

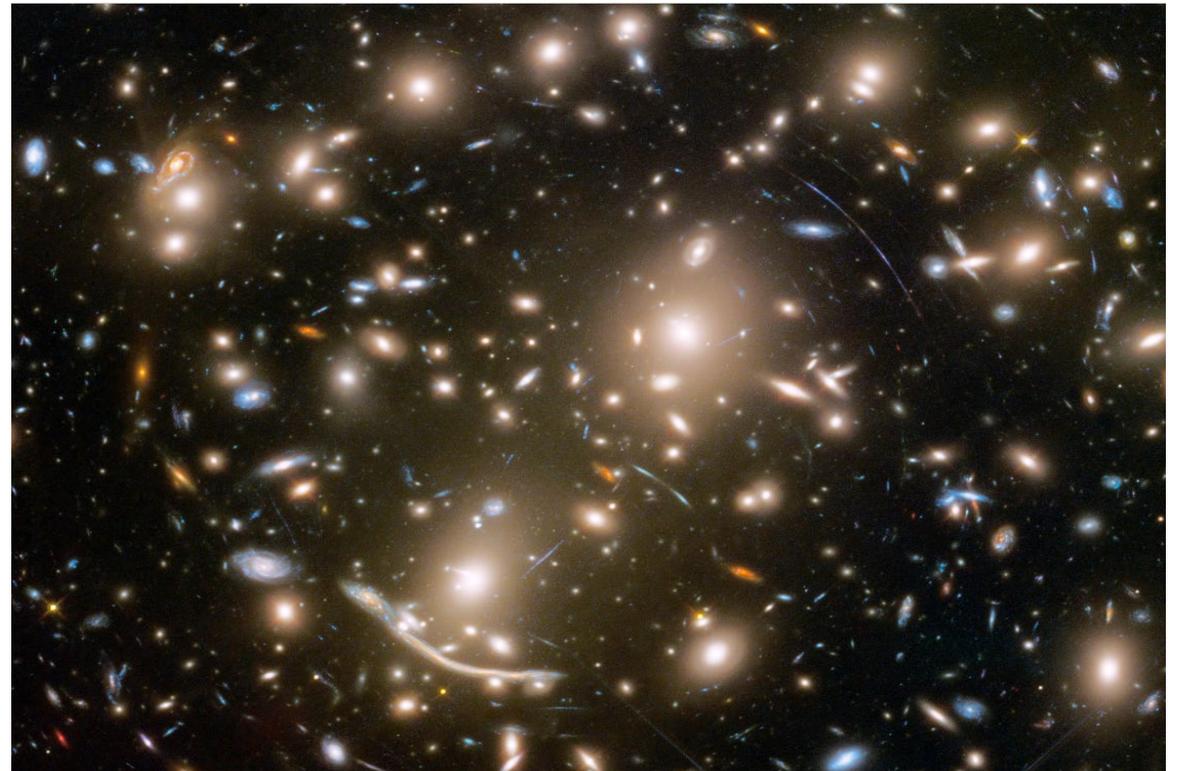


COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

La matière noire à l'échelle des groupes et amas

Abell 370



Françoise Combes

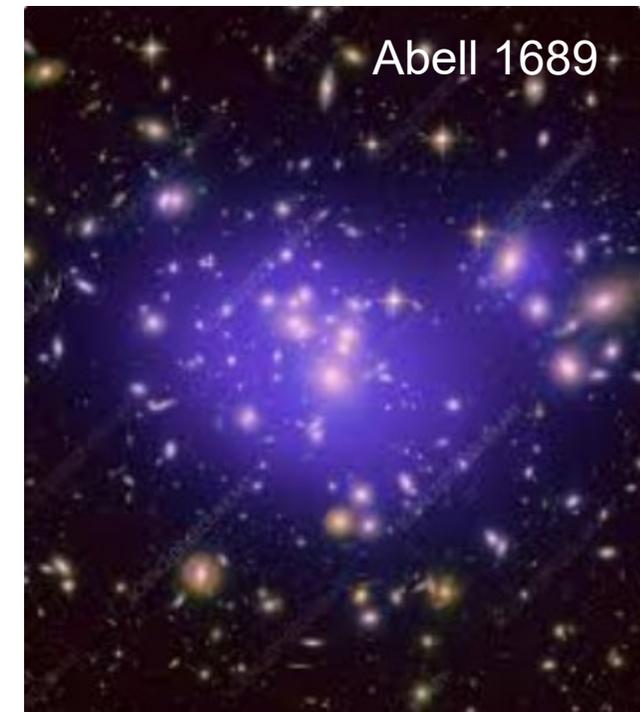
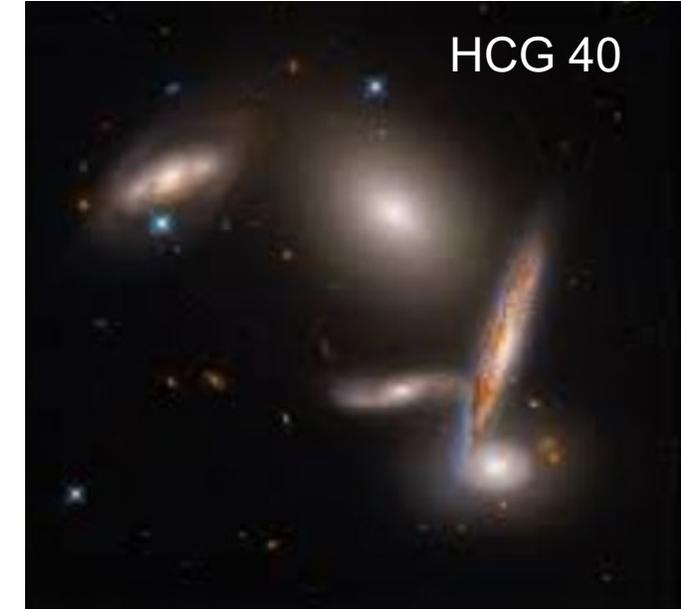


Observatoire
de Paris

| PSL 

Distribution de la matière noire

- Le Groupe Local
- Dispersion des vitesses
- Groupes plus denses, compacts
- Amas de galaxies: Vitesses, Rayons X, Lentilles
Collisions violentes
- Relations d'échelle
- Proto-amas à $z \sim 2$



Le Groupe Local (LG)

- **Kahn & Woltjer 1959:** idée de calculer la masse du LG à partir du temps de formation (« timing argument »)
- $M_{31+\text{satellites}} = 4 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ $M_{\text{MW}+\text{satellites}} = 1 \cdot 10^{11} M_{\odot}$
- M31 s'approche du Soleil -300 km/s , et -130 km/s de MW

