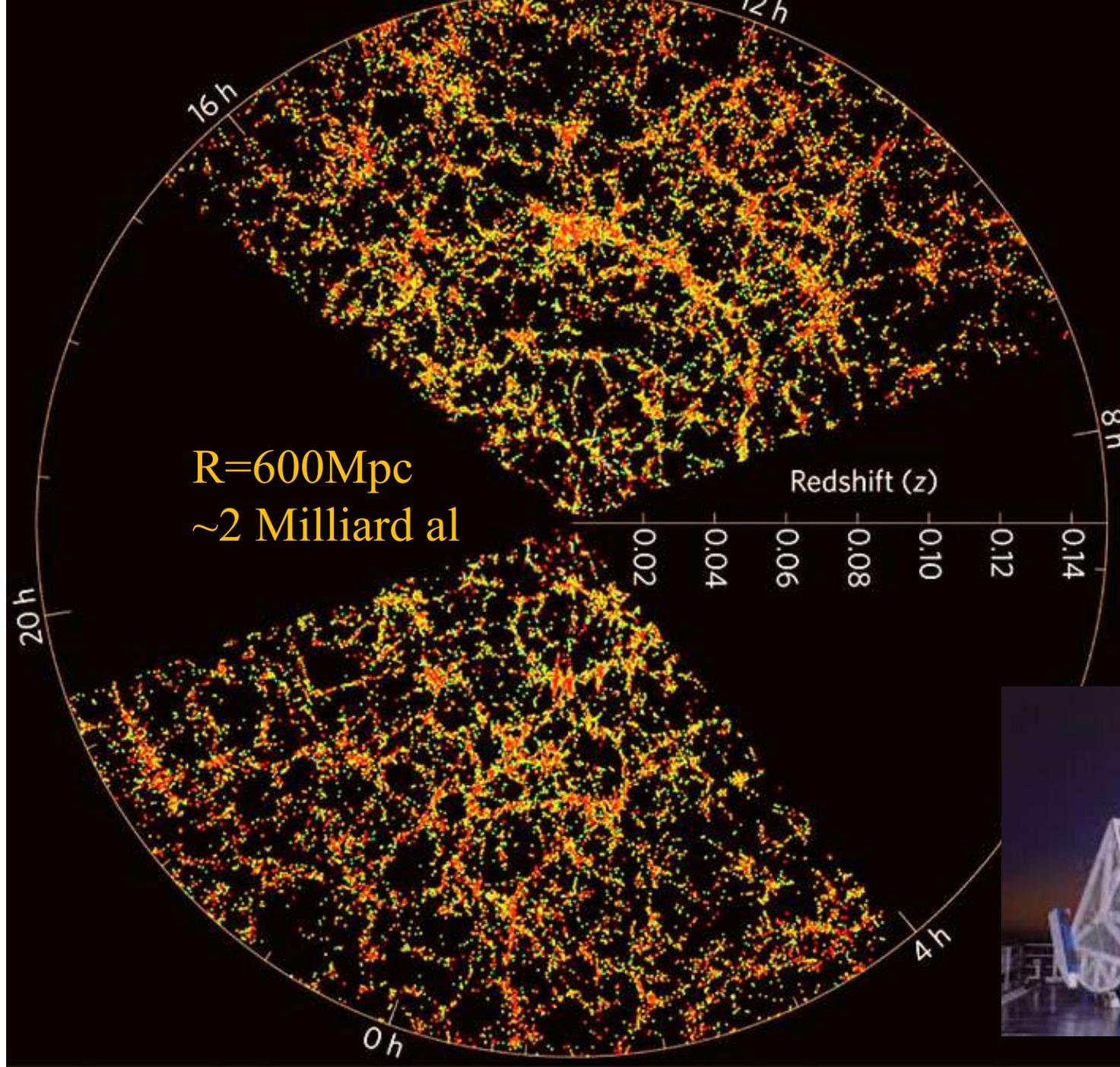
1 million  
de galaxies  
 $z=0-0.2$

Contraste  
 $\delta\rho/\rho \sim 10^6$

**SDSS-IV**  
**200 millions**  
**Imagerie**

**2.4 millions**  
**de redshifts**

**500 000 QSO**



640 fibres/pose  
6-9 poses  
par nuit

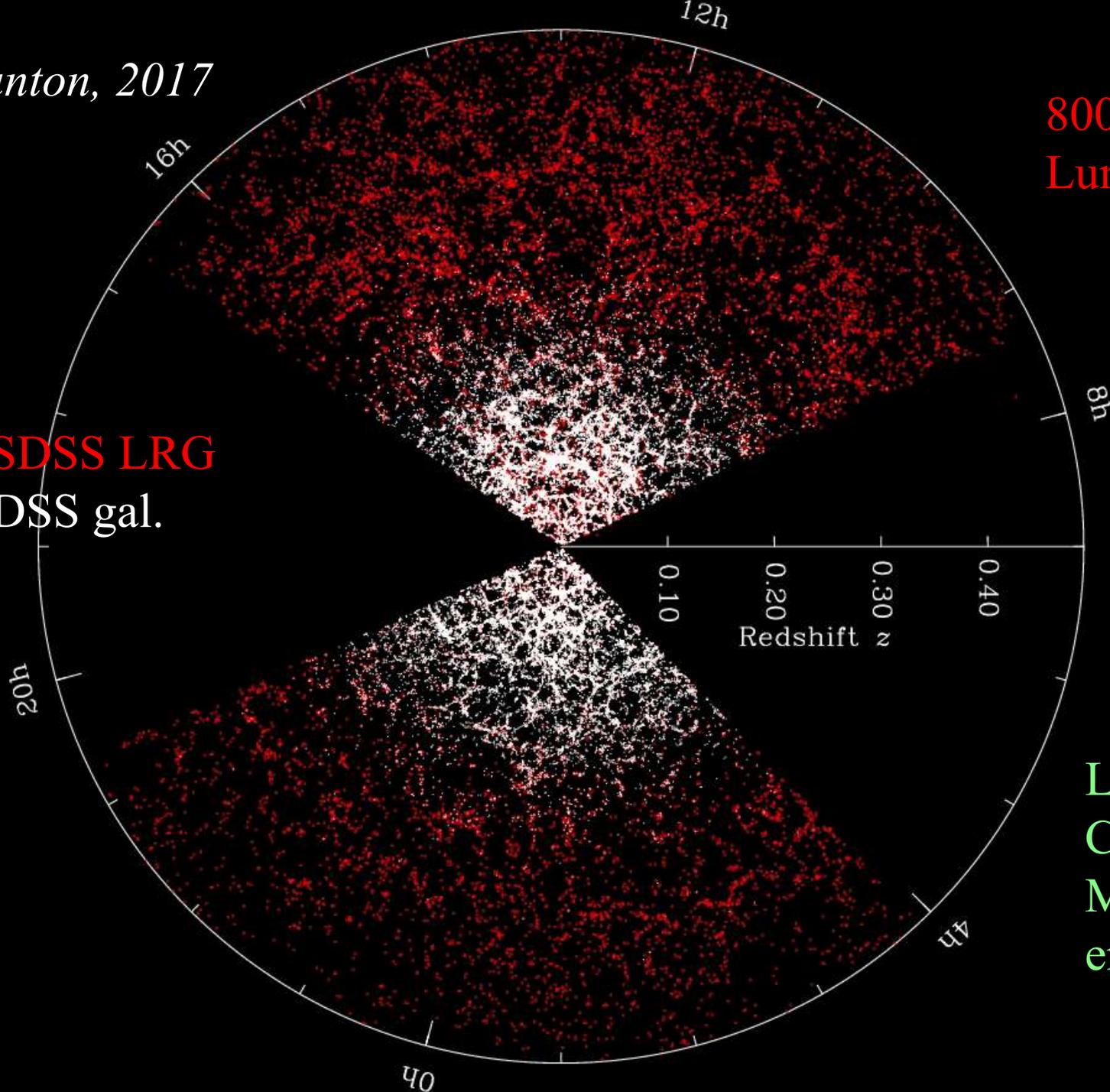
APO  
2.5m



*M. Blanton, 2017*

800 000 galaxies  
Lumineuses rouges

.Rouge = SDSS LRG  
Blanc = SDSS gal.

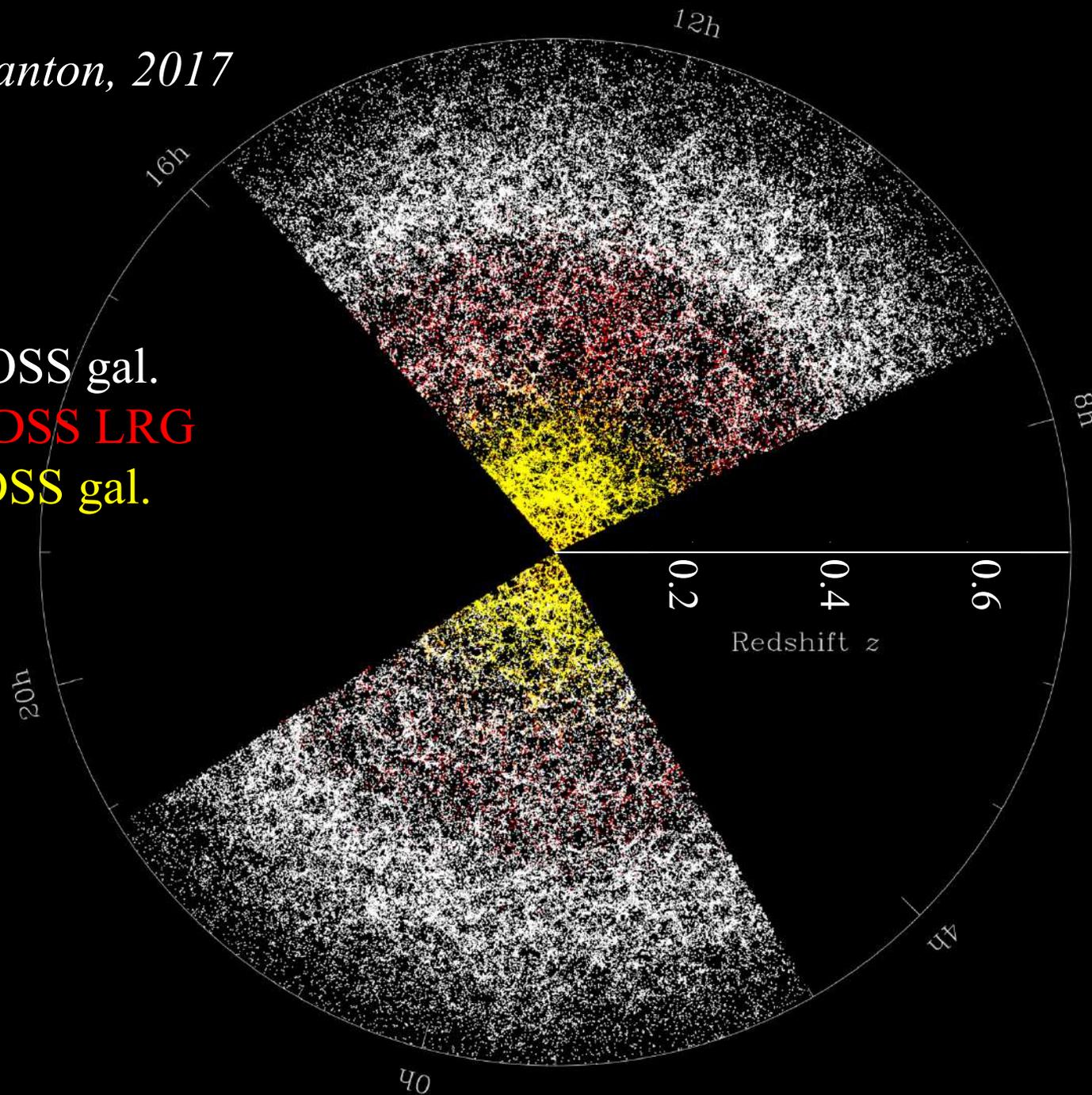


Las Campanas Obs  
Chili, LCO 2.5m  
Même équipement  
en fibres que APO

*M. Blanton, 2017*

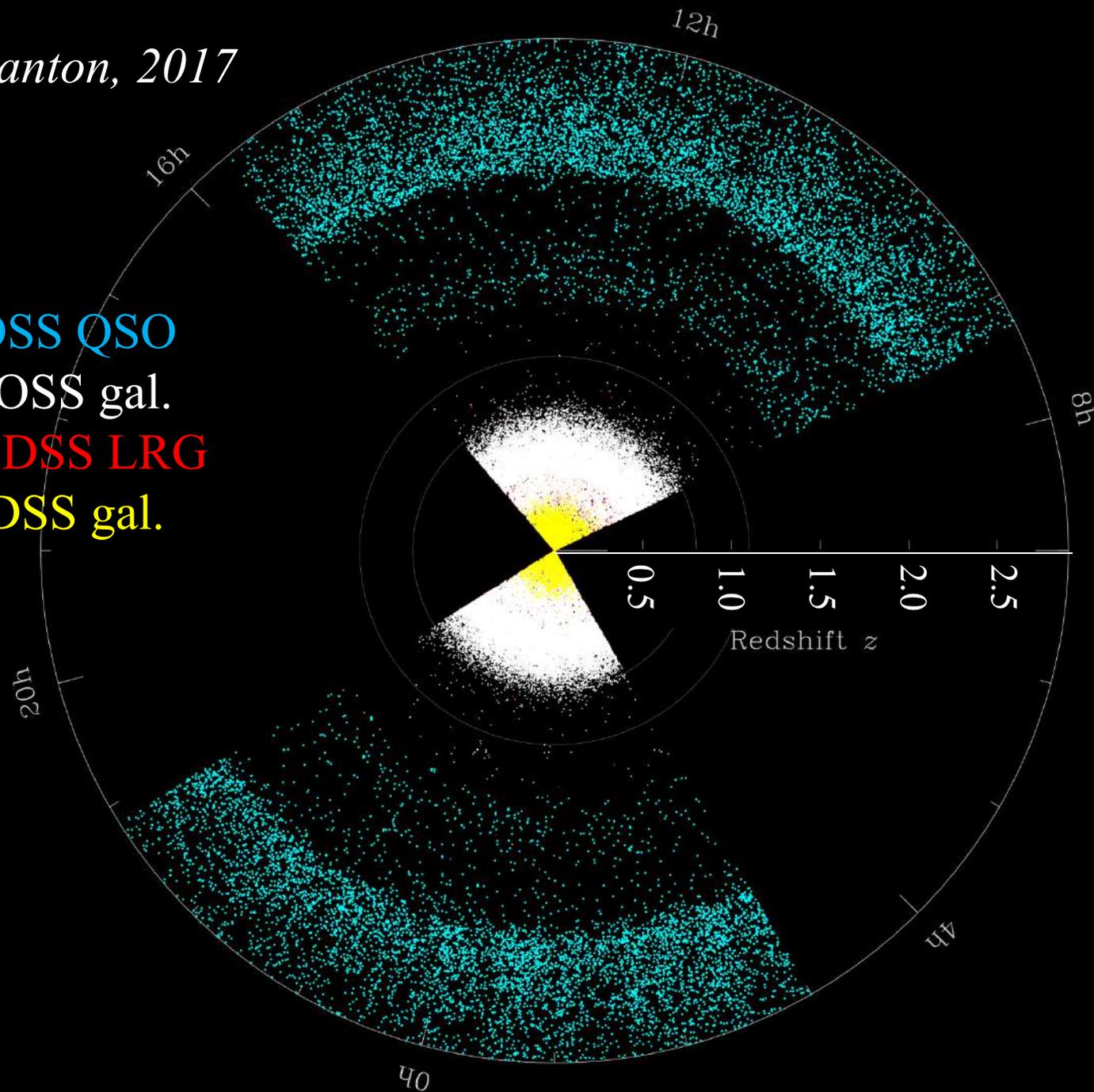
250 000 nouvelles  
galaxies lumineuses

Blanc = BOSS gal.  
Rouge = SDSS LRG  
Jaune = SDSS gal.



*M. Blanton, 2017*

Bleu = BOSS QSO  
Blanc = BOSS gal.  
Rouge = SDSS LRG  
Jaune = SDSS gal.

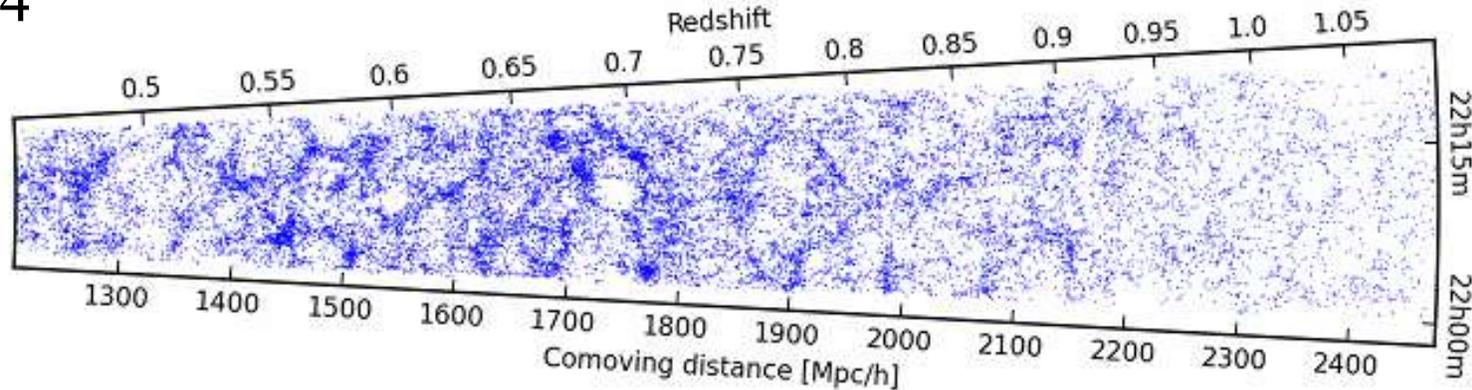


450 000 nouveaux  
quasars choisis  
par variabilité,  
et émission X

# Toile Cosmique à grand z: VIPERS

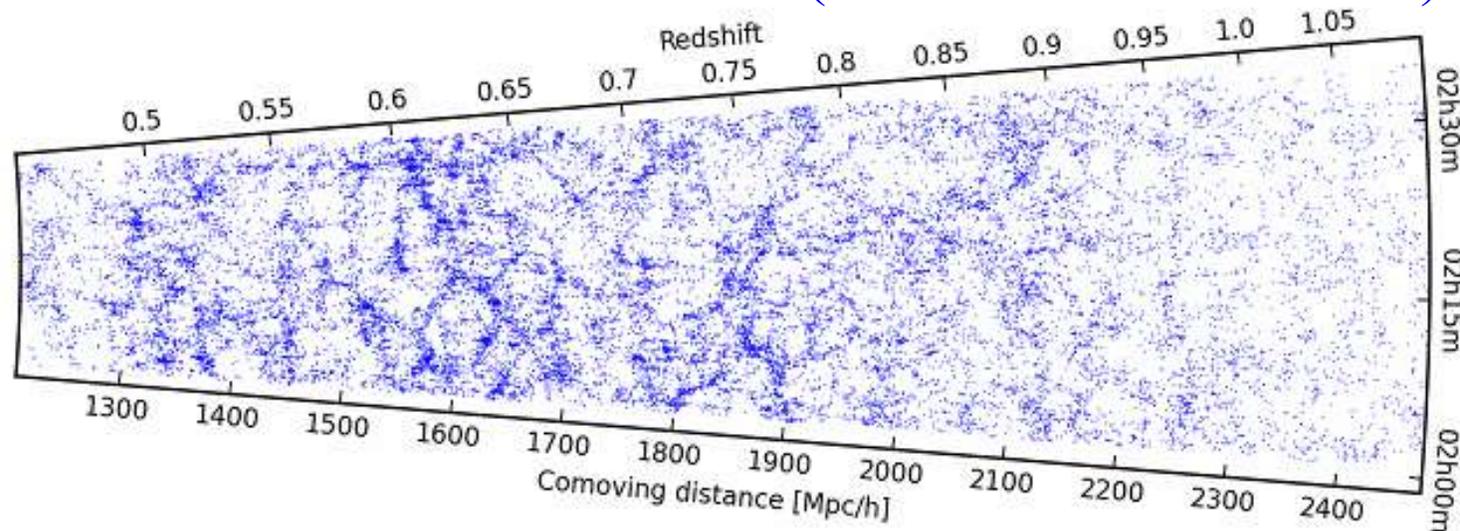
VIMOS au VLT: 100 000 redshifts ( $24^\circ^2$ )

Champ 4



Tranches d'univers à  $0.5 < z < 1.2$  (1<sup>ère</sup> moitié de l'Univers)

Champ 1



**Plus complet**  
**Plus uniforme**  
**Plus de résolution**

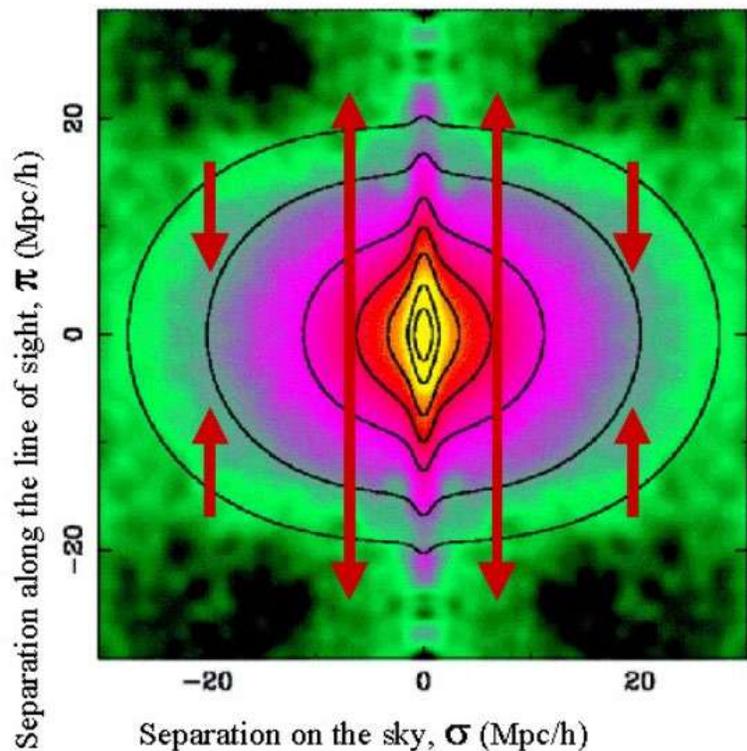
Permet de détecter  
les **RSD** « Redshift-  
Space Distortions »

