

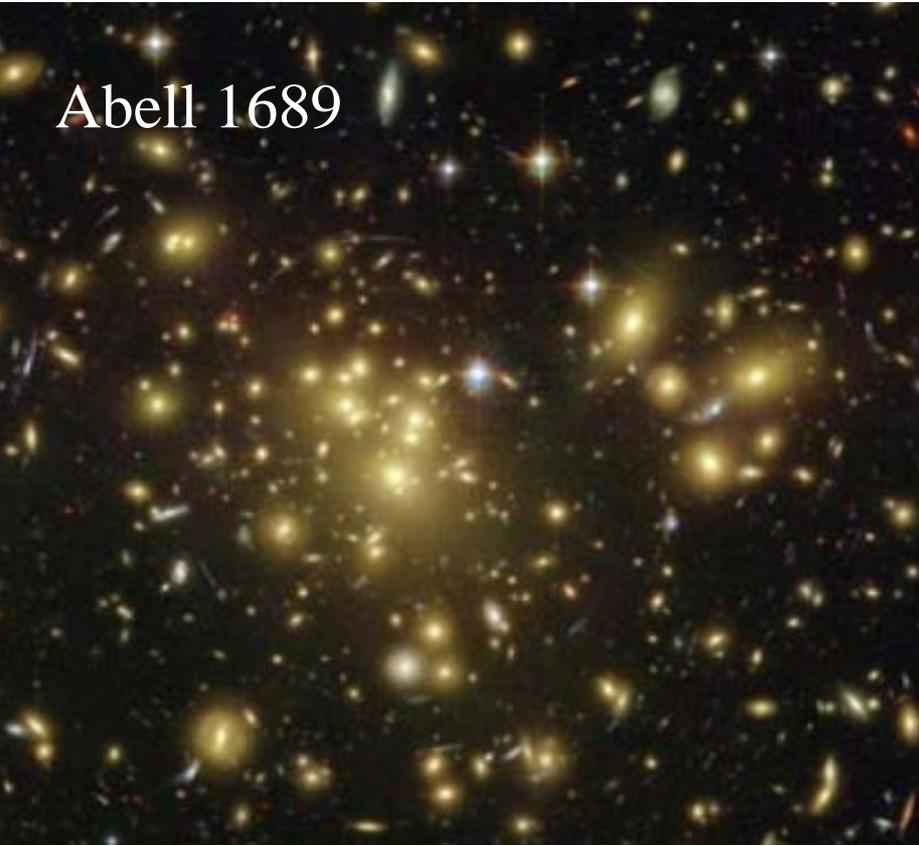


COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Les Amas de Galaxies

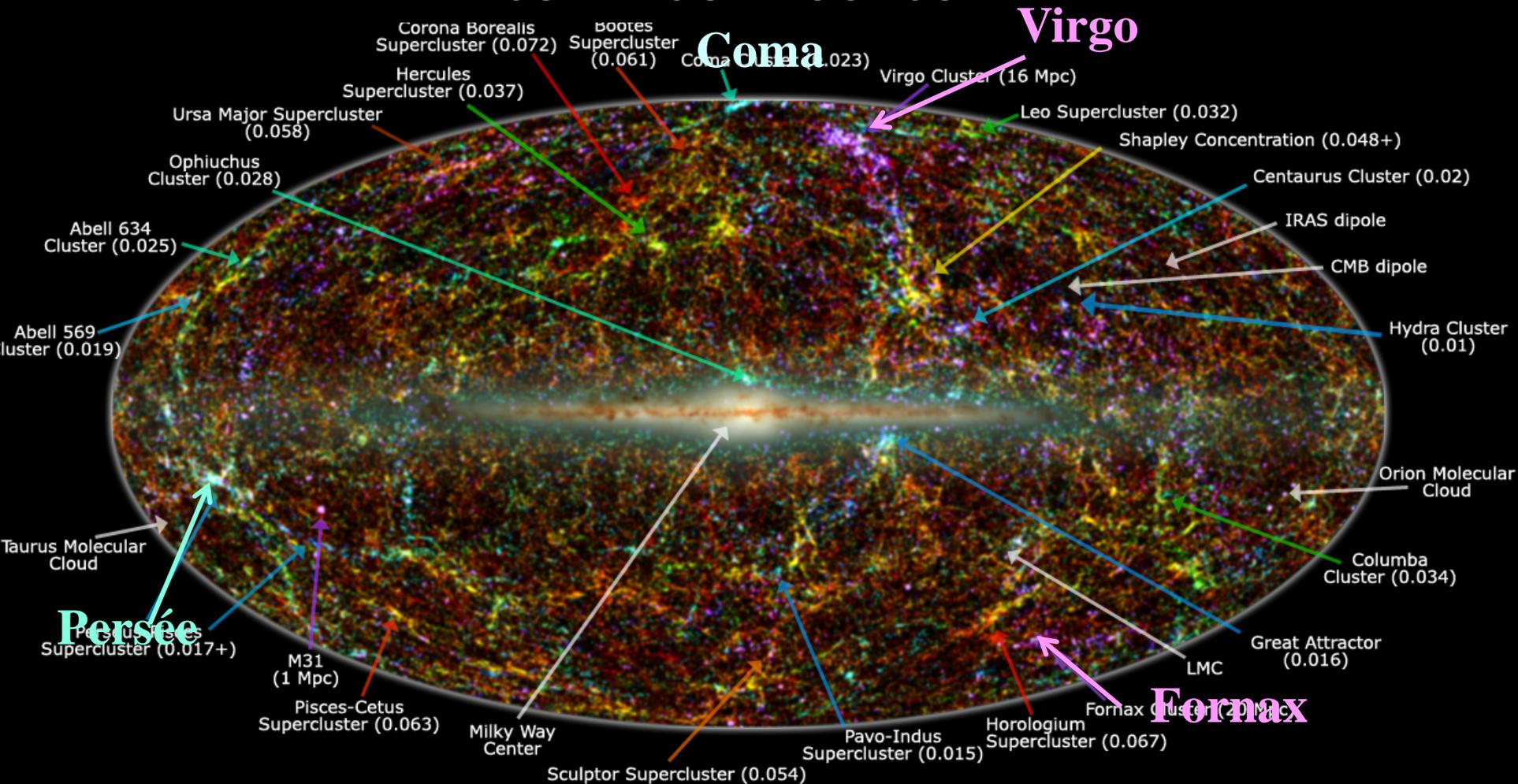
Abell 1689



Françoise Combes



Les Amas Proches



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)

2MASS

Amas et superamas proches 1997-2001

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: $M > 10^{14}$ à $10^{15} M_{\odot}$ -- Surtout E-gal et S0

Amas de galaxies

de qq 100 à 1000 galaxies massives, liées

Taille typique \sim qq Mpc

Le Coeur (Mpc central) contient

50 à 100 galaxies ($L > 2 \times 10^{10} L_{\odot}$)

Catalogue Abell (1958-89): 4073 amas riches

Les amas les plus proches sont Virgo (Nord) et Fornax (Sud)

Avec des milliers de galaxies -- $D=15-20$ Mpc

L'amas le plus riche est Coma, à $D=100$ Mpc, qq Mpc de taille, contient $\sim 10,000$ galaxies

Les amas possèdent du **gaz très chaud** ($T=10^7 - 10^8$ K \rightarrow rayons X

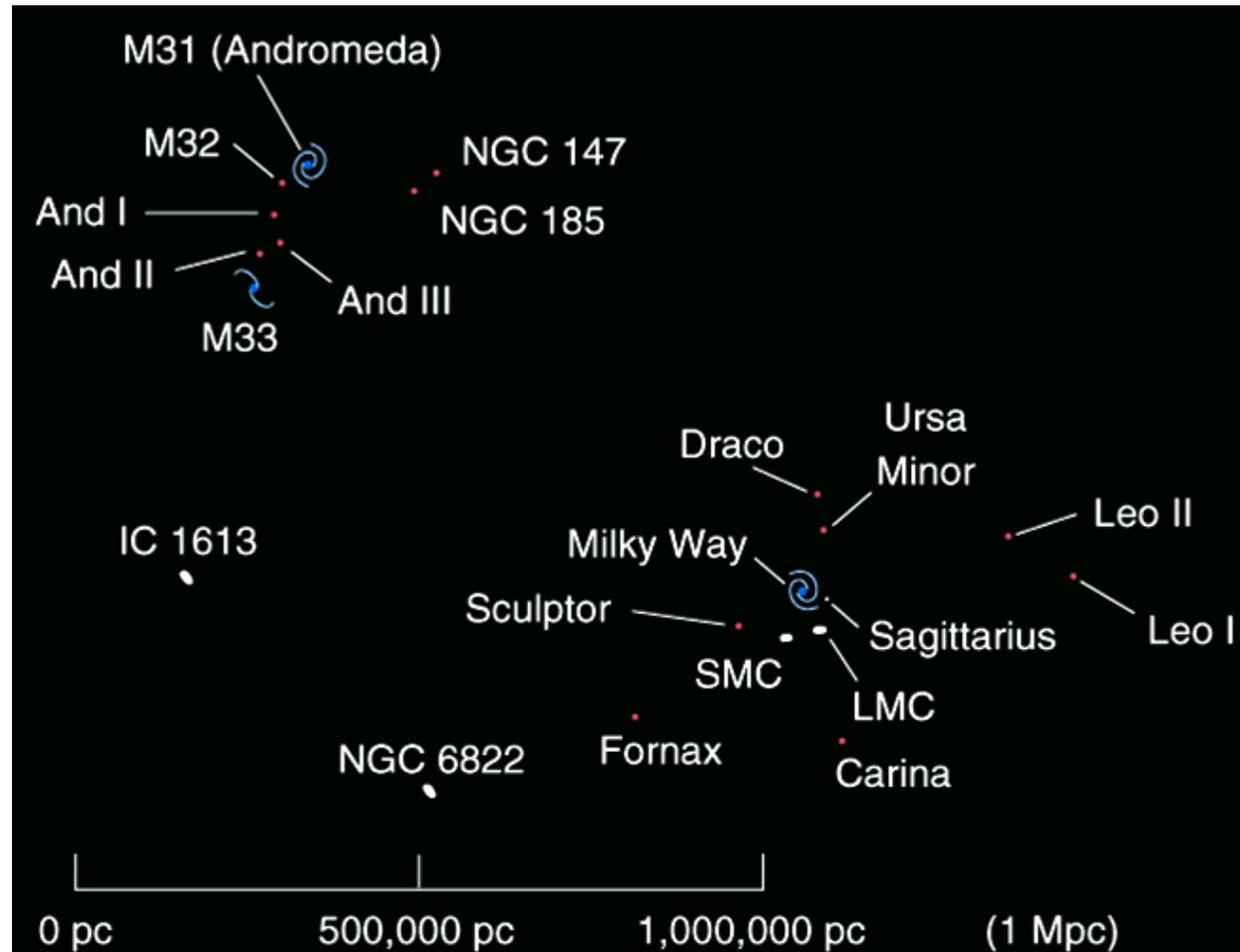


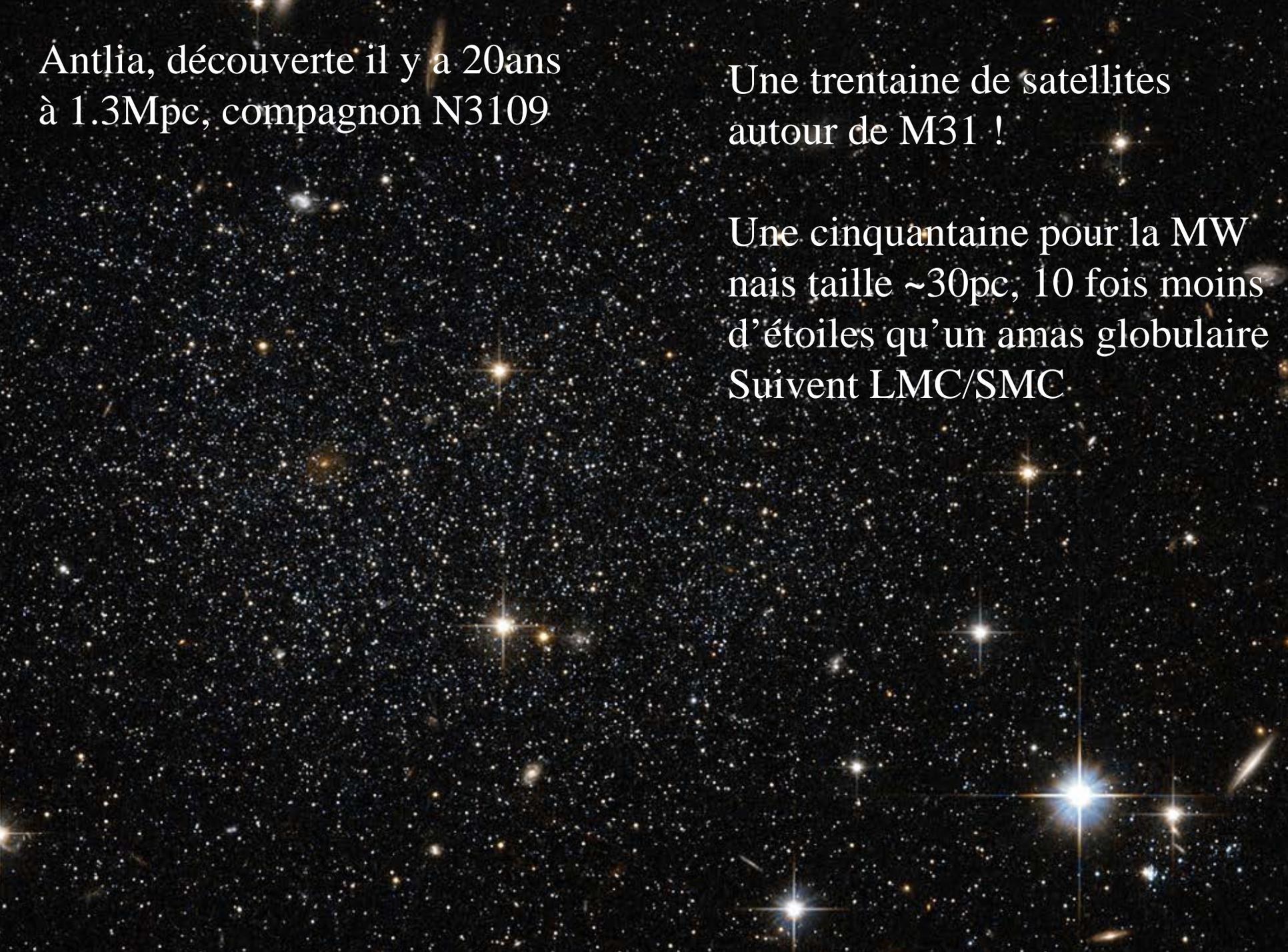
Les groupes de galaxies

- plus petits que les amas
- Moins de ~100 galaxies
- moins liés gravitationnellement
- Contiennent plus de spirales et Irr que les amas

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

Groupe Local





Antlia, découverte il y a 20ans
à 1.3Mpc, compagnon N3109

Une trentaine de satellites
autour de M31 !

Une cinquantaine pour la MW
mais taille $\sim 30\text{pc}$, 10 fois moins
d'étoiles qu'un amas globulaire
Suivent LMC/SMC

Le Groupe Local

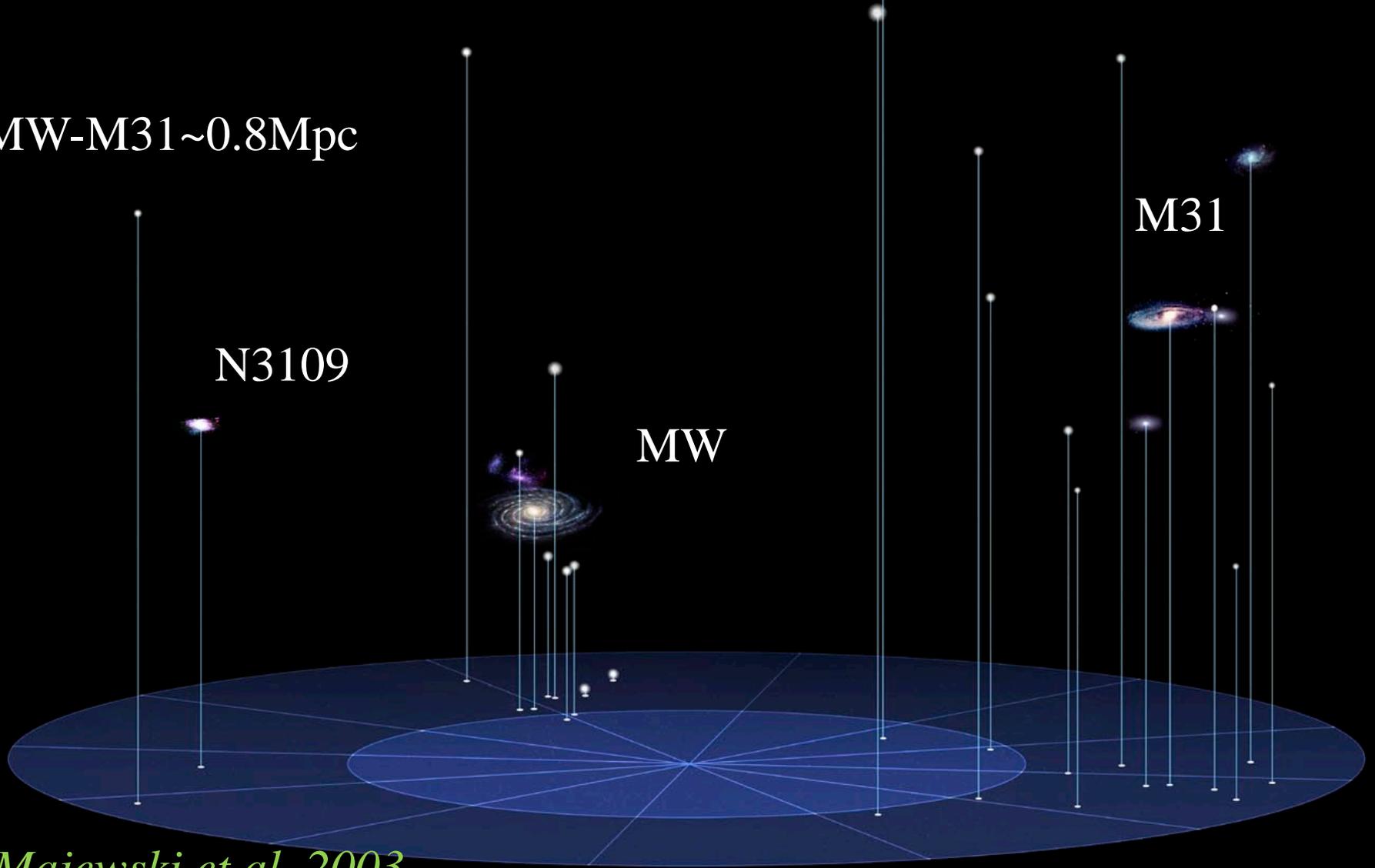
MW-M31 ~ 0.8 Mpc

N3109

MW

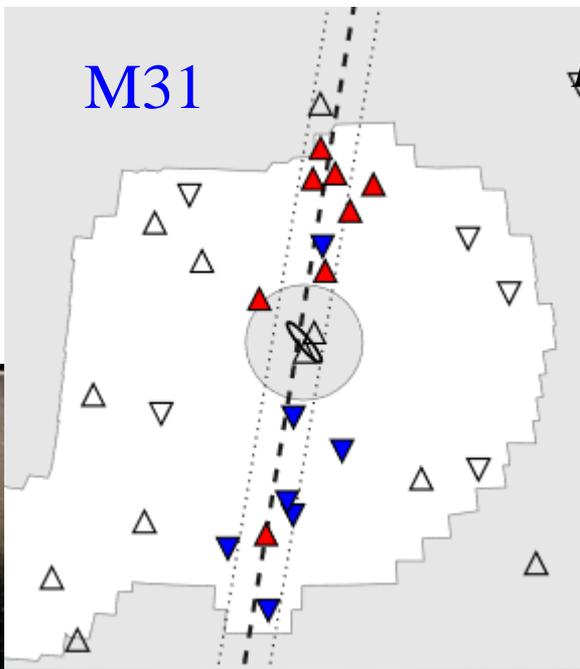
M31

Majewski et al. 2003

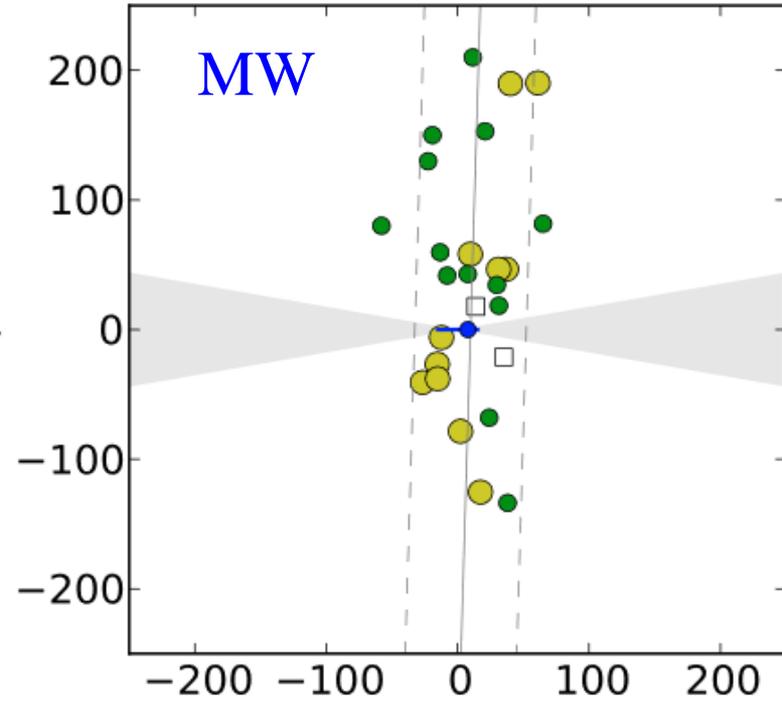


M31

Pawlowski 2018



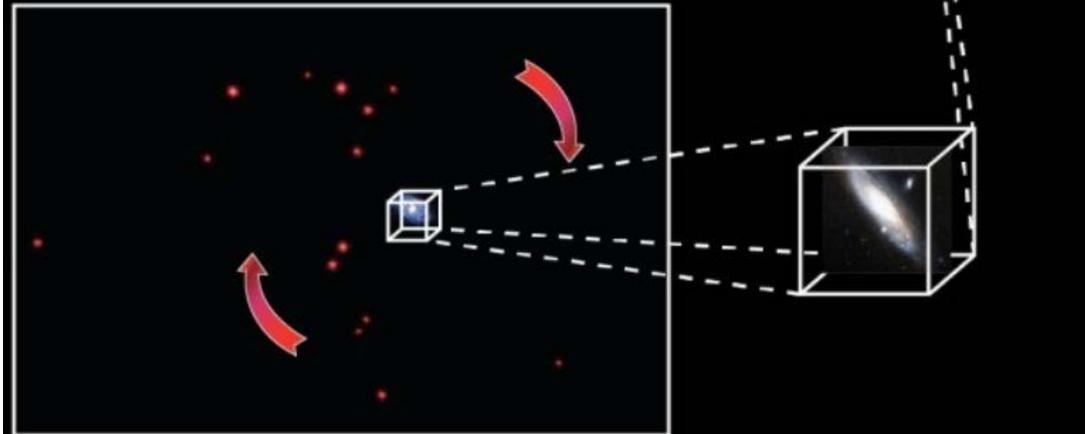
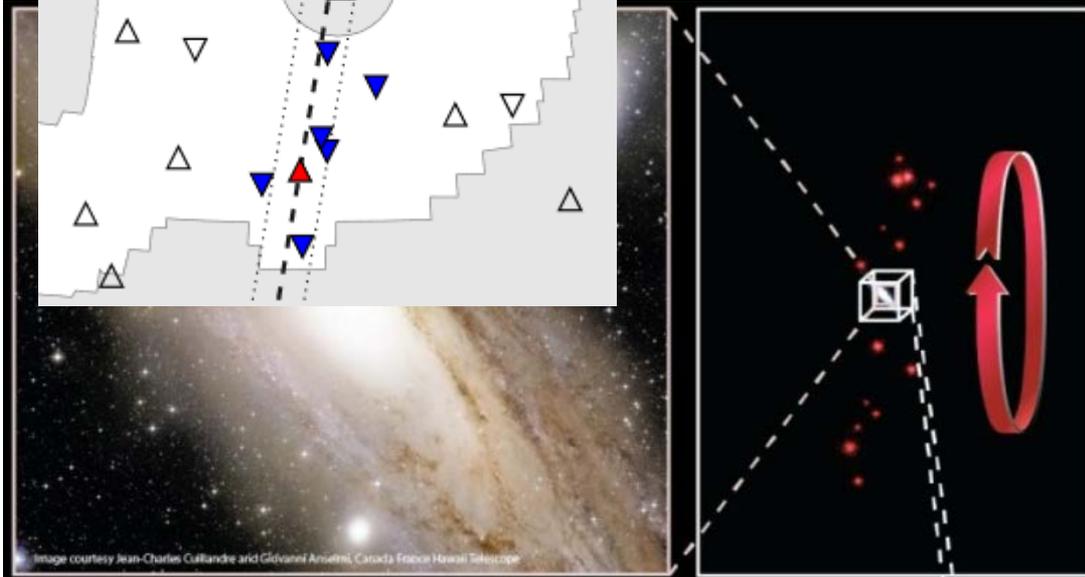
[kpc]