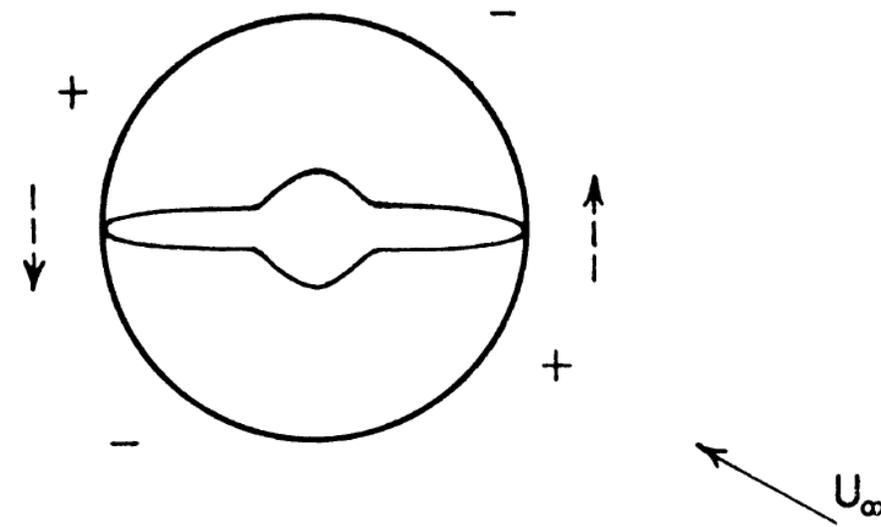
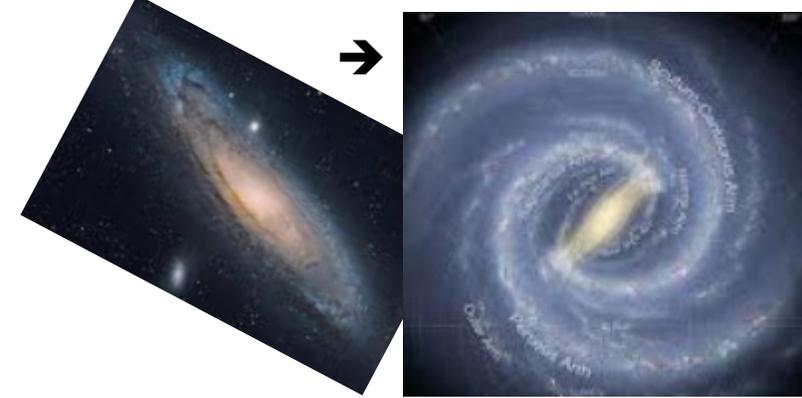
Les deux principales galaxies doivent avoir parcouru une orbite depuis leur formation, $P < 10^{10} \text{ ans}$, $D = 0.7 \text{ Mpc}$

Loi de Kepler $P^2 = 4\pi^2 D^3 / GM < (10^{10} \text{ y})^2 \rightarrow M > 2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$

4 fois la masse M31+MW! De même $T_{\text{kin}} \gg W_{\text{pot}}$

→ Masse manquante, doit être du gaz ionisé $n_e = 10^{-4} / \text{cm}^3$

$T = 5 \cdot 10^5 \text{ K}$



The IllustrisTNG Simulations

IllustrisTNG Team:

Mark Vogelsberger
Shy Genel
Volker Springel
Paul Torrey
Lars Hernquist
Dylan Nelson
Rainer Weinberger
Federico Marinacci
Ruediger Pakmor
Annalisa Pillepich
Jill Naiman

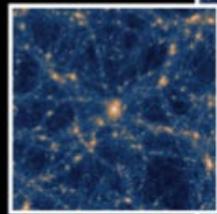
Illustris Team

three boxes with different primary science focus
(~250 million CPUh)