Les amas

# RSD « Redshift-Space Distortions »

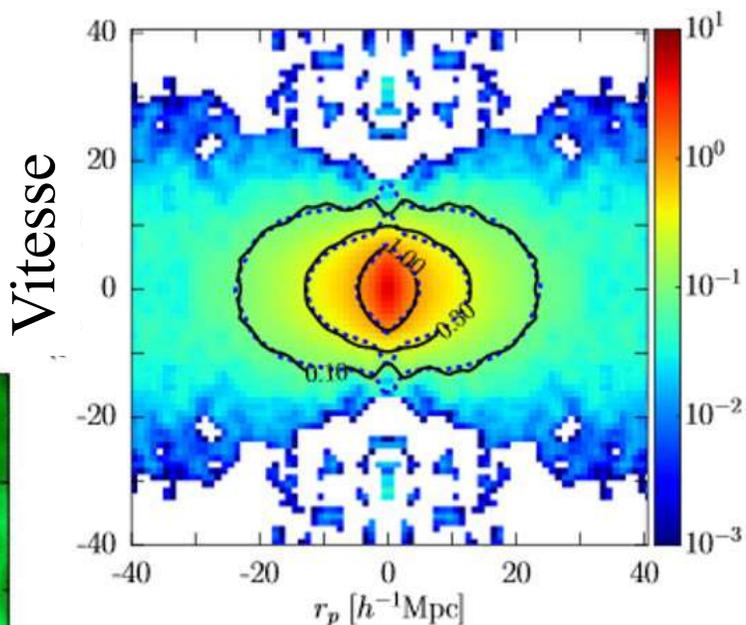
Mohammad et al 2018

Perturbations dues  
aux amas sur la  
ligne de visée

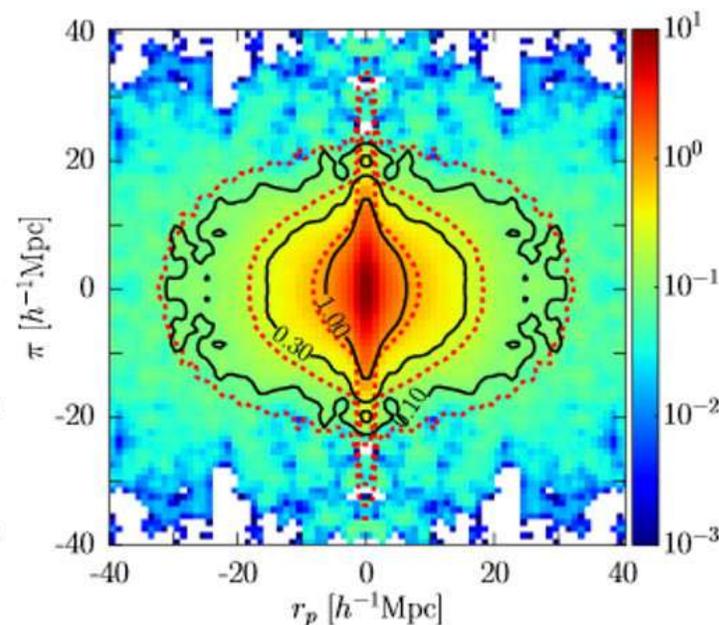


The 2dF Galaxy Redshift Survey Team (2001)

VIPERS galaxies bleues



galaxies rouges



+ allongé  
en rouge  
--- simul

Distance spatiale

→ Correction de la perte de quelques galaxies  
dans les amas (encombrement des fentes)  
Valable à grande échelle

# Toile Cosmique à grand z: VIPERS

Field W1

Contraste décroissant



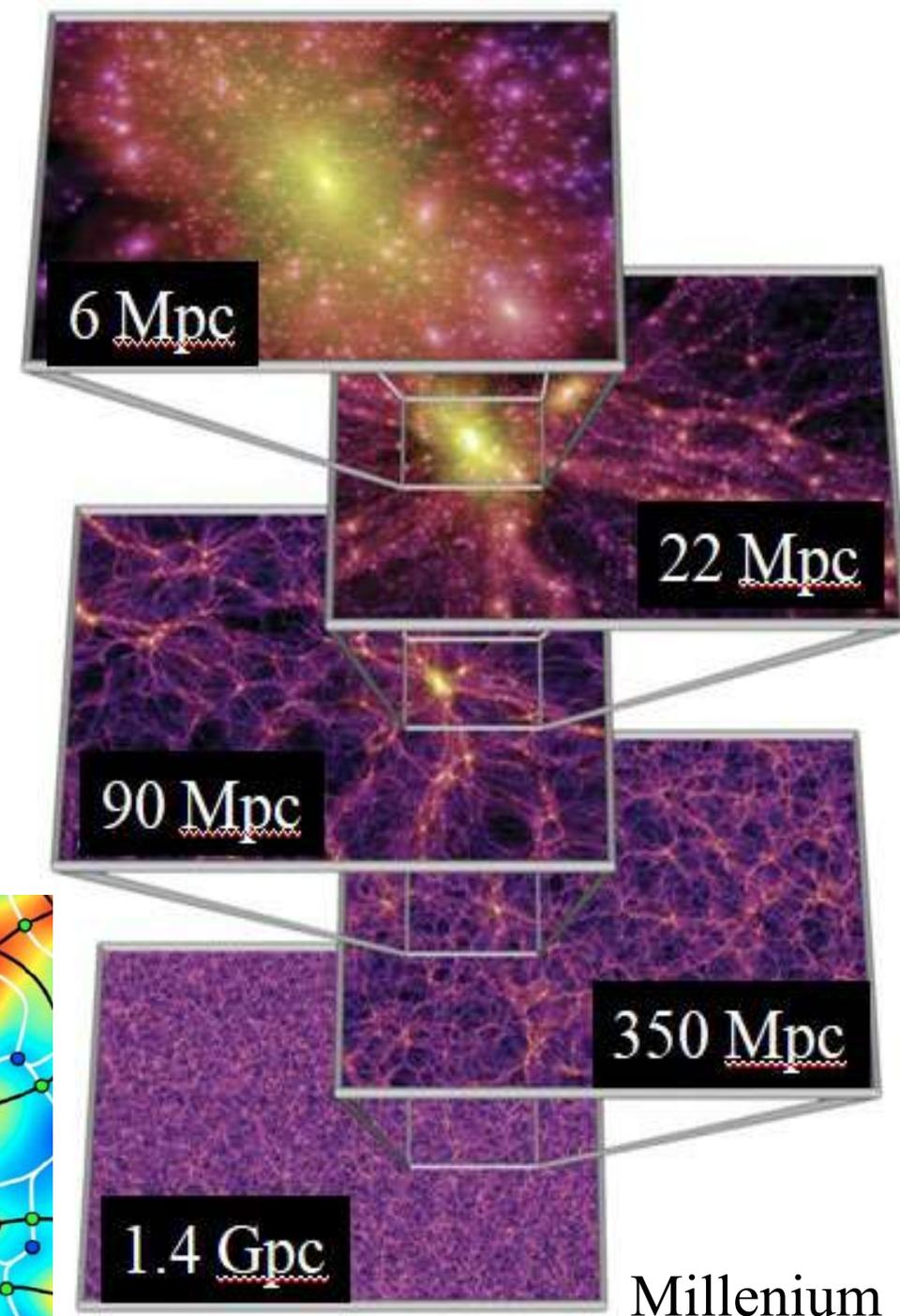
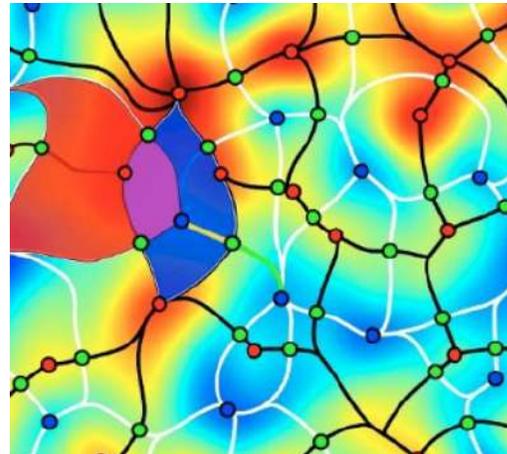
Field W4

# Structure du web cosmique

- Anisotropies des structures,
  - autour des noeuds
  - filaments très allongés (1D)
  - murs, crêpes, grands murs (2D)

Caractère multi-échelle  
grande dynamique de densité, échelle  
Sur-densités dans les amas, groupes  
Sous-densités dans les vides

Connectivité spatiale complexe  
réseau, toile d'araignée, squelette  
→ Toile cosmique



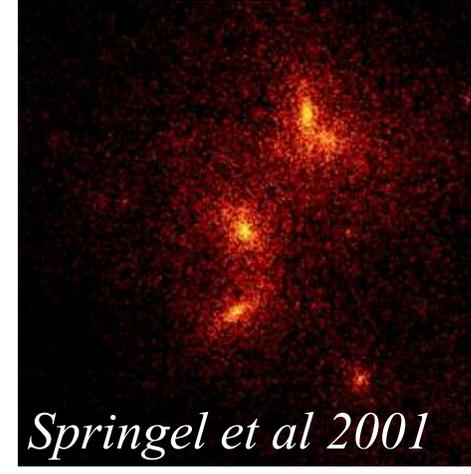
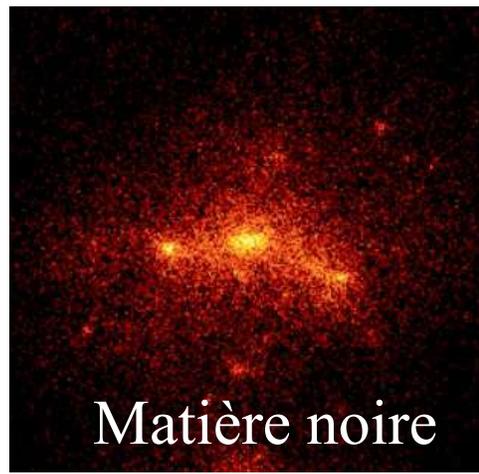
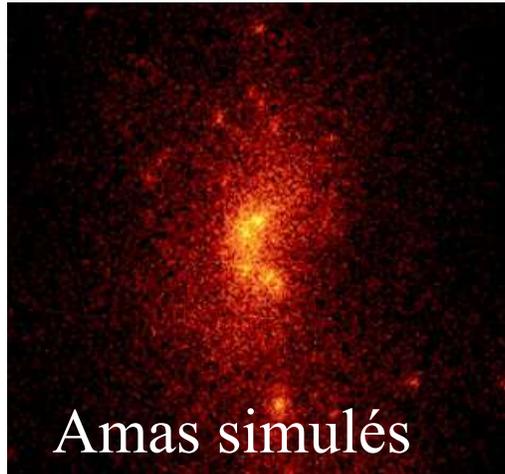
# Connaître mieux la physique

Amas de galaxies: les plus grandes structures virialisées de l'Univers

Comment les amas se forment-ils? (gravité, refroidissement)

Quelle est leur forme intrinsèque? Leur masse? contenu en baryons?

Fréquence des sous-structures: fusions ou accrétion?



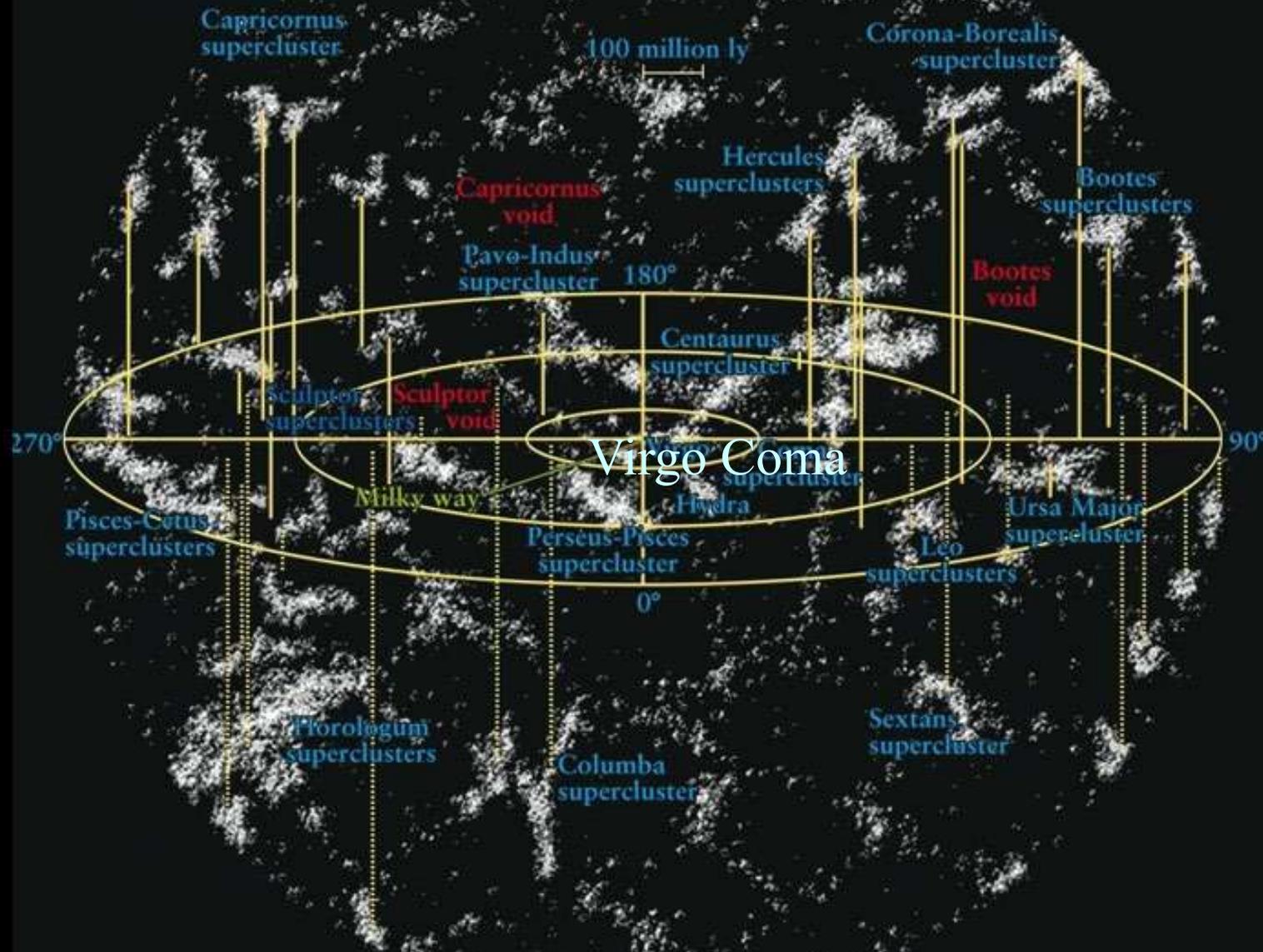
→ Outil cosmologique: Amplitude  $\sigma_8$ ,  $\Omega_m$ , taux de formation avec  $N(M,z)$ ,  $M/L$ ,  $dM/dt$

→ Gravité modifiée?

→ Mieux connaître la matière noire  $M(r)$ ,  $M/L(r)$ , baryons?

# Amas et Super-amas proches

Formation  
et physique  
interne



$R < 300 \text{ Mpc}$   
vides

## Amas de Virgo:

Le contenu en gaz atomique est très affecté par la pression dynamique

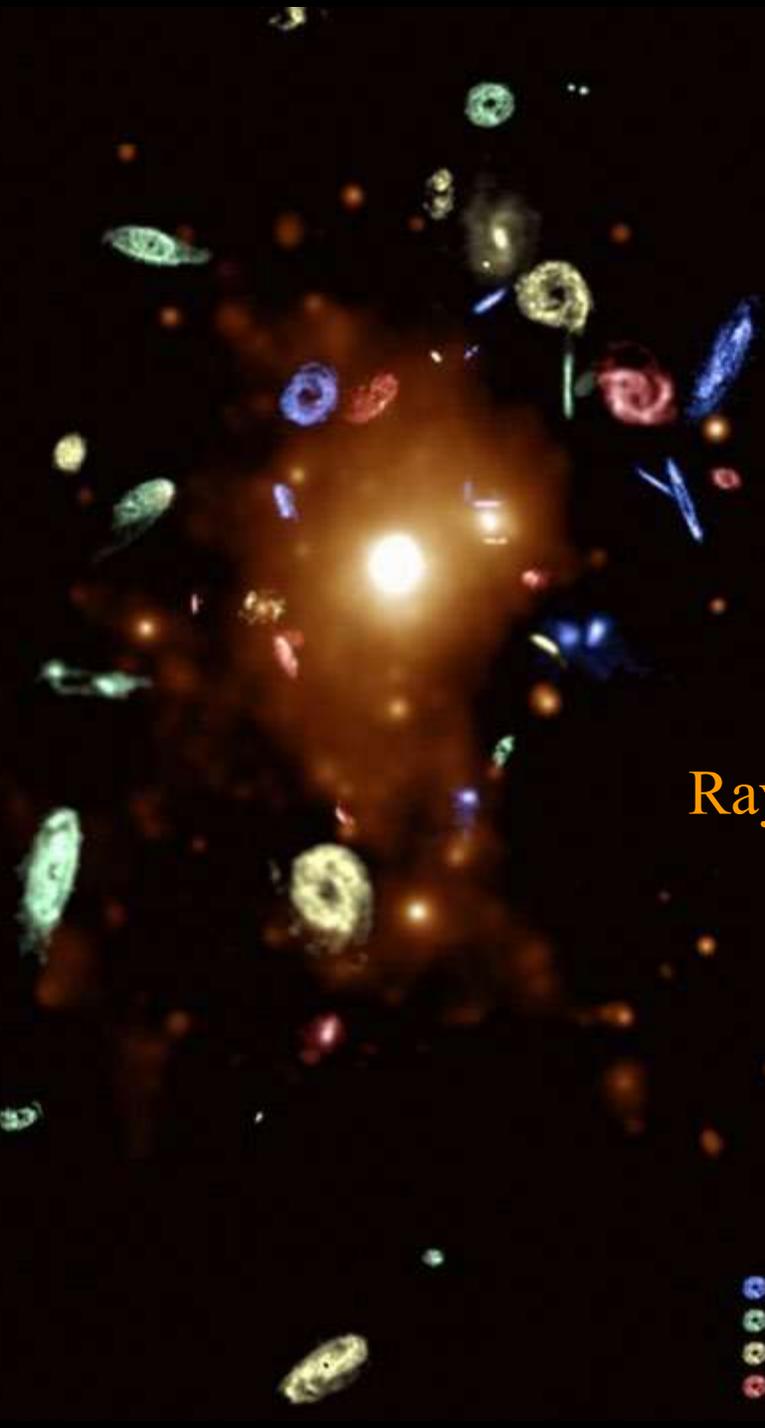
Les cartes des galaxies HI sont agrandies d'un facteur 10 pour le dessin

Couleurs selon la vitesse

*Chung et al 2009*

VIVA survey  
VLA, HI-21cm

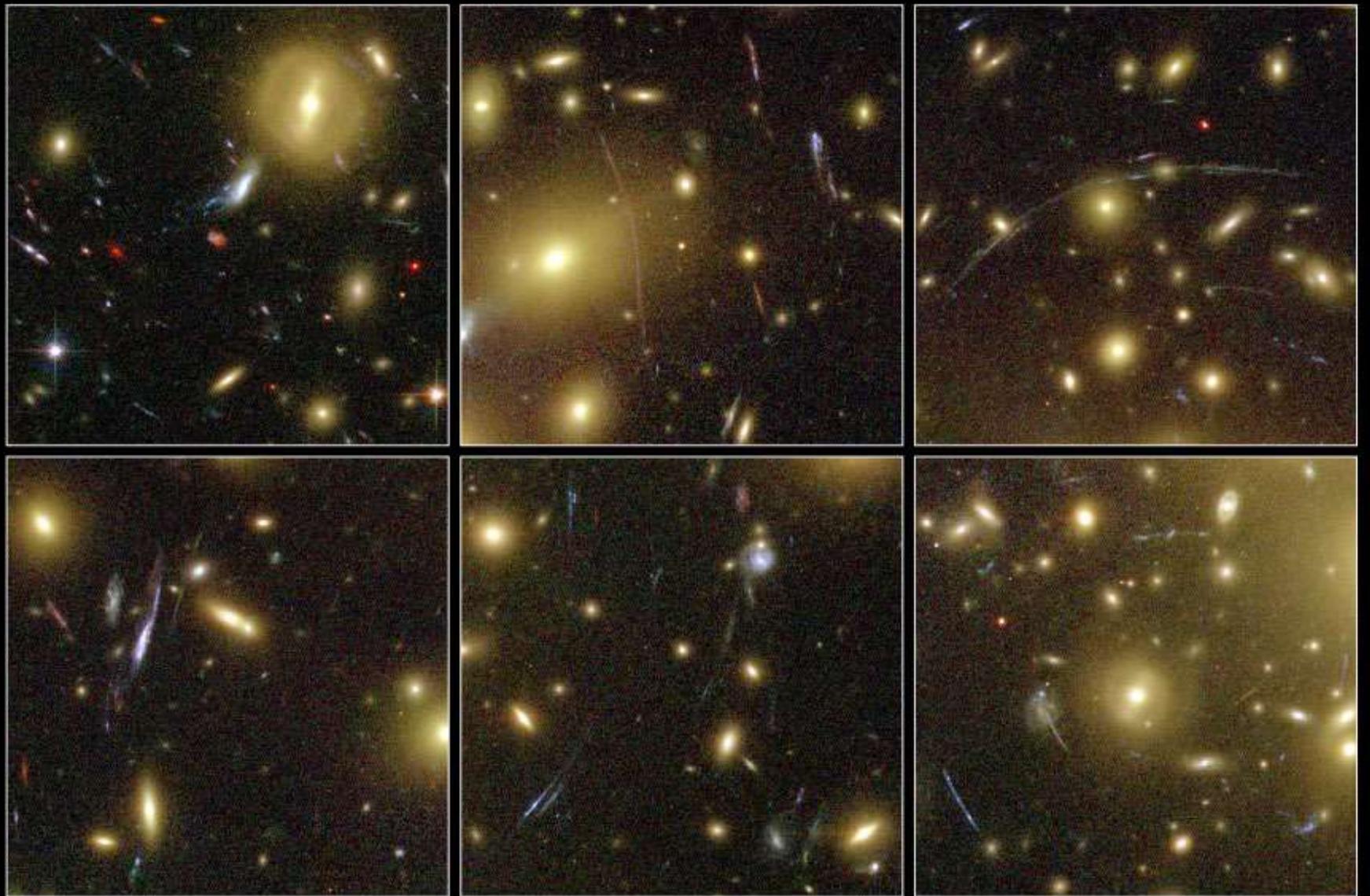
Rayons X

- 
- $v < 500 \text{ km/s}$
  - $600 \text{ km/s} < v < 1300 \text{ km/s}$
  - $1400 \text{ km/s} < v < 2000 \text{ km/s}$
  - $v > 2000 \text{ km/s}$