Kroupa et al 2010

Alignements des
satellites dans un plan
Voie lactée et M31

Ibata et al 2013



Les groupes compacts

Certains groupes
semblent beaucoup plus
compacts et instables

Notamment les groupes
de Hickson



HCG87

Caractéristiques et définitions



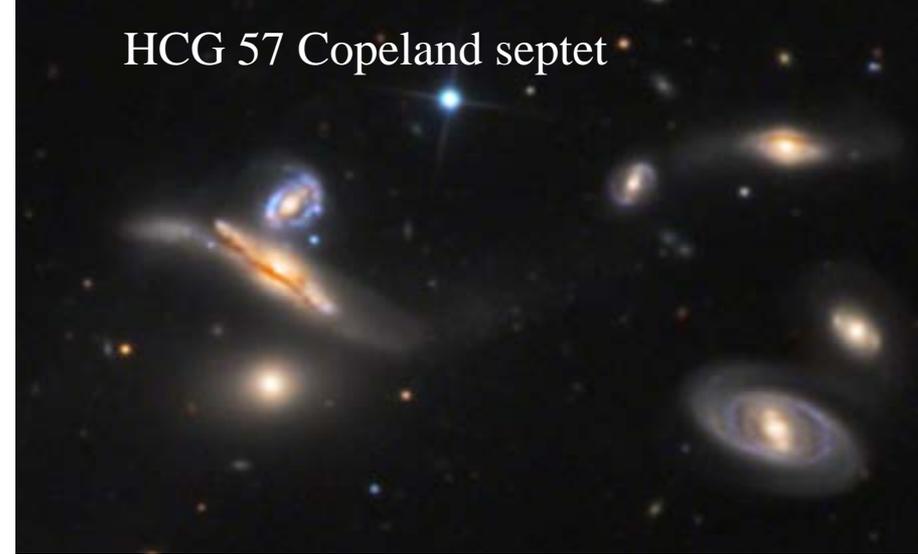
Stephan's quintet

HCG92

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

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

Groupes compacts de Hickson (HCG)



HCG 57 Copeland septet

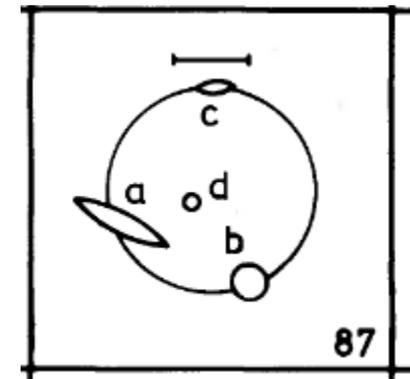
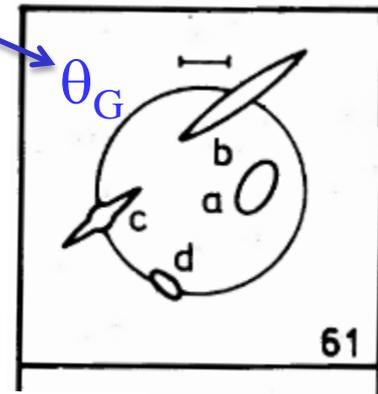
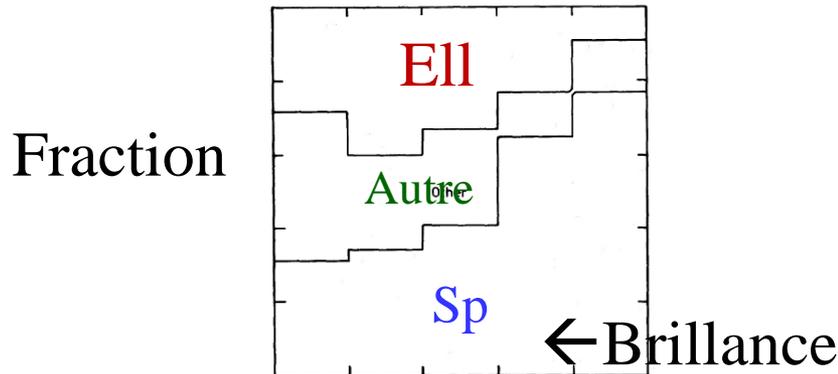
Selection optique basée sur la densité

Nombre: ≥ 4 galaxies dans les 3 magnitudes de la plus brillante

Isolation: pas de galaxies dans les 3 rayons du groupe $\theta_n \geq 3 \theta_G$

Compact: brillance de surface $\mu < 26$ mag/arcsec²

→ 100 HCGs ($\geq 90\%$ sont réels).



Paul Hickson 1982

Les groupes compacts ne devraient pas exister

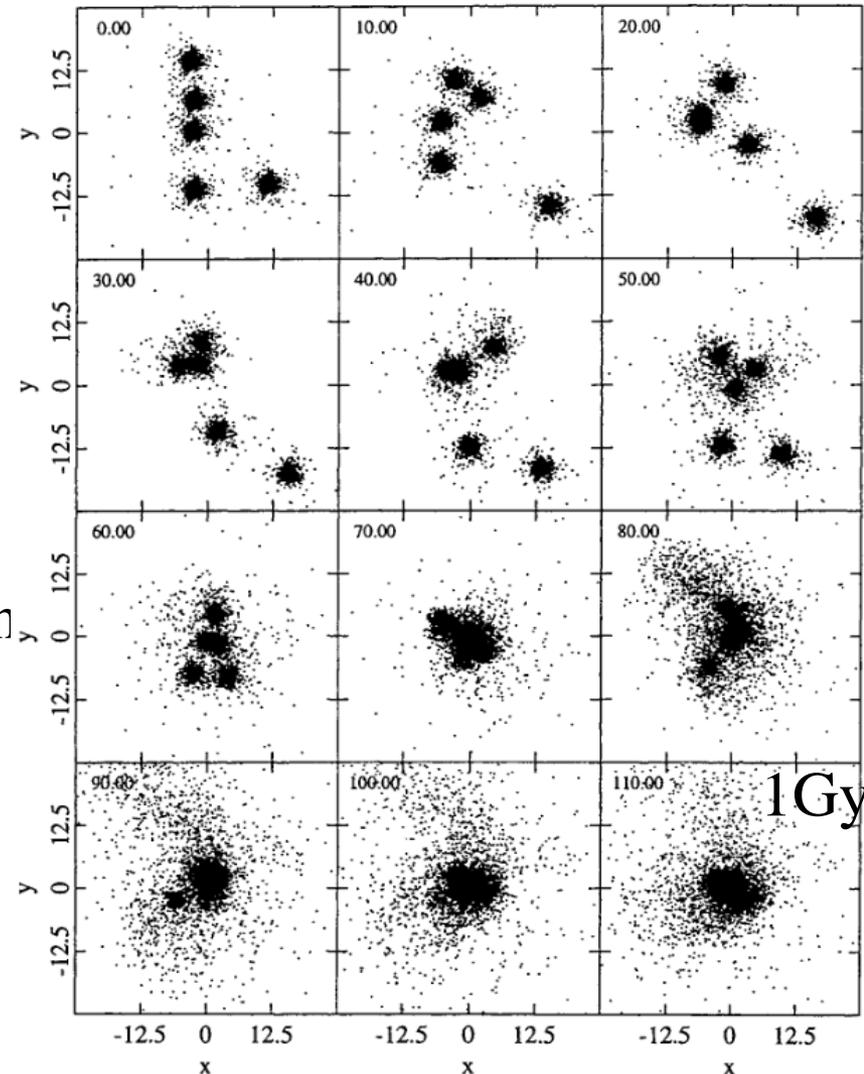
Ils devraient fusionner en une seule galaxie en un temps ~ 1 Gyr

→ 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



Gaz diffus détecté en UV dans les groupes

Quelques groupes compacts sont détectés en rayons X, mais les groupes diffus doivent contenir du gaz moins chaud?

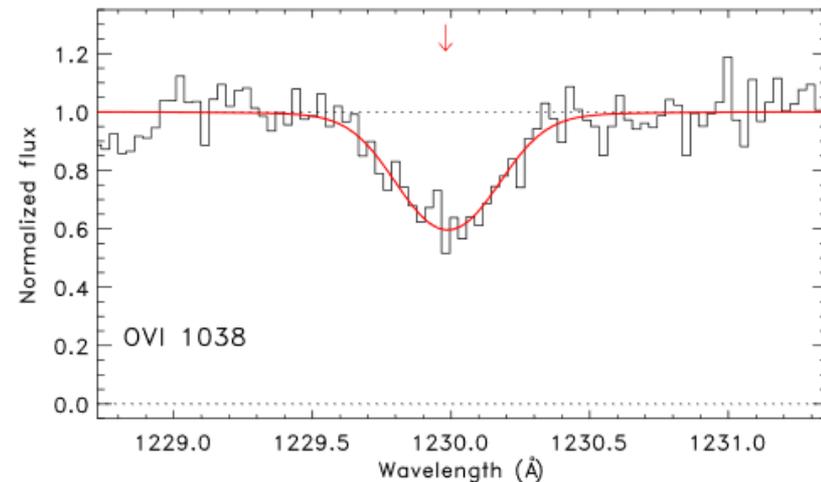
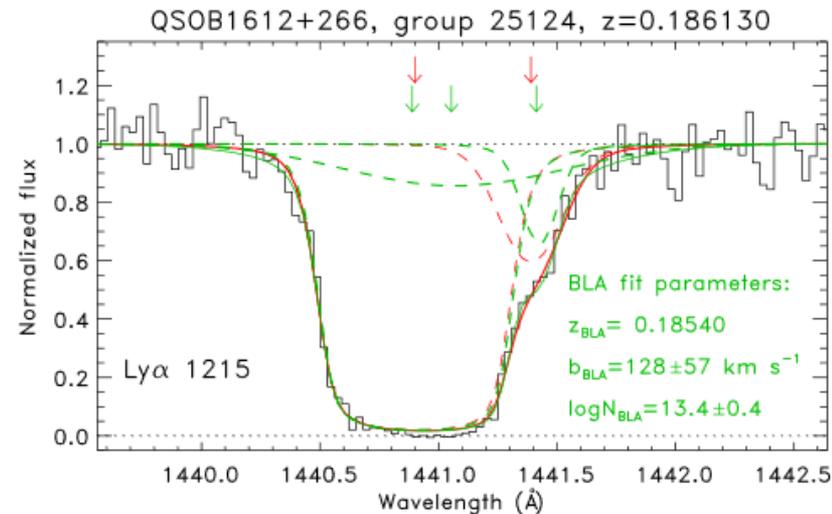
Raies en absorption de OVI, NeVIII ou HI raies larges

Devraient exister à $T \sim 10^5 \text{K}$, il manque beaucoup de baryons dans les groupes

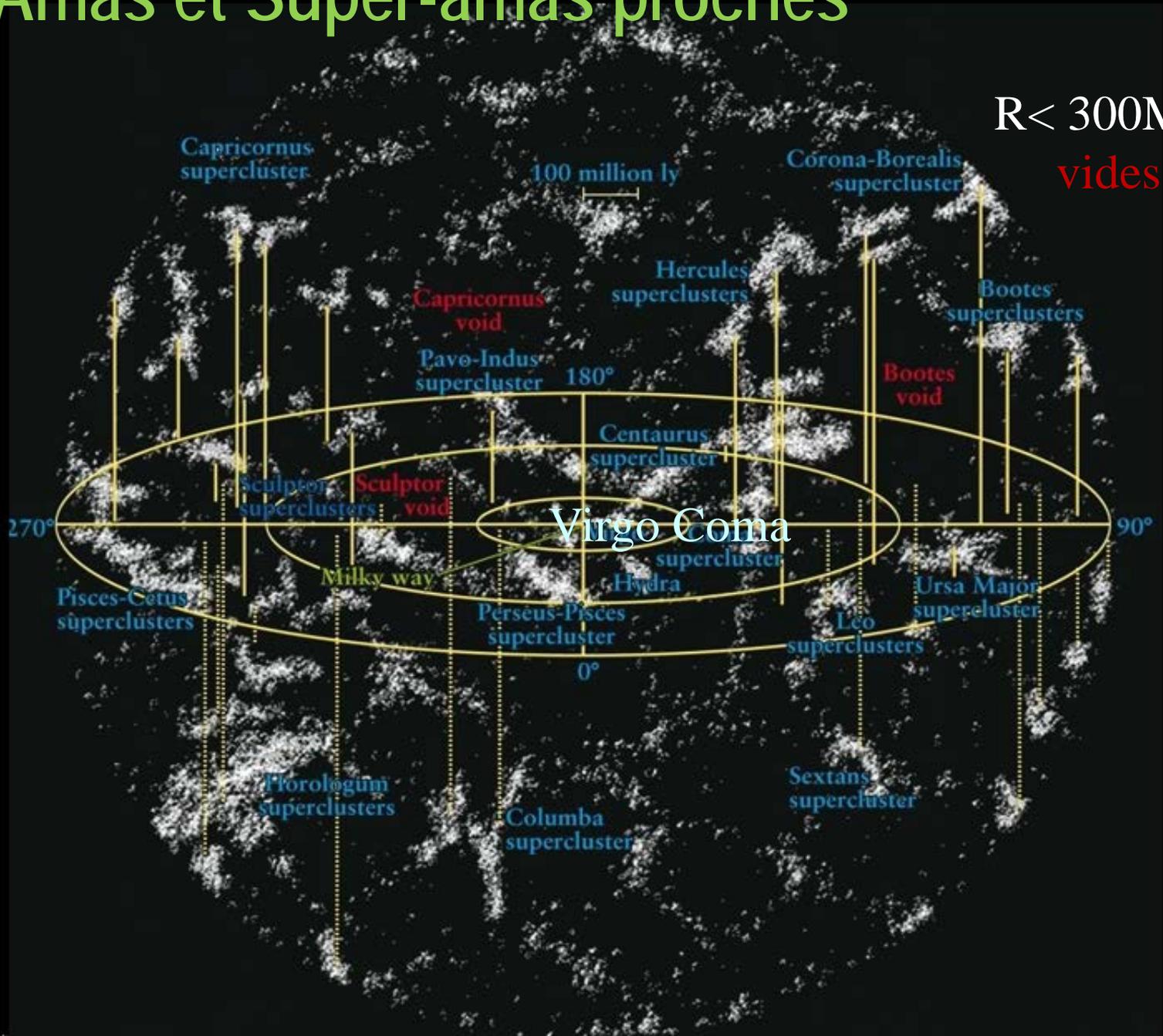
Quelques détections à des vitesses liées avec le groupe

→ Mais pas partout, et ne suffit pas à compléter les baryons

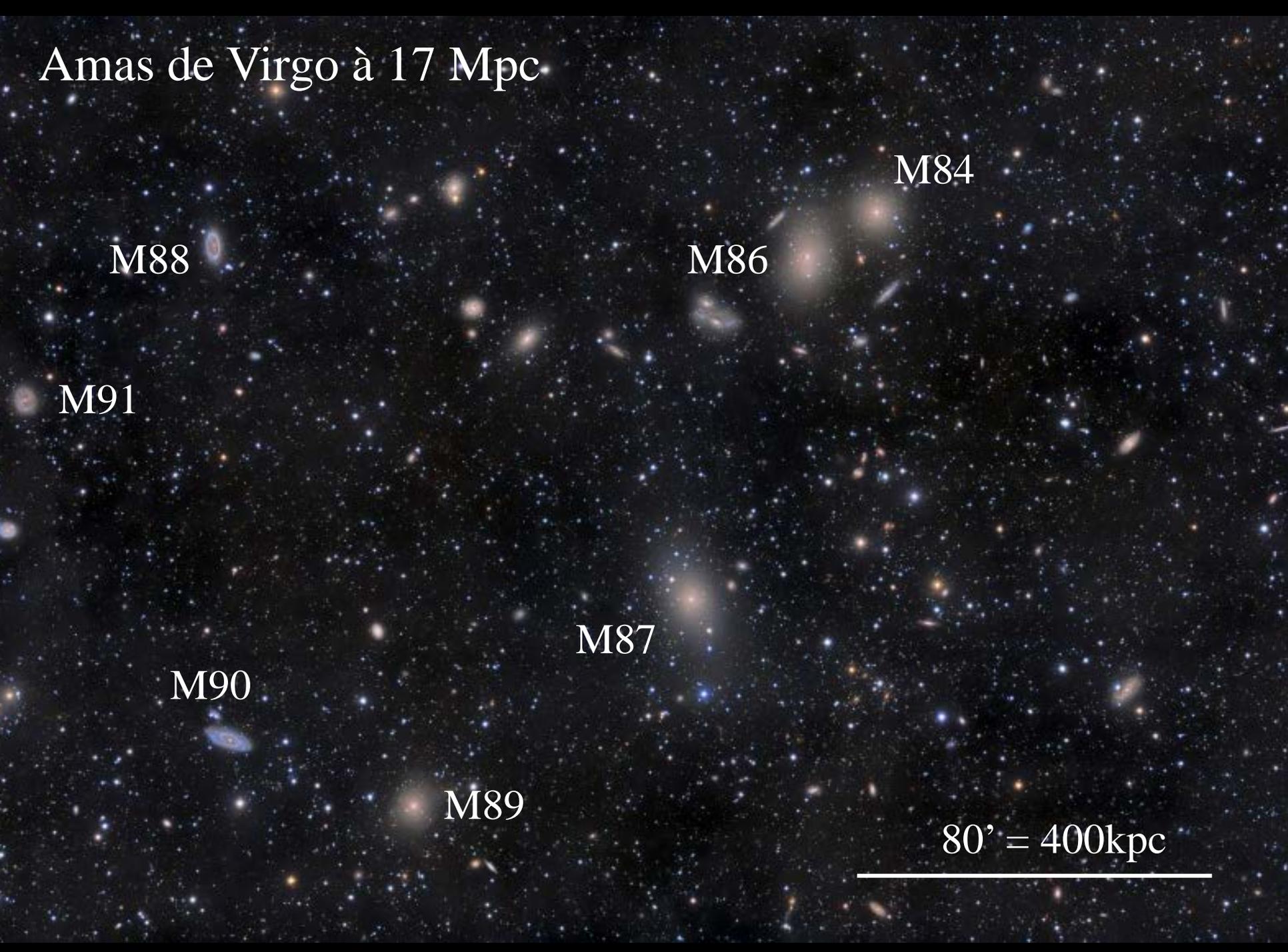
Stocke et al 2018



Amas et Super-amas proches



Amas de Virgo à 17 Mpc



M88

M86

M84

M91

M87

M90

M89

80' = 400kpc

Amas de Virgo:
Laboratoire pour
l'évolution des
galaxies

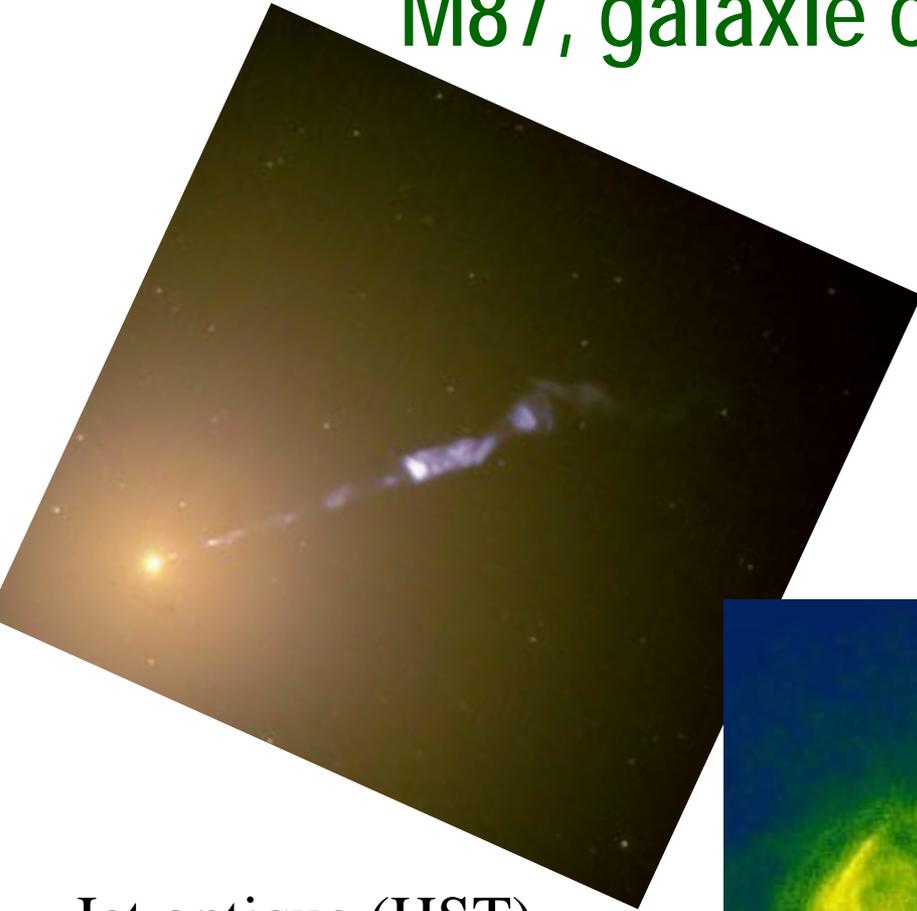
VIVA survey
VLA, HI-21cm



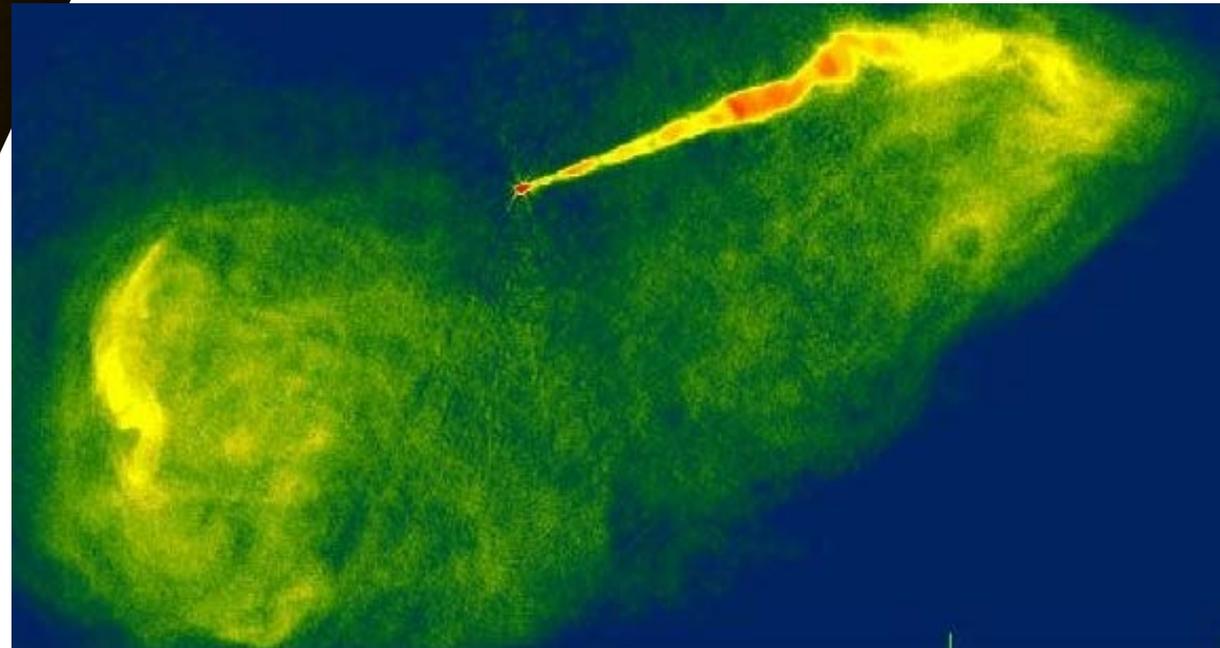
- $\mathcal{V} < 500 \text{ km/s}$
- $600 \text{ km/s} < \mathcal{V} < 1300 \text{ km/s}$
- $1400 \text{ km/s} < \mathcal{V} < 2000 \text{ km/s}$
- $\mathcal{V} > 2000 \text{ km/s}$

M87, galaxie centrale de Virgo

Les galaxies centrales d'amas
sont actives (AGN) en
général des sources radio,
avec jets d'émission synchrotron



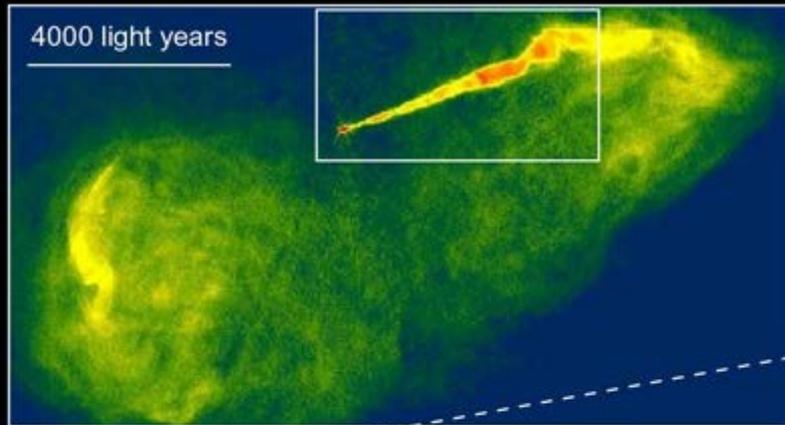
Jet optique (HST)



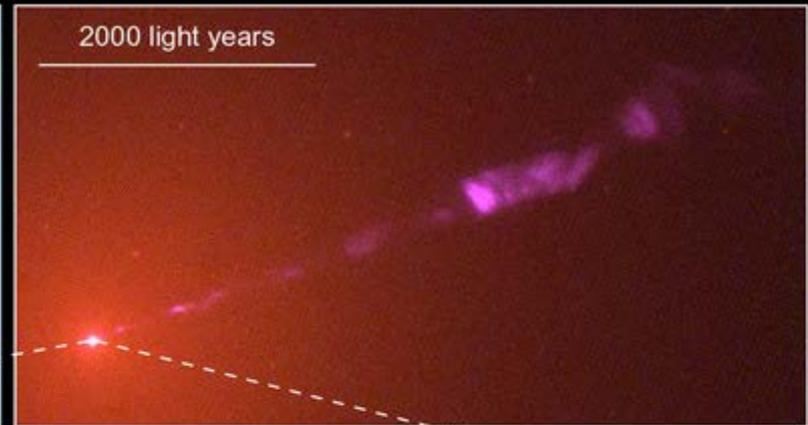
Jet radio (VLA)

Alimentées par le flot de
refroidissement?