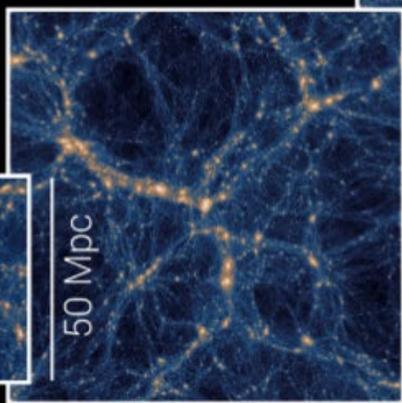
TNG300

TNG100

TNG50

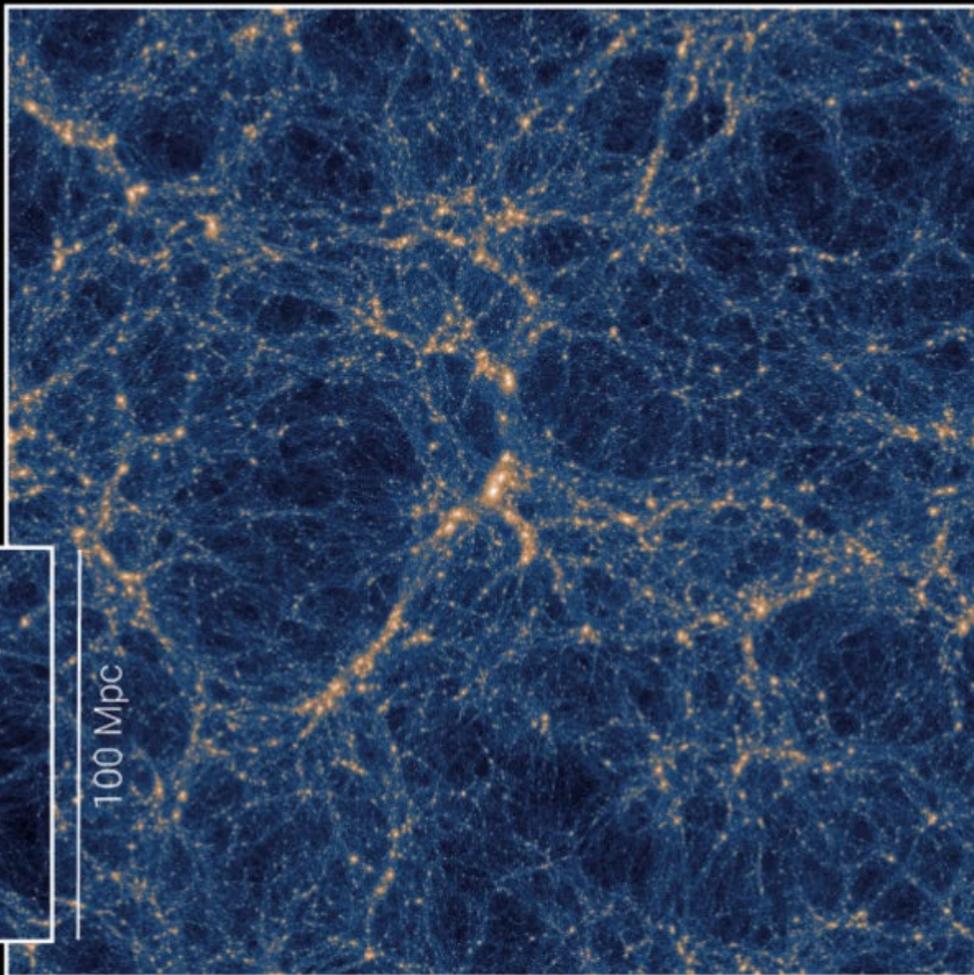


dwarfs



50 Mpc

L* galaxies

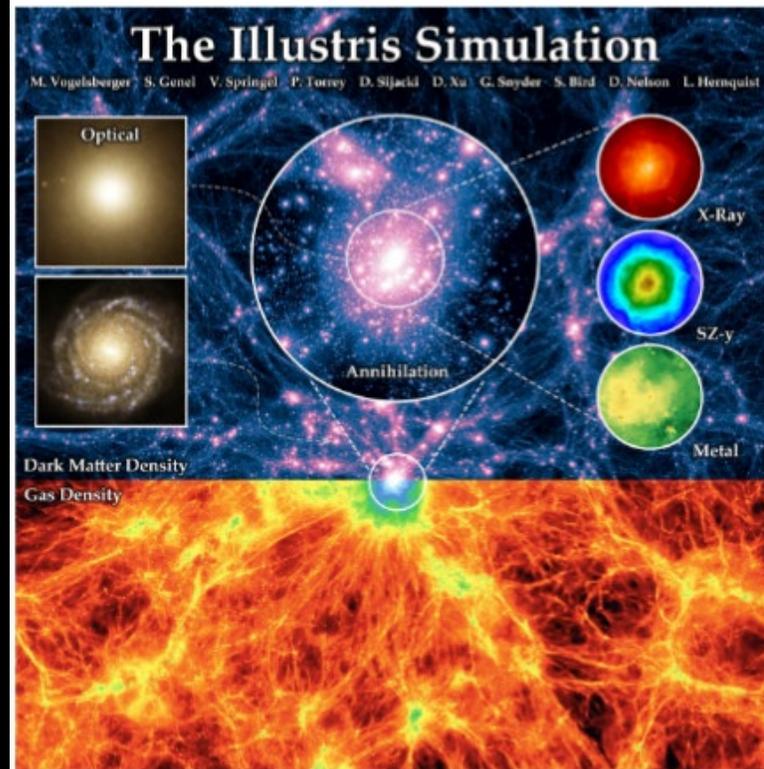


100 Mpc

galaxy clusters

300 Mpc

Top-Down:



model *large* scales: approach *small* scales

Simulations cosmologiques

A partir de Illustris-TNG, $\sim 100\,000$ galaxies de la taille de MW,
4700 paires à la bonne séparation, 1000 isolées, 600 à la bonne V

Permet de tester les estimations par TA « timing argument »

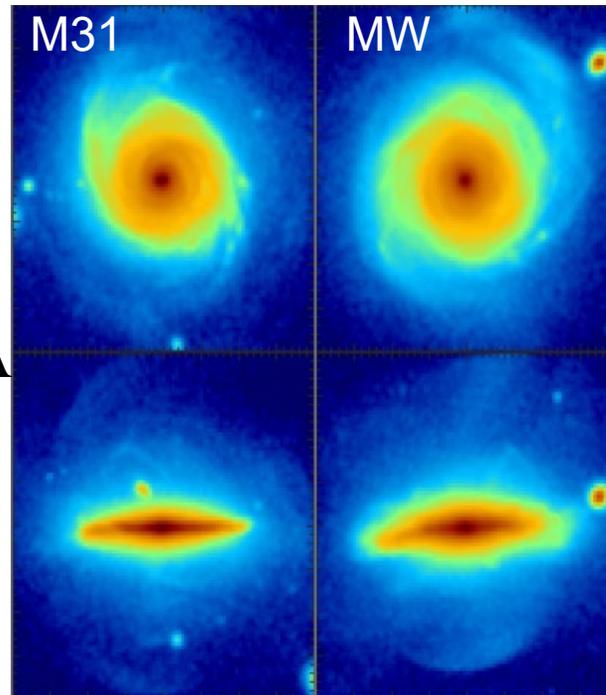
ou bien le Viriel $M \propto \sigma^2 r$

Le Viriel donne la meilleure estimation

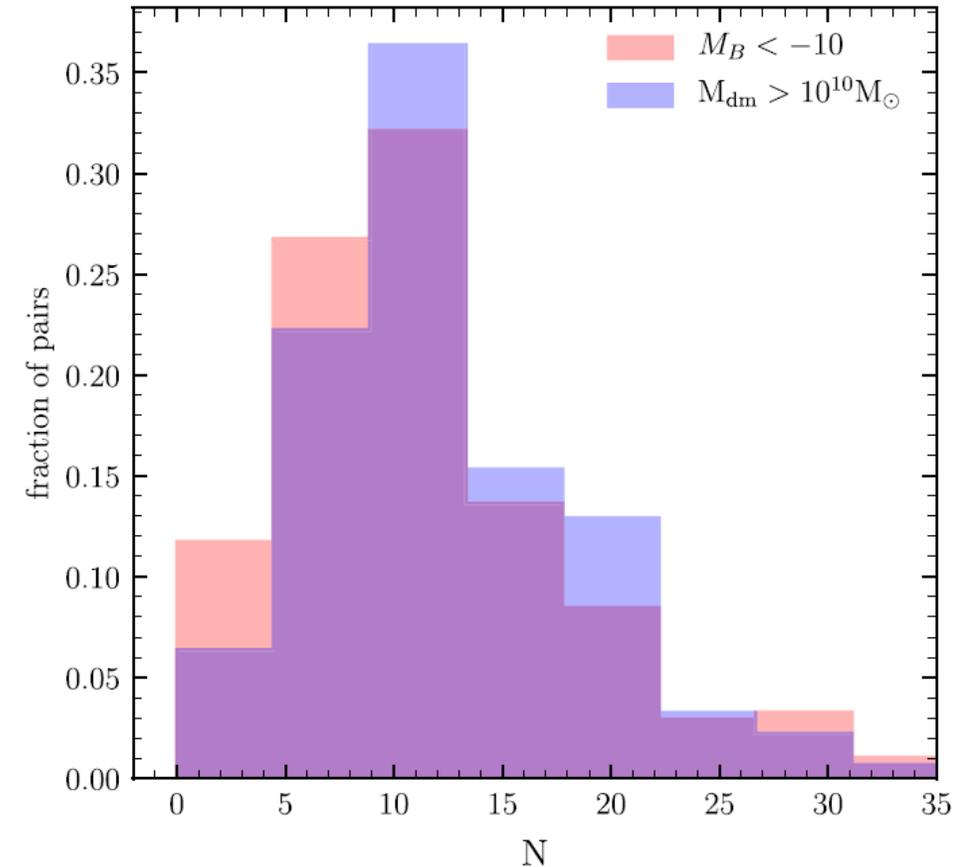
$$M(\text{LG}) = 5 \cdot 10^{12} M_{\odot}$$