Masse obtenue  
par les lentilles  
gravitationnelles

Matière noire  
Très concentrée

Profils NFW



**Galaxy Cluster Abell 1689 Details**  
**Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys**

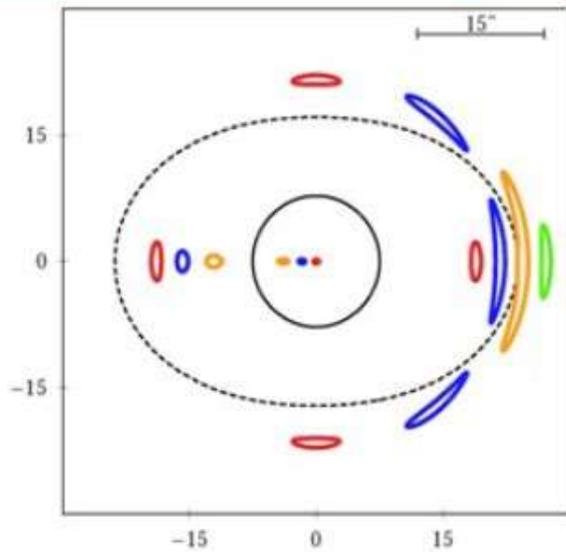
NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA • STScI-PRC03-01b

# Abell 1689 – ligne critique - Caustiques

Ligne critique = magnification infinie

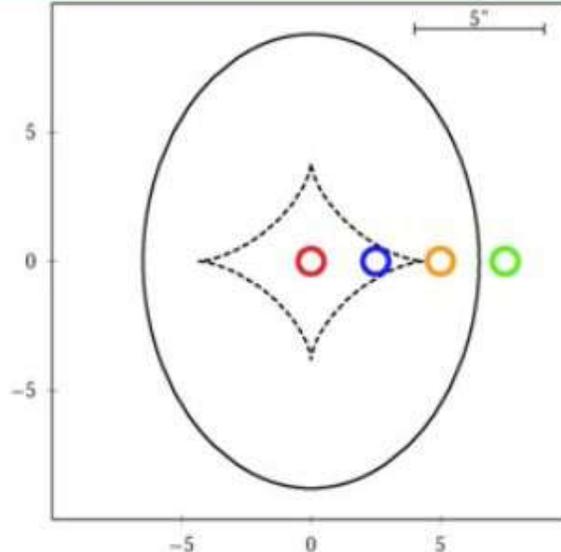
→ Caustique dans le plan source

L'amplification augmente quand on s'approche de la ligne critique



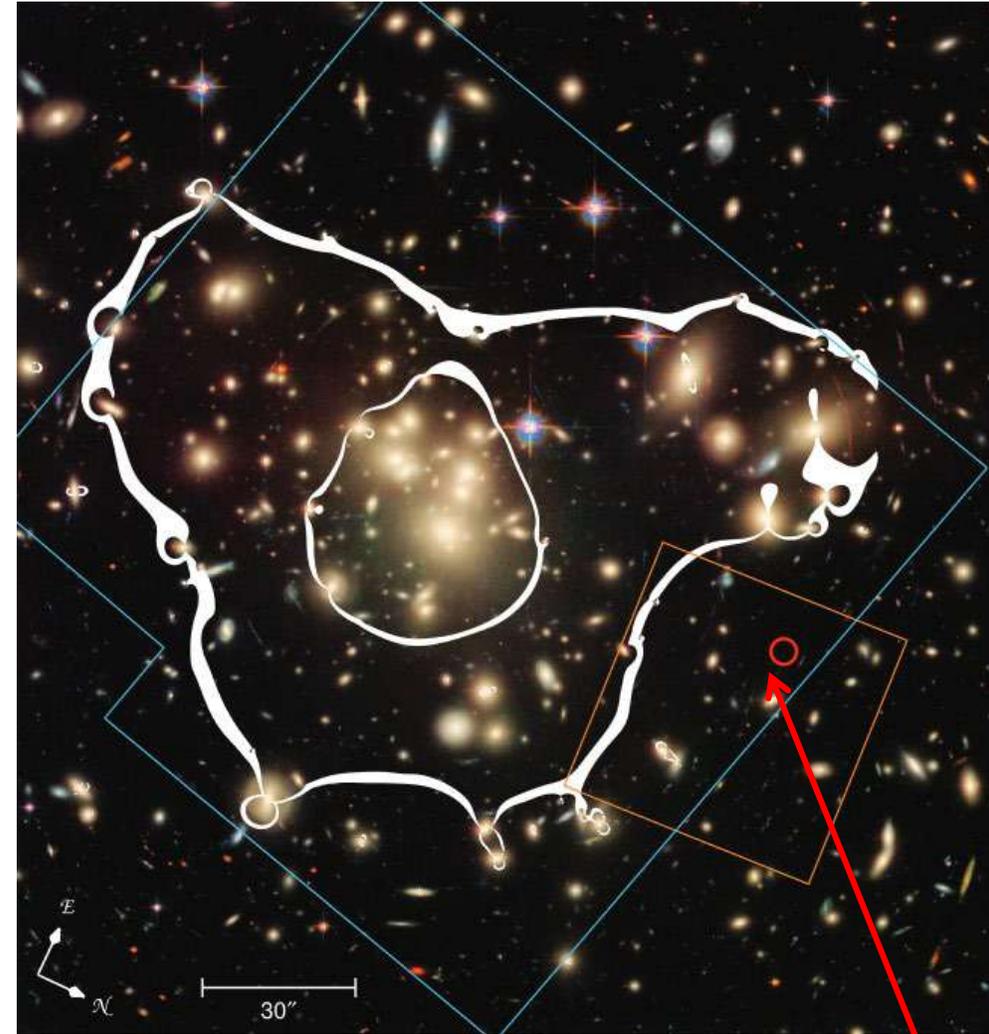
Plan Image

Lignes critiques



Plan source

Caustiques



*L. Bradley et al 2008*

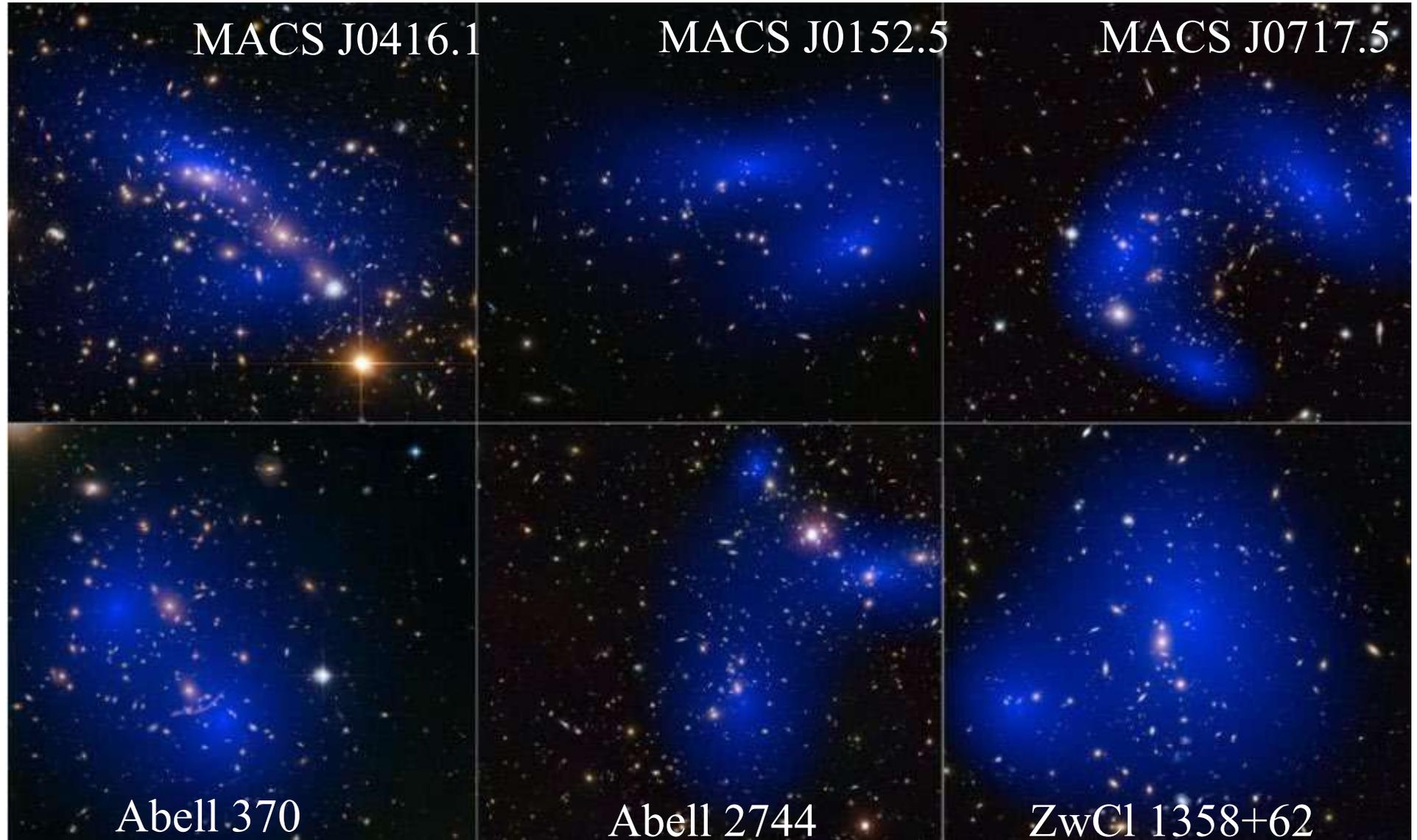
Magnification  
d'un facteur 9

# Cartographie de la matière noire (WL)

Lentilles faibles  
**Cisaillement**

Prend en compte  
les déformations  
statistiques  
de milliers de  
galaxies de fond

→ Permet de faire  
des cartes



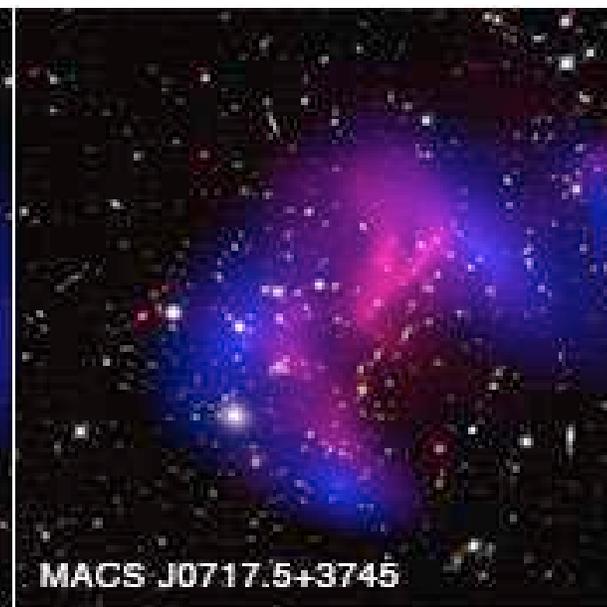
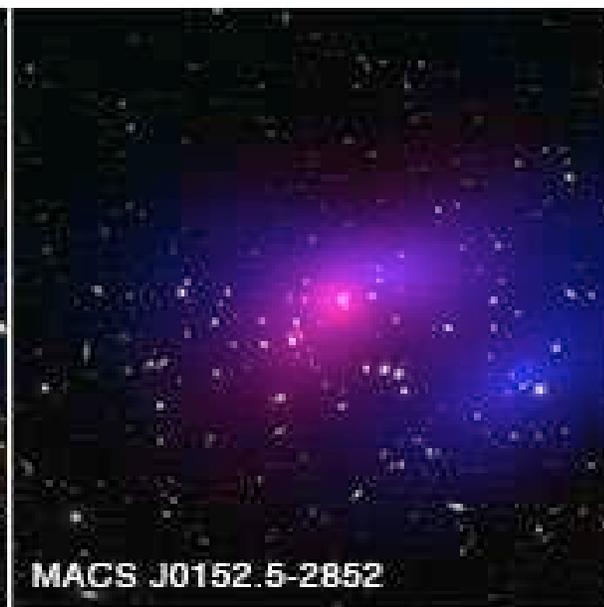
*Massey et al 2015*

# Comparaison avec les rayons X

**Bleu**= Matière totale  
(essentiellement noire)

**Rose**: rayons X

Lorsqu'il existe des  
sous-structures  
les mouvements  
relatifs séparent  
les deux composants  
**Matière noire et  
Gaz chaud (baryons)**



*Massey et al 2015*

Amas de Persée  
D=75 Mpc

BCG



Filaments

H $\alpha$

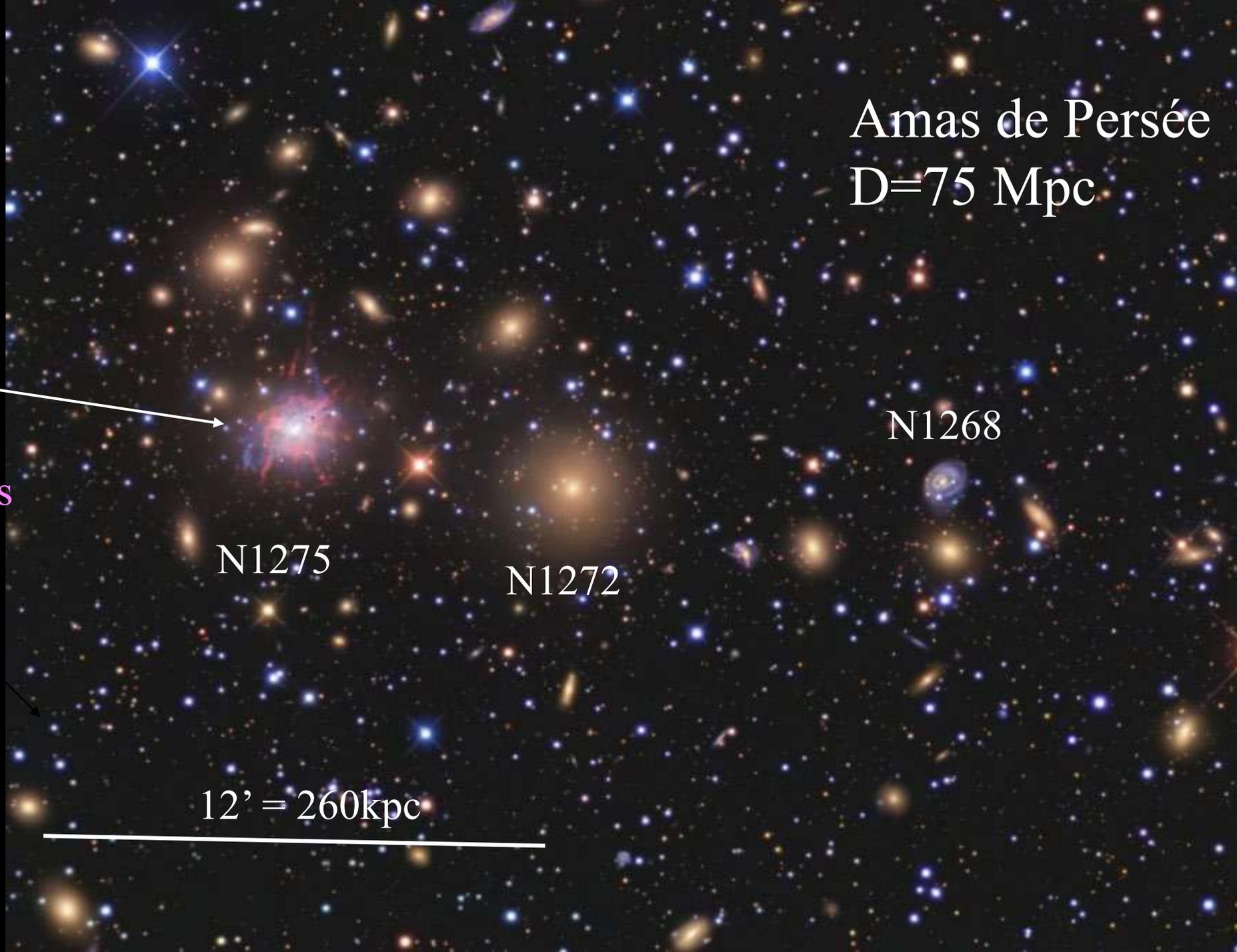


N1275

N1272

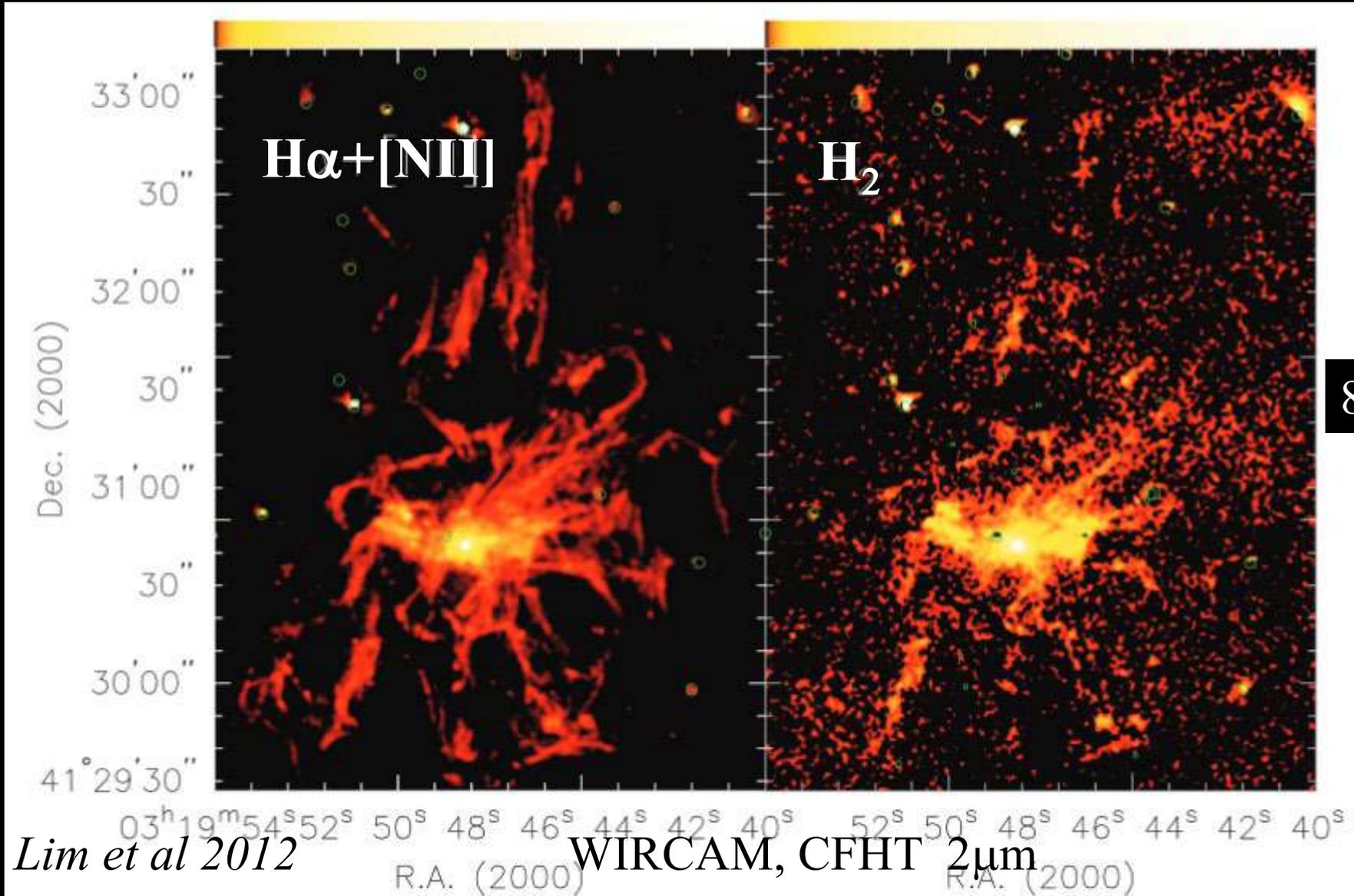
N1268

12' = 260kpc



# H<sub>2</sub> et H $\alpha$ dans les filaments

1-0 S(1) transition ro-vibrationnelle, dans le NIR



*Lim et al 2012*

Flots de  
Refroidissement

Le gaz chaud  
devrait se refroidir  
au centre

Taux en  $n^2$

85kpc

Attendu  $1000M_{\odot}/\text{yr}$

En fait 10 x moins

# Gaz chaud: essentiel des baryons

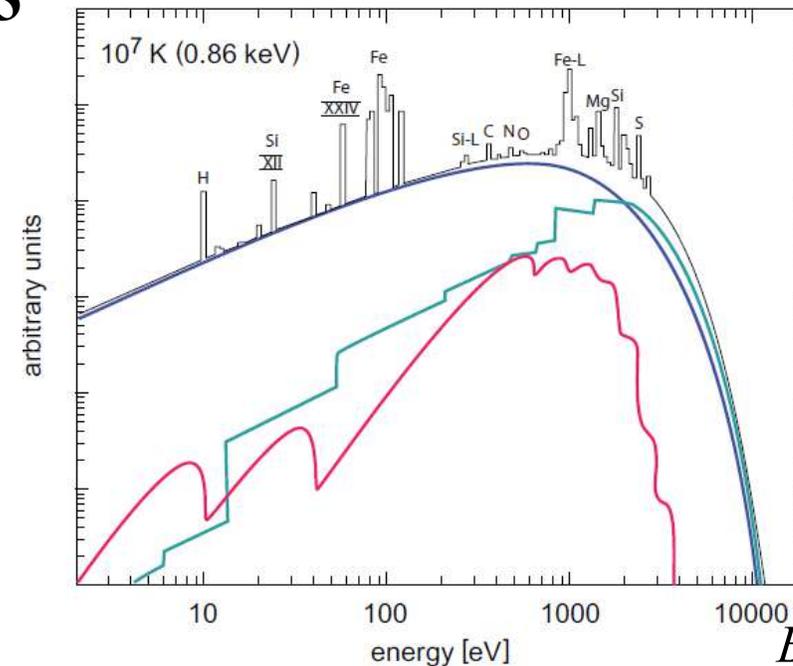
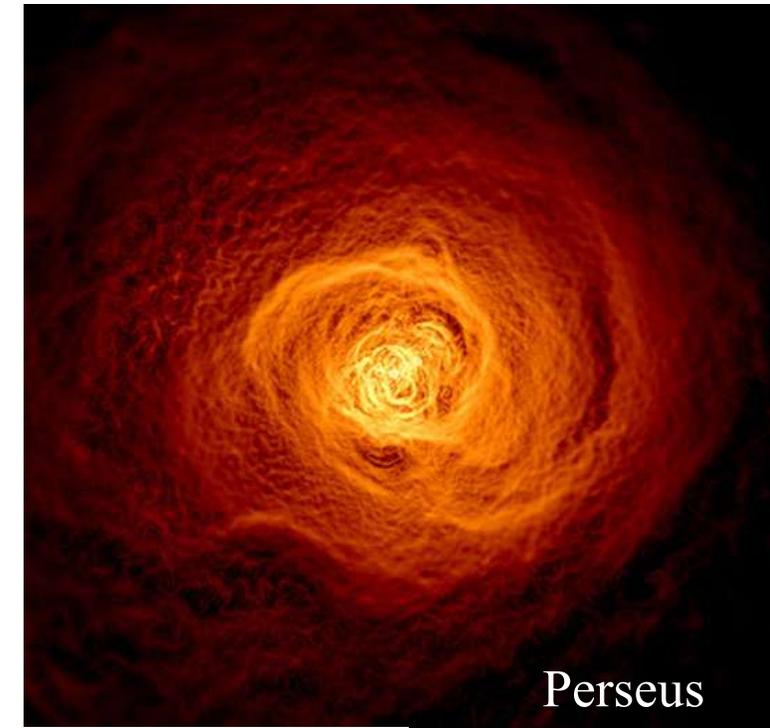
Le gaz chaud contient une part significative des baryons (**dominante** pour les amas les plus riches)

Structure thermique: **trace fossile** de la formation de l'amas  
Énergie non-gravitationnelle, feedback des supernovae, AGN

Spectres de raies en rayons X: abondances  $Z_{\odot}/3$   
Traceur de la matière noire  
(équilibre hydrostatique)

Plus de la moitié sont des systèmes **relaxés, à coeur froid**

Comment le gaz se refroidit, empêché par les phénomènes de feedback?