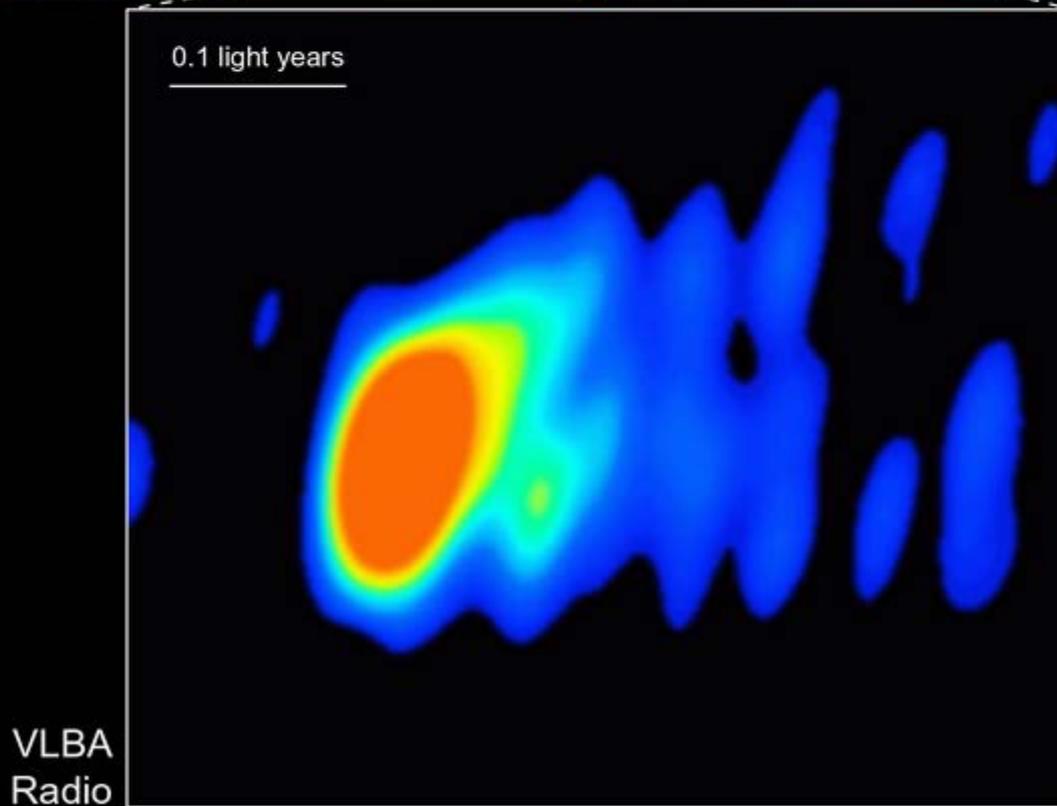
Galaxy M87



VLA
Radio



HST • WFPC2
Visible



VLBA
Radio

N4435

Filaments H α géants dans Virgo

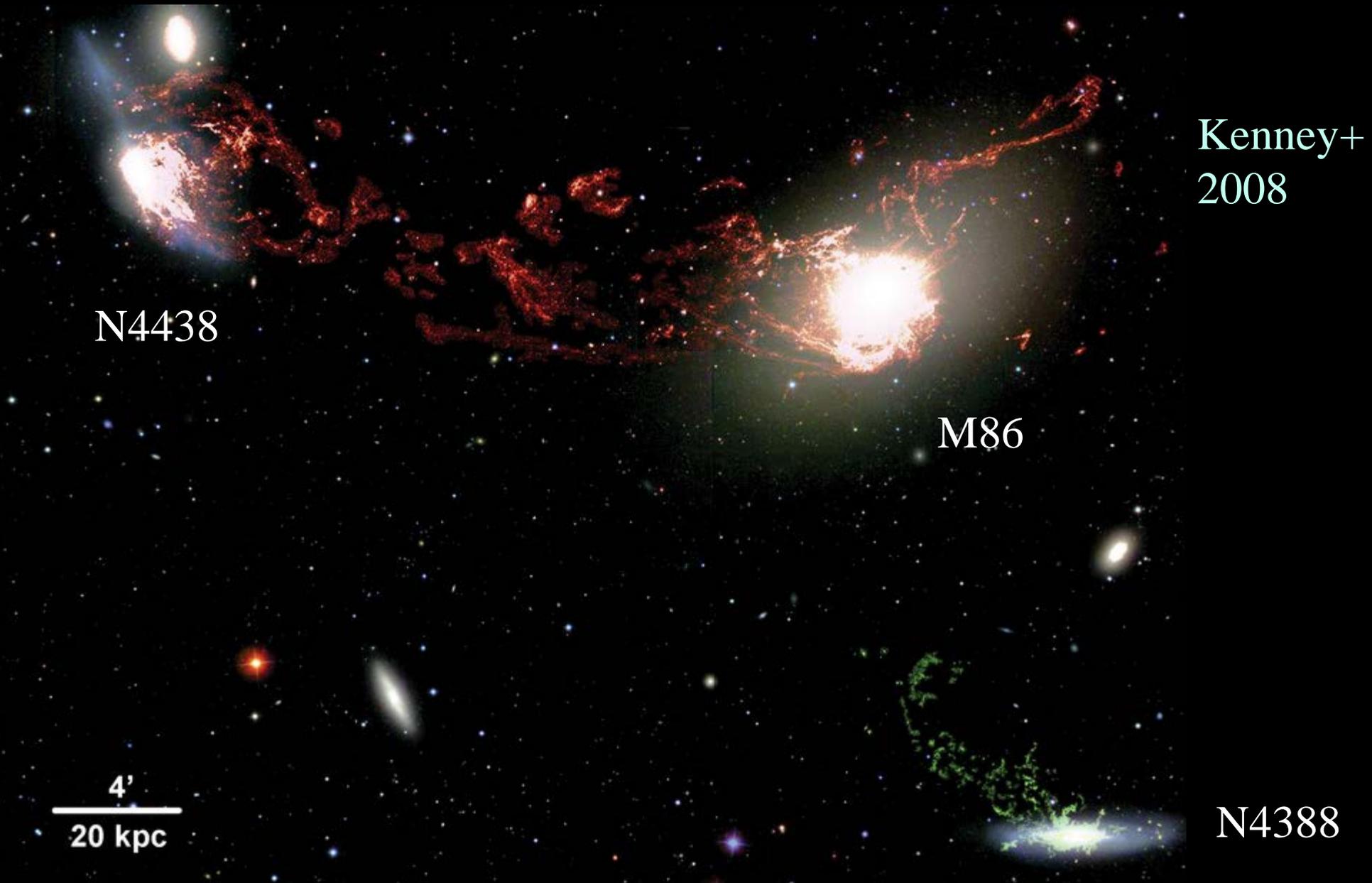
Kenney+
2008

N4438

M86

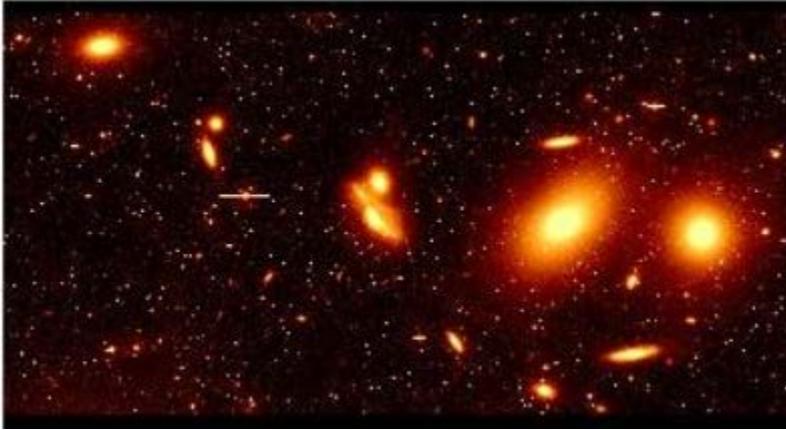
4'
20 kpc

N4388



Etoiles intra-amas dans Virgo

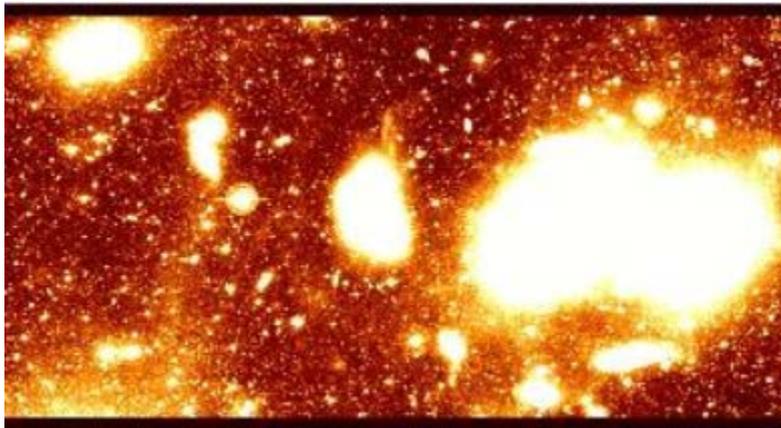
Mihos et al 2005



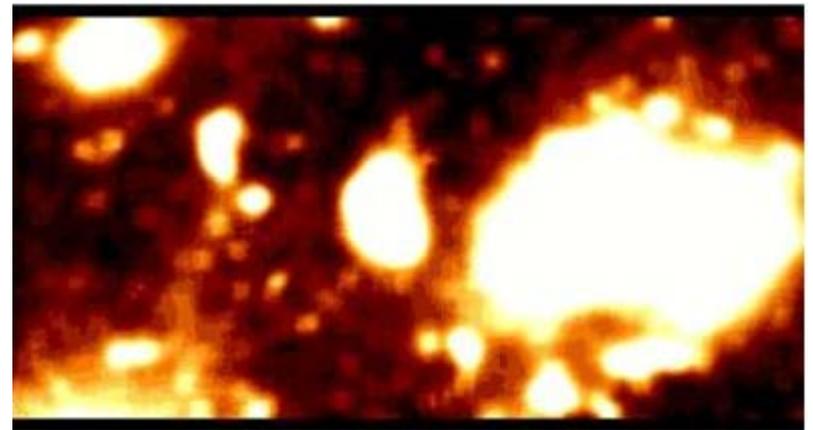
Exposition assez superficielle



Plus profonde: détection d'une lueur



Filtre médian 10x10 pix



Filtre médian 100x100 pix

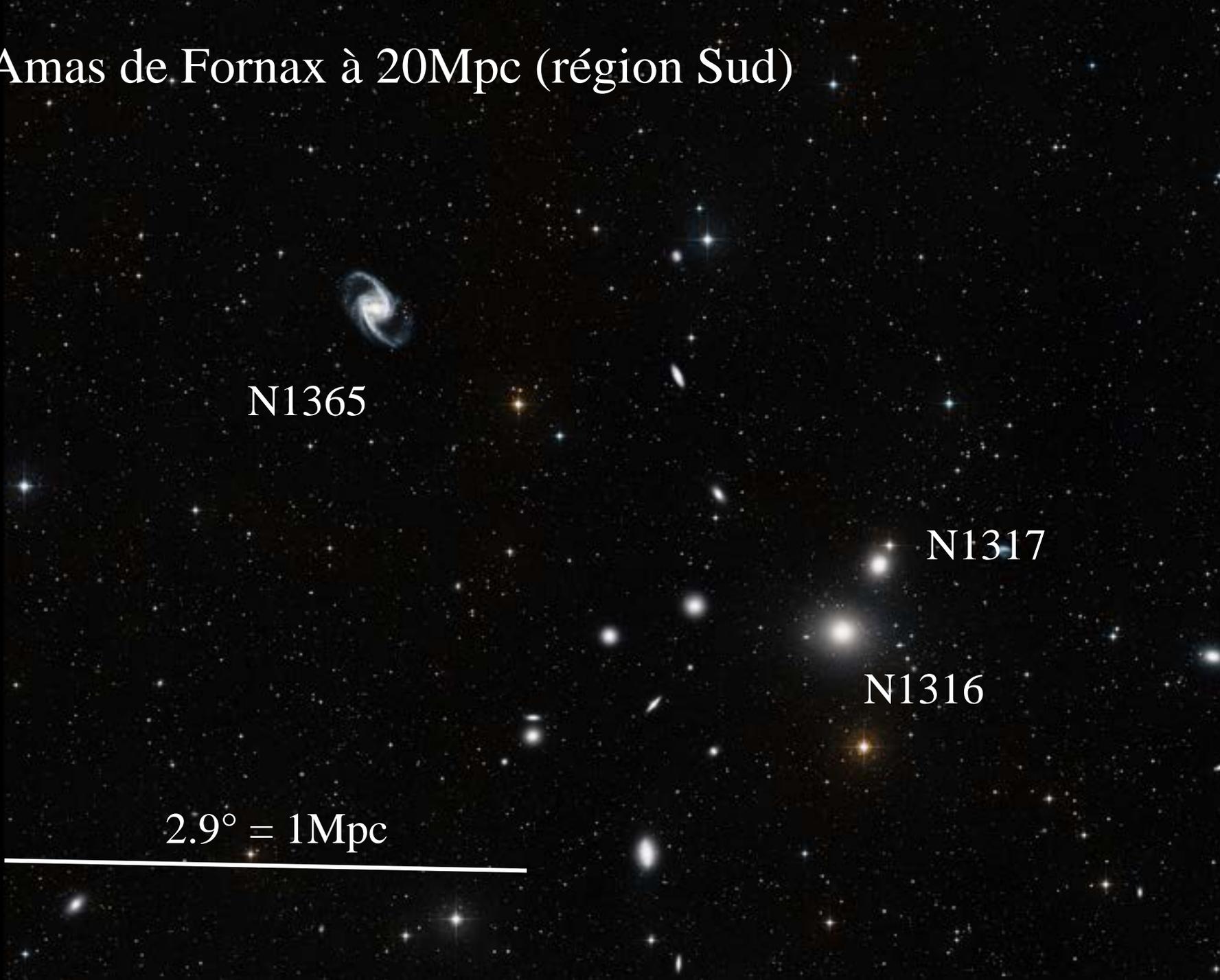
Amas de Fornax à 20Mpc (région Sud)

N1365

N1317

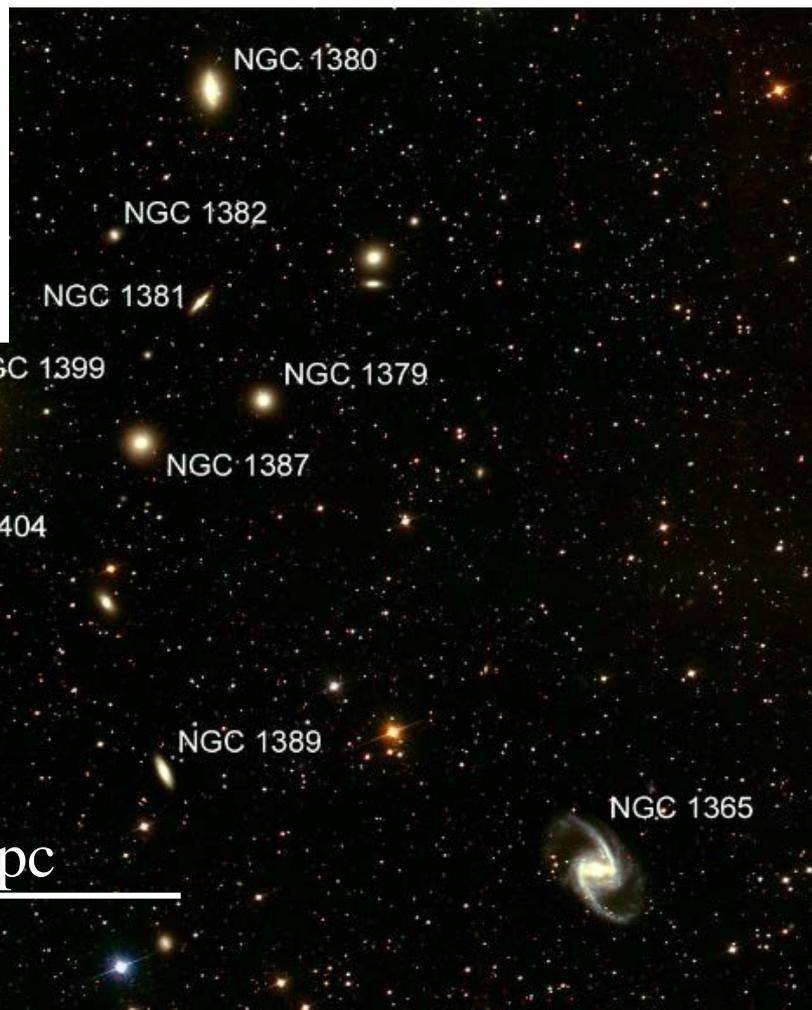
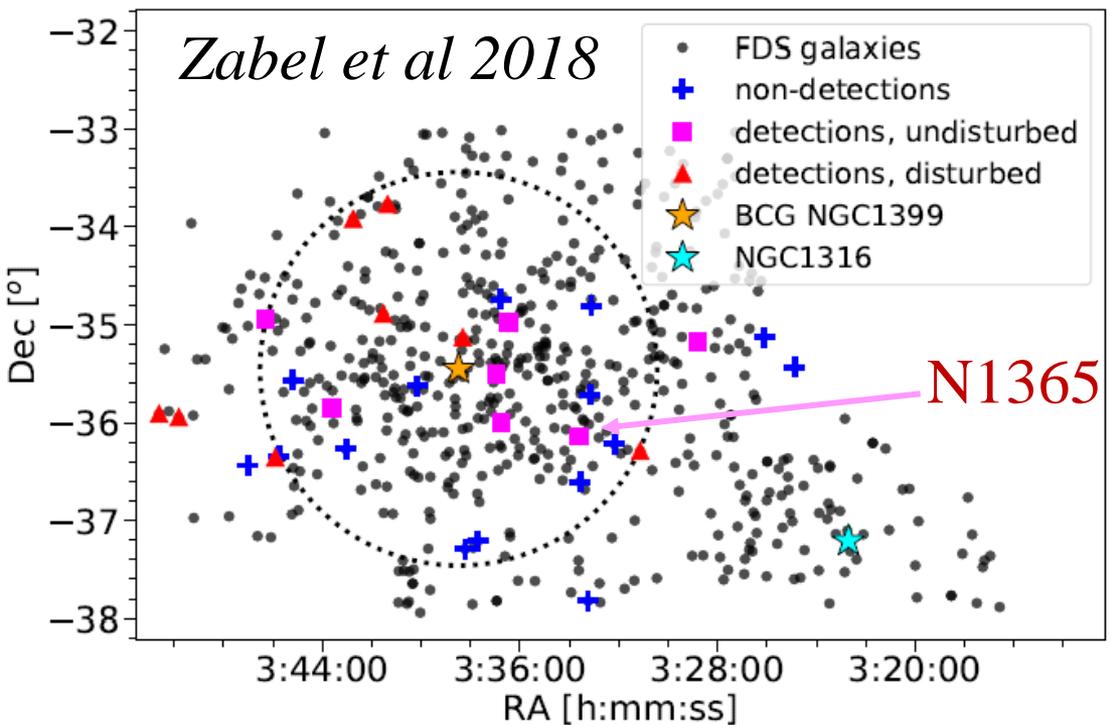
N1316

$2.9^\circ = 1\text{Mpc}$



Amas de Fornax à 20Mpc

Deux sous-amas, en cours de fusion?