HESTIA

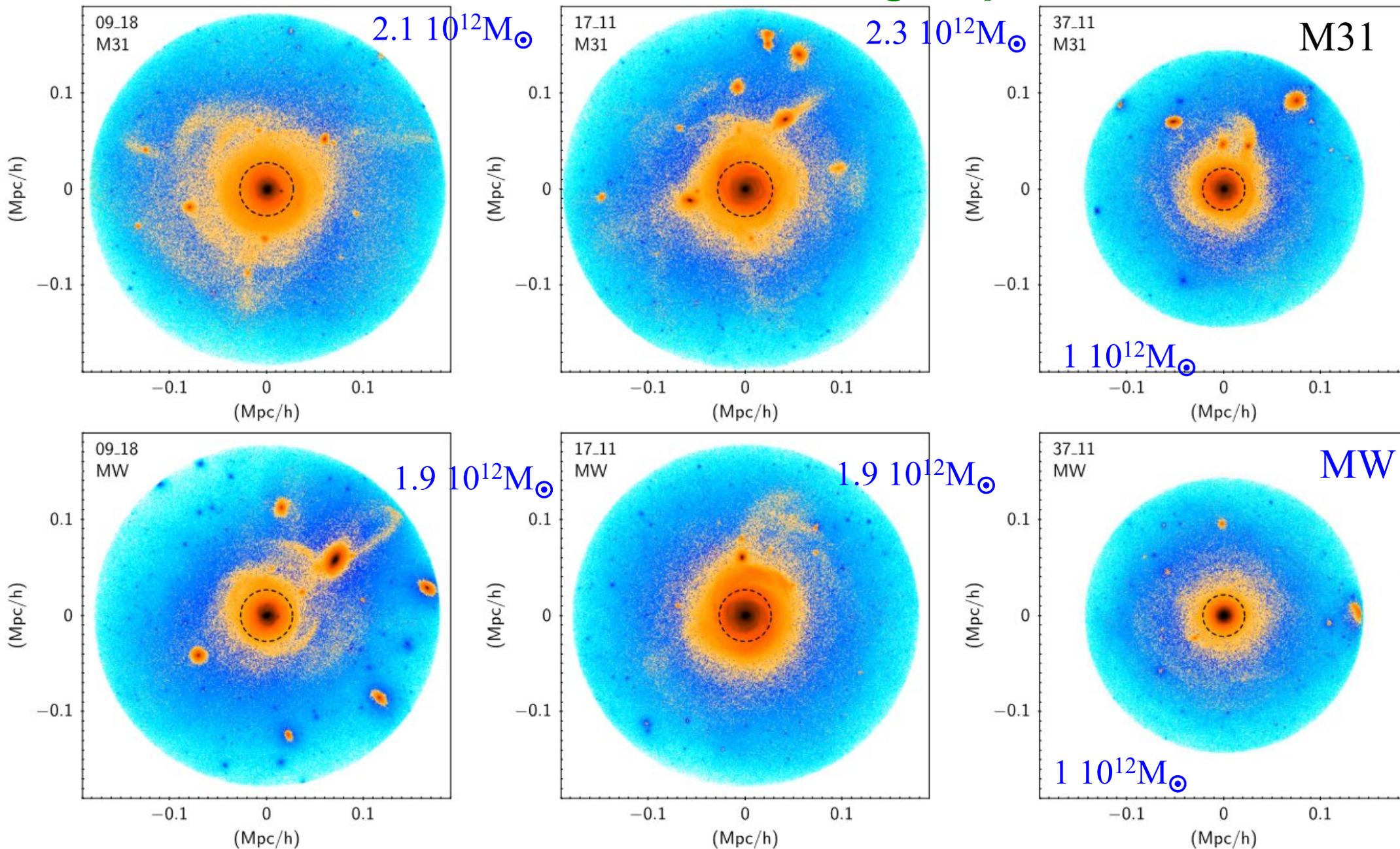
Hartl & Strigari 2022



Nombre de satellites
externes M31-MW



Simulations du groupe local HESTIA



Centre de masse
différent entre
étoiles et DM

de l'ordre
de 10kpc

M31-MW
D= 0.7 Mpc
3 modèles
différents

Dark matter
Stars

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, tel l'amas de Coma

de qq 100 à 1000 galaxies massives, liées

Taille typique $\sim \text{qq Mpc}$

Le Coeur (Mpc central) contient

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

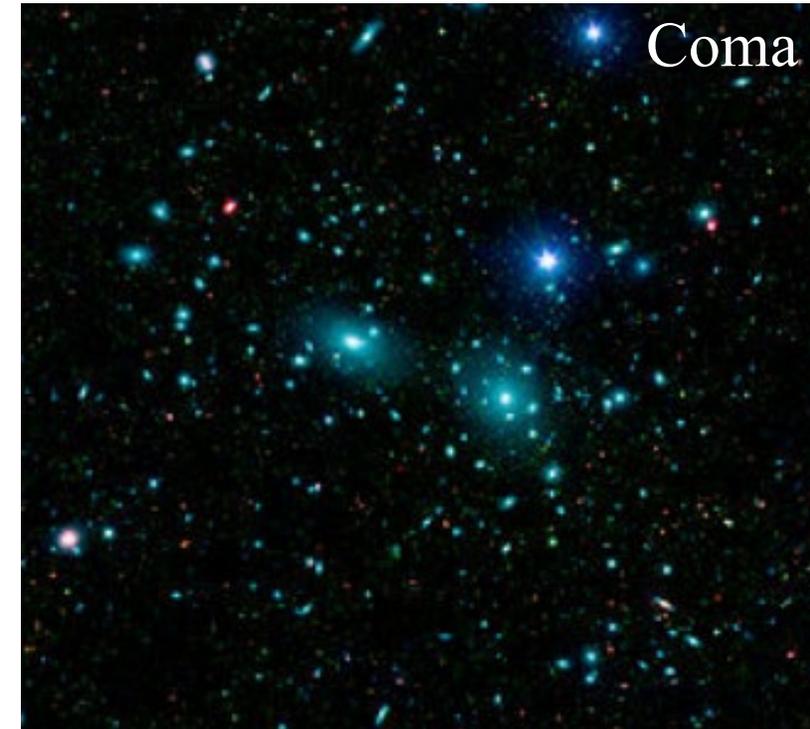
Catalogue Abell (1958-89): 4073 amas riches