Free-free  
Recomb.  
2-photons

# Quelques chiffres

Températures  $T=1-10\text{keV}$  soit  $10^7-10^8\text{ K}$ ,  $\rightarrow \lambda_D \sim 1\text{km}$  (plasma parfait)

$\lambda_D$  longueur de Debye, écrantage charges positives et négatives

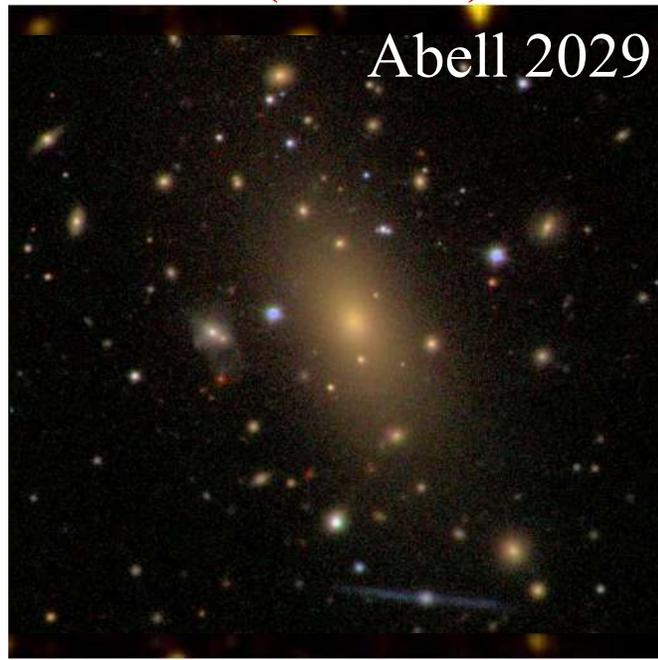
$n \sim 10^{-3} - 10^{-1}\text{cm}^{-3}$   $L_X \sim 10^{-2} - 10^{-4} L_{\text{opt}}$

Comparer à  $n \sim 10^{-8}\text{cm}^{-3}$  dans l'Univers

$M_{\text{gaz}} \sim 5-10 M_{\text{gal}}$   $B \sim 0.1 - 10\mu\text{G}$

Métallicité  $Z \sim 0.3 Z_{\odot}$ , enrichi par les supernovae

Enorme BCG au centre (IC1101)



La plus grosse  
galaxie centrale!

*Dullo et al 2017*

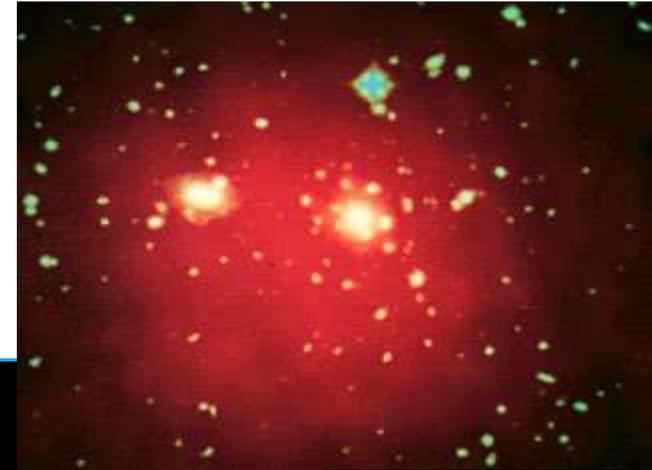
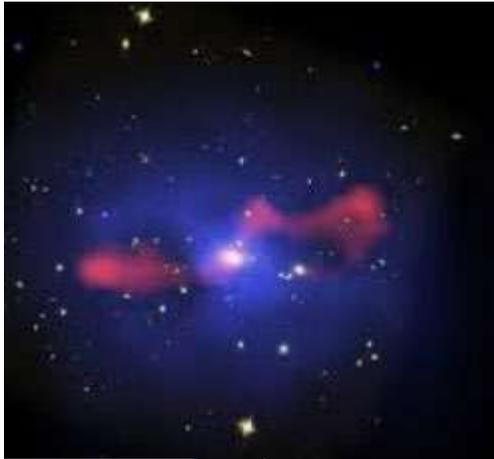
# Cœur froid (relaxé) ou non

Deux catégories d'amas:

(1) Relaxé, à l'équilibre, BCG centrale, le centre se refroidit (2/3)

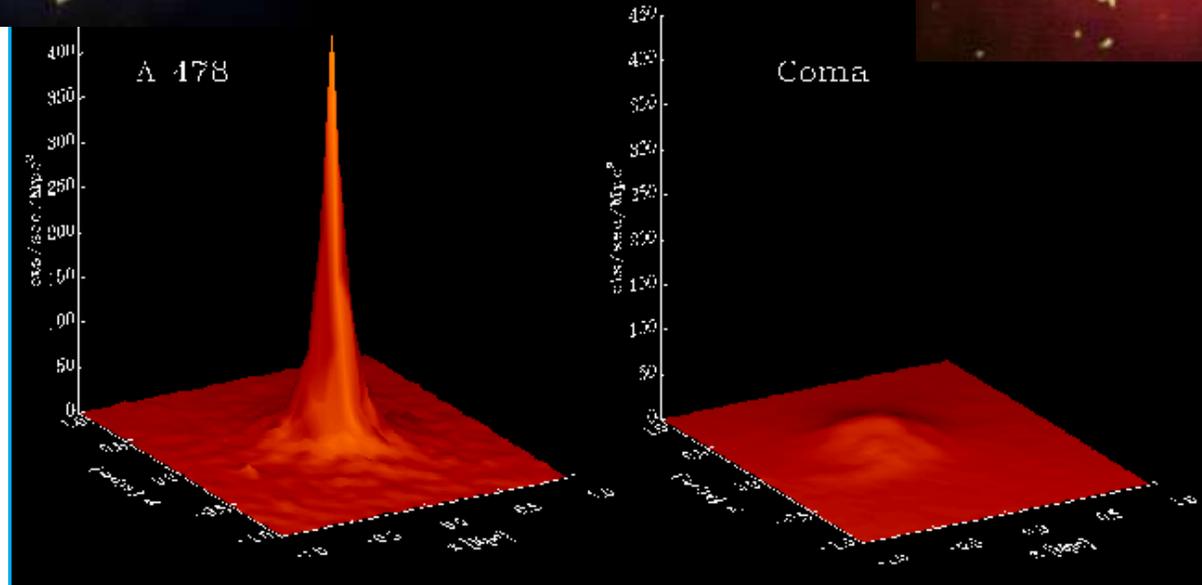
(2) Perturbé, fusion entre deux sous-amas, pas de centre (1/3)

Température  
décroît vers le  
centre



Température  
constante au  
centre

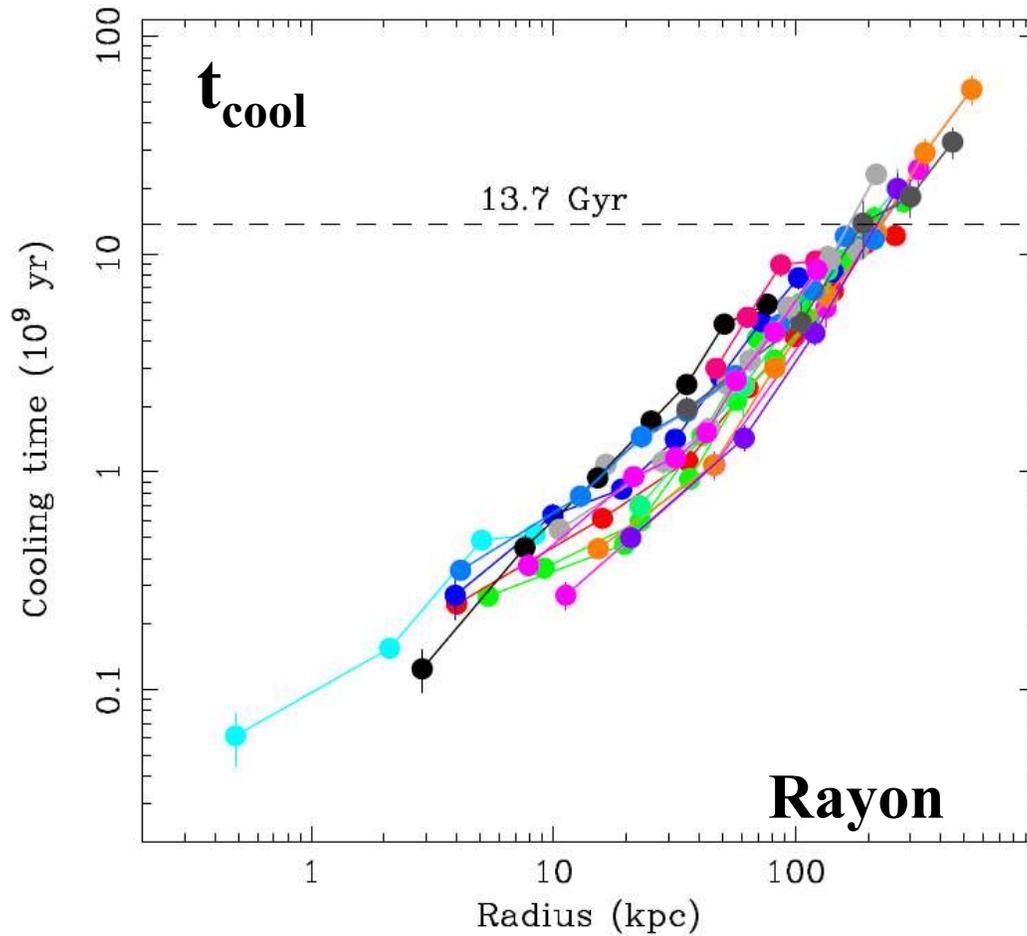
Intensité  
Rayons-X



# Les flots de refroidissement: pourquoi si peu?

Modèle de gaz homogène

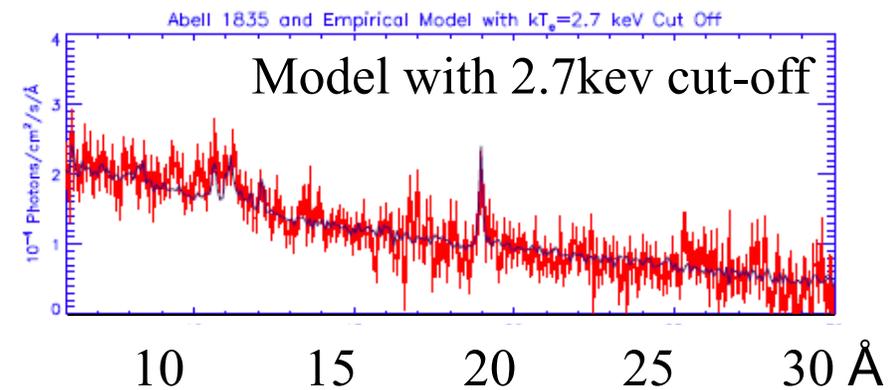
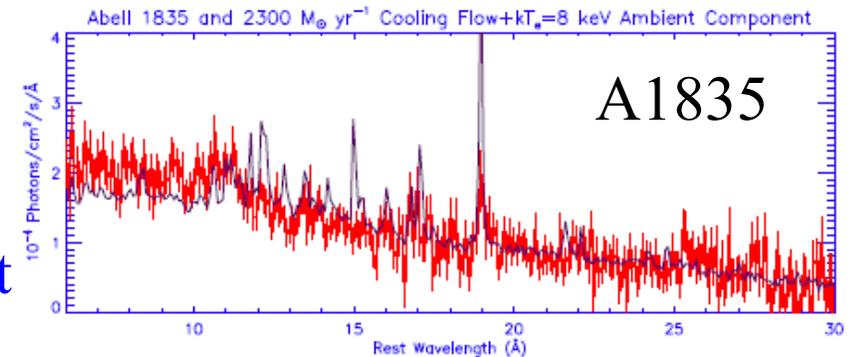
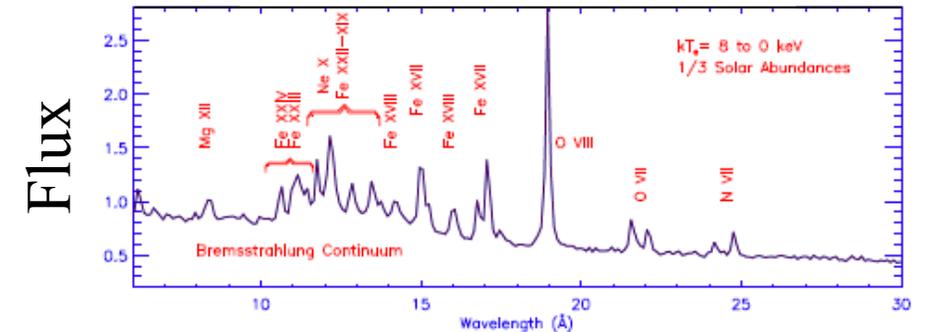
- raies à haute température observées
- mais pas les raies à basse température



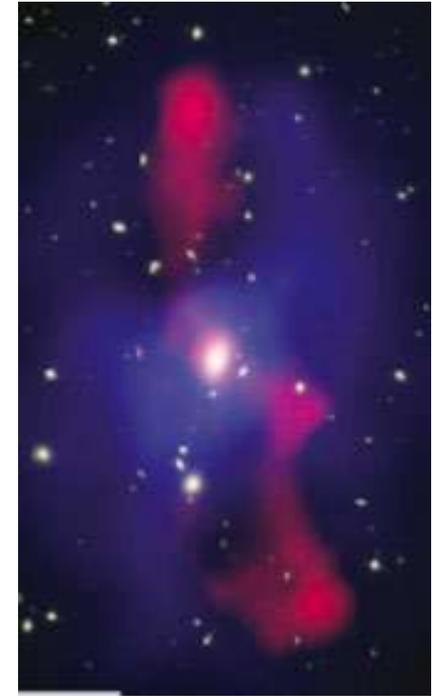
En fait  
Mélange?

Le gaz se refroidit  
sans rayonner

Cooling flow model



# Solutions: effets de feedback de l'AGN central



Le gaz se refroidit jusqu'à  $\sim 1/2-1/3$  de  $T$  externe ( $\sim 2$  keV)

La quantité de gaz qui peut se refroidir bien plus bas n'est que de  $\lesssim 10\%$  du flux de gaz qui se refroidit à haute  $T$

→ Après correction de ce **facteur 10**, le gaz froid et la formation d'étoiles attendus correspondent aux observations

Maximum  $1000 M_{\odot}/\text{an} \rightarrow 100 M_{\odot}/\text{an}!$

**Source de chaleur pour réchauffer 90% du gaz:**

La conduction, mais souvent supprimée par le champ B

Marche mieux pour le gaz le plus chaud  $Q \propto T^{7/2}$

comment réchauffer le gaz plus froid? Supernovae?

→ **AGN et sources radio**

XMM ne voit pas les raies de gaz  $< 10^6\text{K}$

Les cartes Chandra montrent que le plasma des jets radio a **déplacé** le gaz chaud (existence de cavités)

# Amas de Persée: cavités + fronts froids

X-Chandra

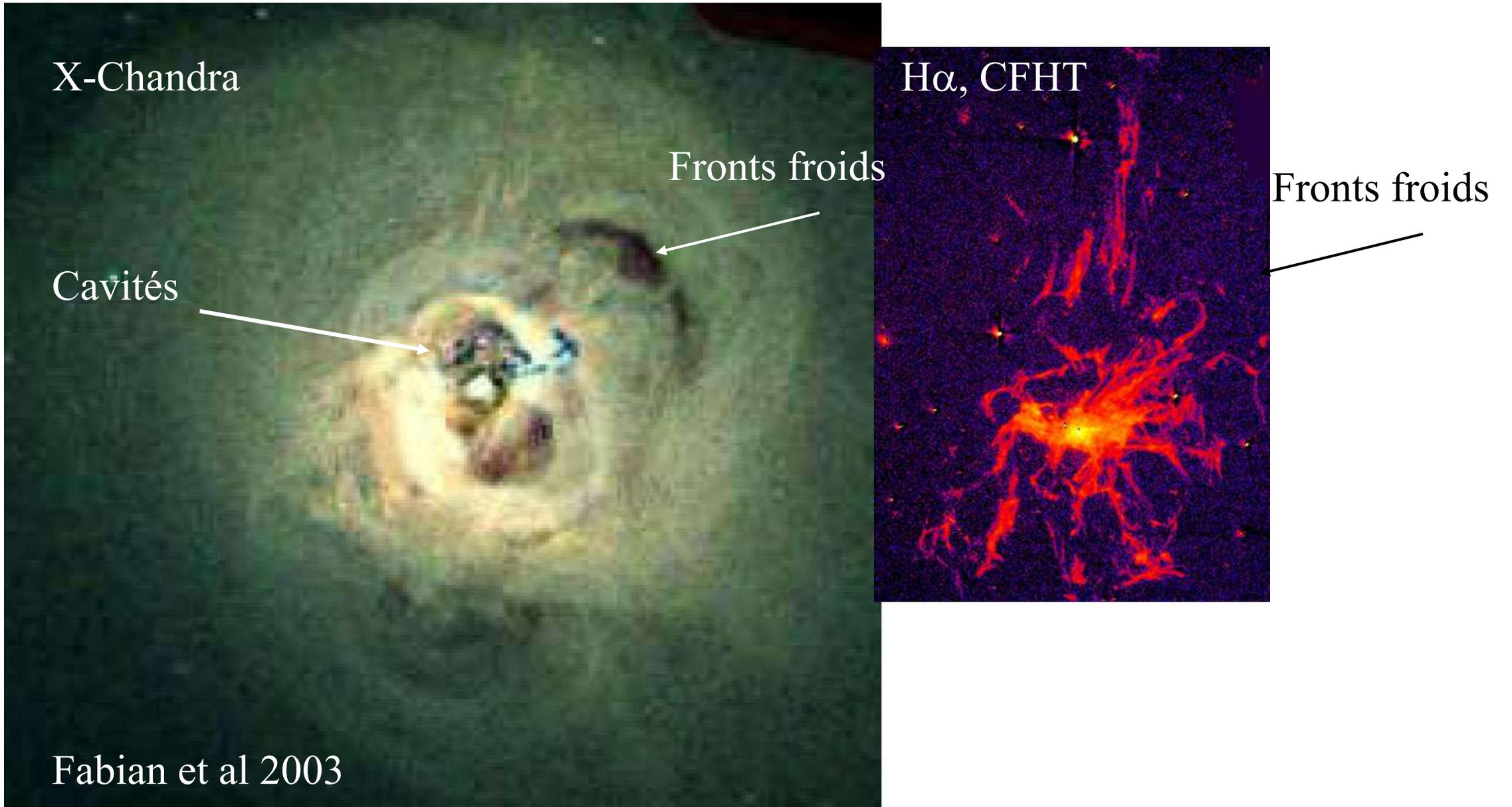
Cavités

Fronts froids

H $\alpha$ , CFHT

Fronts froids

Fabian et al 2003



# Equilibre possible?

- **Région 1**

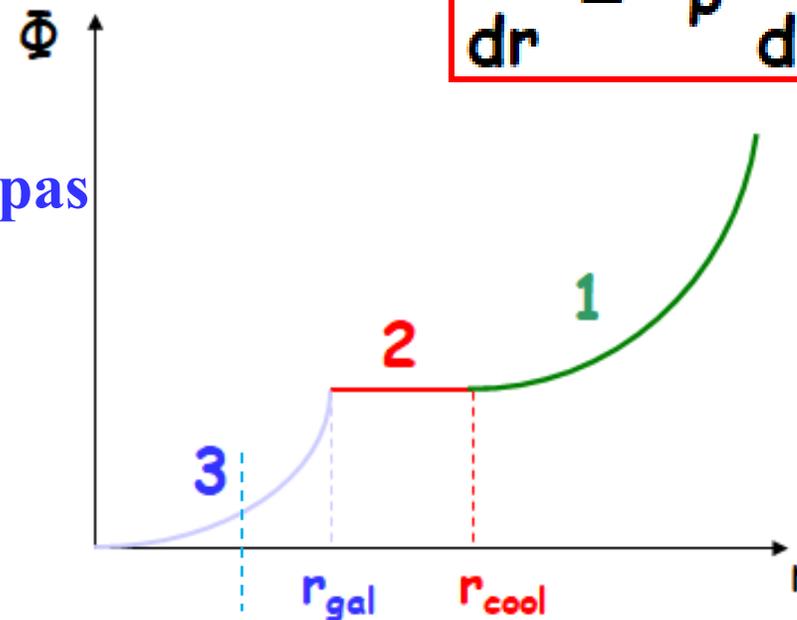
- Equilibre hydrostatique
- Le gaz chaud ne se refroidit pas