Galaxies perturbées
Détection de gaz
moléculaire avec
ALMA

60' = 350kpc

Fornax A, N1316

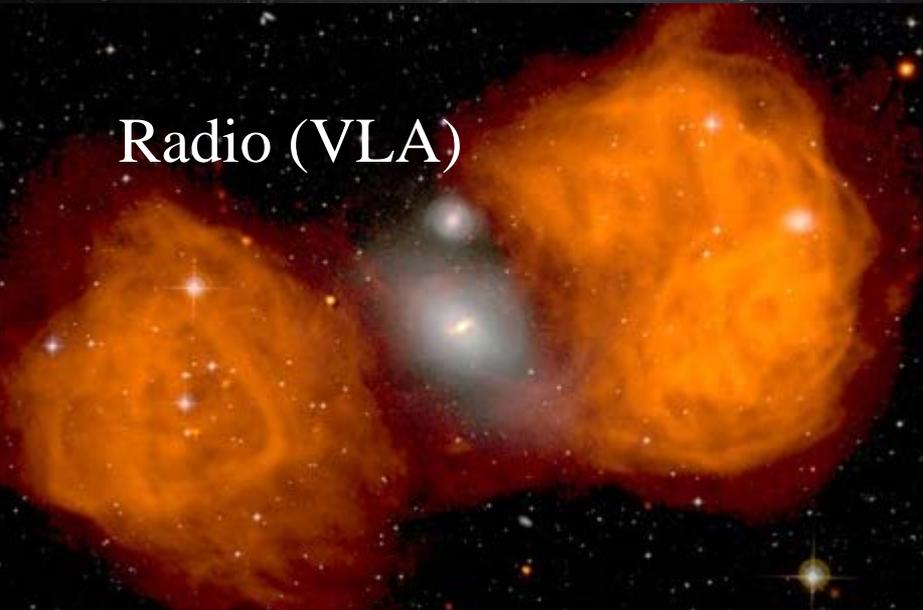
Les galaxies centrales
sont des cannibales

→ Souvent plusieurs noyaux

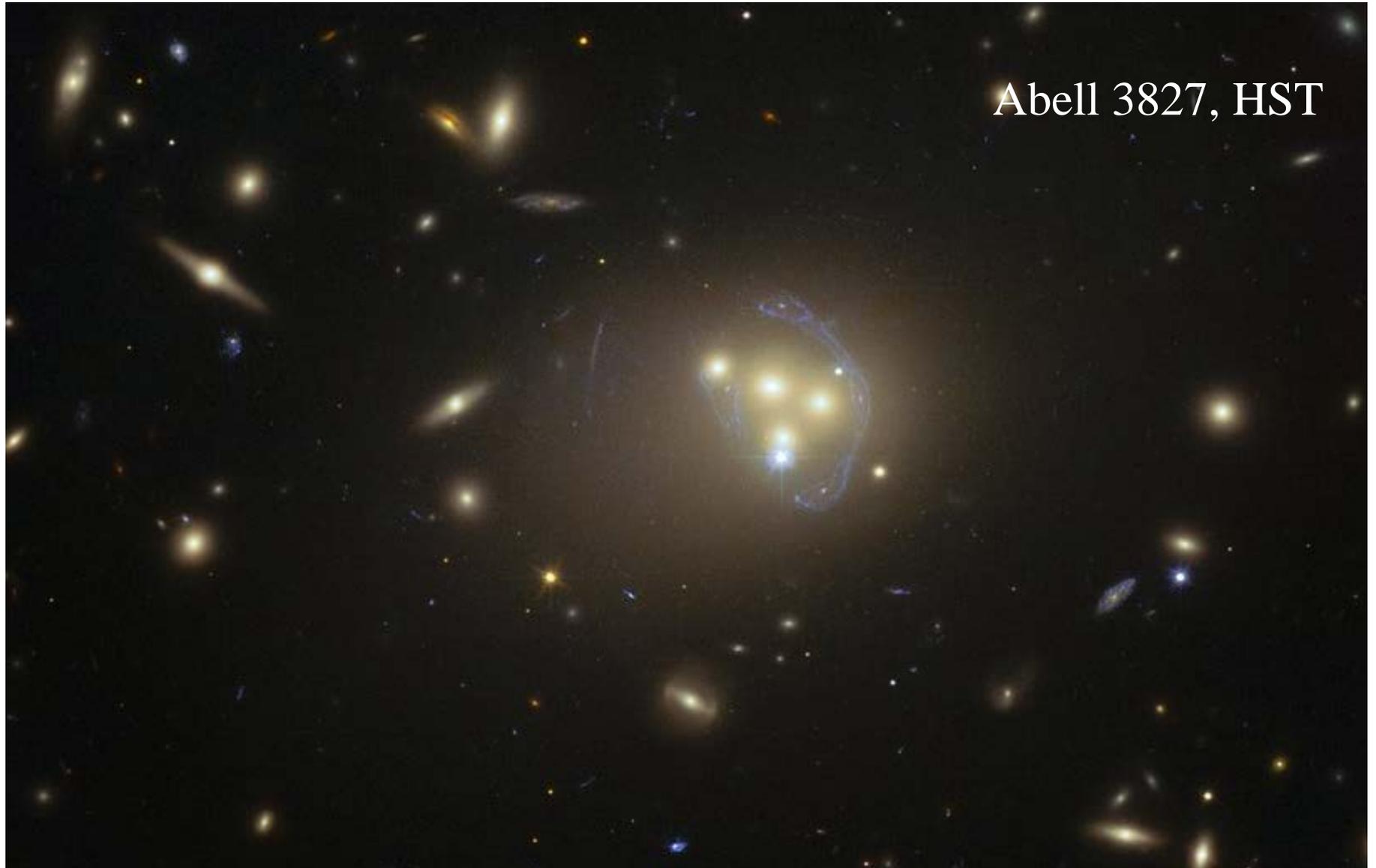
N1317

N1316

Radio (VLA)



Galaxies cD cannibales



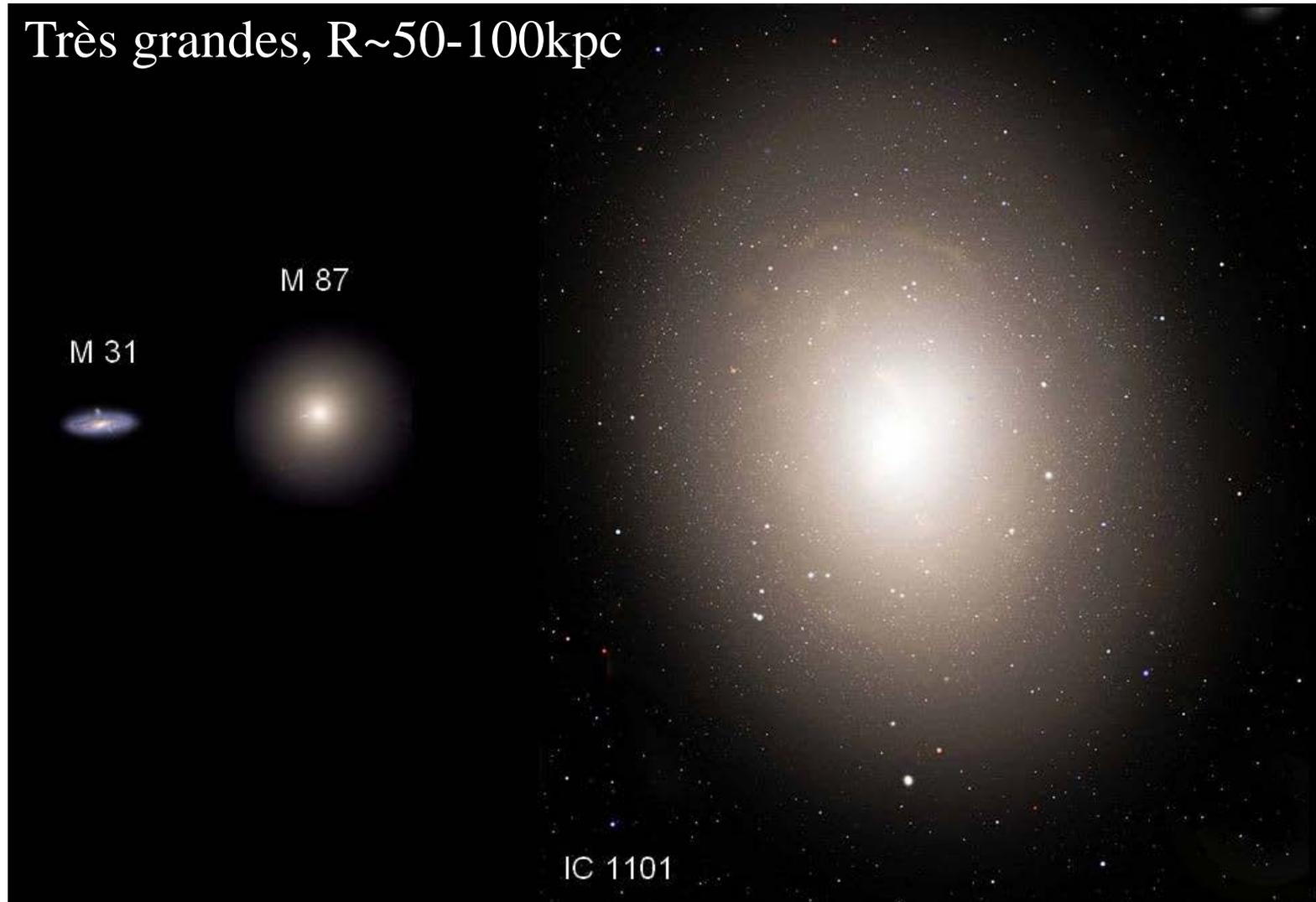
Galaxies cD, ou BCG : très spéciales

Très lumineuses, au moins $10 \times L_{\text{gal}}$

Très grandes, $R \sim 50-100 \text{ kpc}$

Alignées
avec l'amas

Barycentre
Espace et
vitesse



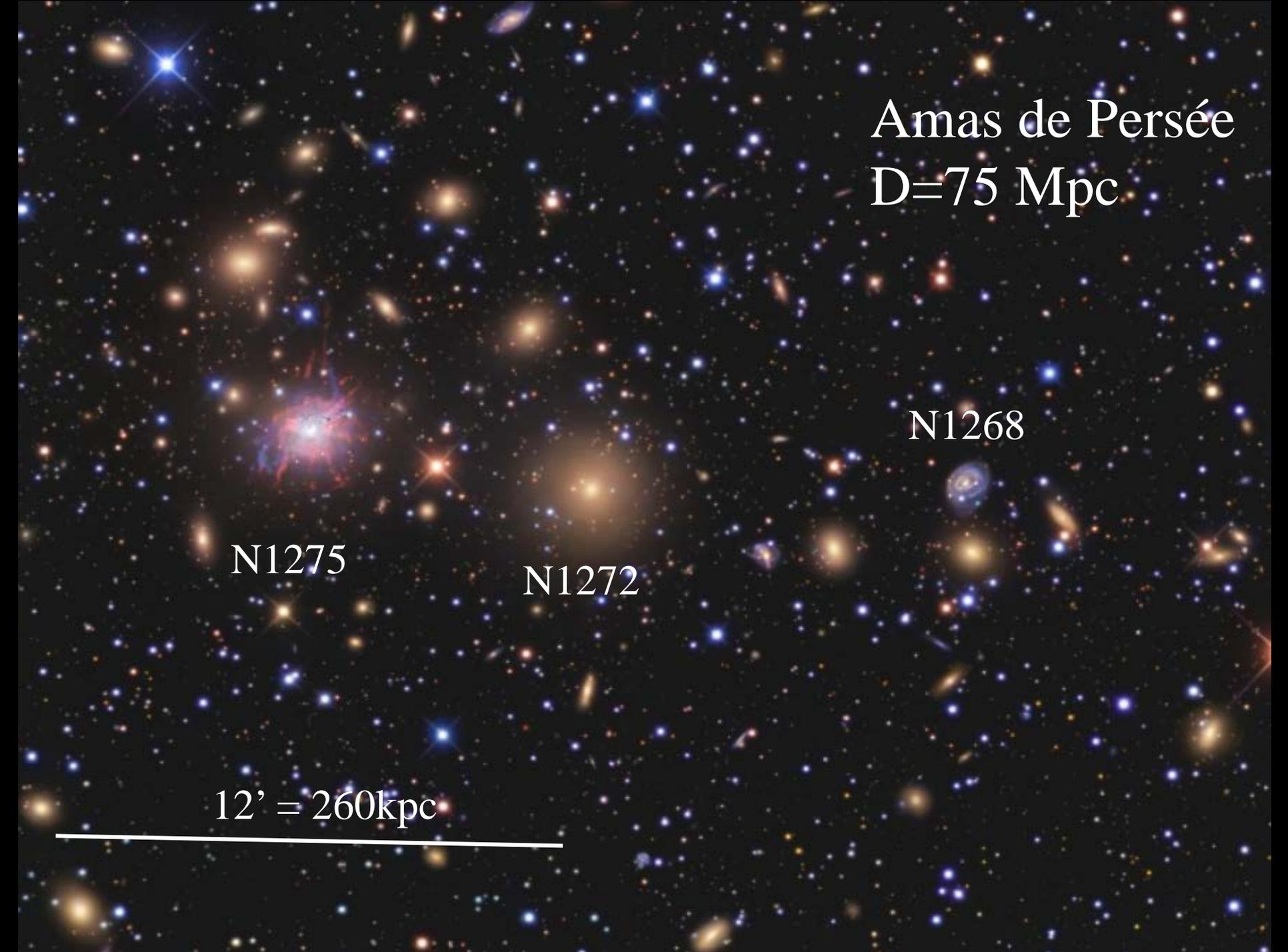
Amas de Persée
D=75 Mpc

N1275

N1272

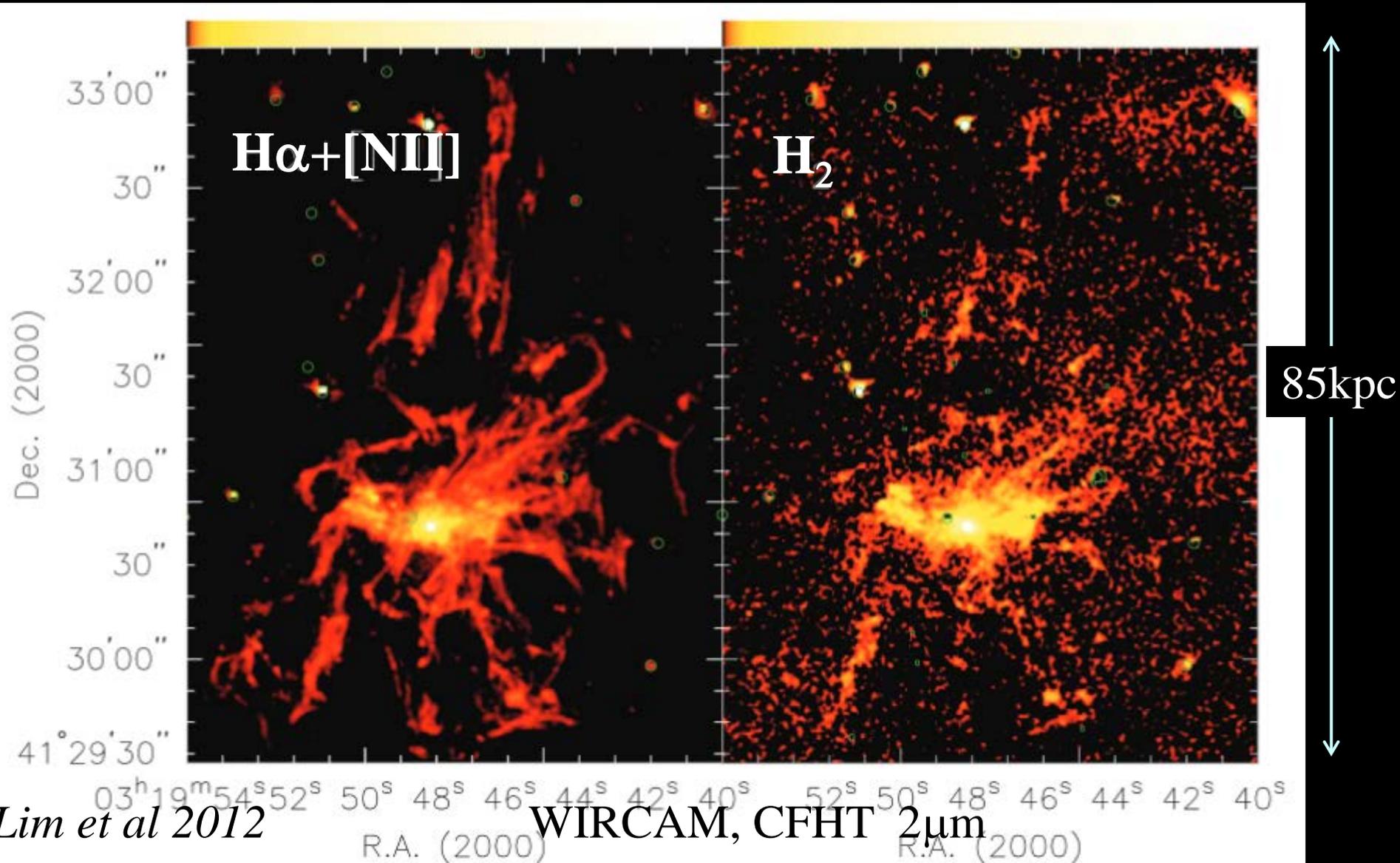
N1268

12' = 260kpc



H₂ dans les filaments H α

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



Amas de Persée

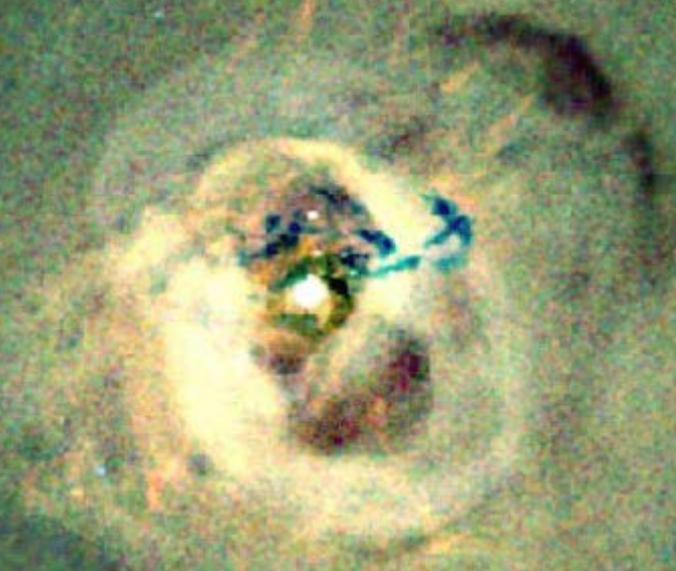
Galaxie centrale

N1275

3C84

Rayons X, sur
Optique H α

Cavités creusées
par le jet radio



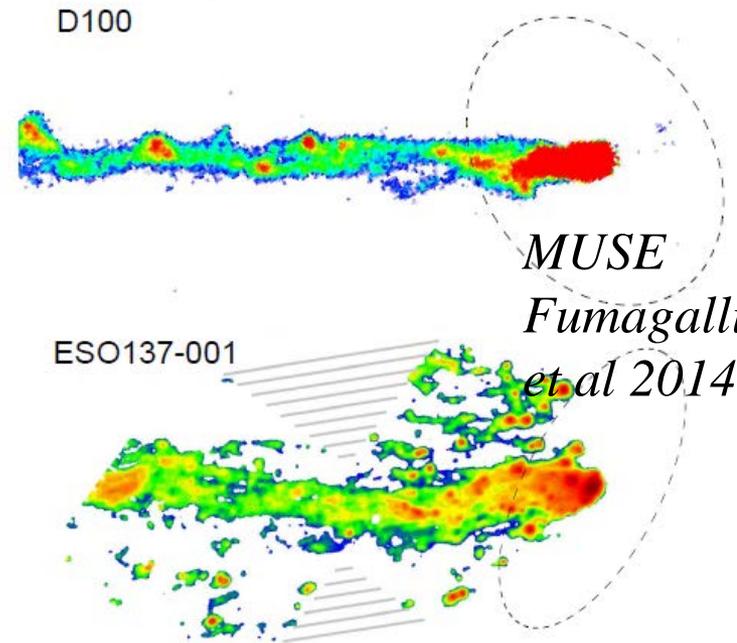
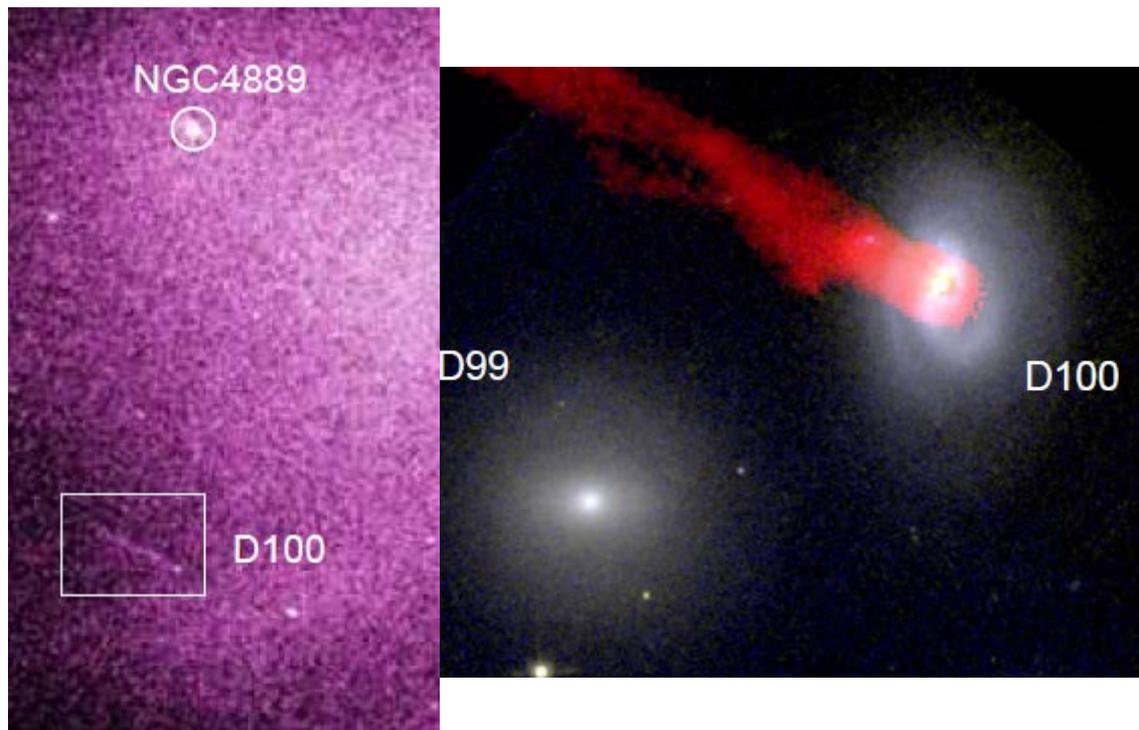
Amas de Coma à 100Mpc

N4874

N4889

9' = 260kpc

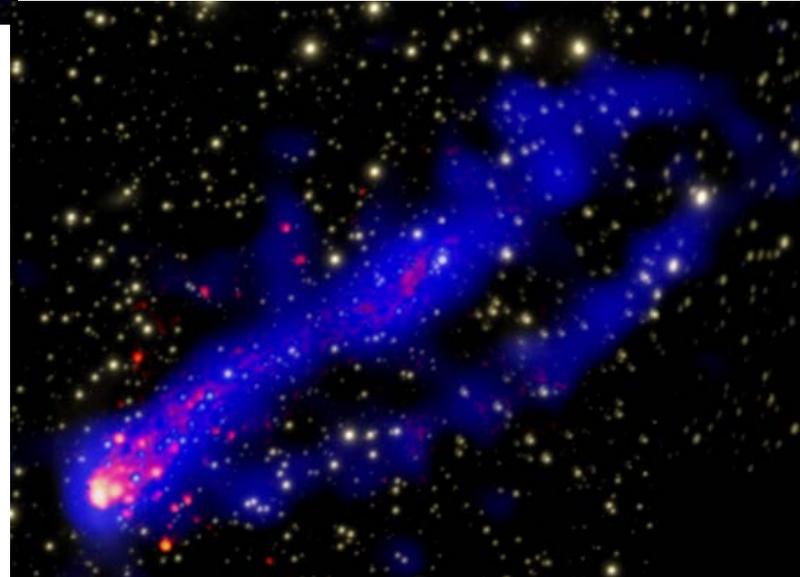
Balayage du gaz dans Coma



Filament X de 80kpc

D100: galaxie spirale entrant dans l'amas: le gaz est balayé par le milieu très chaud émetteur en rayons X

Jachym et al 2017



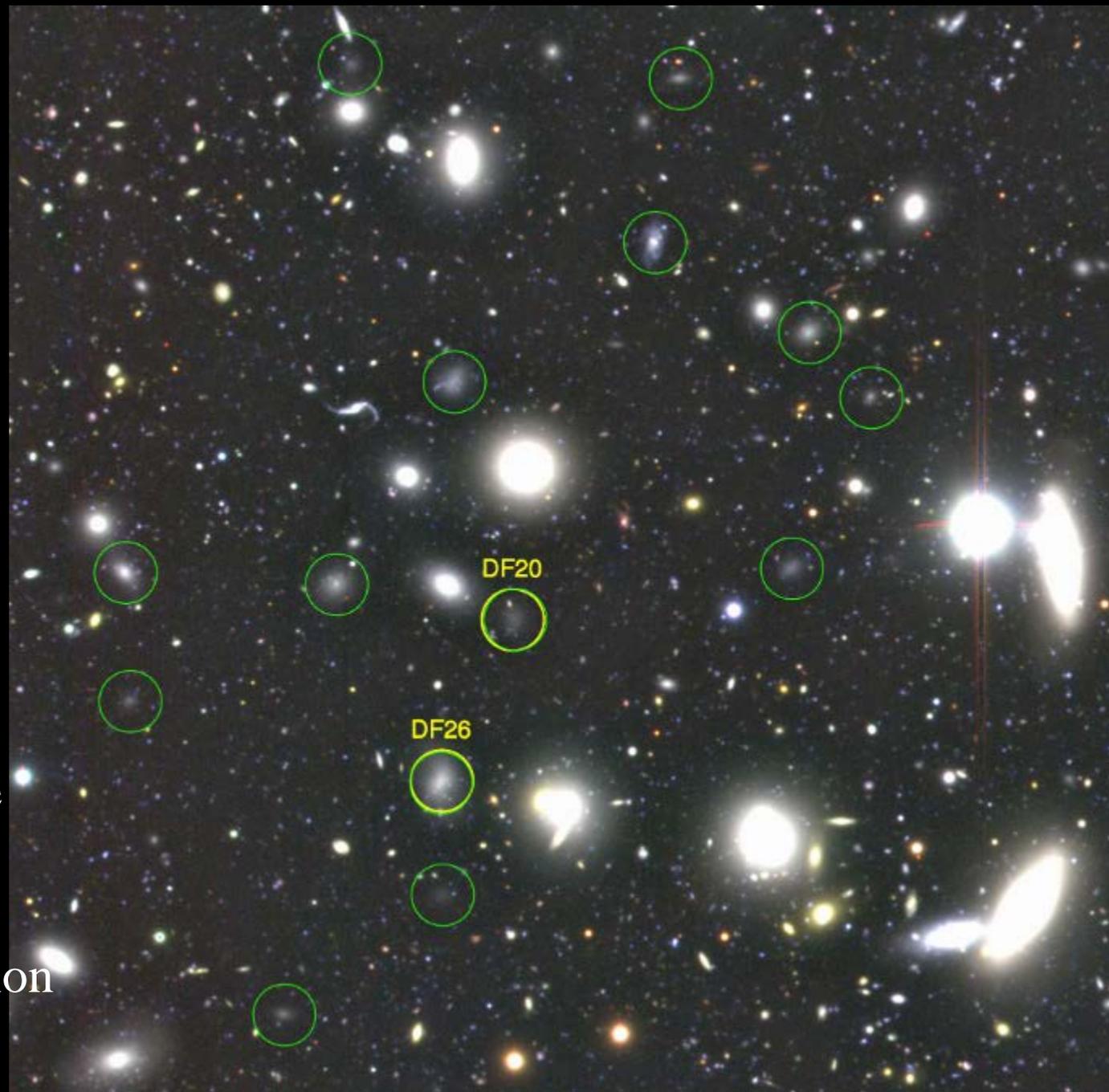
Galaxies
Ultra-diffuses
dans Coma

854 avec Subaru
(Koda 2015)