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

Avec des milliers de galaxies -- $D=15\text{-}20 \text{ Mpc}$

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

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

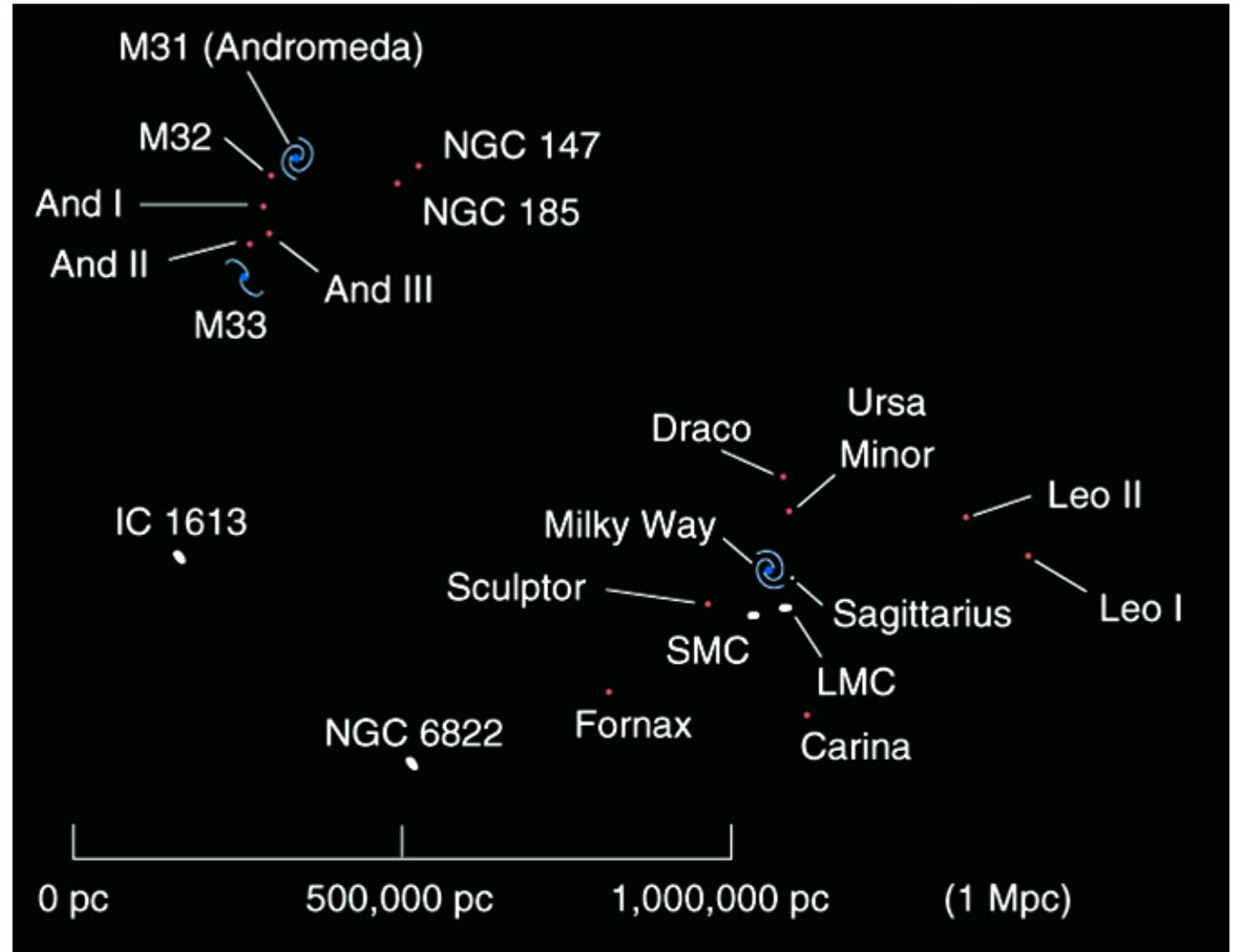


Les groupes de galaxies

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

Mais fraction de spirales moindre que dans les vides et les galaxies “de champ”

Groupe Local

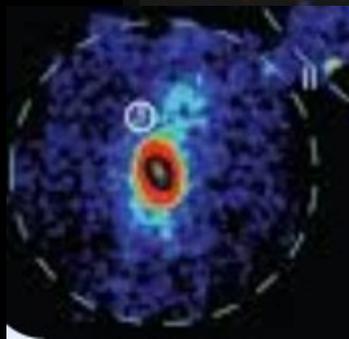


Une trentaine de satellites pour M31 !

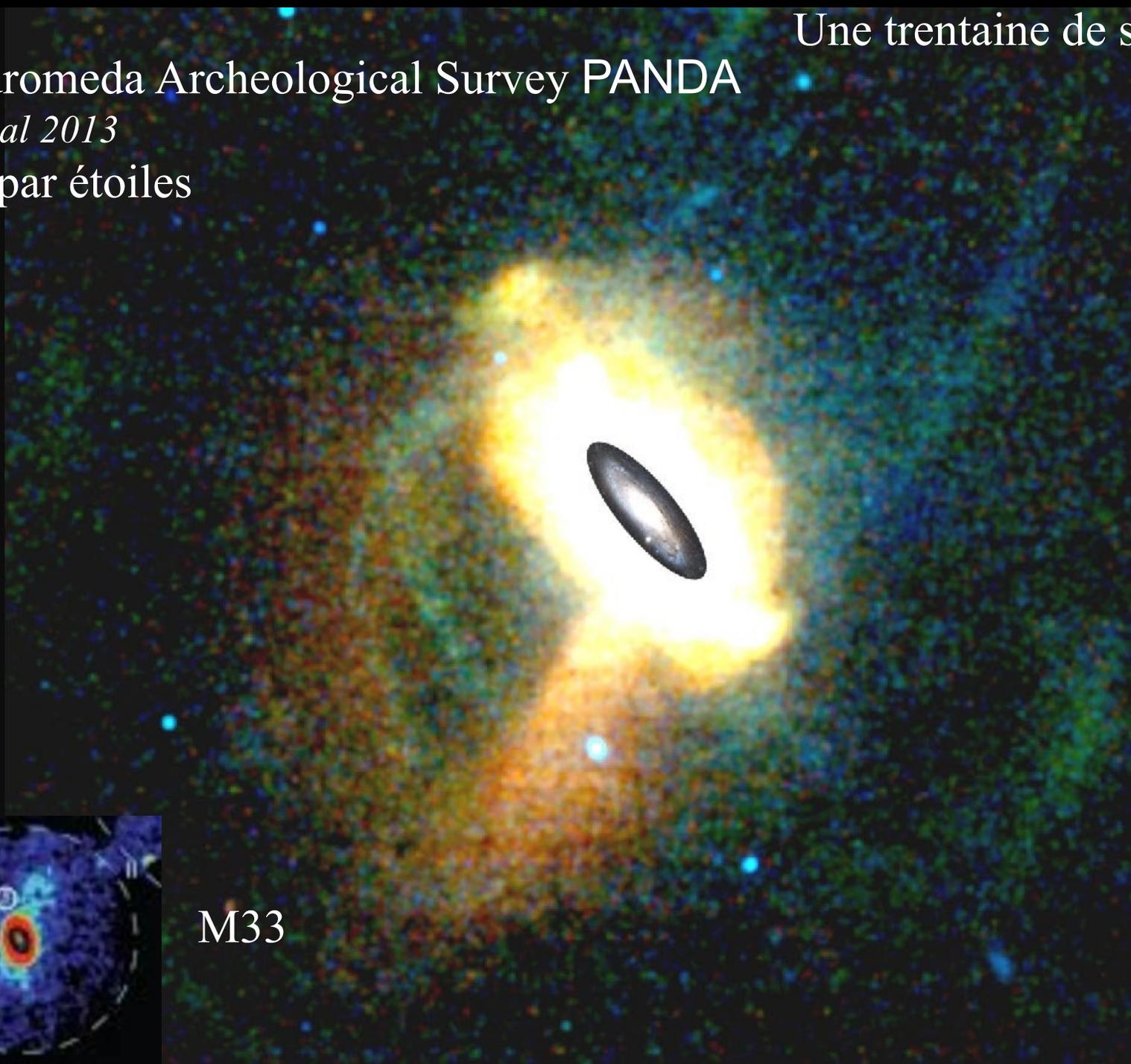
The PAN-Andromeda Archeological Survey PANDA