- **Région 2**

- $\Delta\Phi/\Delta r$  est faible
- Pertes radiatives compensées par énergie thermique + PV
- $v_s \gg v_{\text{free fall}}$
- Le gaz est en quasi-équilibre hydrostatique

- **Région 3**

- $\Delta\Phi/\Delta r$  fort
- Energie gravitationnelle compense les pertes radiatives



$$\frac{dP}{dr} = -\rho \frac{d\Phi}{dr}$$

$$\rho \frac{d}{dt} \left( \frac{5P}{2\rho} \right) = -n^2 \Lambda(T)$$

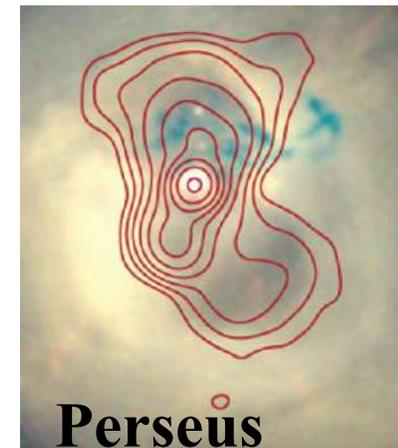
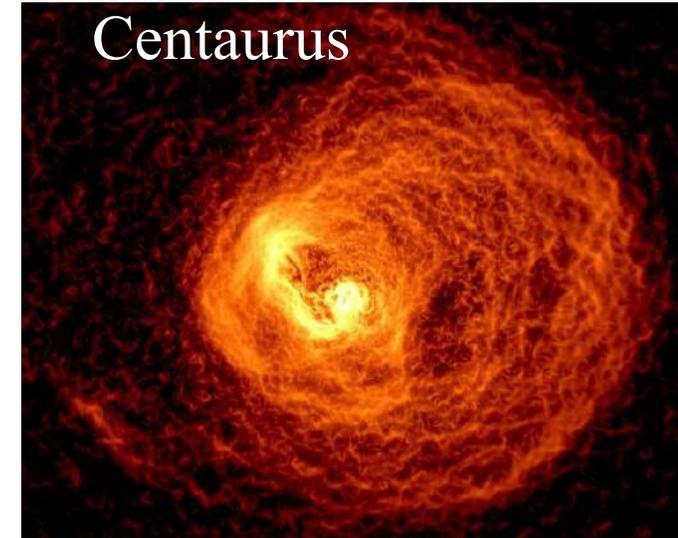
Enthalpie  $H=U+PV=5/2 P/\rho$

# Déséquilibre dynamique: sous-structures, clapotements

- Le gaz dans les coquilles est plus froid
  - Pression dans les coquilles  $\approx$  comme dehors
- Pas de chocs (pas de saut de pression)
- Expansion des bulles  $\lesssim$  vitesse du son
- Pression dans les bulles radio  $\approx$  pression dans les coquilles X

**Pourtant la pression du gaz radio est  $\sim 10$  fois plus faible que la pression des coquilles X!?**

- Y-a-t-il d'autres sources de pression dans les bulles? Champ magnétique?
- Des électrons ou ions relativistes, rayons cosmiques, des chocs, un reste de gaz très chaud?
- → **pression dynamique**



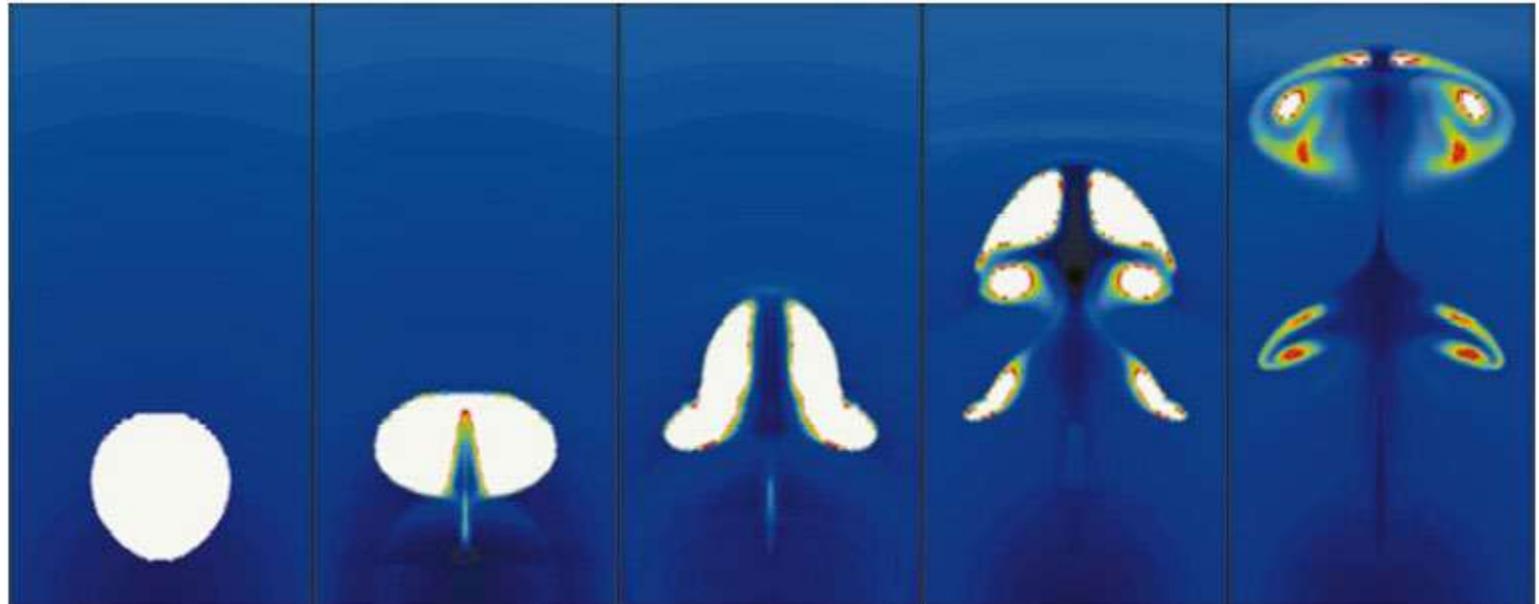
« Sloshing »

# Les radio sources compensent le cooling

Les deux grandeurs sont **comparables**

- Energie totale dans les bulles radio, intégrée sur tous les épisodes de sources radio se répétant dans le temps
- Taux de refroidissement par le rayonnement X

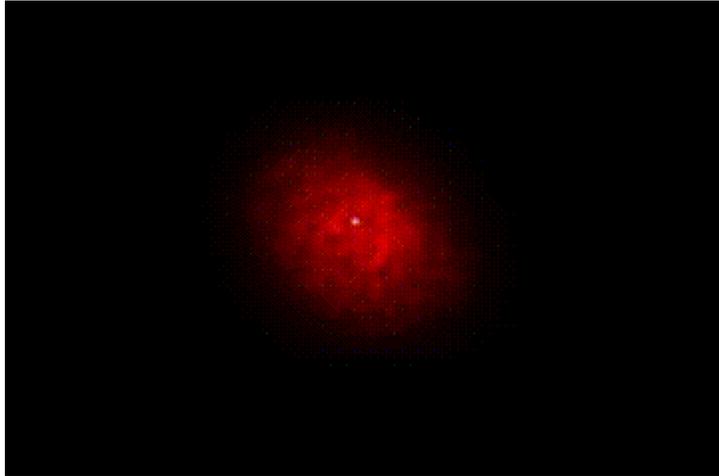
$$L_{\text{cool}} = 5/2 (kT/\mu m) dM/dt$$



Simulation de la montée du plasma radio par la force d'Archimède

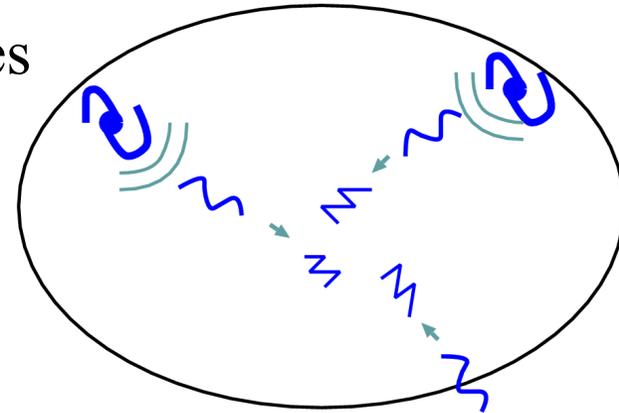
# Tsunamis et ondes sonores

**Peut aussi résoudre une partie du problème du réchauffement**



- Mécanisme

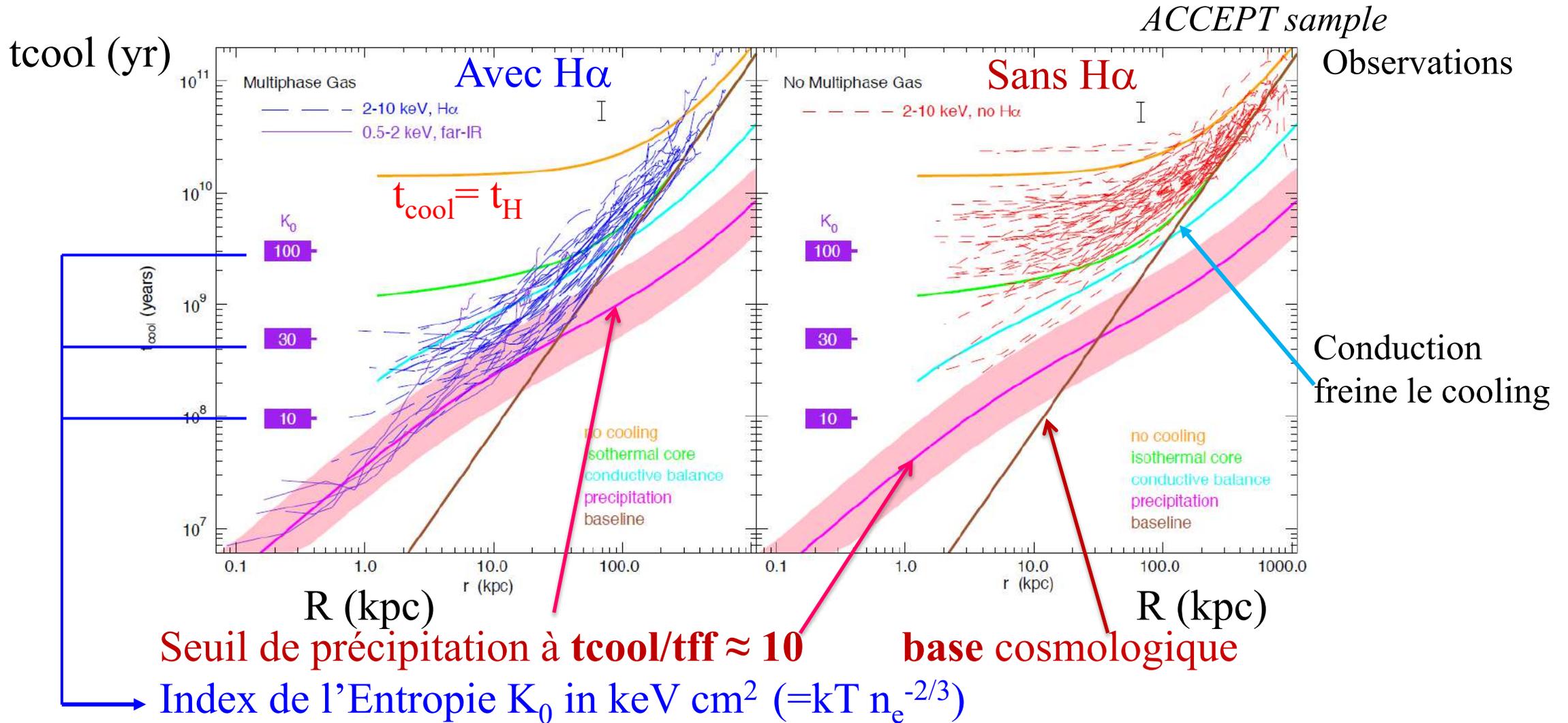
Fusion d'amas, mouvement des galaxies  
→ Turbulence → Ondes sonores  
→ Effet non-linéaire → Chocs faibles  
→ Réchauffe le centre de l'amas



- Analyse analytique, Simulations numériques

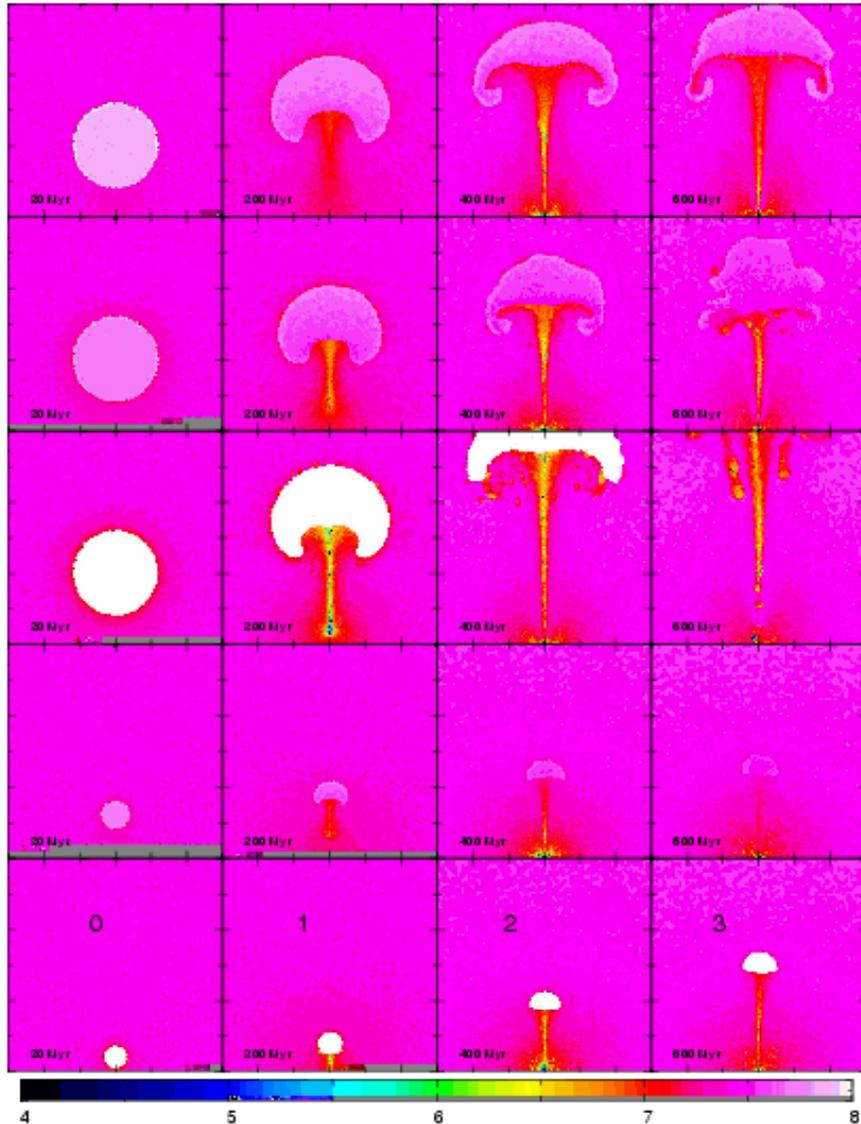
Le mécanisme pourrait effectivement marcher dans les amas, régularisant le refroidissement du gaz

# Processus de refroidissement



➔ **Gaz multiphase refroidit sur 1-20kpc**

# Simulations Numériques

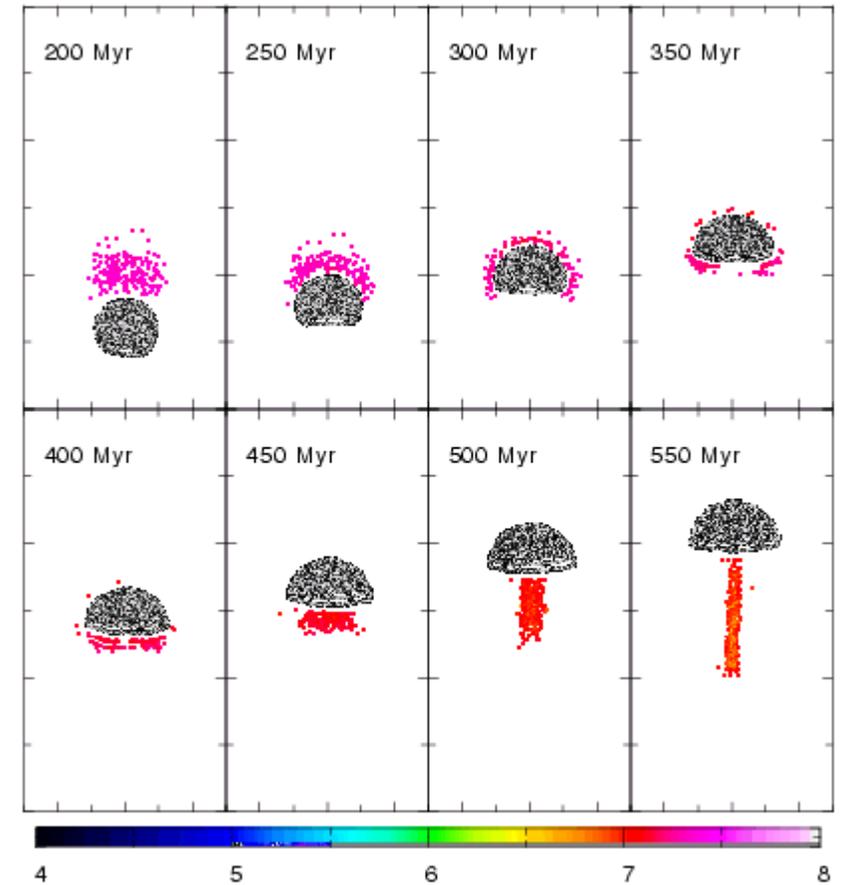


Log Temperature (150kpc)

Le gaz froid tombe en Filaments

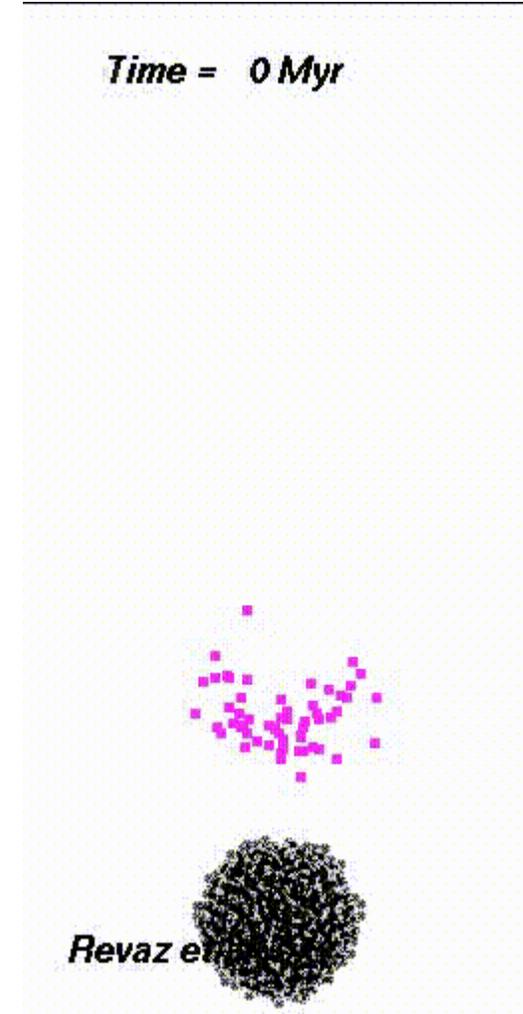
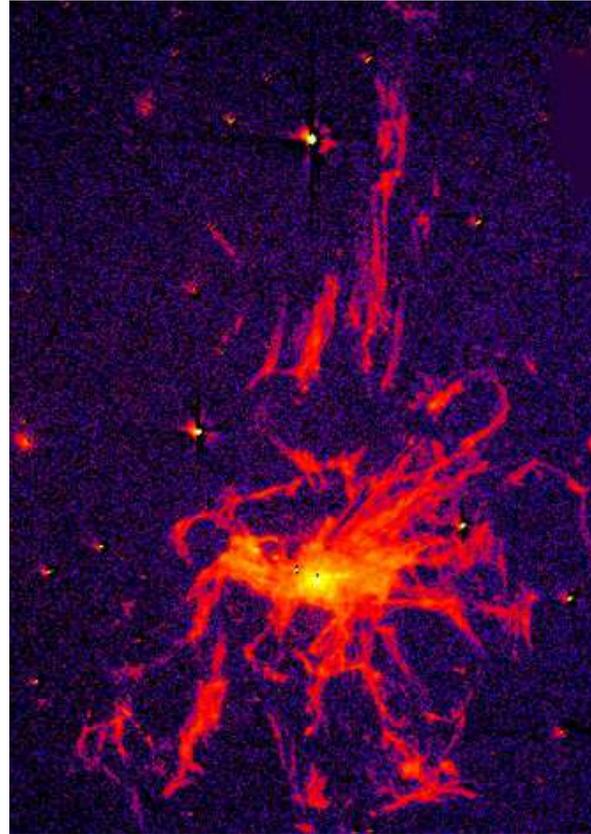
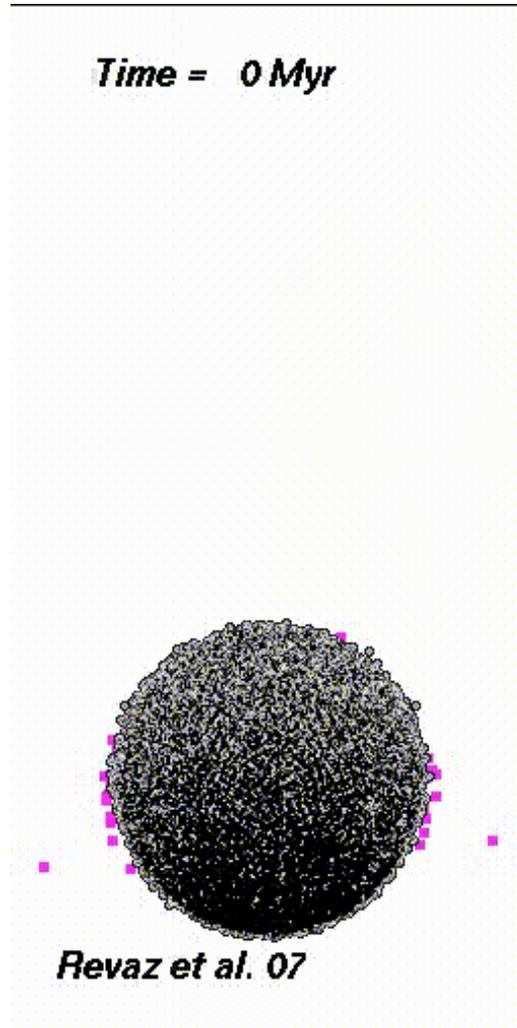
Se découple du gaz chaud  
→ Plus de pression