Même taille que la
Voie lactée
Concentrées
vers le centre

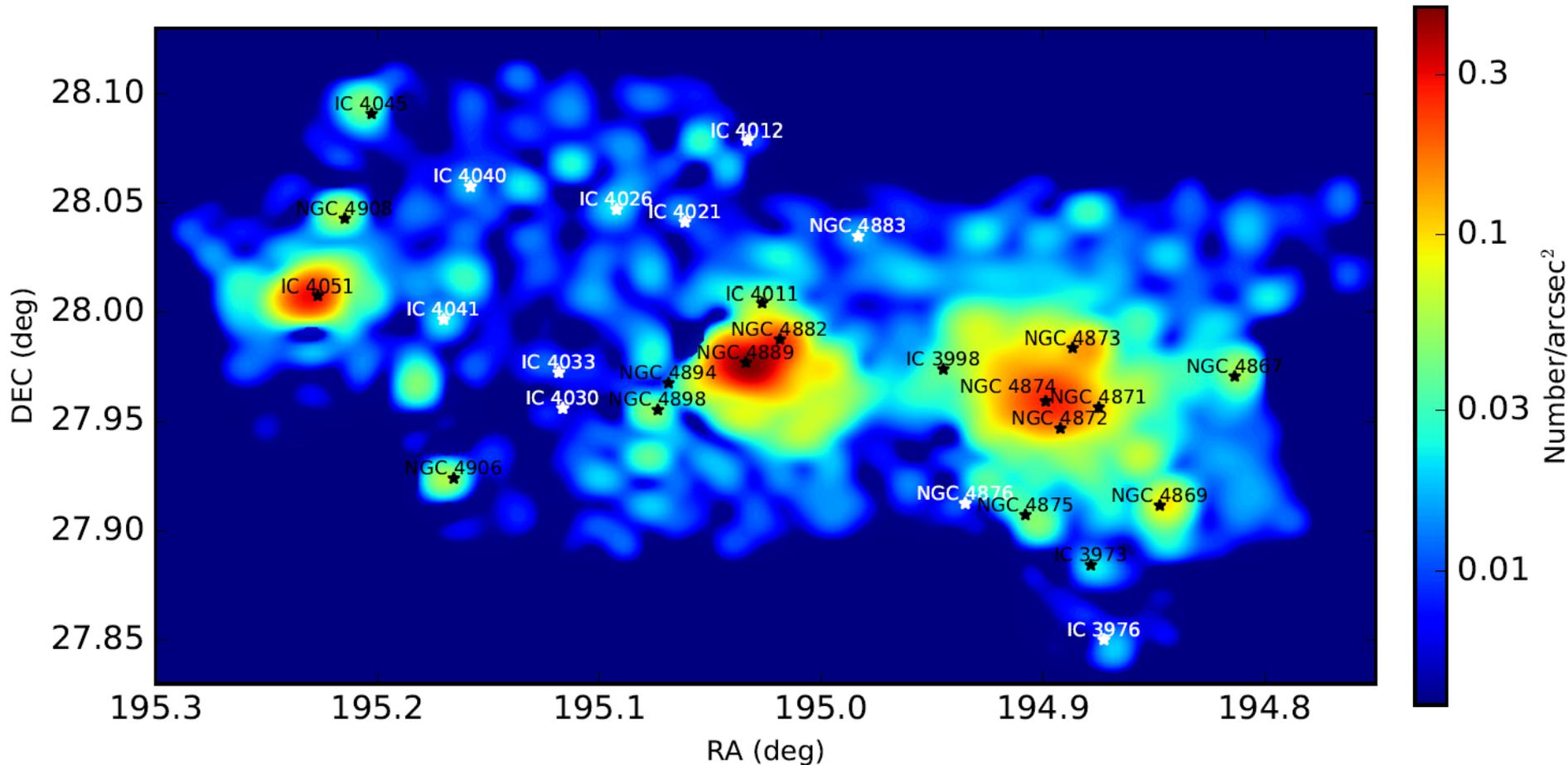
Plus grand nombre
que dans le champ

→ Effets d'évolution



Amas globulaires dans Coma

Il existe des étoiles intra-amas, provenant de l'interaction entre galaxies et aussi des amas globulaires: 22400 autour de NGC 4889, NGC 4874, et IC 4051



Profils de lumière et de masse

Profils de lumière magnitude $\propto r^{1/4}$, soit un profil de

De Vaucouleurs, comme les galaxies elliptiques, $I(r) = I_0 \exp(-r^{1/4})$

Le temps caractéristique de traversée dans un amas typique

vitesse de 1000 km/s,

taille 1 Mpc, $t_c = 10^9$ ans $\ll t_{\text{Hubble}}$

Les amas sont liés

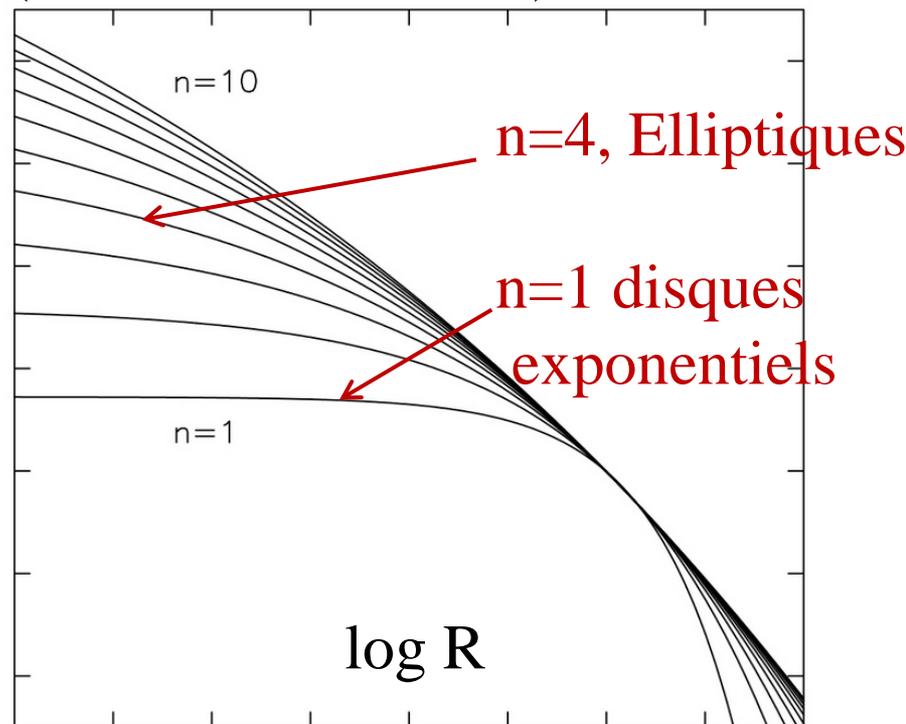
gravitationnellement et “relaxés”

Masse du Viriel $M = 7.5 \sigma^2 R_e / G$

Coma, $\sigma = 880$ km/s, $R_e = 1.5$ Mpc

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

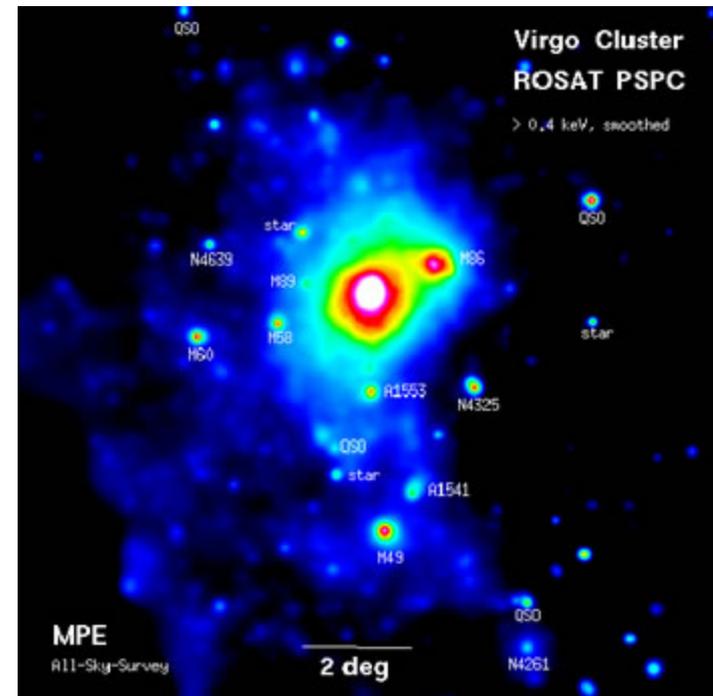
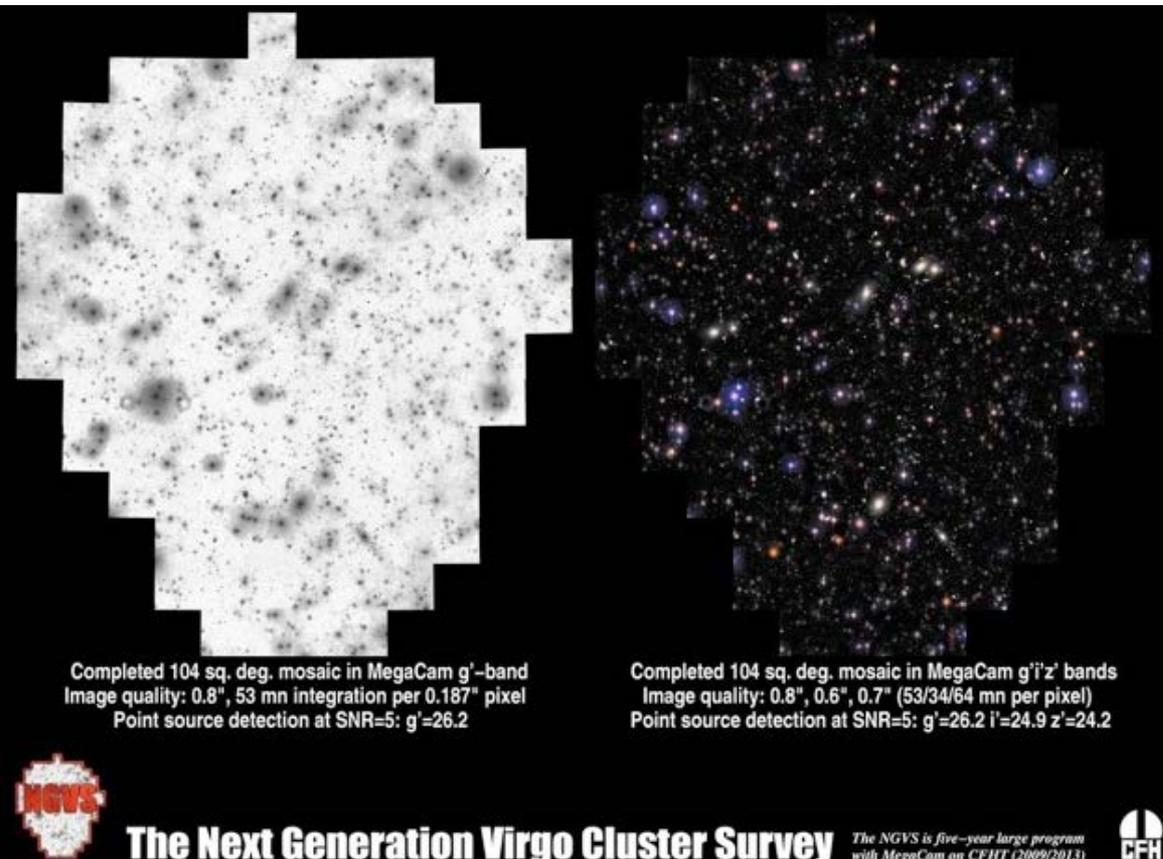
log I (brillance de surface)



Distribution de masse

$$L_b = 8 \cdot 10^{12} L_{b\odot} \rightarrow M/L_b = 250 M_{\odot} / L_{b\odot}$$

La masse de gaz chaud (rayons X), peut aller jusqu'à 10 fois la masse visible des galaxies



Masse visible ~ 10% M_{tot}

Où est la matière noire?

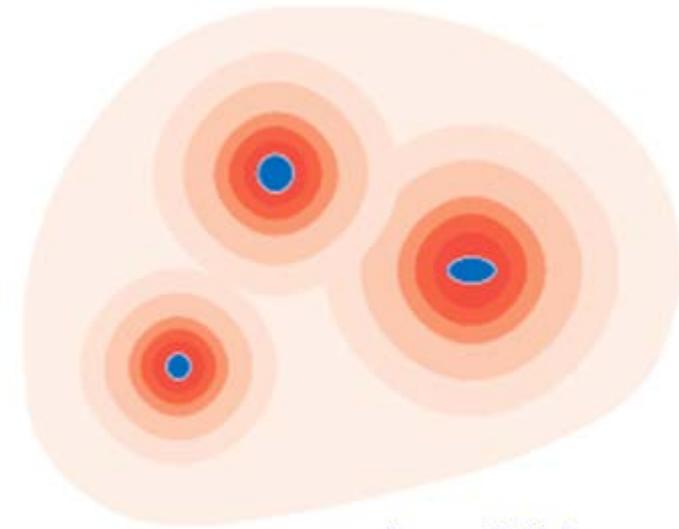
Dans des halos autour des galaxies, et aussi dans l'espace inter-galactique, ou intra-amas

Lors de la formation de l'amas, la matière est balayée

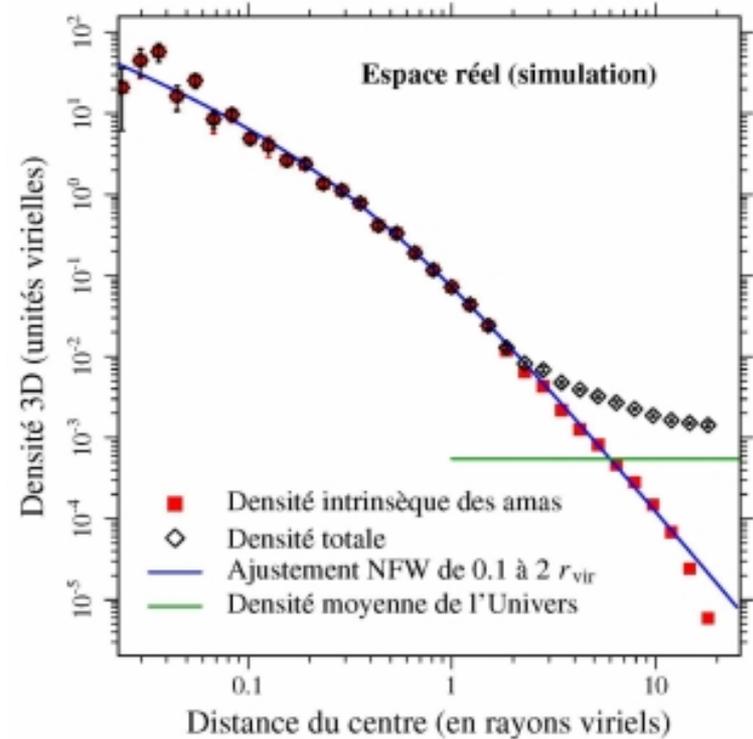
- Matière noire mise en commun
- Le gaz est chauffé à $T_{\text{vir}} \sim 10^7 - 10^8$ K

Les profils NFW sont déduits:

- ▶ De la dispersion de vitesses des galaxies
- ▶ De l'hydrodynamique du gaz chaud
- ▶ Des lentilles gravitationnelles



Matière visible
Matière noire



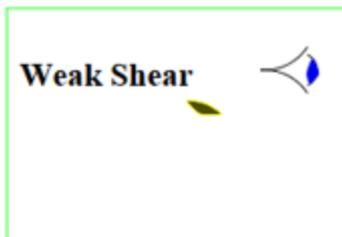
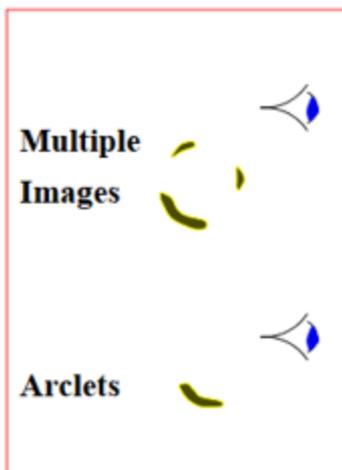
Outil: lentille gravitationnelle

Observateur

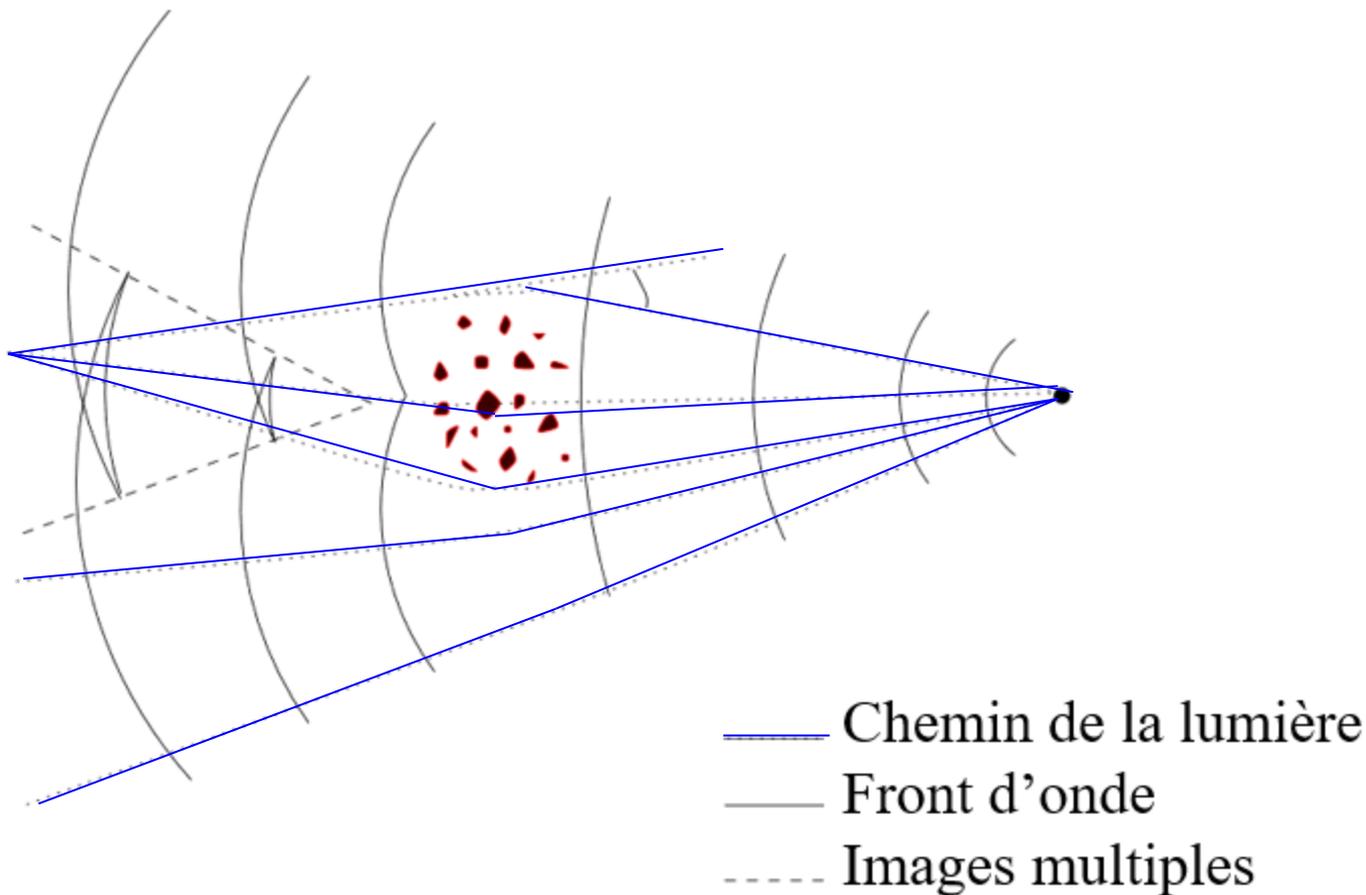
Amas de galaxies

Galaxie de fond

Non-linéaire



Linéaire



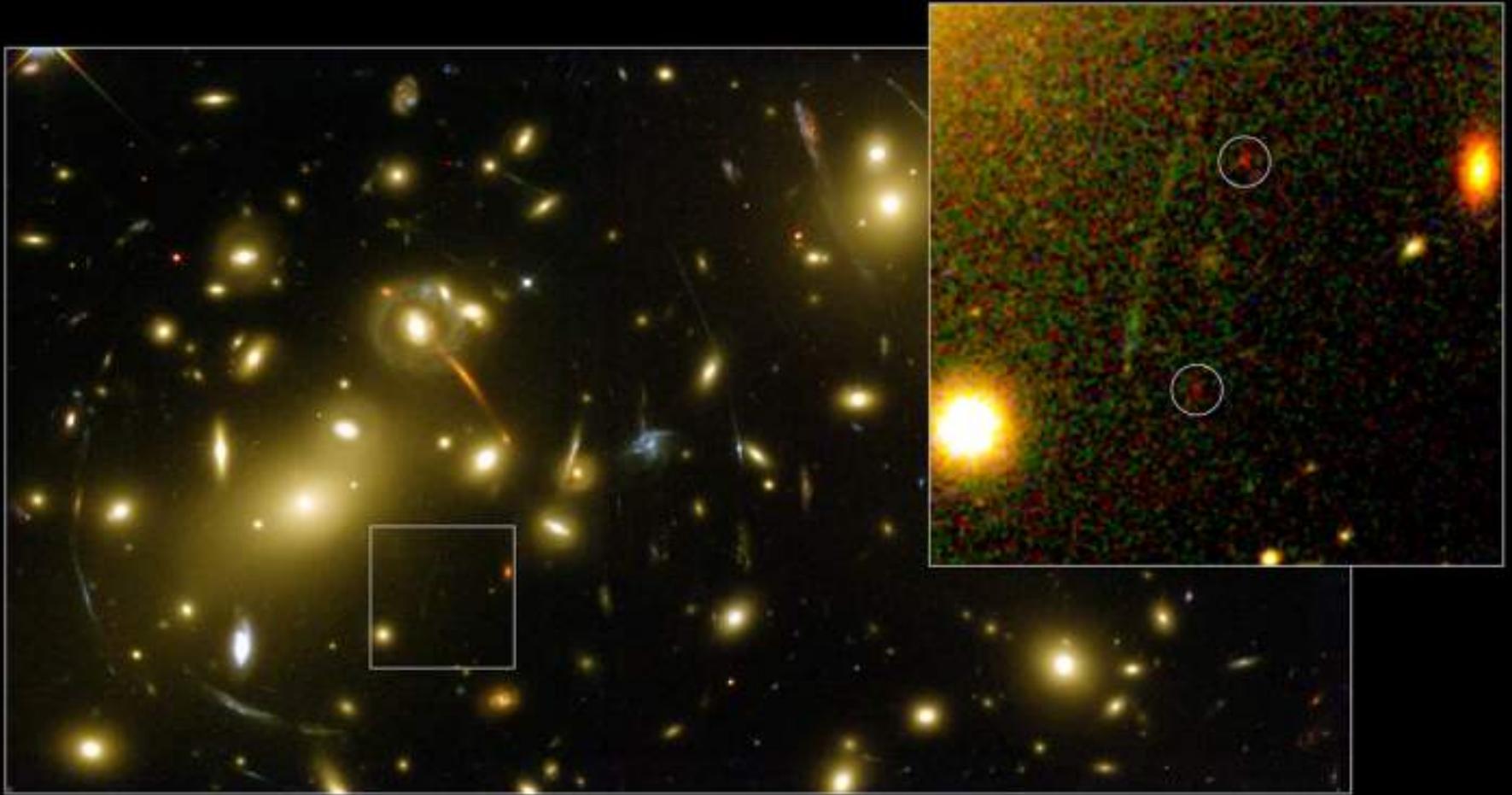
Kneib, 2000

Lentilles et arcs dans Abell 2218



A. Fruchter et al, HST
Abell 2218 $z \sim 0.176$ $D \sim 700$ Mpc

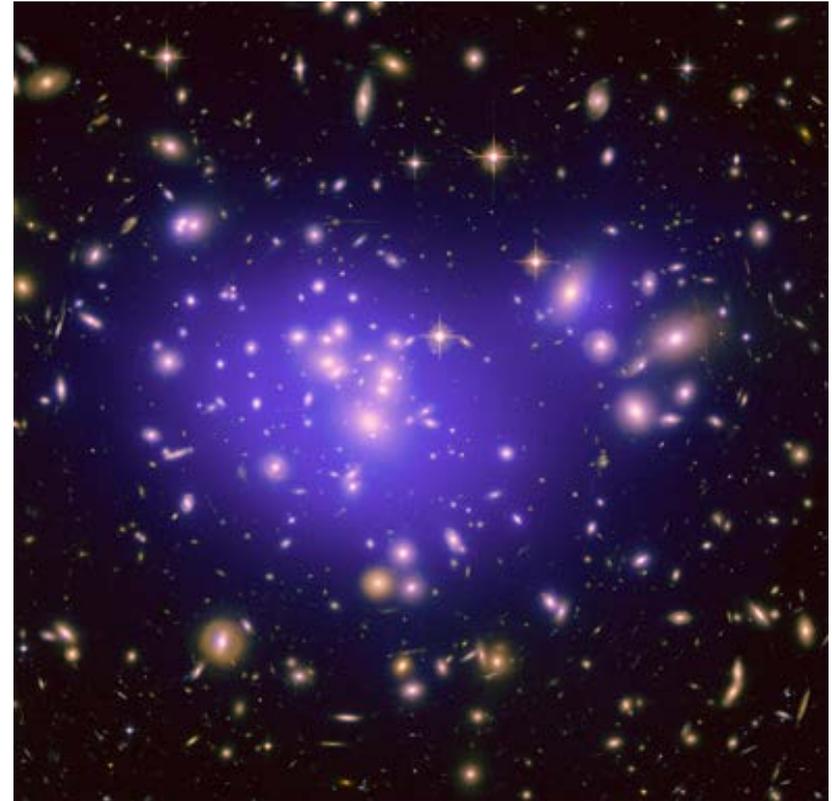
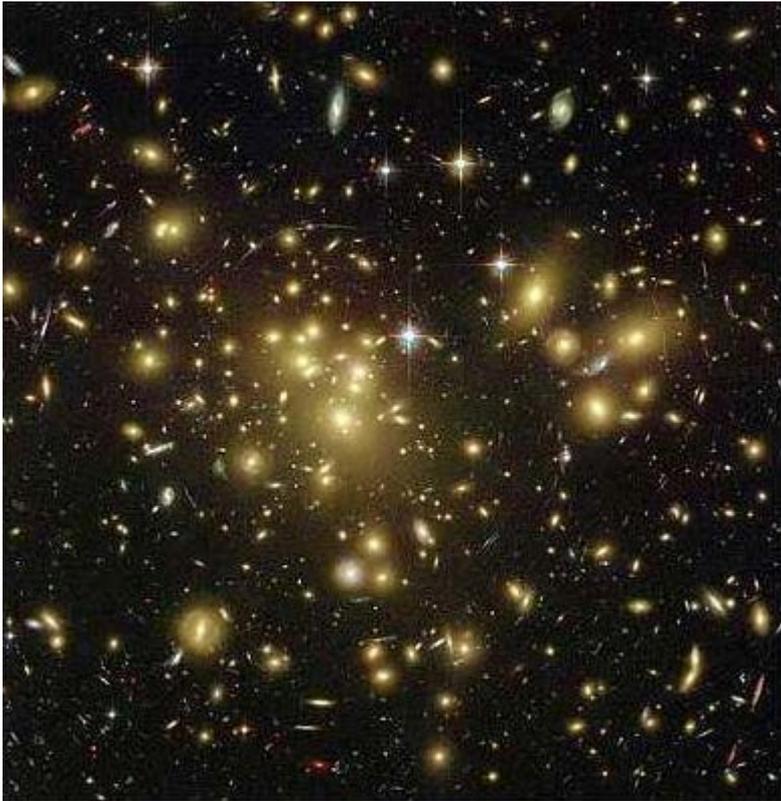
Abell 2218 (Details)



Kneib et al., 2004, Galaxie amplifiée $z \sim 7.0$, 2 images rouges
Arc orange = E gal @ $z \sim 0.7$; Galaxies bleues = SF galaxies à $z \sim 1-2.5$.