McConnachie et al 2013

Identification par étoiles
individuelles

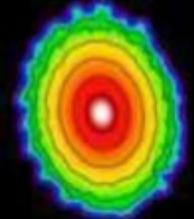


M33

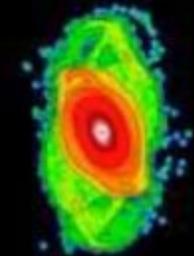


Surface Brightness

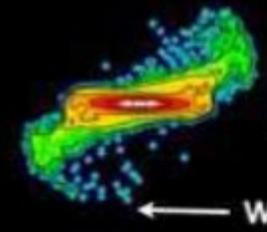
$t = -3.4$ Gyr



$t = 0$



Edge-on $t = 0$



20 kpc

Le Groupe Local

MW-M31~0.8Mpc

Antlia

N3109

N6822

M33

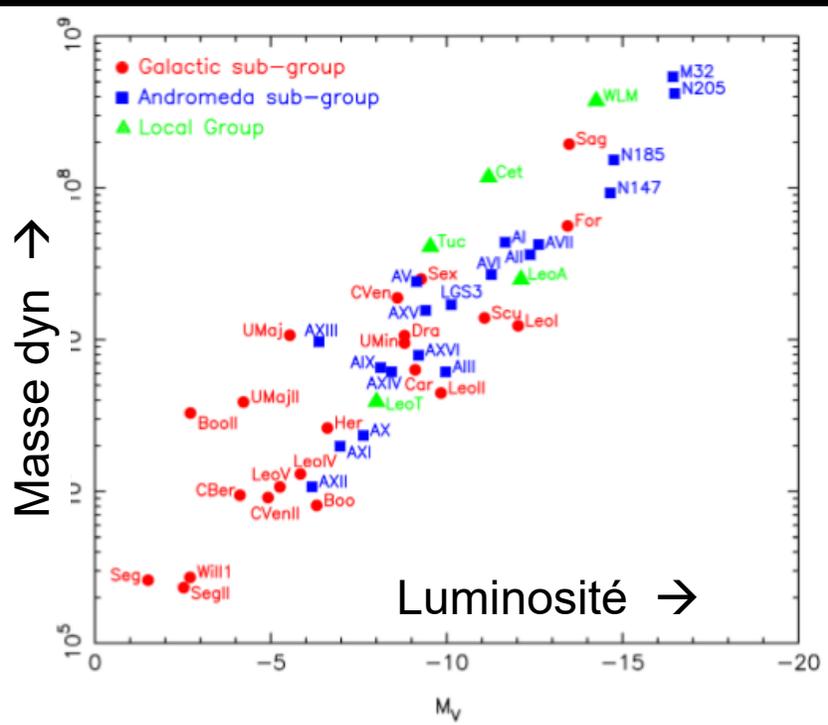
M31

M32

LMC

MW

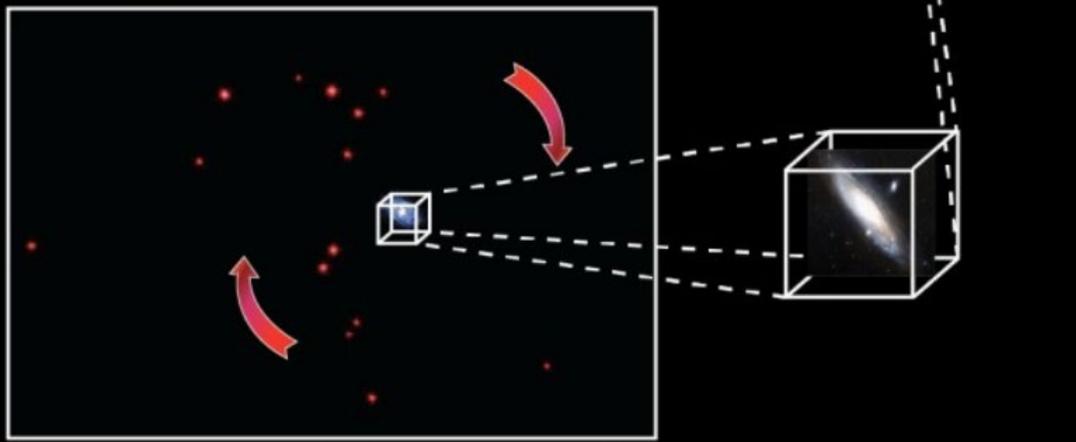
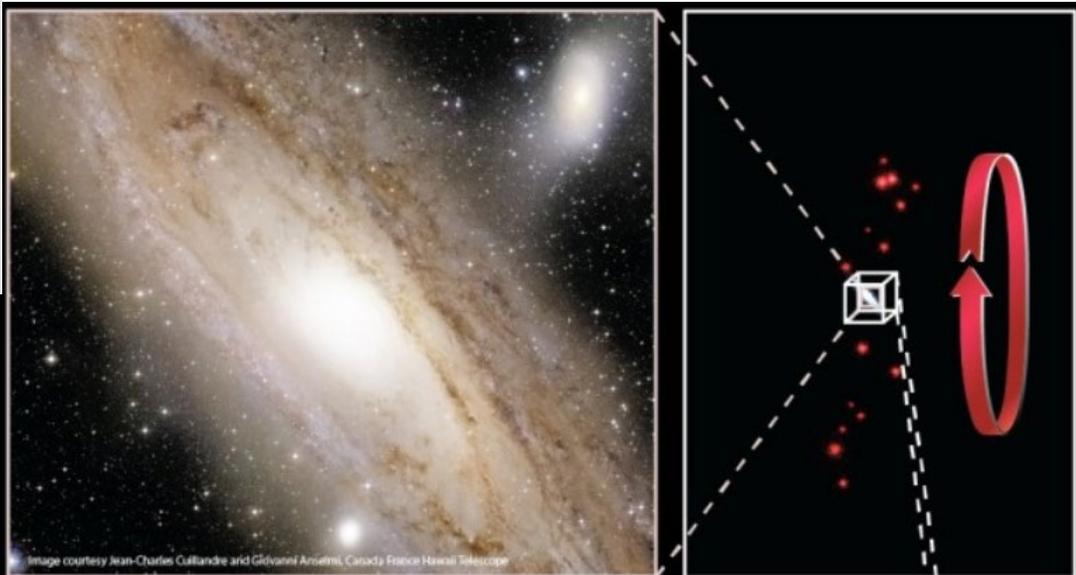
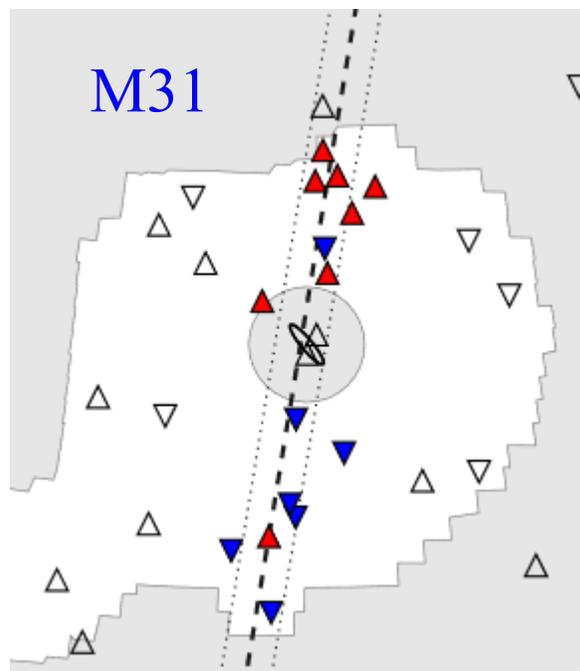
N205