## Model 5



Log densité (25x50kpc)

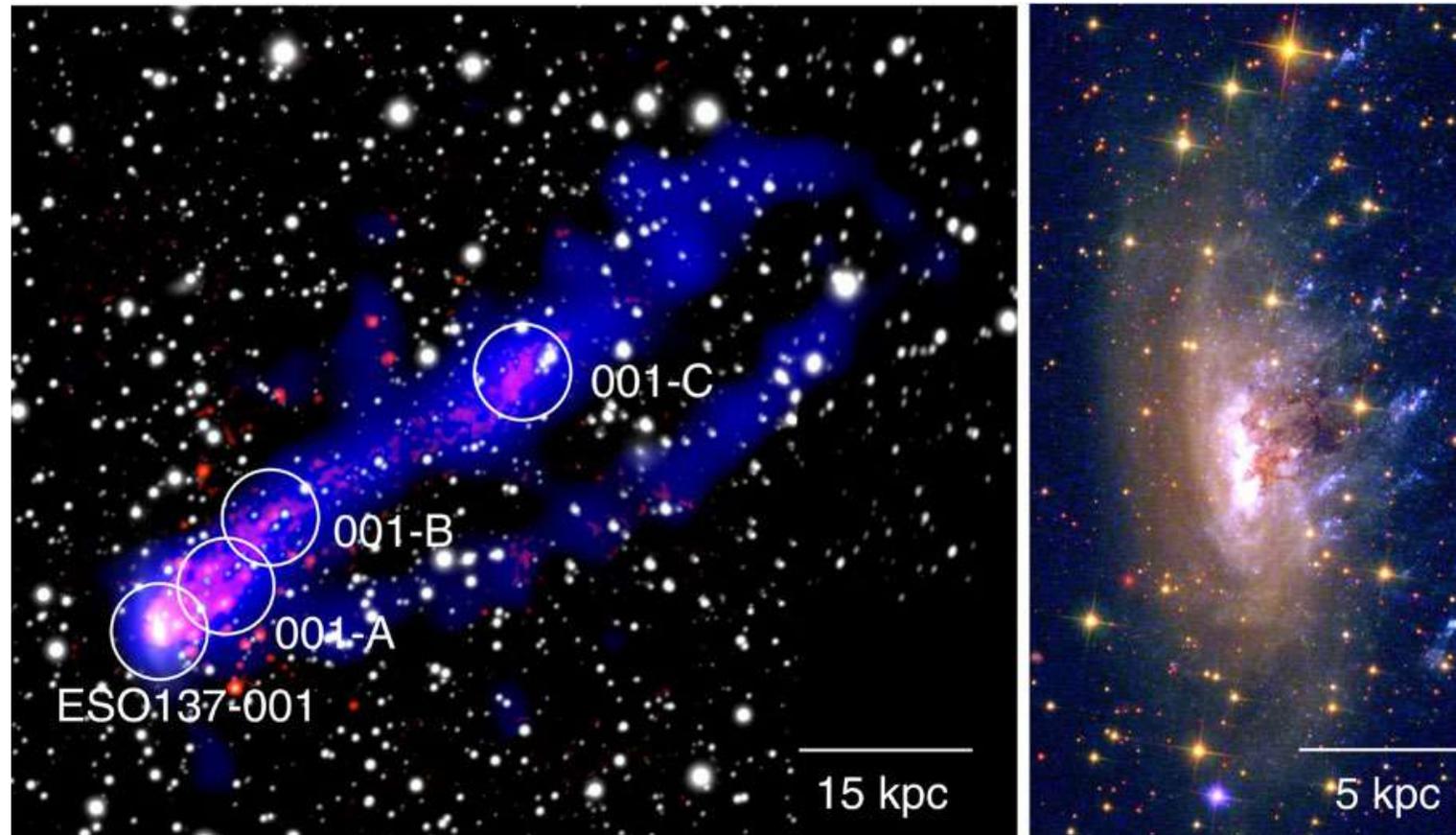
# Processus de formation des filaments



# Impact des amas sur les galaxies

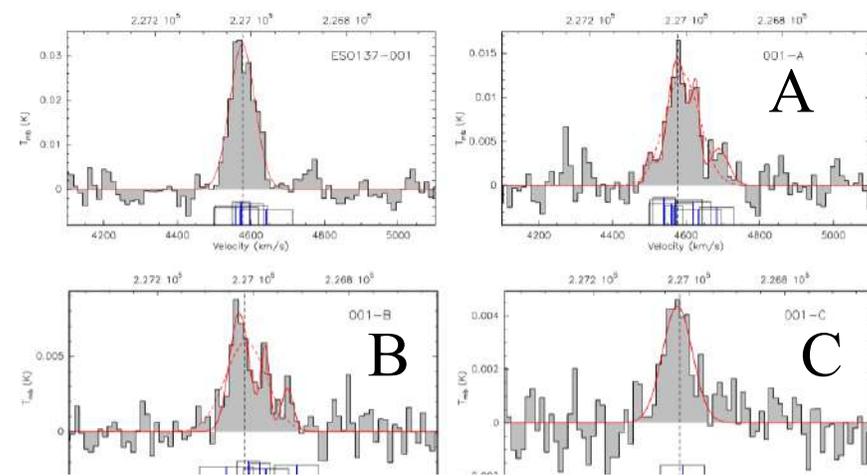
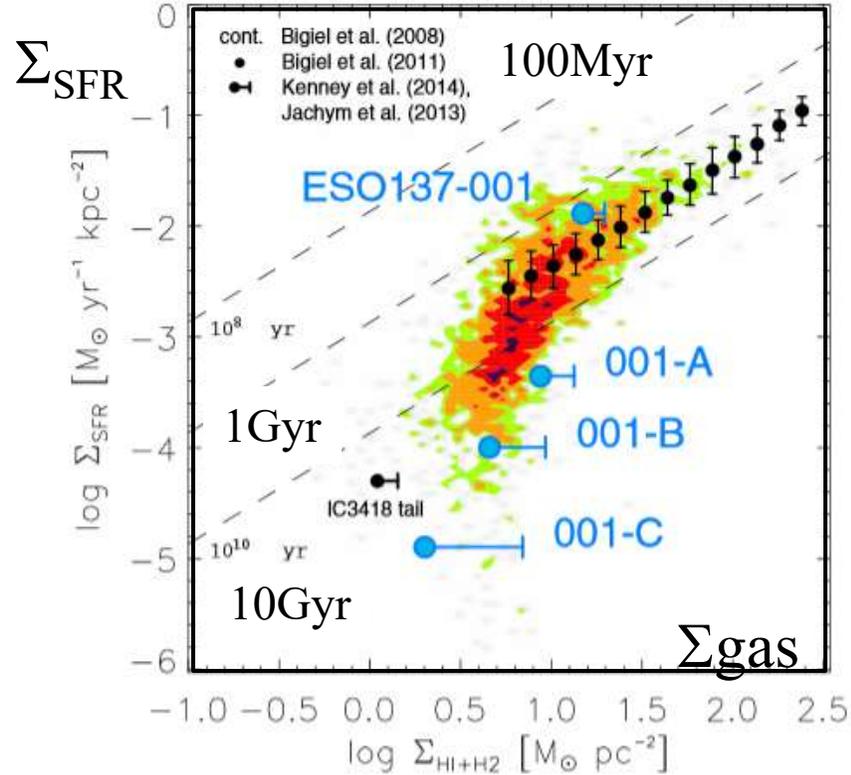
Pression dynamique du gaz chaud dans les amas

Peut-être très rapide et violent: ESO137-001

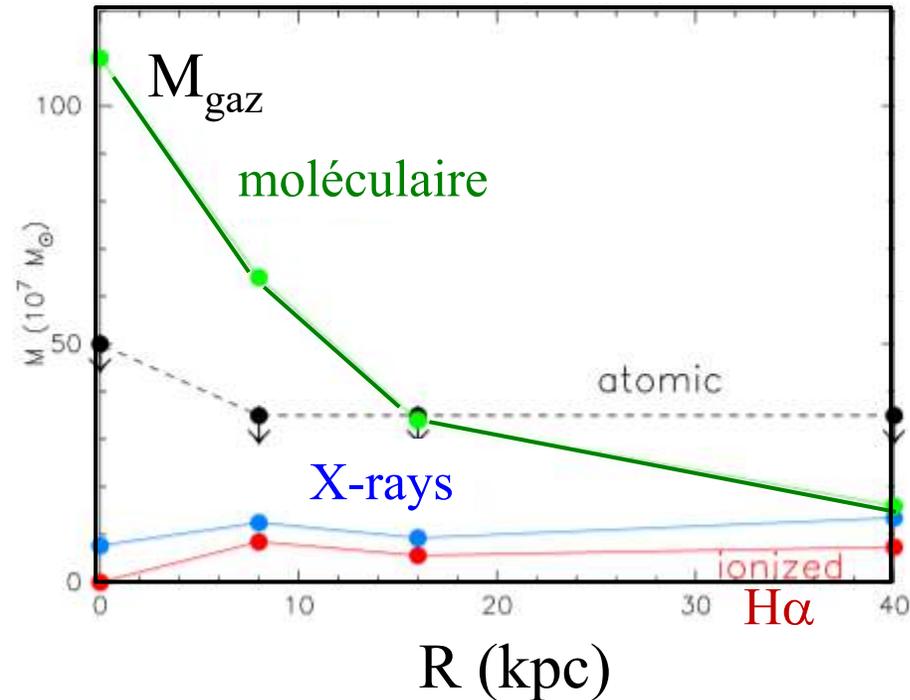


*Jachym et al 2014*

# Formation stellaire et pression dynamique



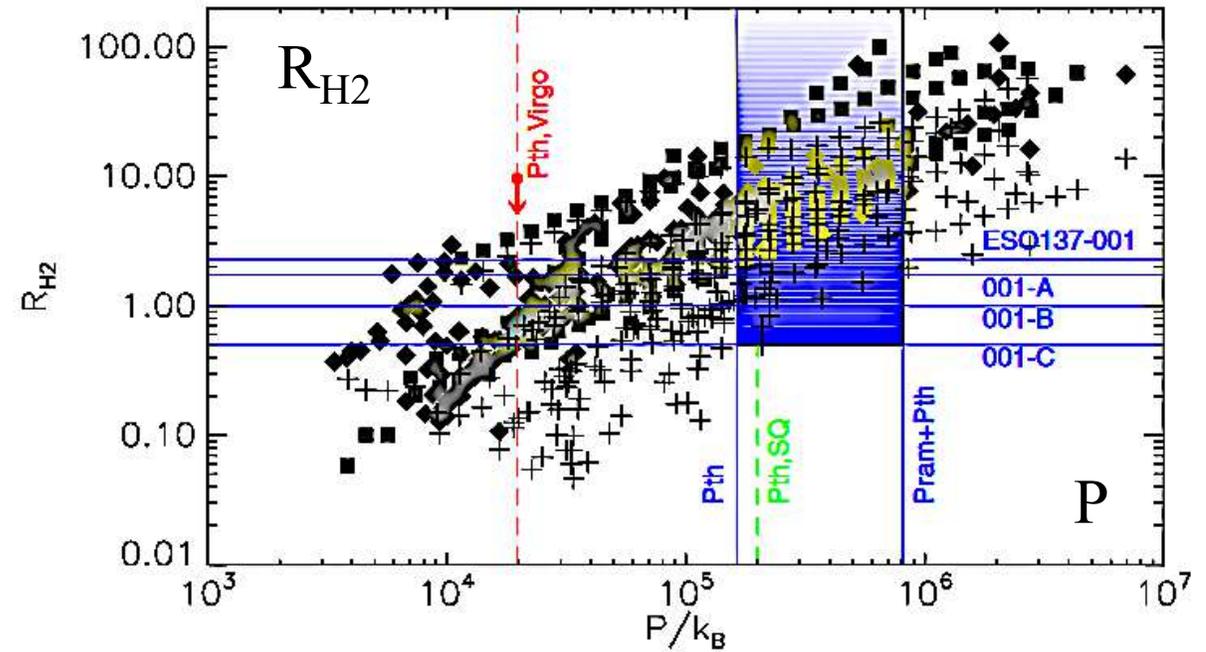
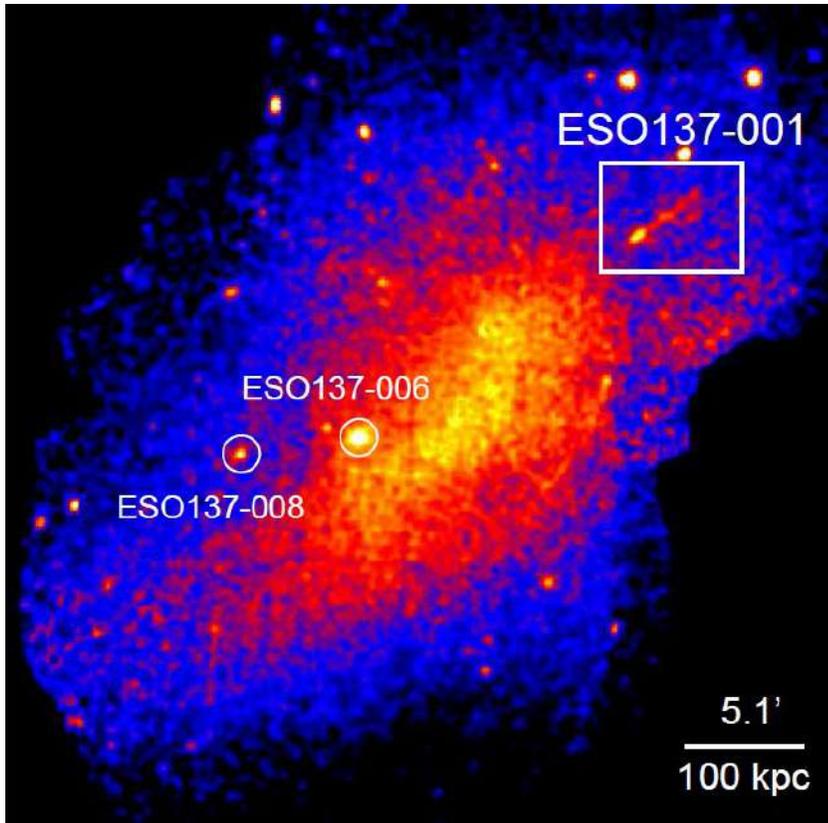
Traînée de 80kpc en rayons-X  
 40kpc en CO  
 $M(\text{H}_2) \text{ en CO} = 1.5 \cdot 10^8 M_{\odot}$



*Jachym et al 2014*

# Amas de Norma: Abell 3627

Limite inférieure  $R_{H_2} = \Sigma_{H_2} / \Sigma_{HI}$   
(HI non détecté)



Pression en  $K.cm^3$

Symboles pleins: data

++ *Krumholz et al 2009*

Rouge: Virgo

Vert: Stephan Quintet

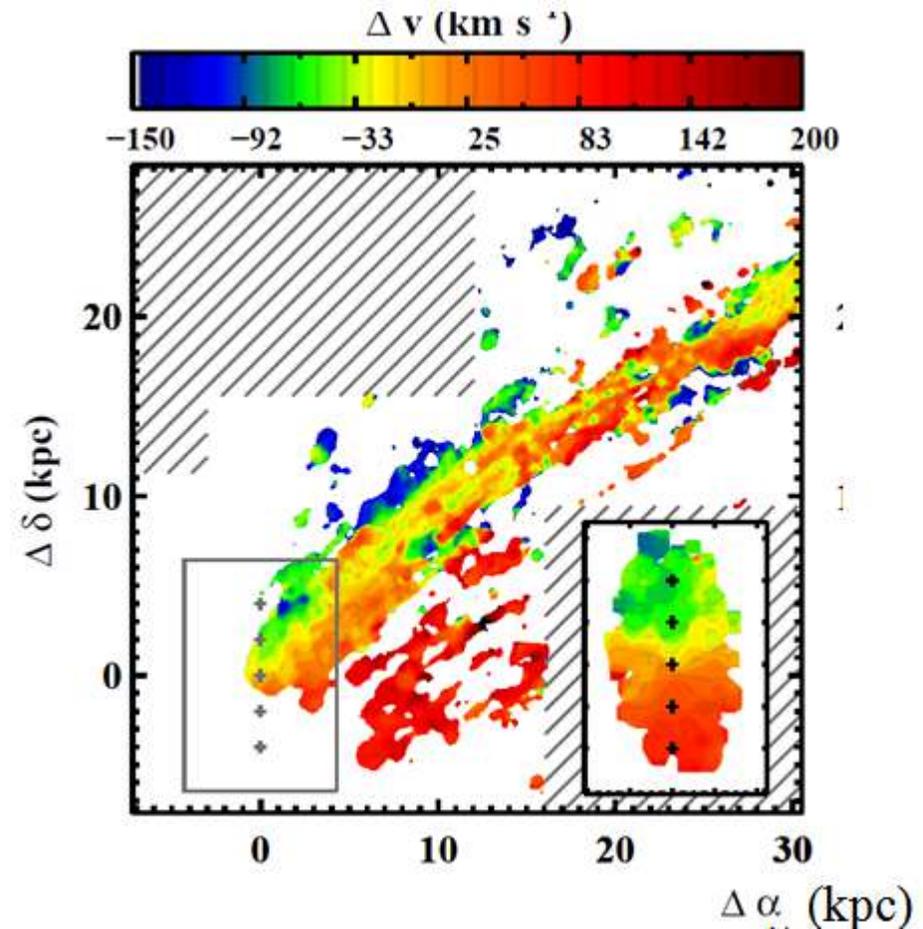
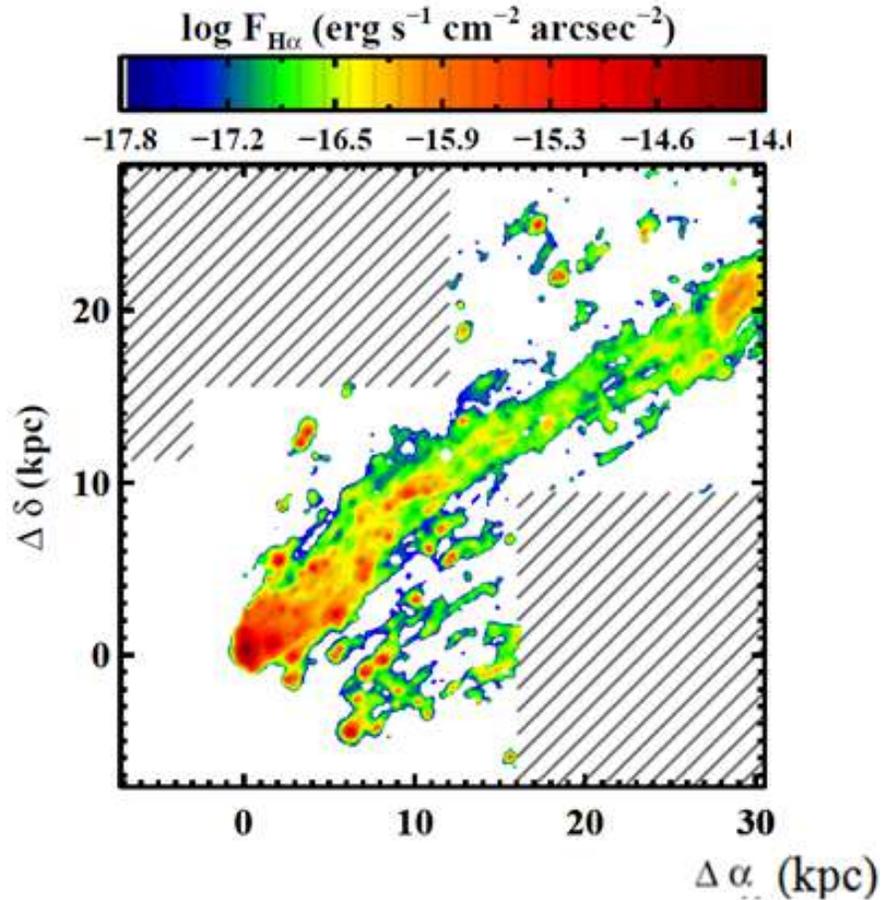
$N_{HI} = 10 M_{\odot}/pc^2$  requis pour abriter  $H_2$