Abell 1689

En bleu: matière totale

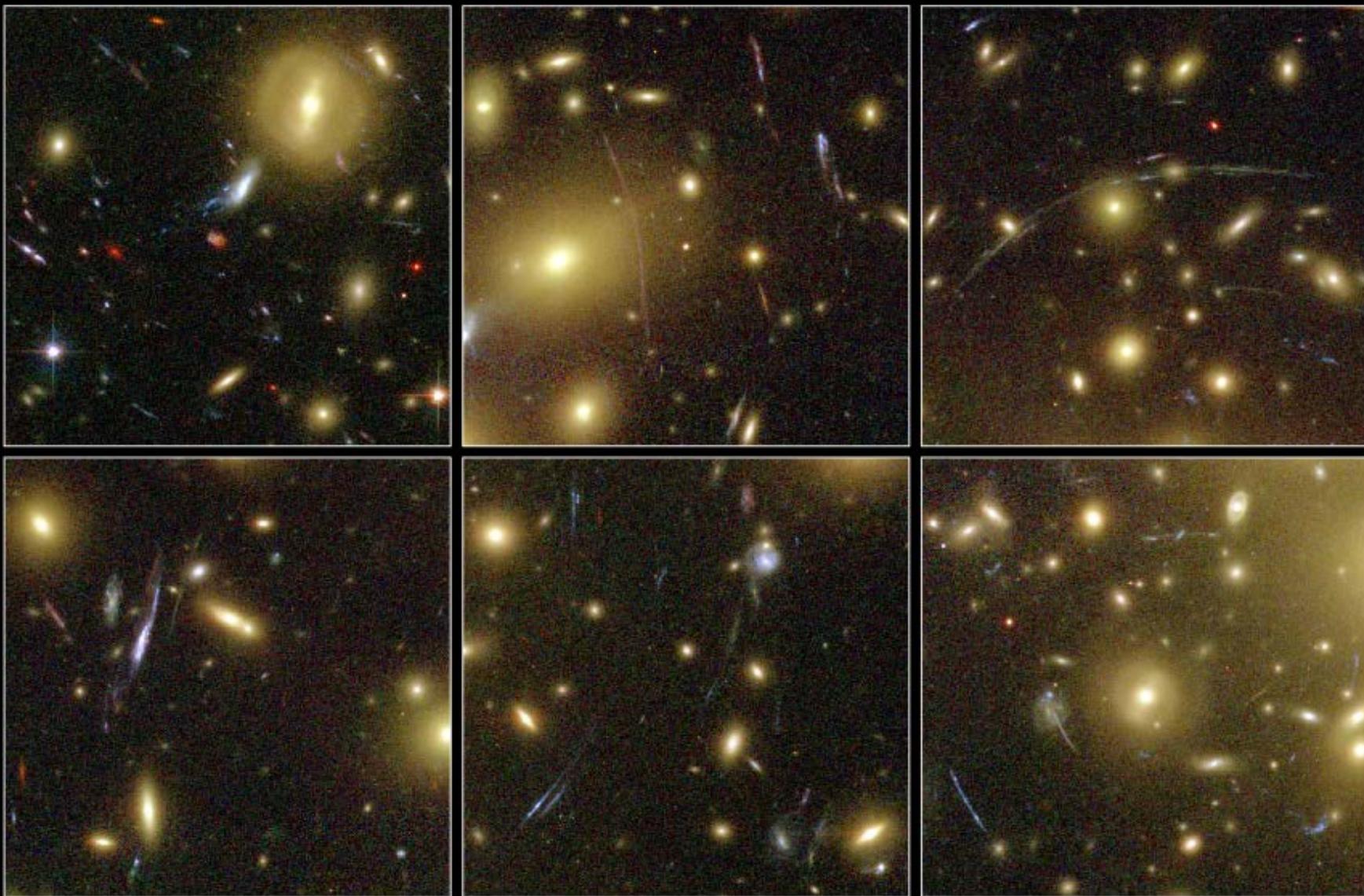


Abell 1689, $z \sim 0.183$, 800Mpc

Le plus grand anneau d'Einstein, $\propto M d_{LS}/(d_L d_S)$

le plus grand nombre d'arcs et de contraintes

→ Modèle de masse précis et exact (*Zekser et al 2006*)



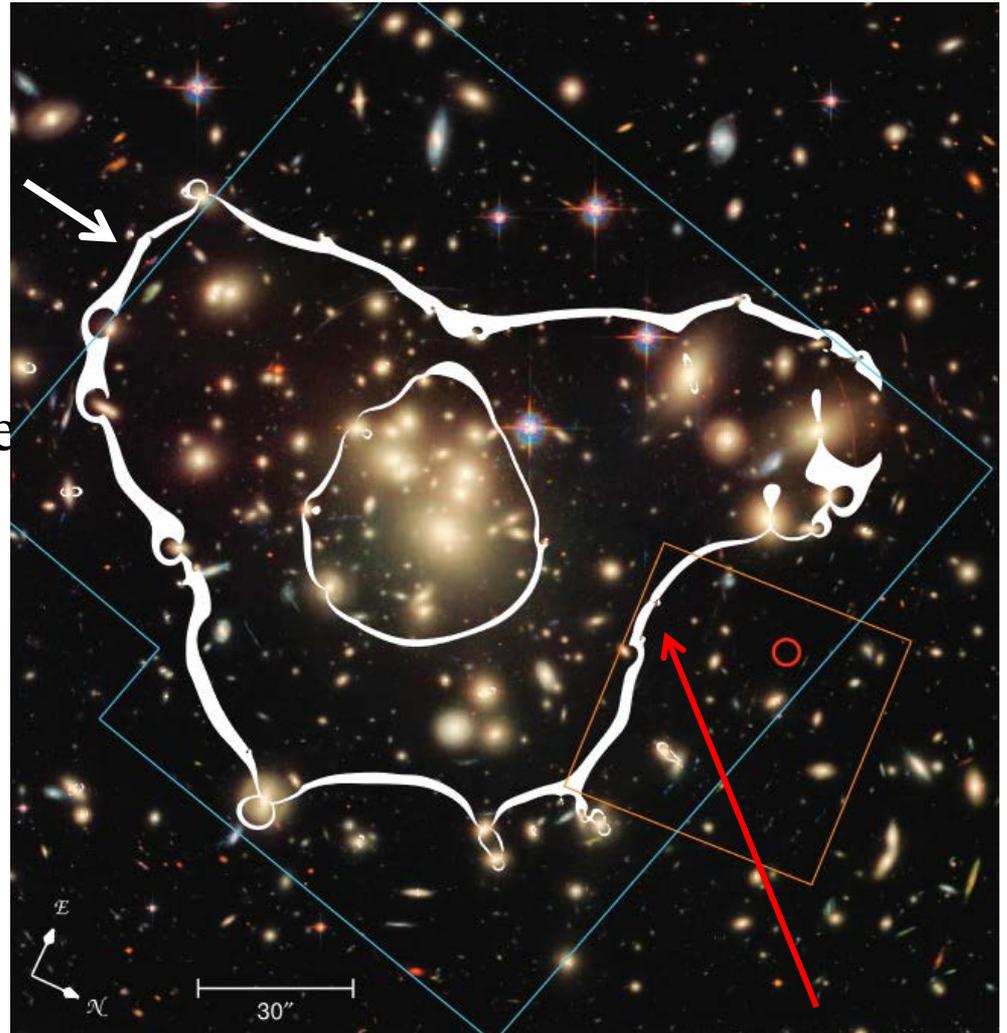
Galaxy Cluster Abell 1689 Details
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

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



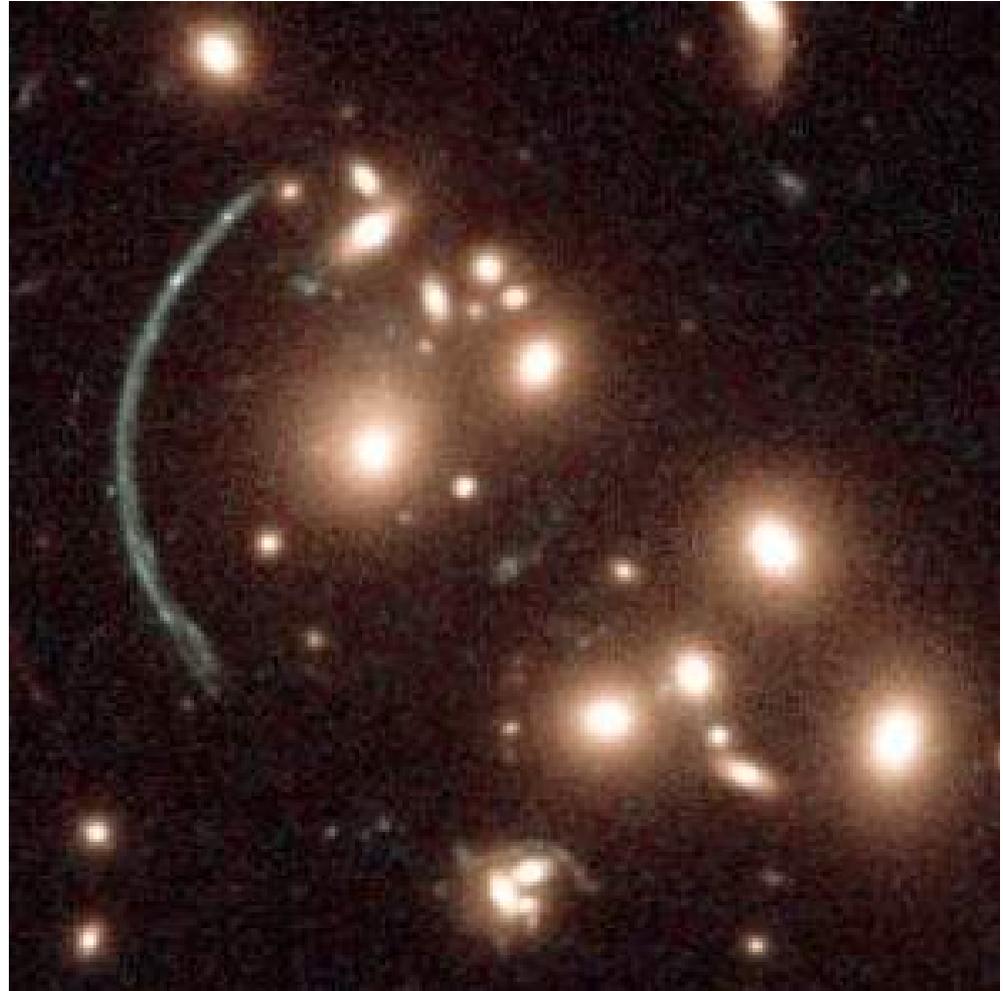
L. Bradley et al 2008

Magnification
d'un facteur 9

CL2244-02 – Les halos de matière noire des galaxies sont tronqués

Sous halos
de matière noire

Mais des halos
plus petits
que pour les
galaxies de champ



HST+WFPC2 - I. Smail et al., 1997, P. Natarajan et al. 2002.

CL0024+1654

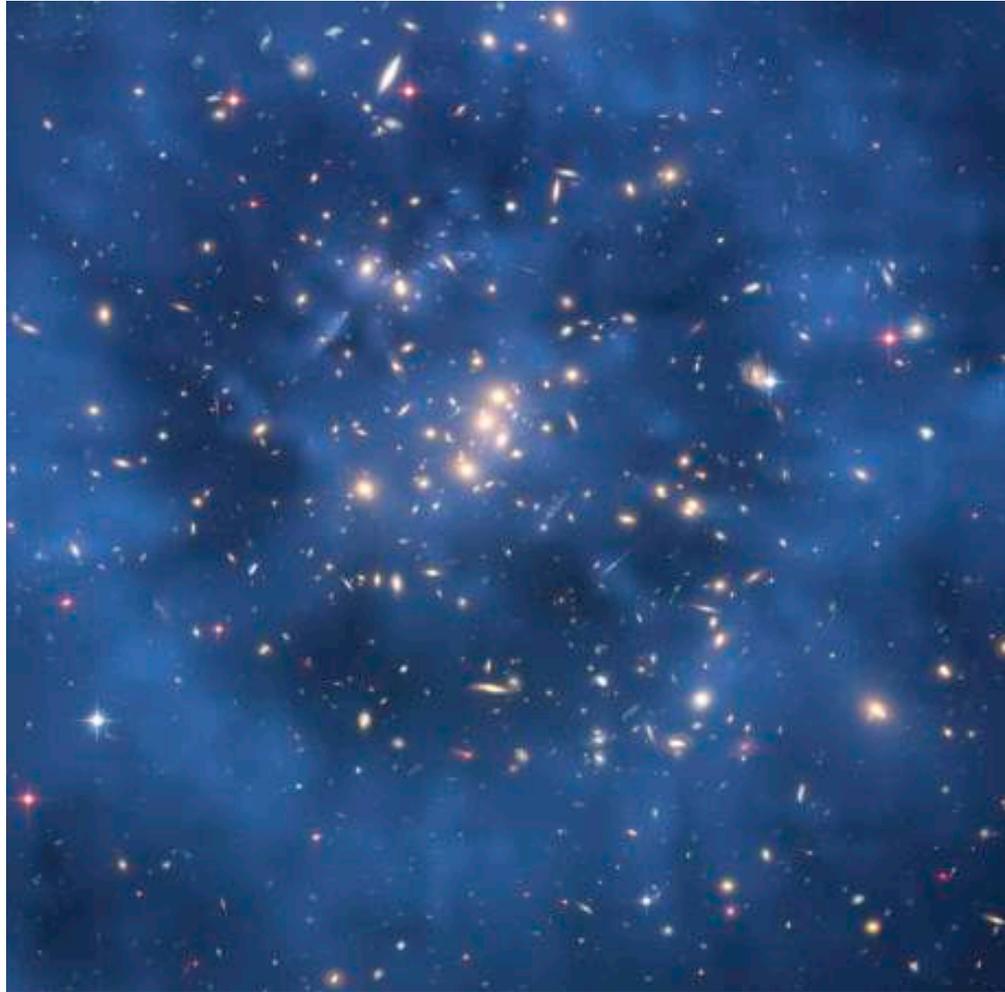
Les arcs bleus
viennent d'une galaxie
à $z=1.675$

5 images
gravitationnelles



HST: Colley et al 1996 CL0024+1654 $z \sim 0.391$ ~ 1000 Mpc

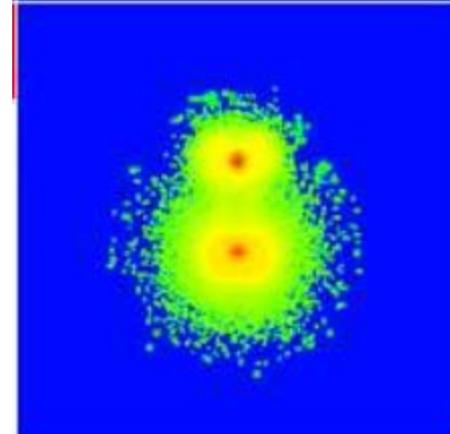
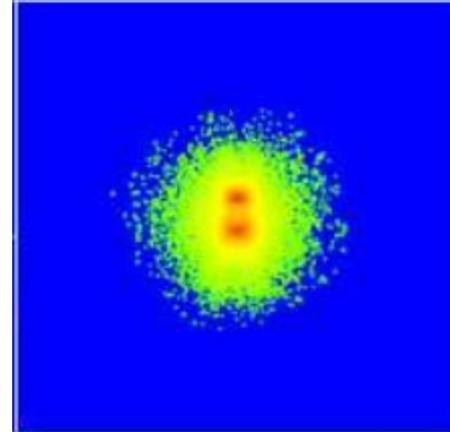
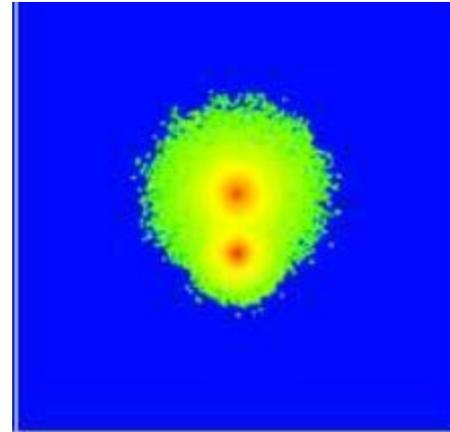
CL0024+1654 – Anneau de matière noire - Résultat d'une Collision?



M. J. Jee, H. Ford et al., 2007
Anneau de ~ 2 Mpc de diamètre

Simulations
ne confirment
pas

*Zuhone et al
2009*



Fonction de Luminosité des Galaxies

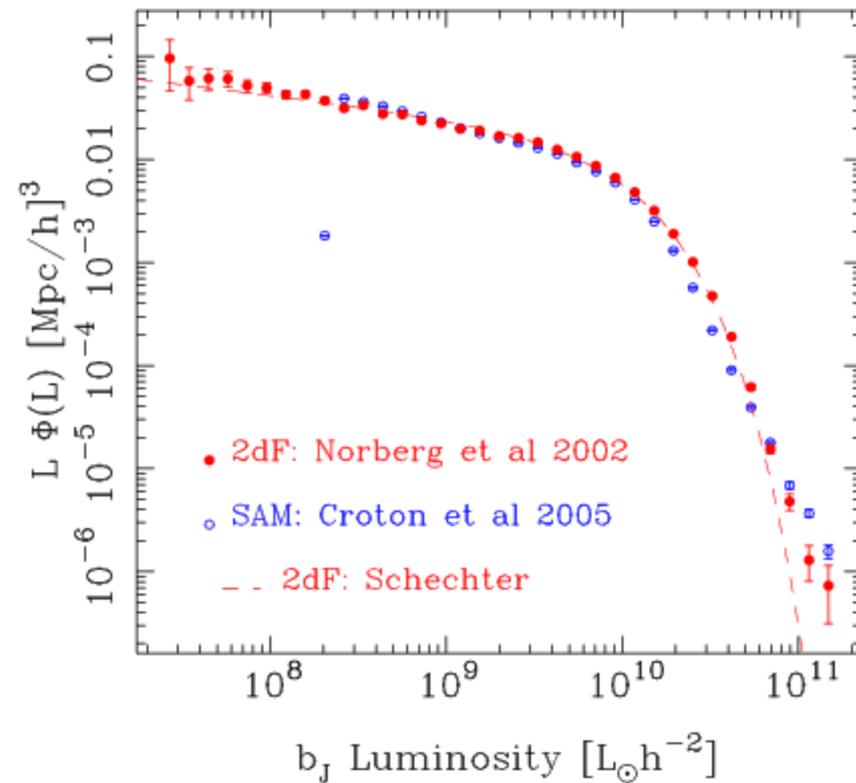
$$\Phi(L) = \Phi_* \left(\frac{L}{L_*} \right)^\alpha \exp \left(-\frac{L}{L_*} \right) \frac{dL}{L_*}$$

Φ nombre de galaxies entre L et $L + dL$

Le coude de la distribution,
où le nombre chute exponentiellement
est $L_* = 2 \times 10^{10} L_\odot \sim L_{\text{MW}}$

La fonction est une loi de puissance
de pente $\alpha = -1.2$, favorisant les plus
faibles L

→ 40W dans une sphère de 1 AU!