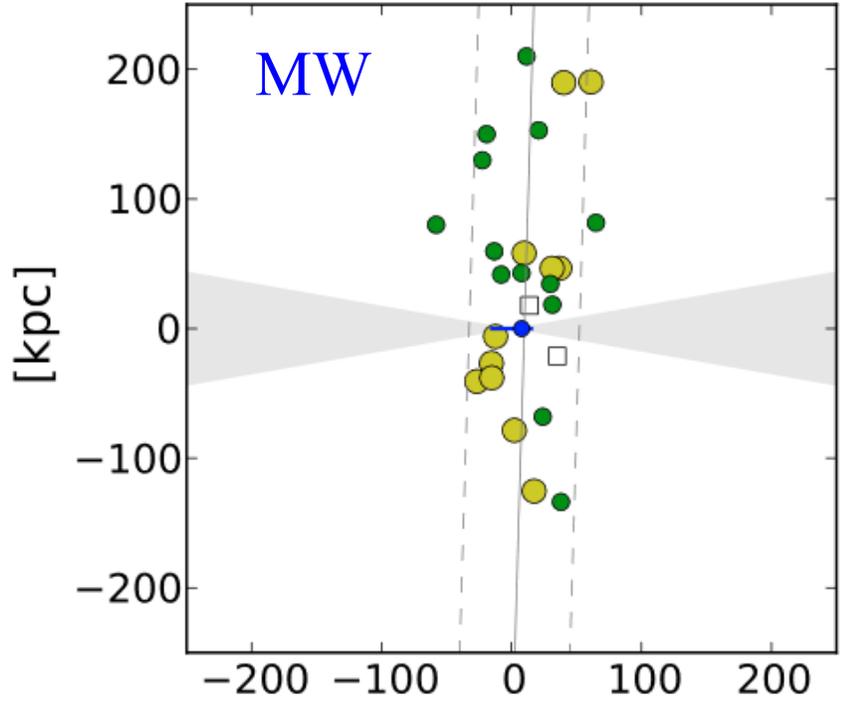
Majewski et al. 2003

Antlia-Sextans Group, le plus proche à 1.3Mpc, compagnon N3109

Pawlowski 2018



Disque en rotation



Kroupa et al 2010

Alignements des satellites dans un plan Voie lactée et M31

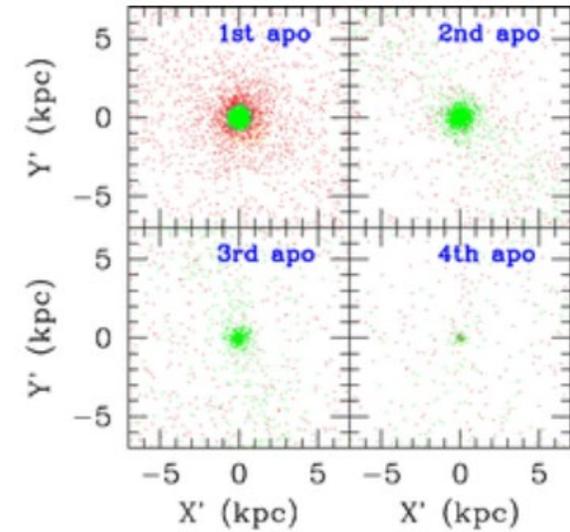
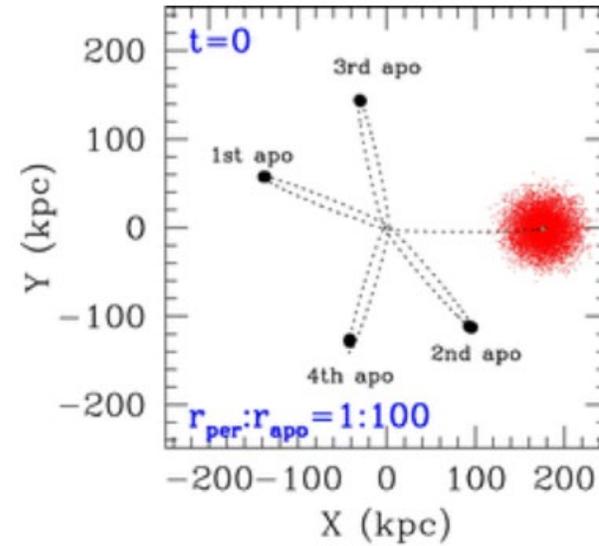
Ibata et al 2013