*Jachym et al 2014*

# Etapes: H $\alpha$ avec MUSE (VLT)

Les parties externes balayées en premier: reste le centre

Transition de laminaire à turbulent > 6.5 Myr

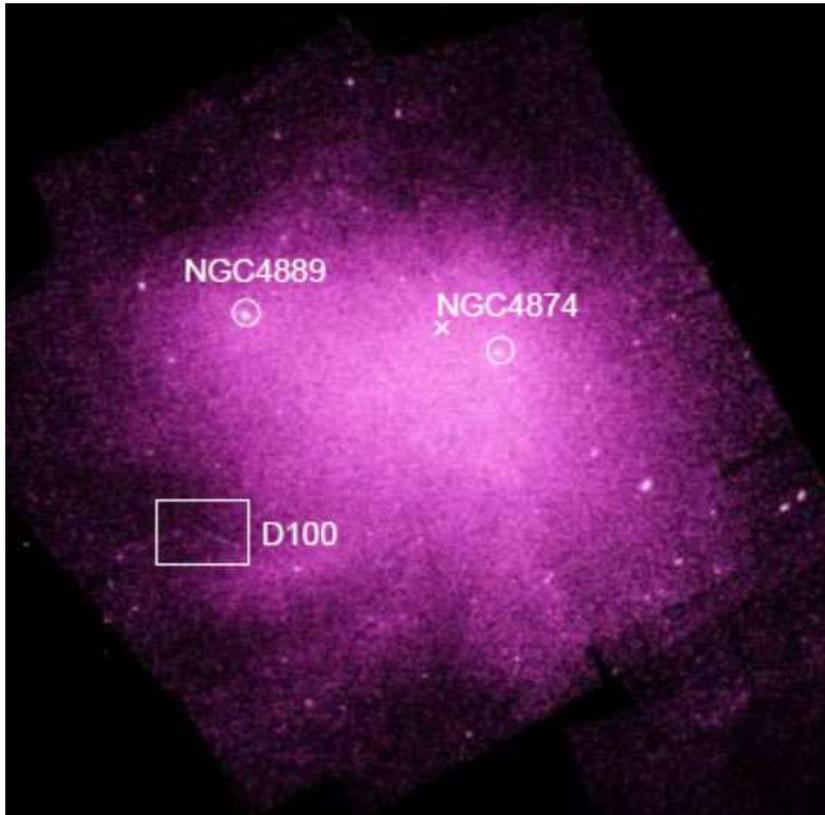


*Fumagalli et al 2014*

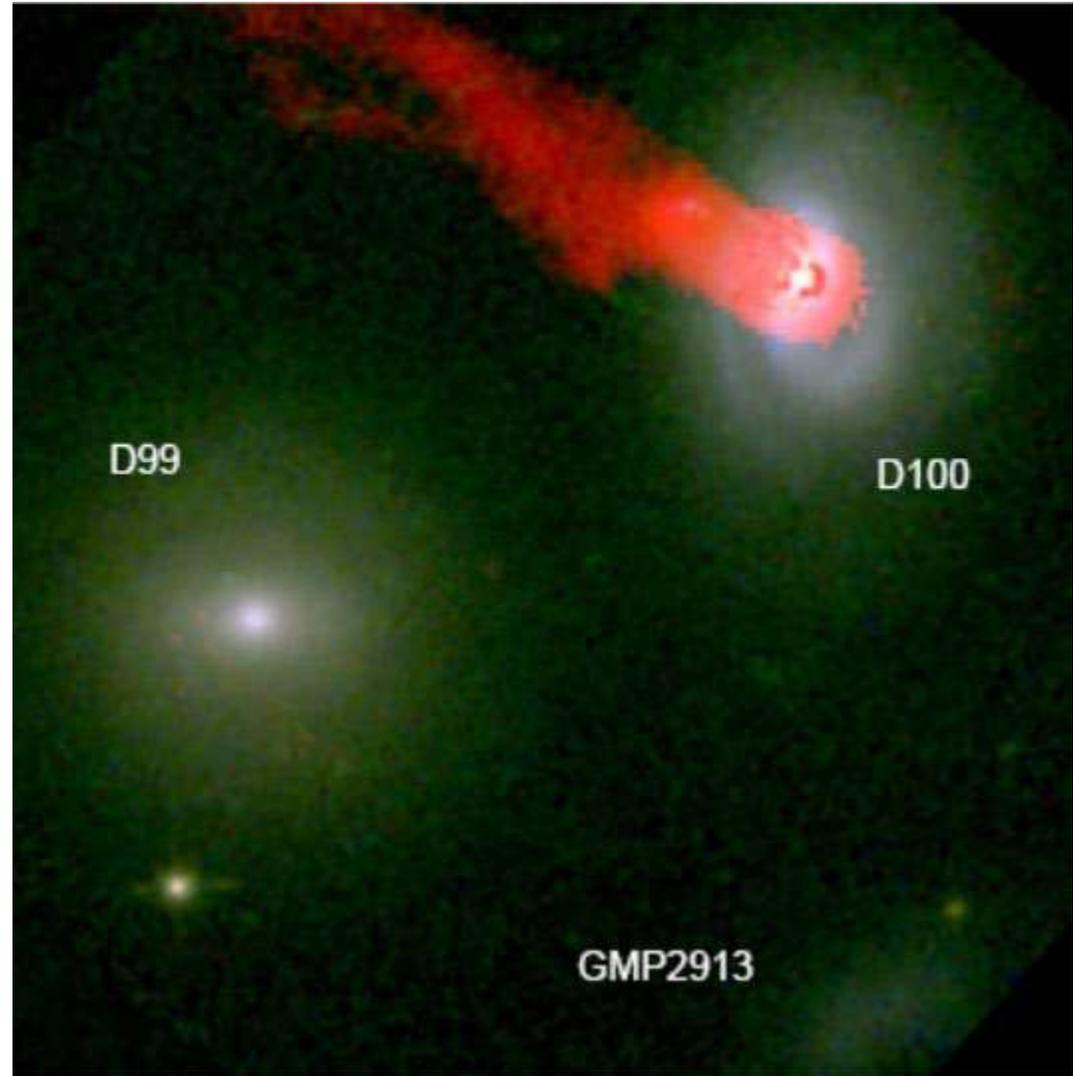
# Pression dynamique dans Coma

HST image+

H $\alpha$  en rouge (*Yagi et al 2007*)



Chandra: traînée en rayons-X



# D100, gaz moléculaire

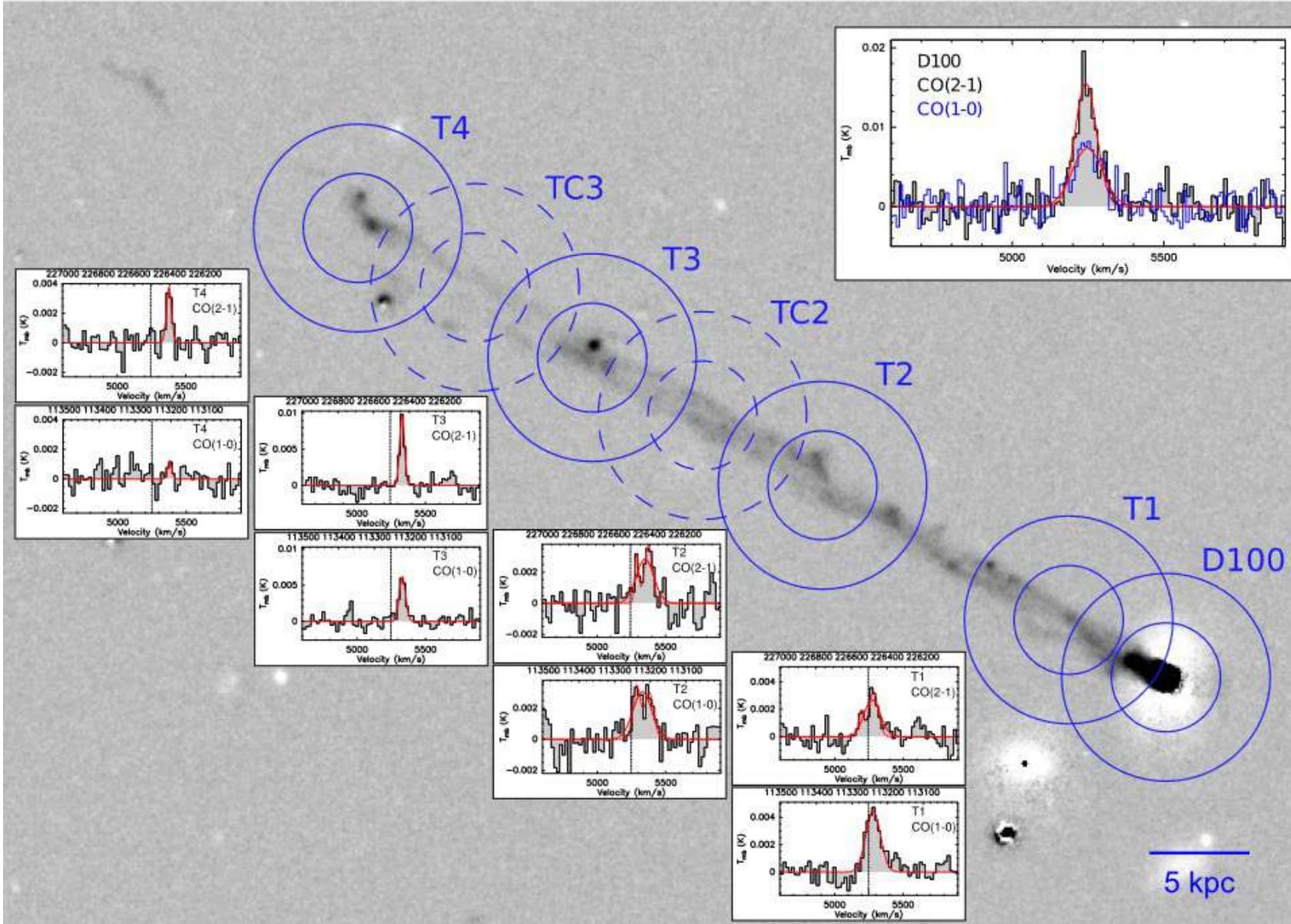
CO 21'' = 9.9kpc,  
11'' = 5.2kpc  
sur H $\alpha$  (Yagi et al 2010)

Jachym et al 2017

Un léger décalage entre  
les vitesses H $\alpha$  et CO

Gaz ionisé balayé en premier,  
Puis le CO, plus dense,  
qui forme des étoiles

→ H $\alpha$  secondaire, retardé

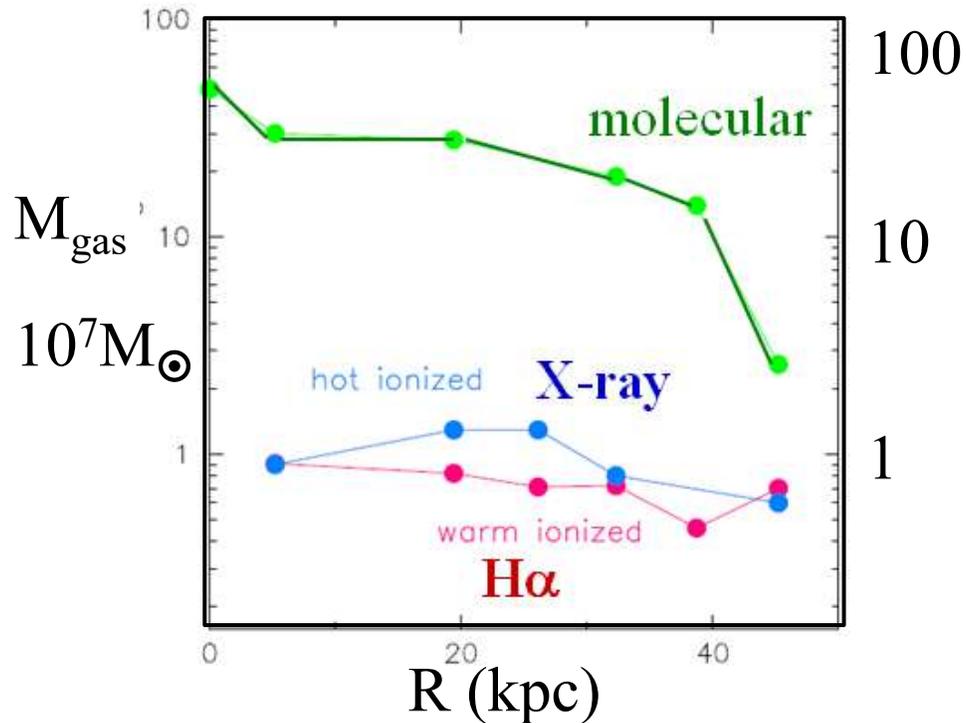


# D100: traînée moléculaire

Vitesses H $\alpha$  décalées

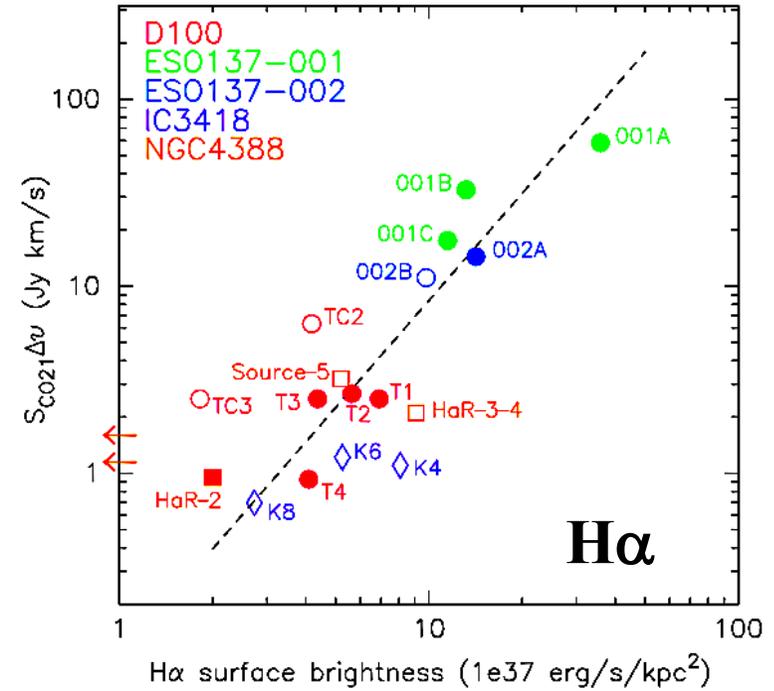
H $\alpha$  trace le gaz balayé

10Myr avant, qui a formé des étoiles



Bonne corrélation CO-H $\alpha$

CO

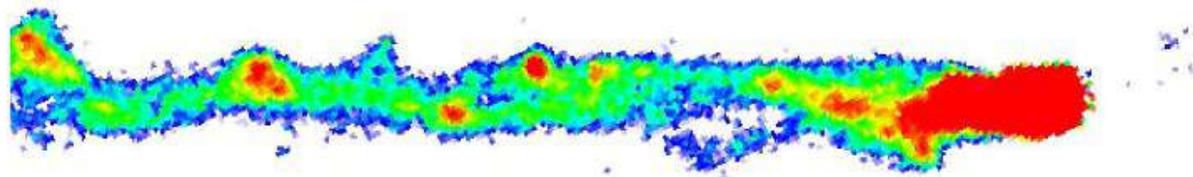


Gaz moléculaire  
Distribution radiale

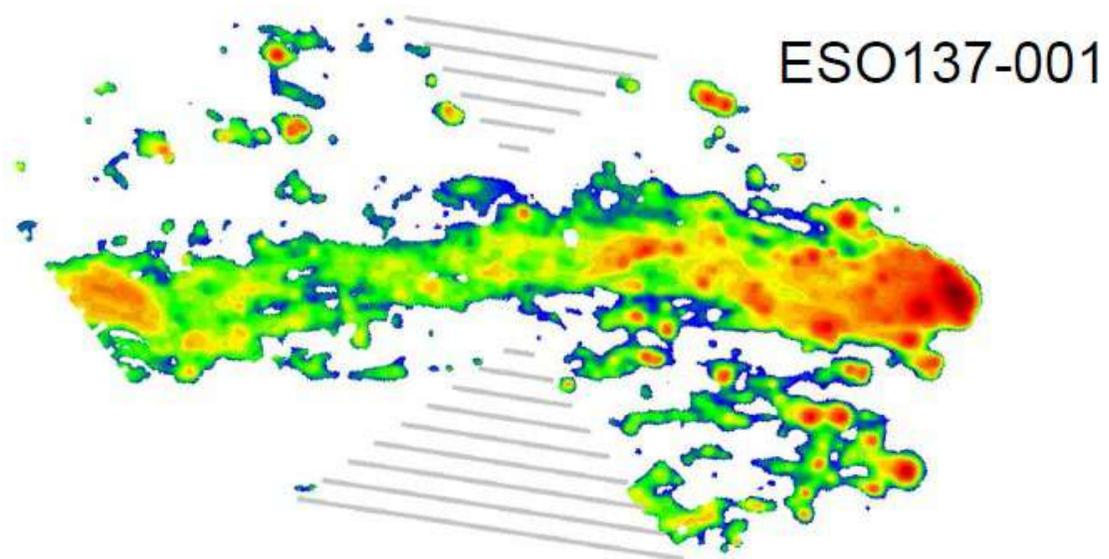
*Jachym et al 2017*

# Comparaison D100 & ESO137-001

Largeur de la traînée décroît avec le temps?