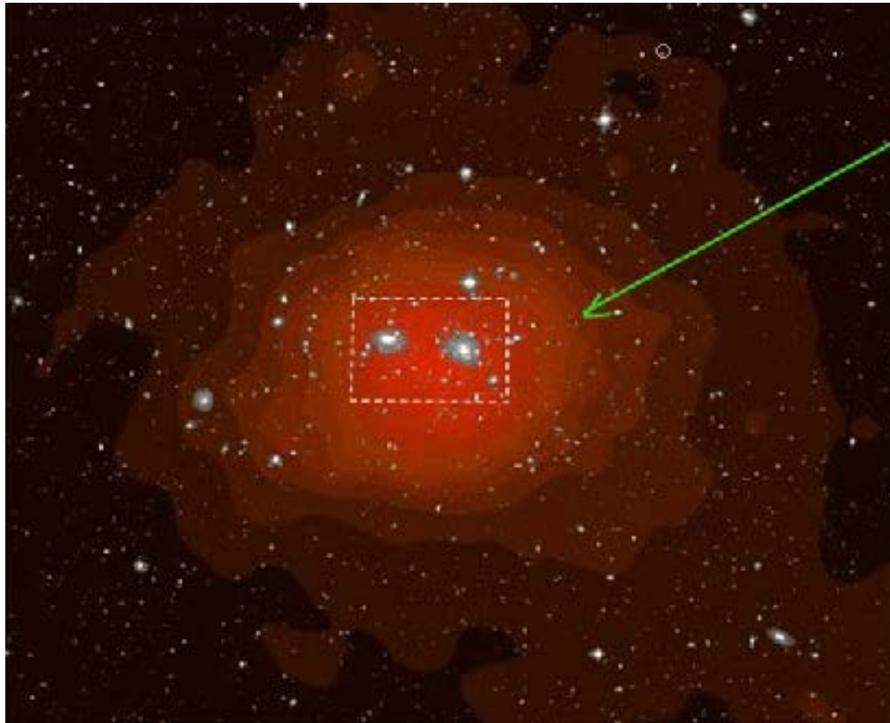
Principal composant baryonique

Gaz chaud, $T=1-10\text{keV}$ ou 10^7-10^8 K

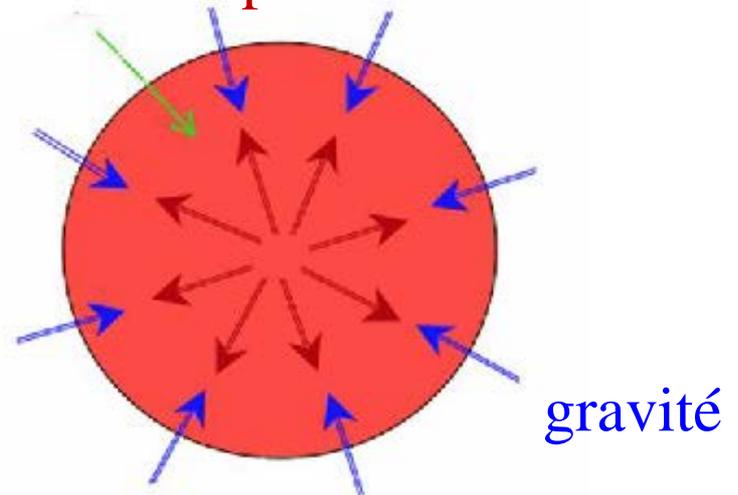
$n \sim 10^{-3} - 10^{-1}\text{cm}^{-3}$ $L \sim 10^{43-46}\text{ erg/s} \sim 10^{-2} - 10^{-4} L_{\text{opt}}$

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

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



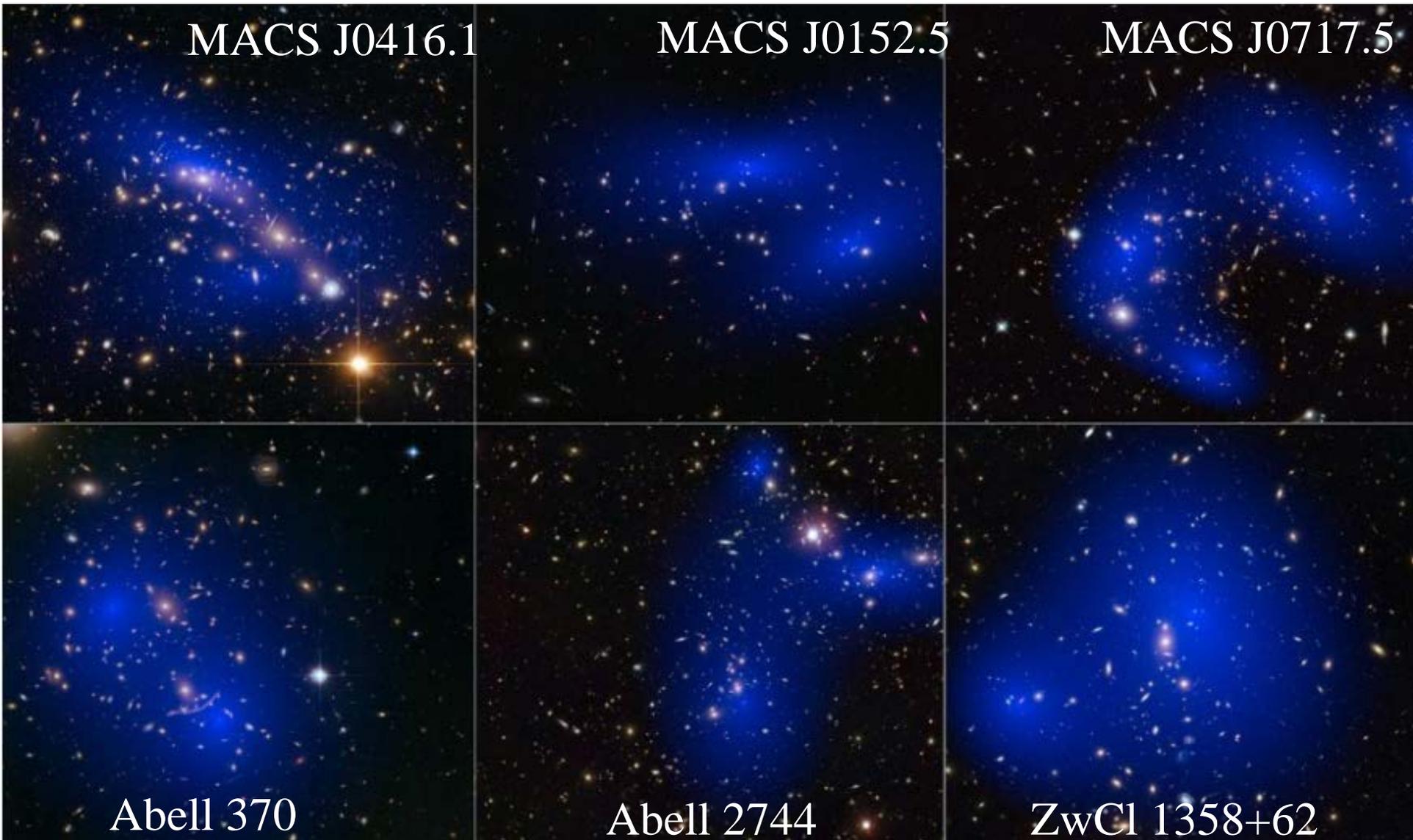
Gaz chaud: pression



Equilibre hydrostatique

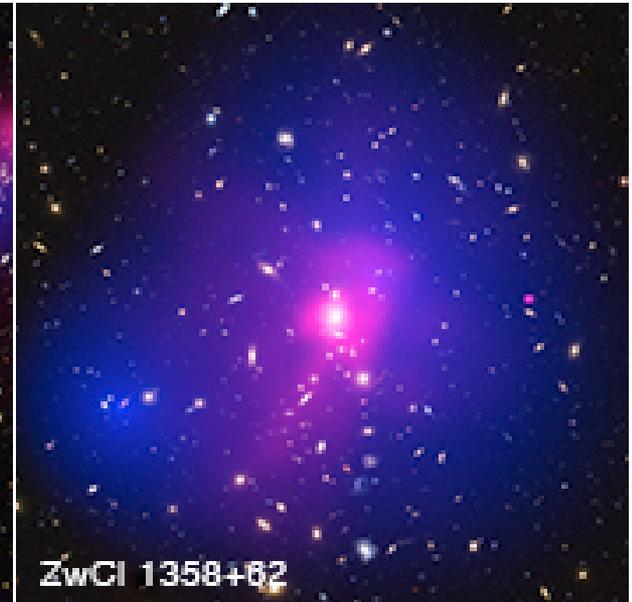
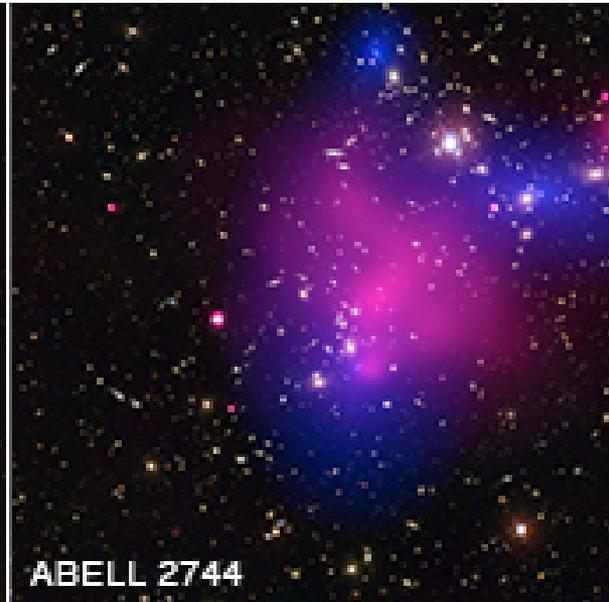
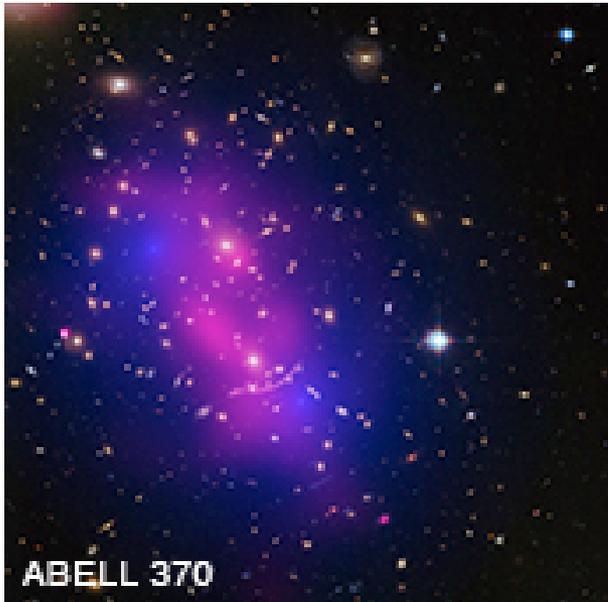
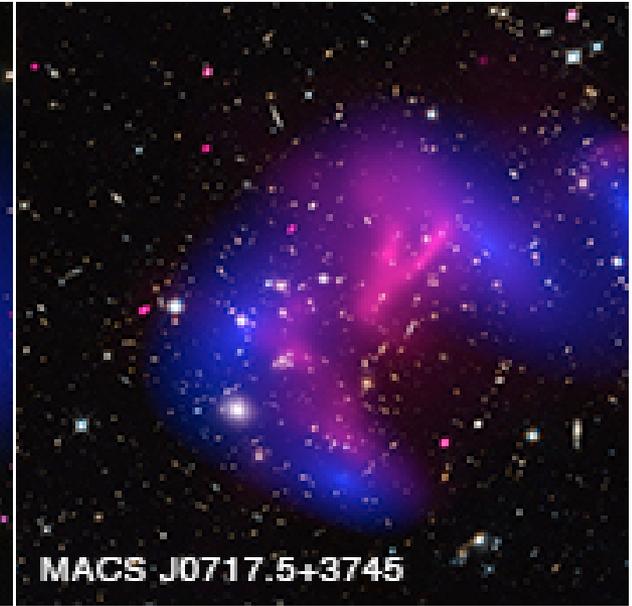
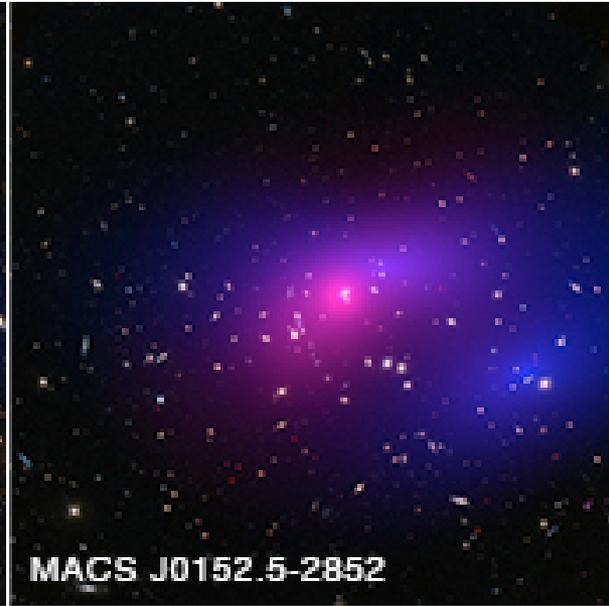
Amas de Coma: gaz chaud **en rouge**

Cartographie de la matière noire (WL)



Massey et al 2015

Comparaison avec les rayons X



Massey et al 2015

IDCS J1426.5+3508

Un amas à très
grand redshift
 $z=1.75$

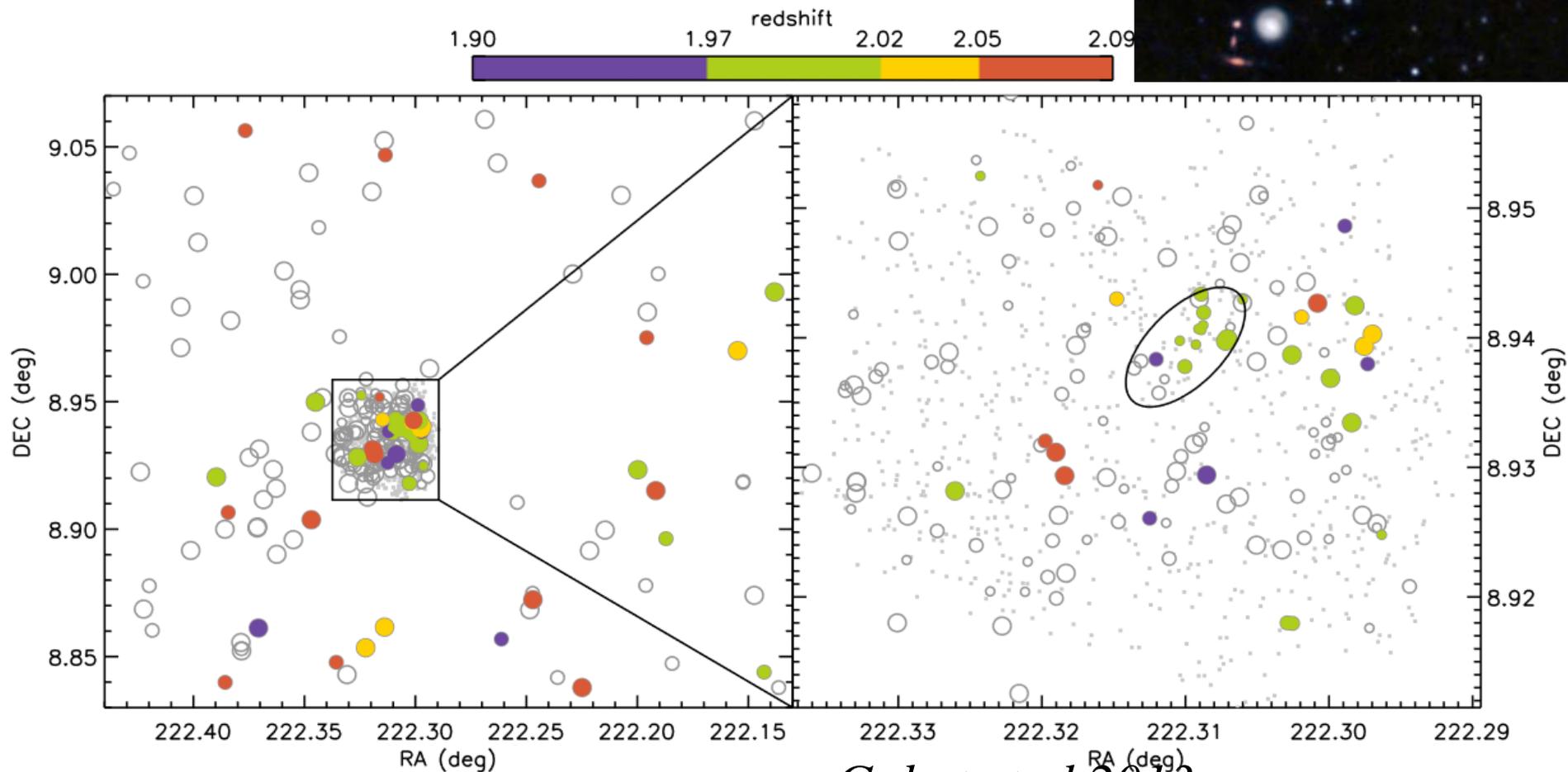
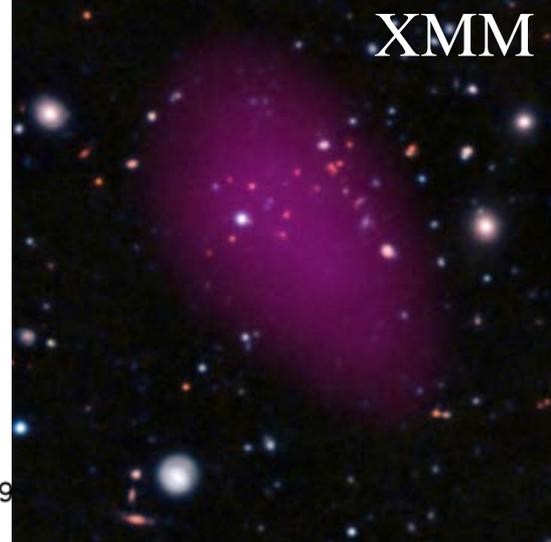
Bleu: X-ray
Rouge Spitzer
Blanc: HST

Le plus lointain
avec weak lensing
 $M = 2.3 \cdot 10^{14} M_{\odot}$
Wenli Mo+ 2016

CL J1449+0856, $z=2.07$

Le plus lointain, $M = 6 \cdot 10^{13} M_{\odot}$

XMM

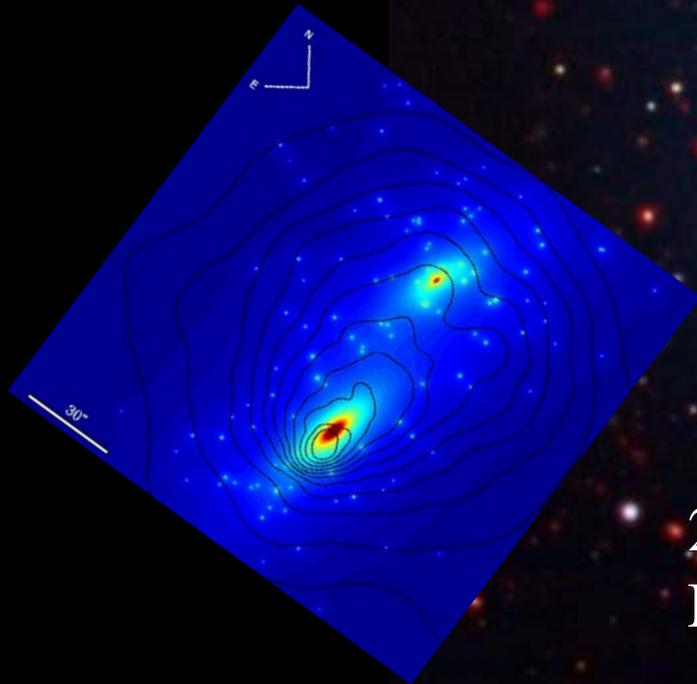


Gobat et al 2013

L'amas le plus massif: El Gordo

Découvert en X et SZ
Menenteau et al 2012

$$M = 2.3 \cdot 10^{15} M_{\odot}$$



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

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

Comment rechercher les amas?



XMM

Les amas riches se trouvent le plus facilement en rayons X

Les amas riches ont un puits de potentiel profond → riche en X

Ce sont les amas virialisés et relaxés qui émettent le plus

L'émissivité $\sim n^2$, pratiquement pas d'avant-plan X

(juste un léger fonds de rayonnement X)

En comparaison aux surveys optiques, pas de confusion sur la los
(très important à grand redshift)

Plusieurs surveys existent: **EMSS** (Einstein Medium Sensitivity

Survey) 800 deg², $z \sim 0.05 - 0.55$); **RDCS** (ROSAT

Deep Cluster Survey) 100 deg², $z \sim 1$); **RASS** (ROSAT

All Sky Survey); **XCS** (XMM cluster survey); **Chandra**

Aujourd'hui, nbre d'amas en X= 5 000 avec ~500

où les températures et abondances en Fer sont mesurées

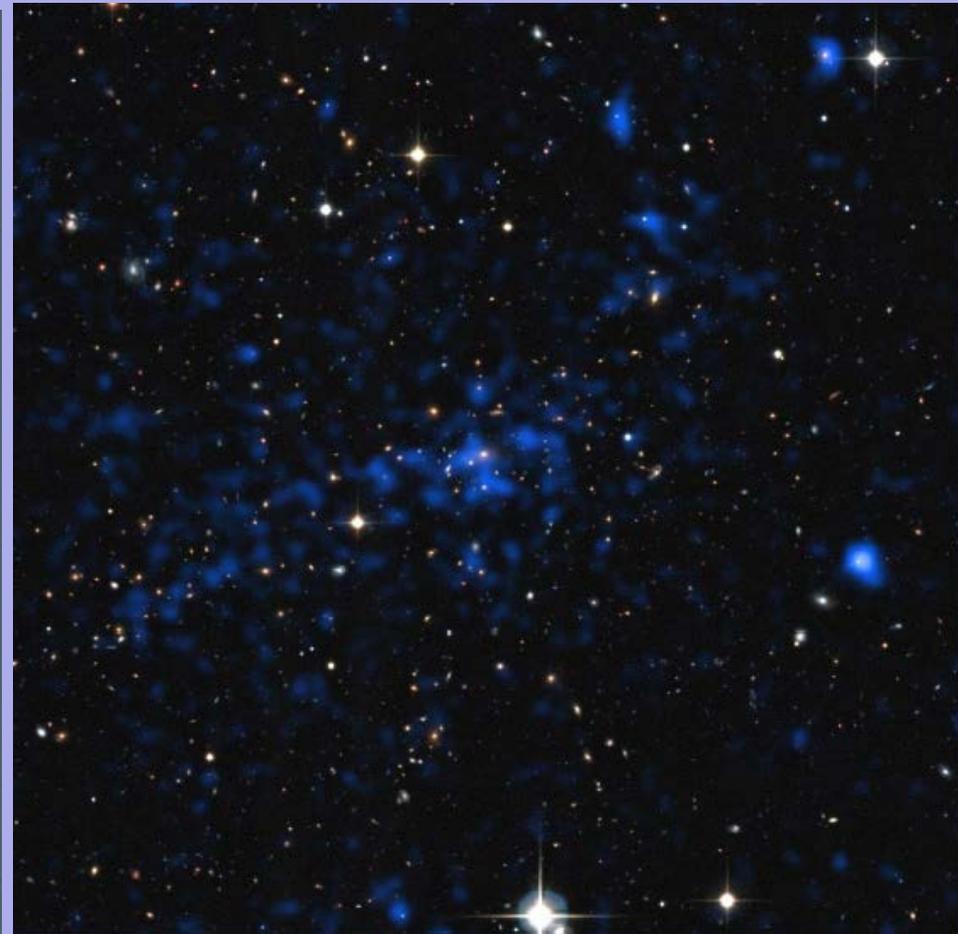
Recherche d'amas avec le survey XXL de XMM