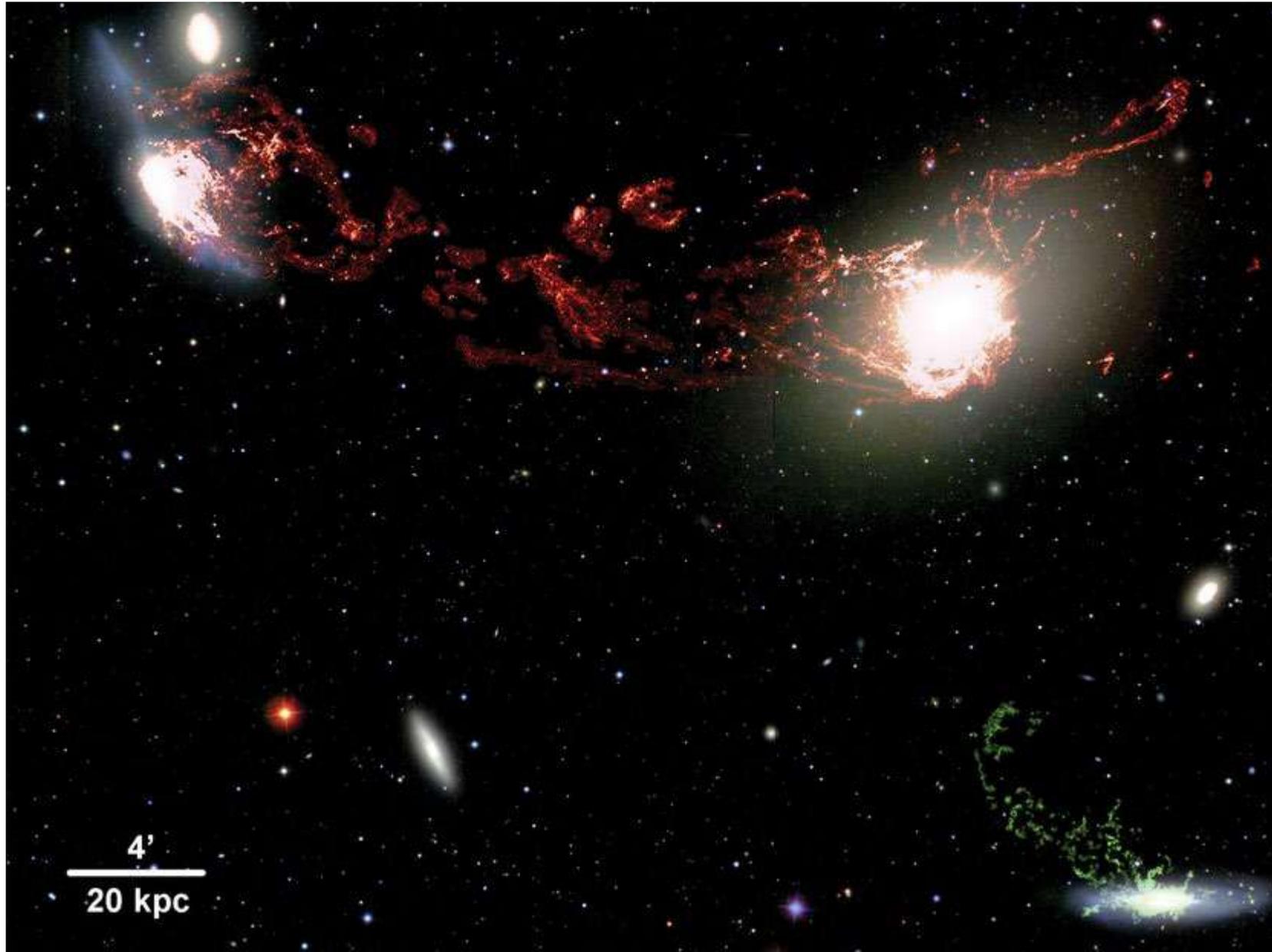
→ Balayage plus ancien dans D100



Mise à l'échelle, même longueur *Jachym et al 2015*

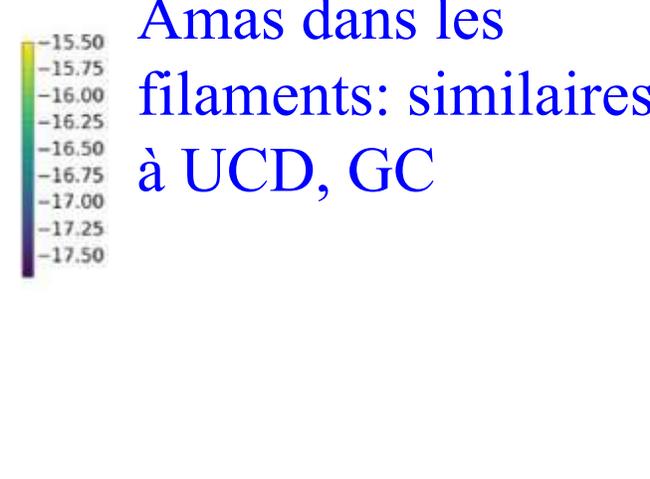
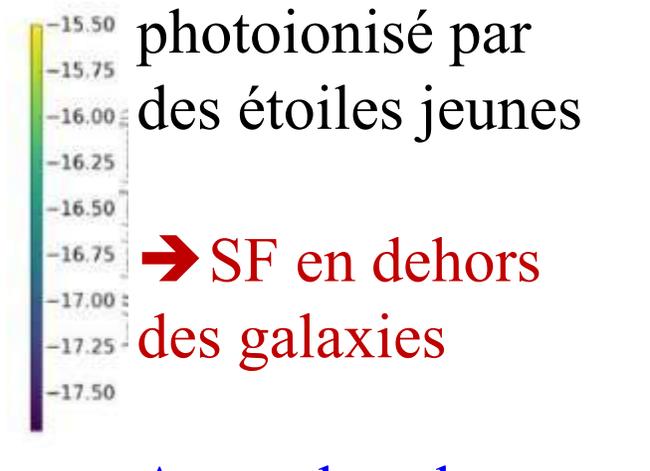
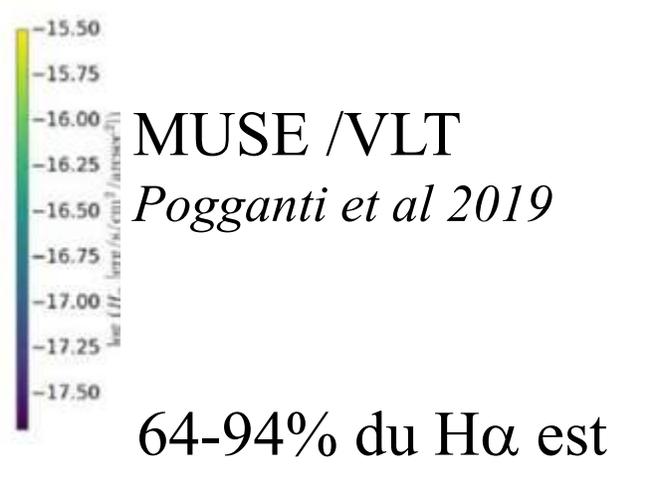
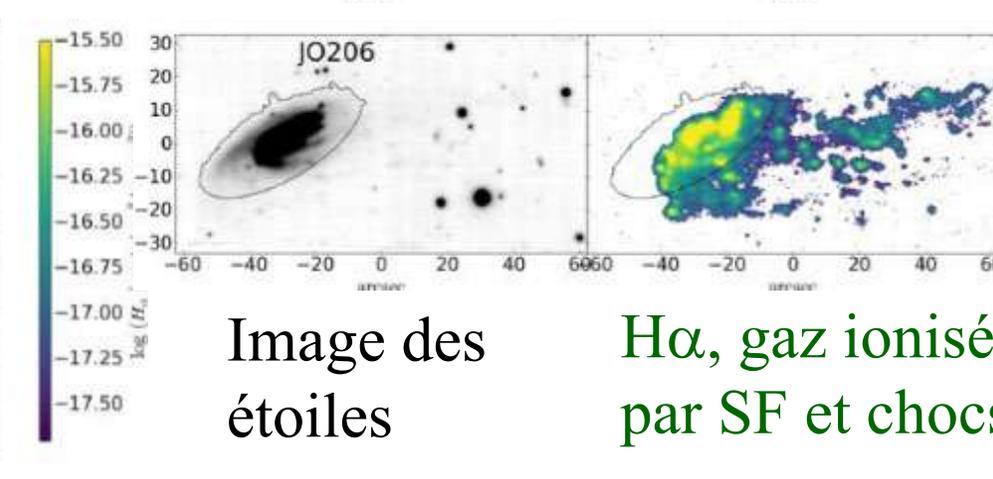
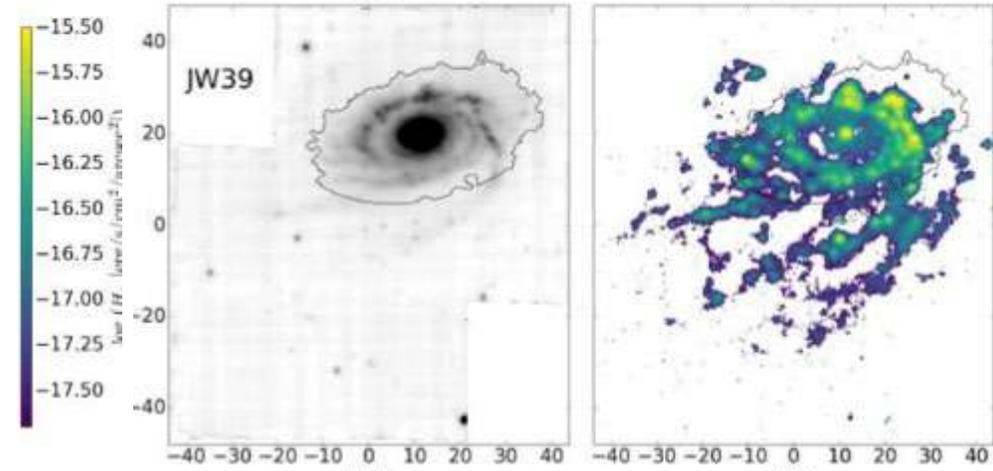
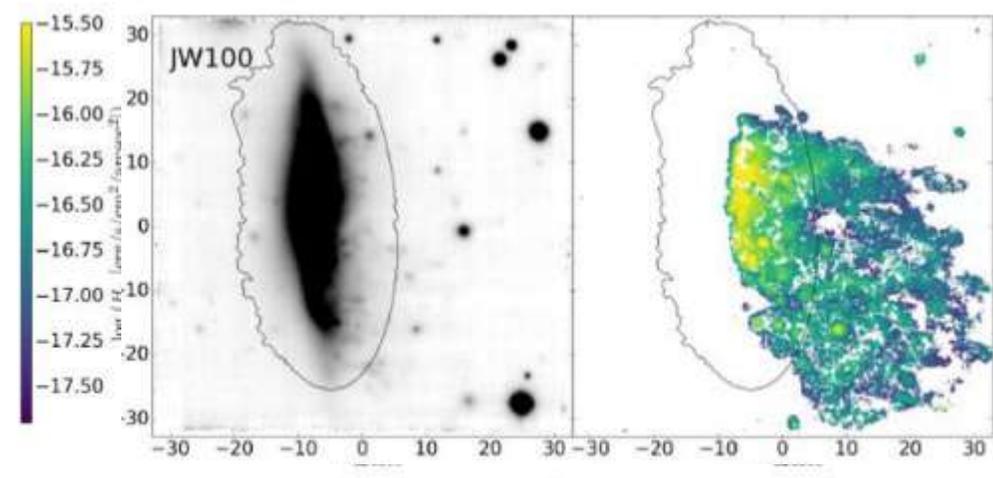
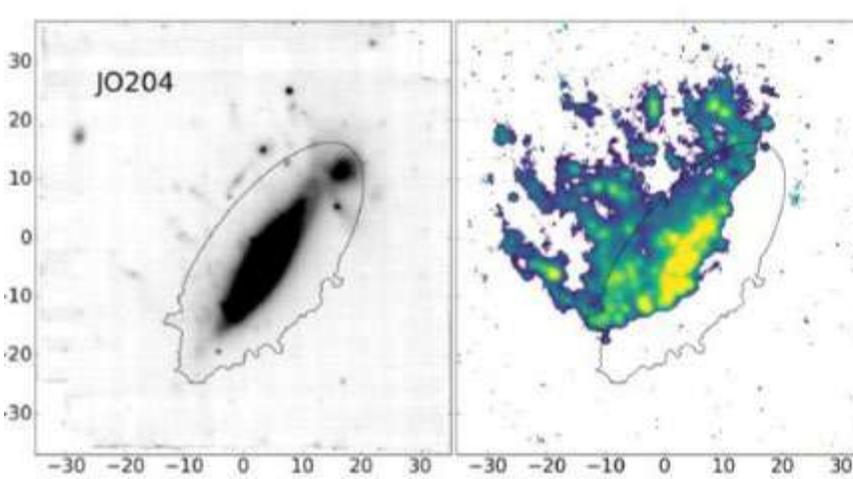
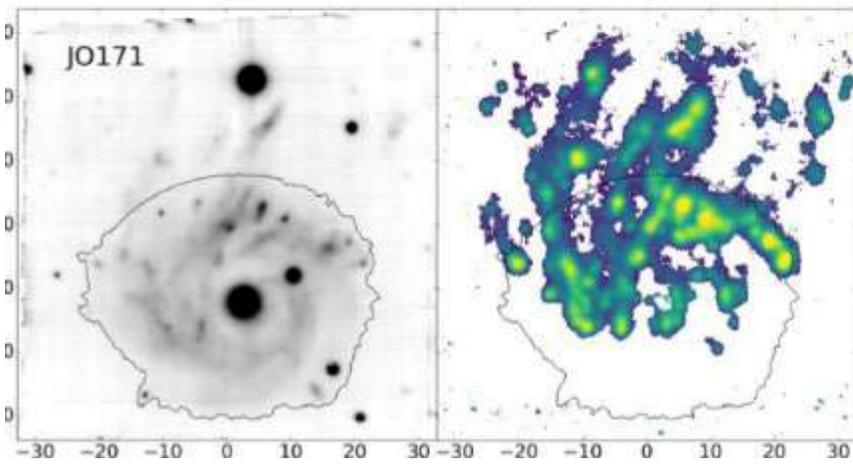
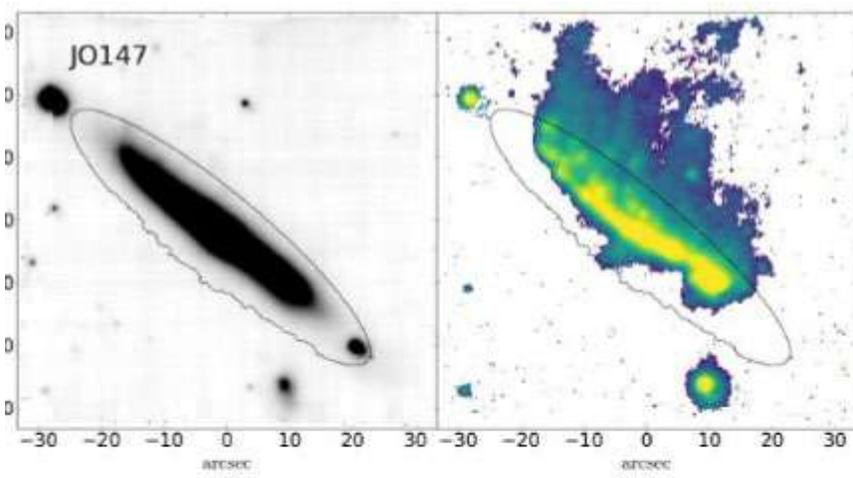
# Traînée géante en H $\alpha$ dans Virgo

N4438-35



Kenney+  
2008

M86



MUSE /VLT  
Poggianti et al 2019

64-94% du H $\alpha$  est photoionisé par des étoiles jeunes

→ SF en dehors des galaxies

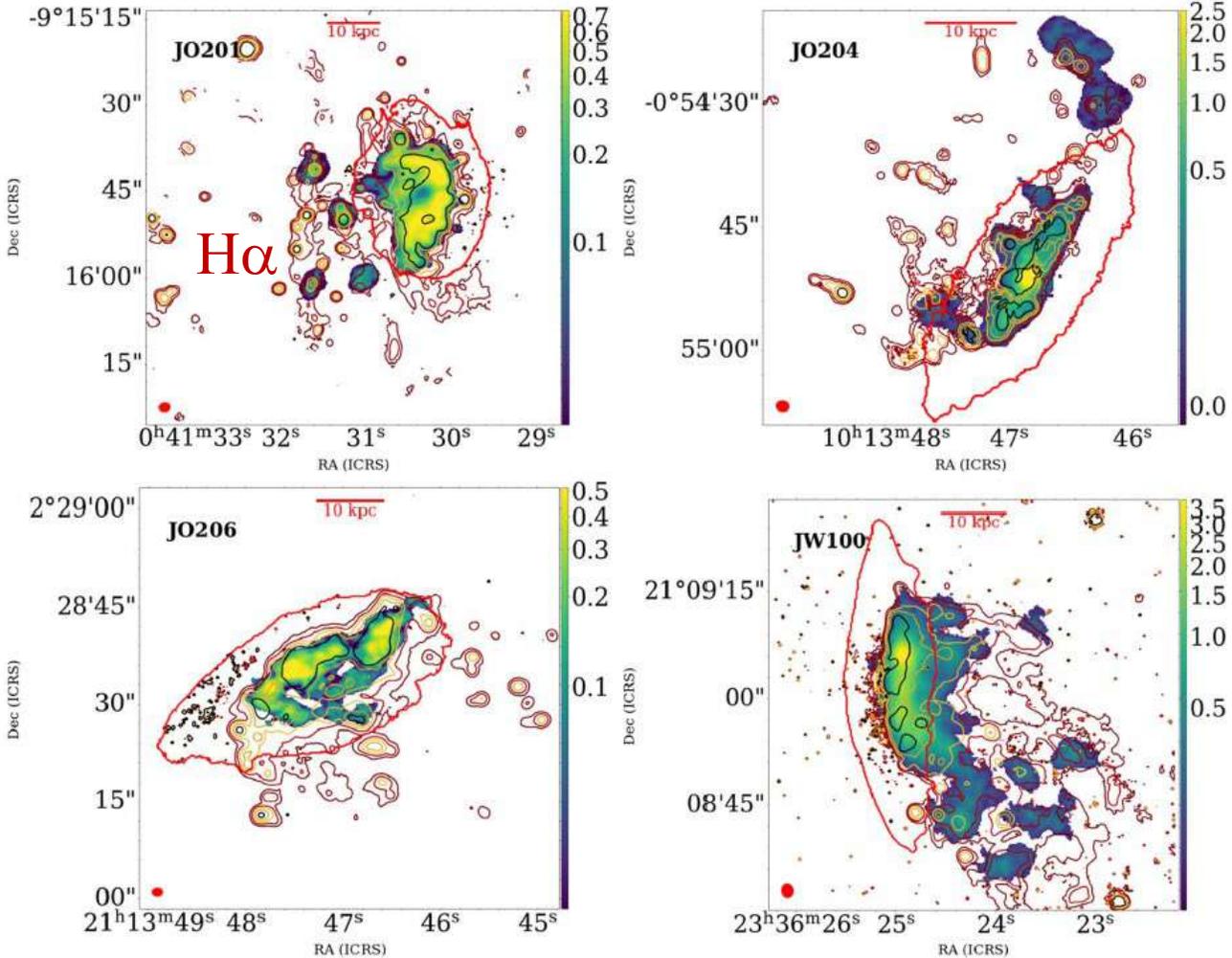
Amas dans les filaments: similaires à UCD, GC

Image des étoiles

H $\alpha$ , gaz ionisé par SF et chocs

# Formation d'étoiles et gaz dense

CO



Dans ces galaxies, déficientes en HI  
Il existe 4-5 fois plus de gaz moléculaire

→ Le gaz atomique se condense en H<sub>2</sub>  
Du fait de la pression dynamique

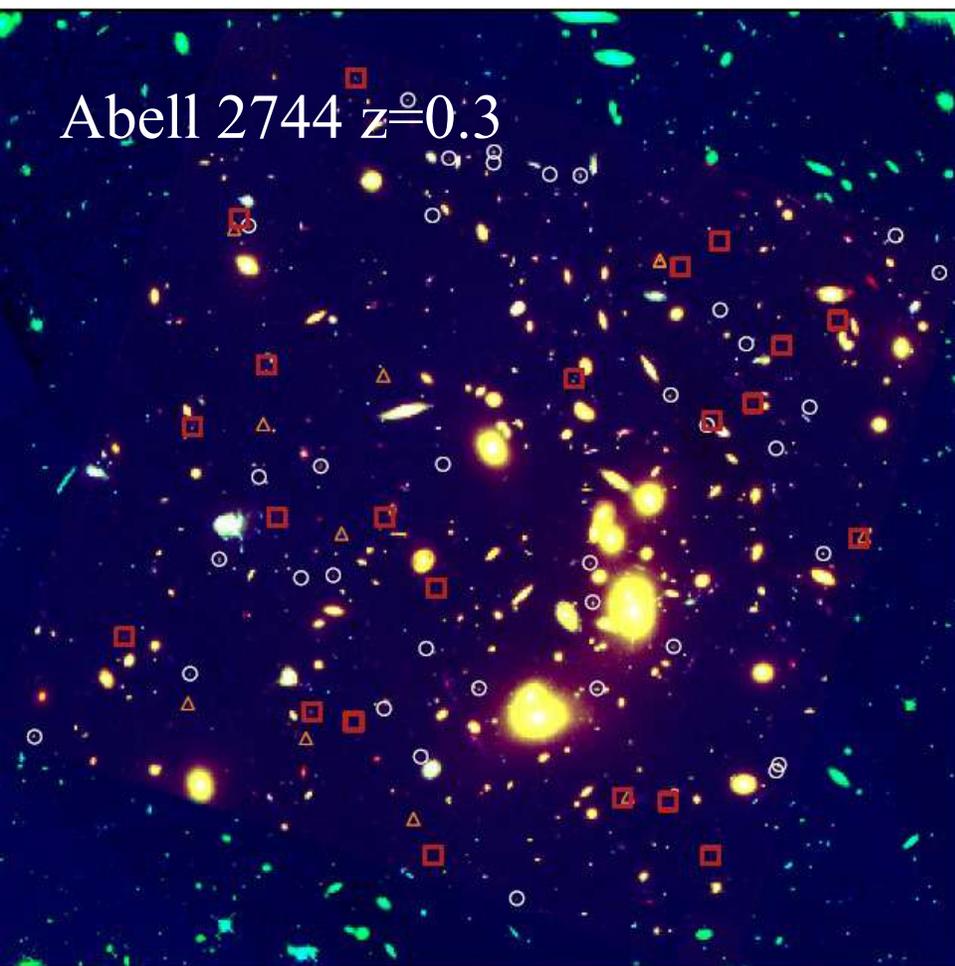
$t_{\text{dep}}$  temps de déplétion, 1-9 Gyr,  
Formation d'étoiles peu efficace

*Moretti et al 2020*

# Galaxies Ultra Diffuses (UDG)

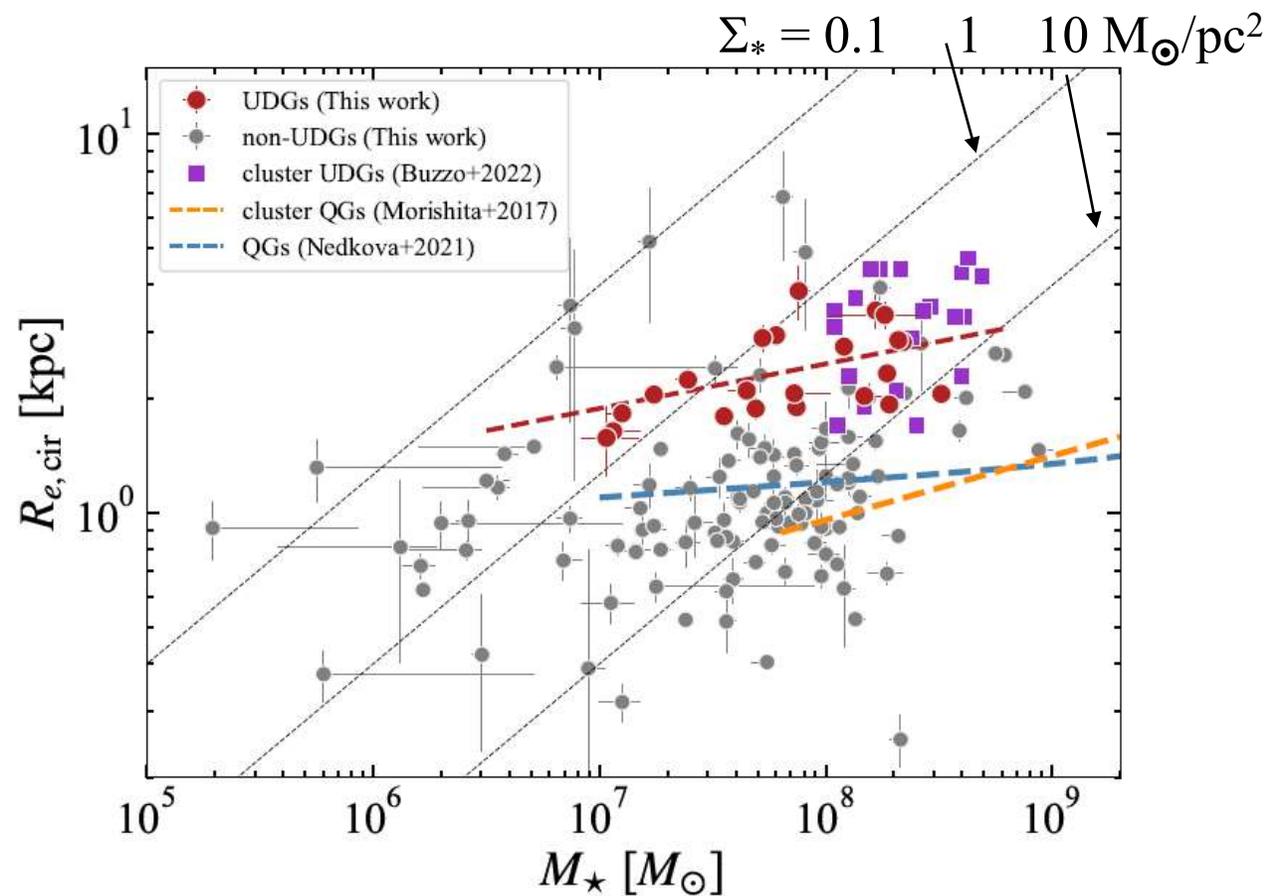
La plupart des UDG sont dans les amas  
~1000 dans l'amas de Coma (*Koda et al 2015*)

*Ikeda et al 2022*



22 UDG identifiées avec JWST dans A2744  
 $M = 10^{7-9} M_{\odot}$  // quiescent galaxies (QG)  
avec  $Re \times 2.6$   $0.2 < z < 0.5$

La moitié sont perturbées



# Résumé

→ La plupart des galaxies sont dans des groupes, parfois des amas (< 10%)

→ Masses obtenues avec les vitesses, ou lentilles gravitationnelles, ou rayons X

**Amas:** transition entre accrétion froide et chaude  
Flots de refroidissement ( $z=0$ )

→ L'environnement fait évoluer les galaxies  
Ségrégation morphologique, balayage du gaz et suppression de la formation d'étoiles