2 x 25 °², 10ks, dans le futur 40ks + suivi multi-longueur d'onde



Optique

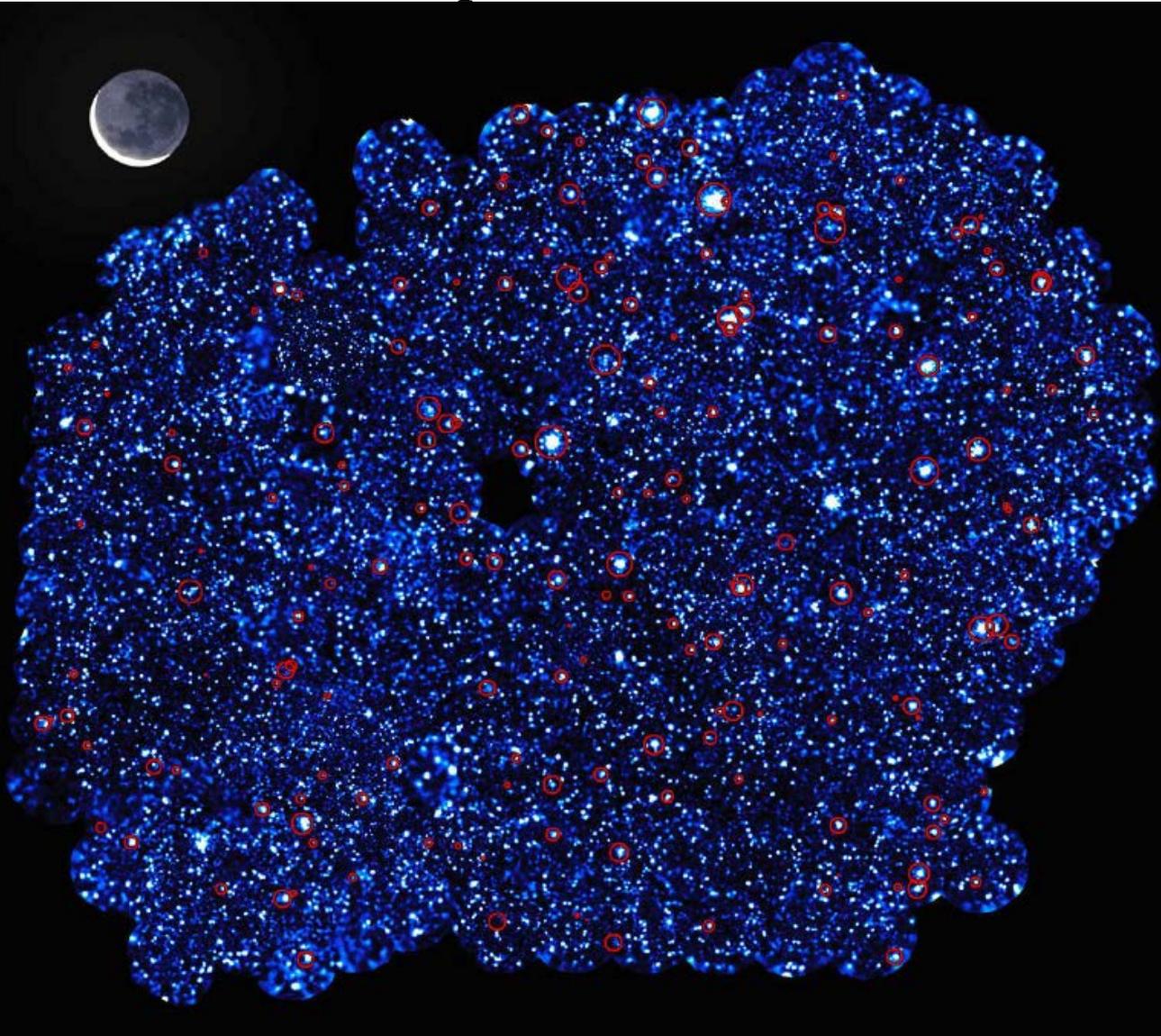
100 amas de galaxies détectés (Pierre et al 2016)



rayons X

Résultats de la recherche XXL

XXL-champ du Sud, Snowden et al 2015



Amas de
 $0.05 < z < 1.05$

Détections d'amas
entourées de rouge

Au total
12 000 sources
détectées

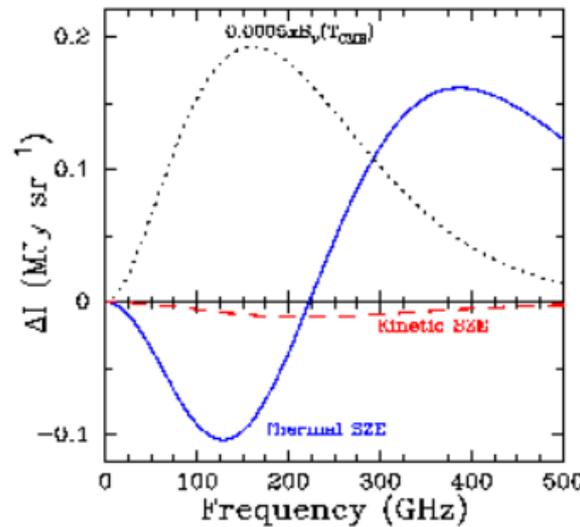
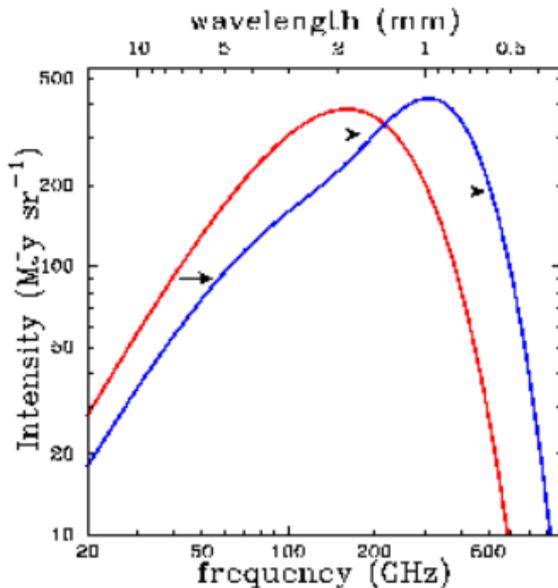
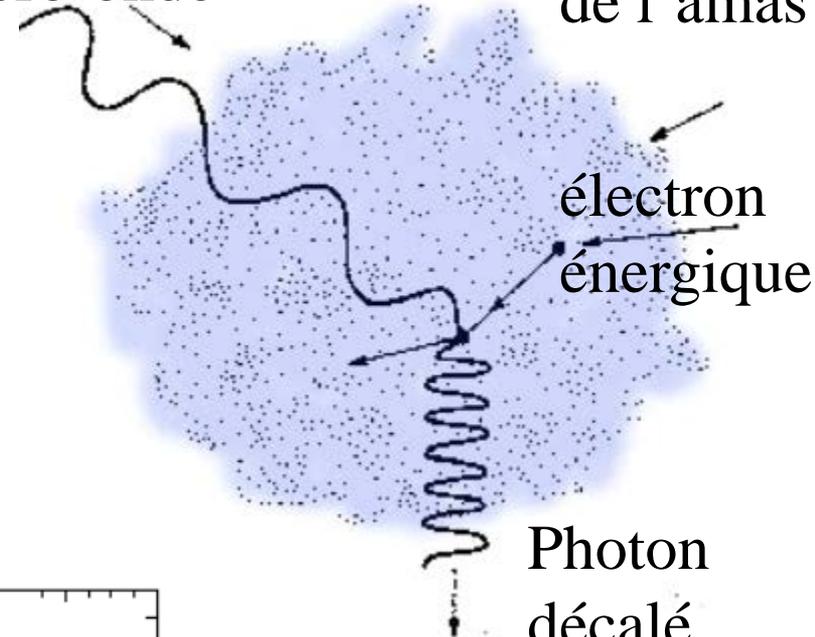
Effet Sunyaev-Zeldovich (SZ)

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

Indépendant du redshift, facile
 de détecter des amas à grand z
 Plus loin qu'avec les rayons X

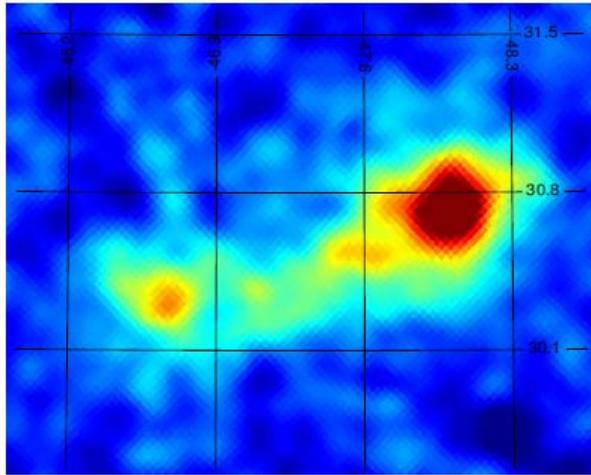
Photon
 micro-onde

Gaz chaud
 de l'amas



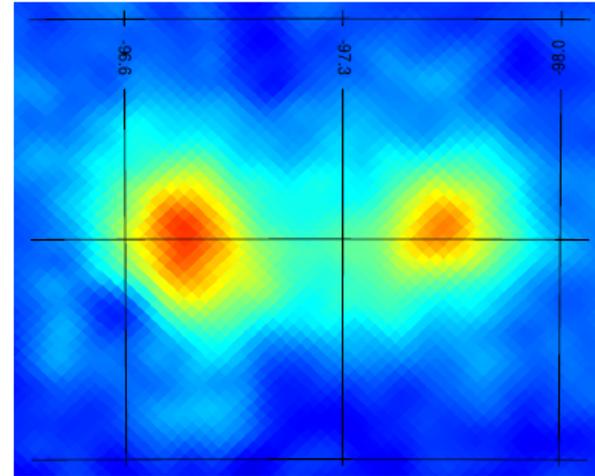
Nombreux amas SZ détectés par Planck

(a) Shapley supercluster,



-3.5 25.0

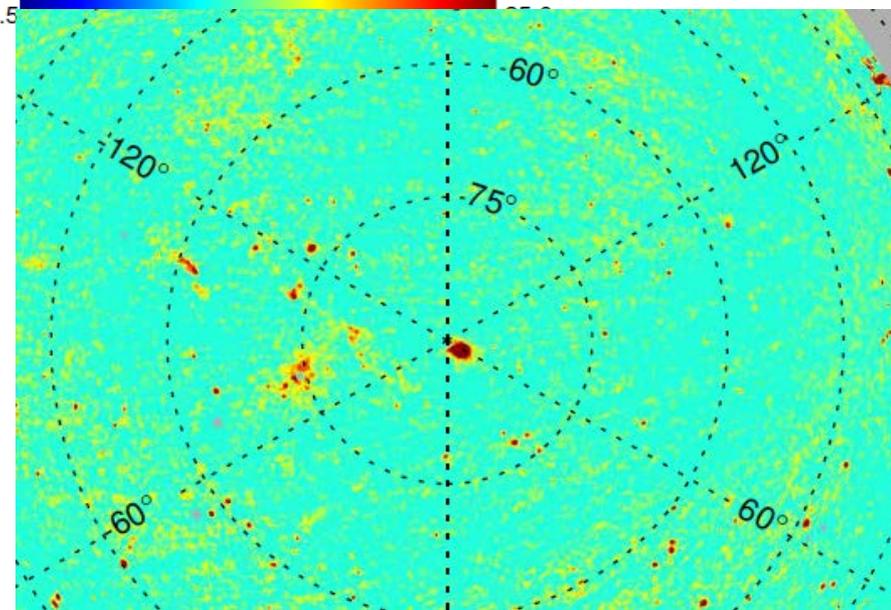
(b) A3395–A3391 merger system,



-3.5

Plus de 1200 dans le catalogue,
jusqu'à $z=1$

Planck Collaboration 2016



Détection par lentille gravitationnelle

PSZ2 G099.86+58.45

à $z=0.616$

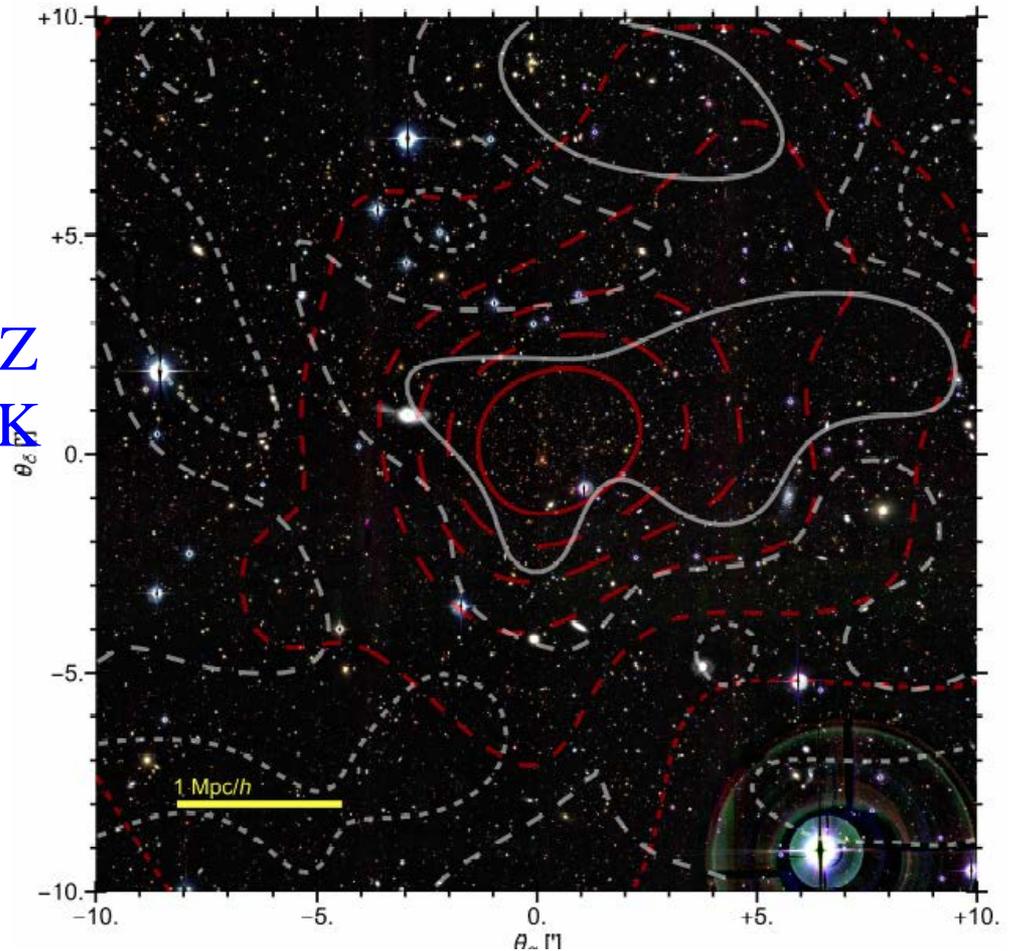
Un amas détecté par Planck-SZ

Détecté en X, $T_X = 9 \text{ keV} = 10^8 \text{ K}$

$M = 5.5 \cdot 10^{14} M_\odot$

Observation jusqu'à 30 Mpc

biais $b_e = 5.5$



Rouge: optique, Blanc: WL

Sereno et al 2018

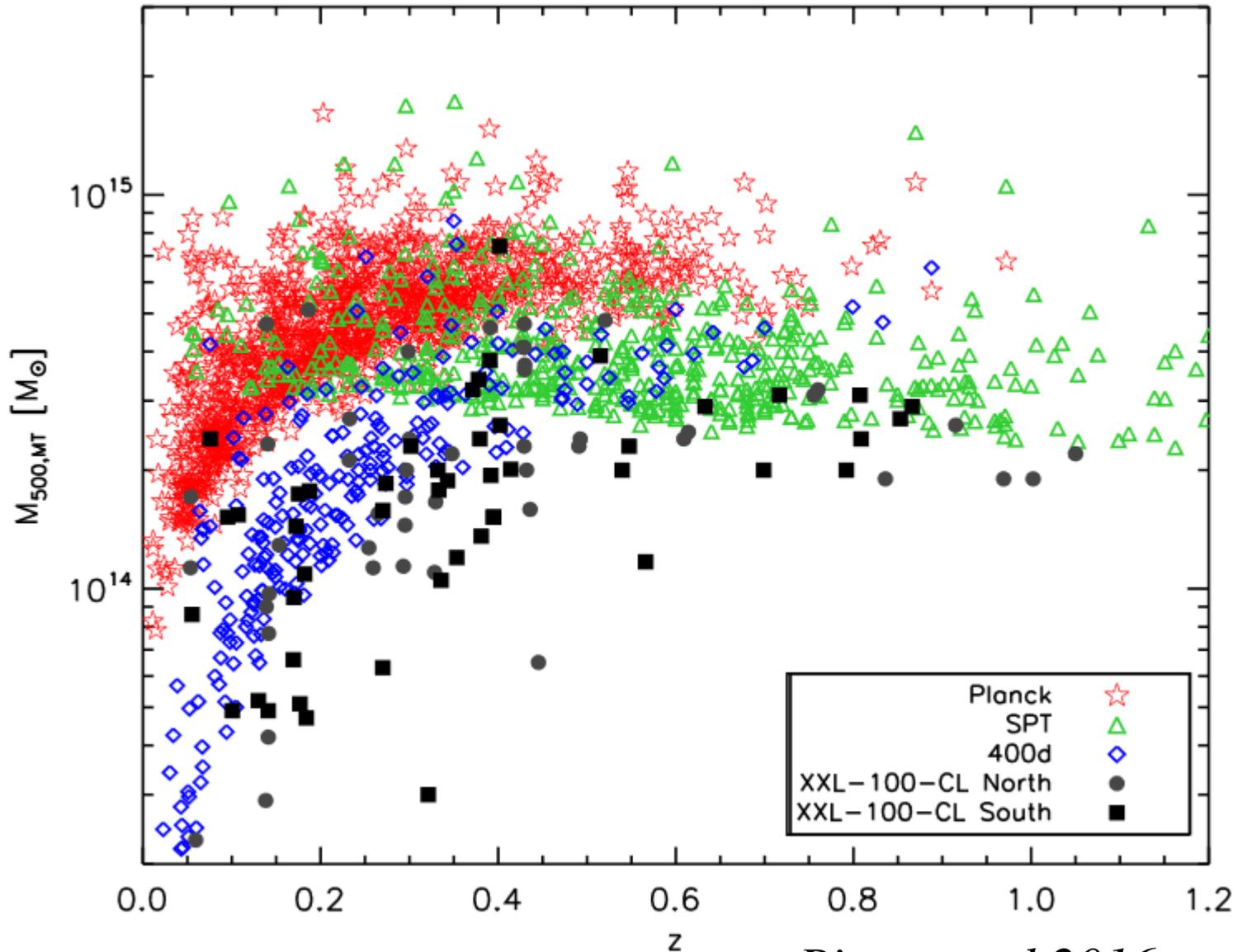
Comparaison des diverses méthodes

Effet SZ

Planck, SPT

Optique

XXL



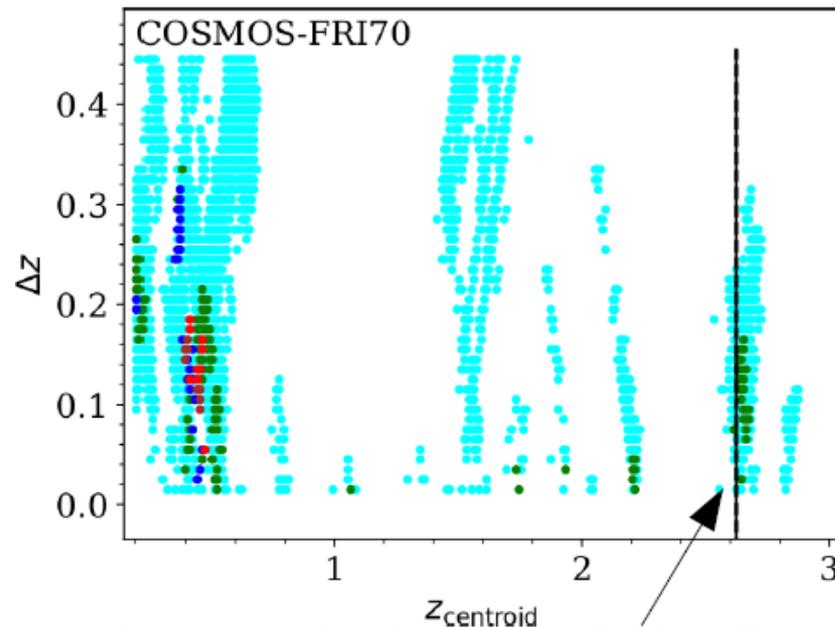
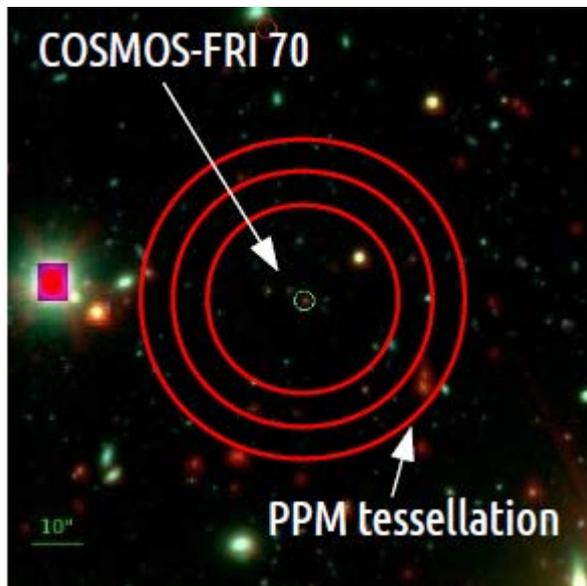
Pierre et al 2016

Algorithmes pour détecter les amas

Recherche des proto-amas autour des radio sources FR II (puissantes et rares) ou FRI plus faibles mais nombreuses

Méthode de la Probabilité de Poisson (PPM)

D'une sur-densité, en fonction du redshift, et de la position

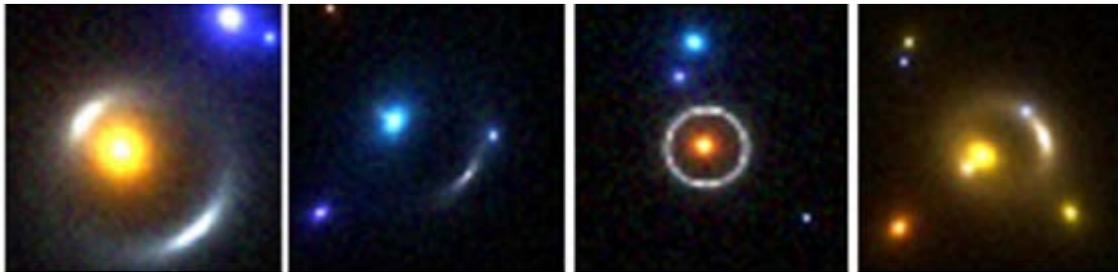


Sur-densité à 3σ correspondant à $z(\text{galaxie radio})$ *Castignani et al 18*

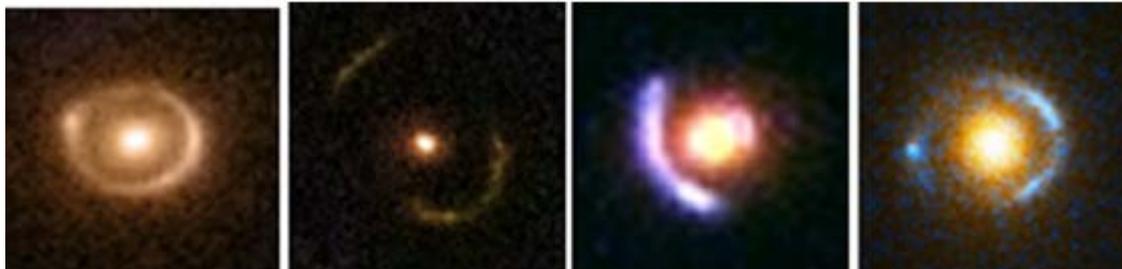
Apprentissage profond – réseau de neurones

Dans les surveys futurs (Euclid, LSST, SKA, milliards de galaxies)
Il est impératif d'automatiser

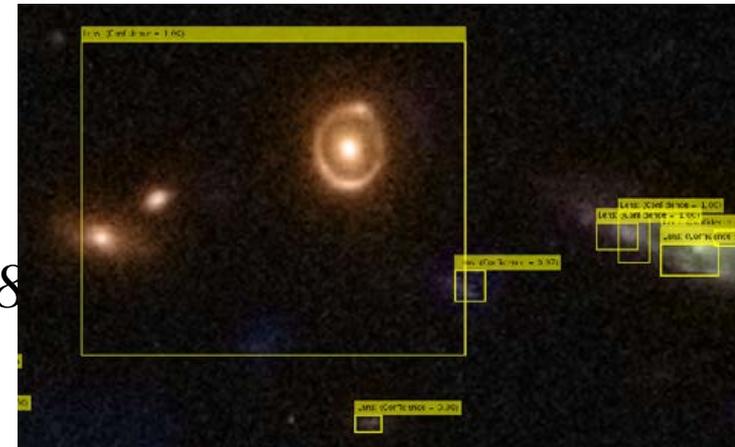
→ Recherche de lentilles gravitationnelles par réseaux de neurones CNN
420 000 images simulées, 98% de taux de succès



Exemples de **simulations** *Pearson et al 18*



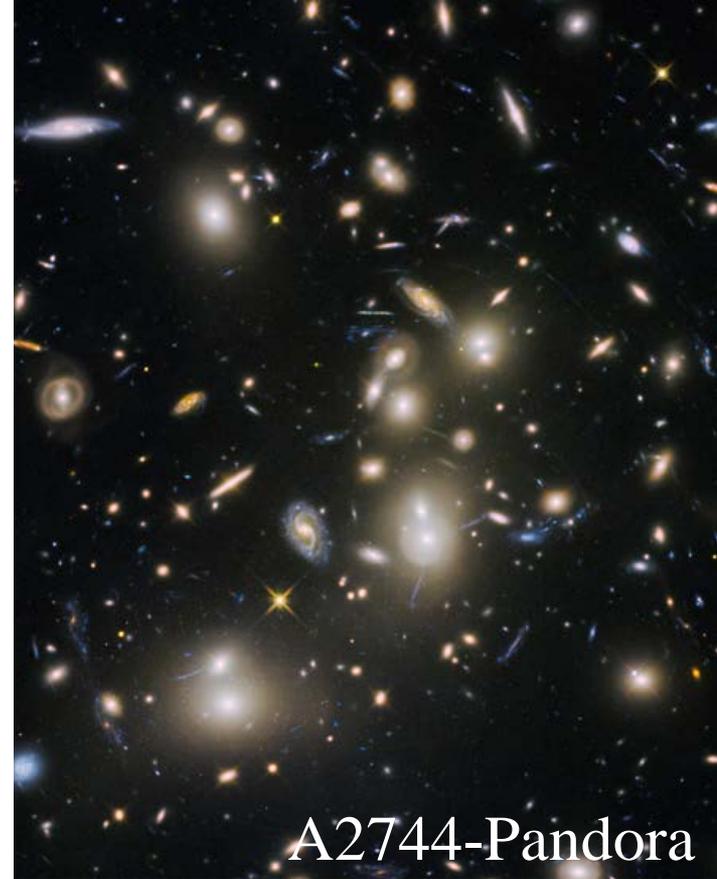
Exemples d'**observations** *Pearson et al 18*



Bien gérer les
tailles d'images

Résumé

- La plupart des galaxies sont dans des groupes, parfois des amas
- L'environnement fait évoluer les galaxies
Ségrégation morphologique, contenu en gaz
Suppression de la formation d'étoiles
- Masses obtenues avec les vitesses (Viriel), ou lentilles gravitationnelles, ou rayons X
- Outils de diagnostics pour la gravité – se forment à $z \sim 2$
→ recherches automatisées



A2744-Pandora