Les marées sur les naines du groupe local

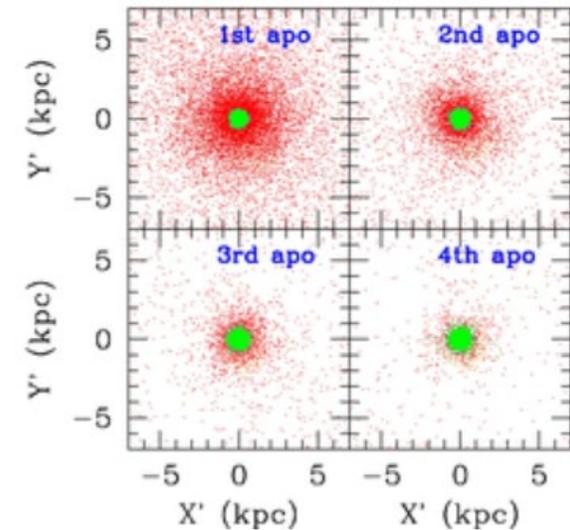
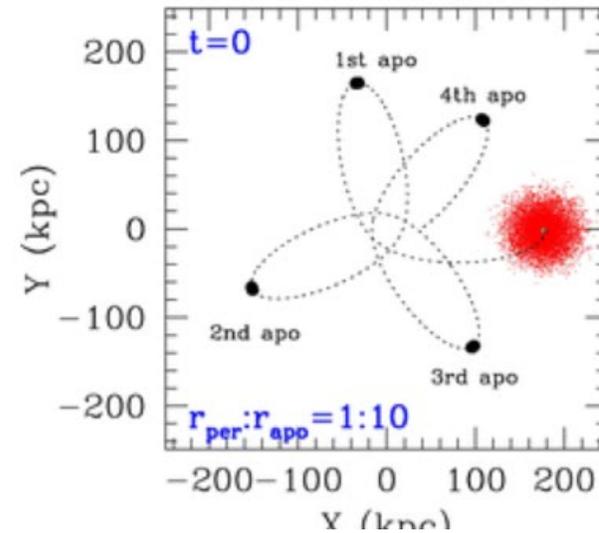
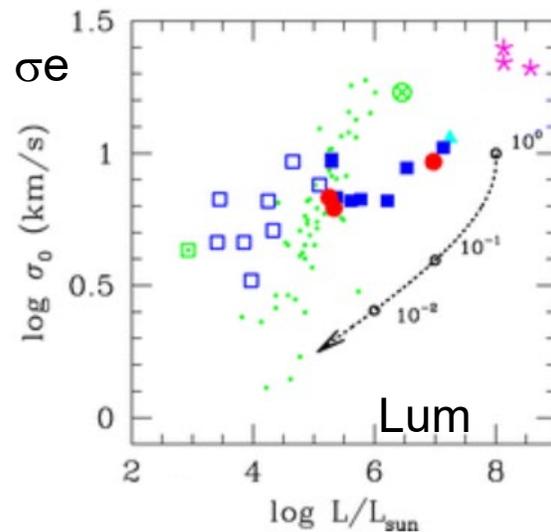
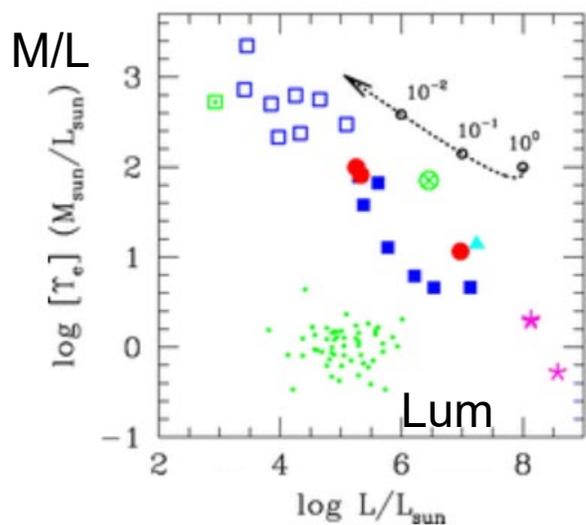
- Les étoiles sont éjectées par les forces de marée, la matière noire est moins éjectée

- Simulations N-corps, avec halo Rc, NFW
99% des étoiles éjectées, $R_c/2$

- Les marées rendent les dSphs encore plus dominées par la matière noire



Penarrubia et al 2008



Les groupes compacts

Certains groupes compacts et instables
Notamment les 100 groupes de Hickson:

Population:

$N \geq 4$ luminosité dans un rapport ~ 10

Isolation:

Distance de $N+1 > 3$ diamètres-groupe

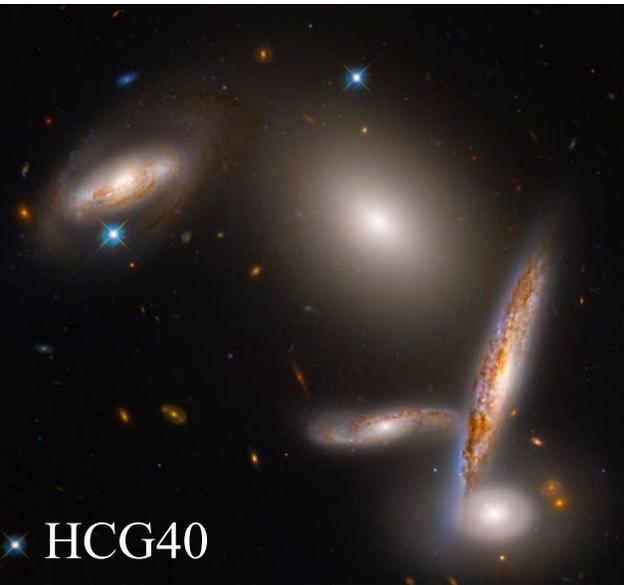
Compact : grande brillance de surface



HCG87



HCG92: quintette de Stephan



Caractéristiques et définitions

	Groupe diffus	Groupe compact	Amas
Nombre de galaxies	~20	~5	~100-10 ³
Contraste $\rho/\langle\rho\rangle$	20	10 ⁶	10 ⁶
Dispersion de vitesse	~150km/s	~150km/s	~700-10 ³ km/s
Température T_x	<1keV	<1keV	10keV
	10 ⁷ K	10 ⁷ K	10 ⁸ K

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

Groupes compacts de Hickson (HCG)

Selection optique basée sur la densité

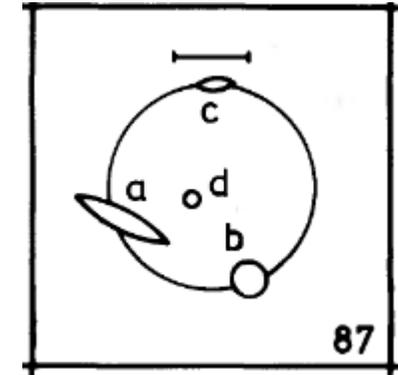
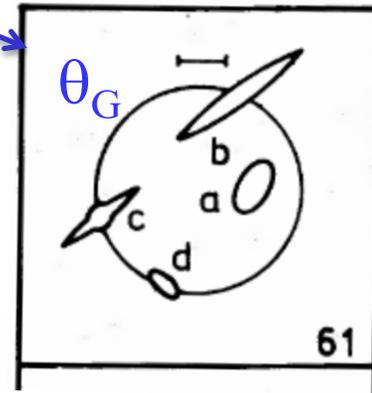
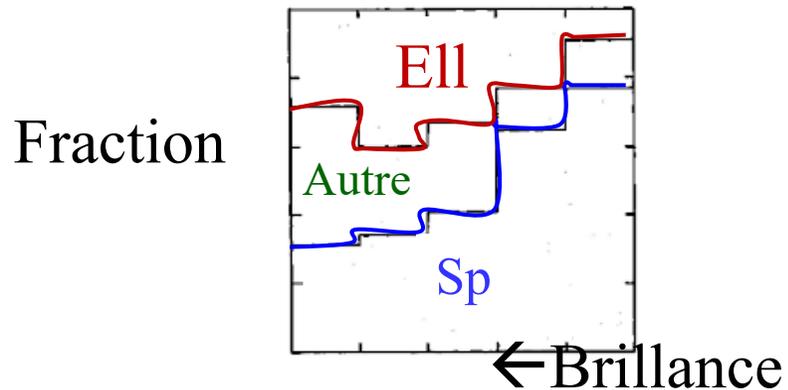
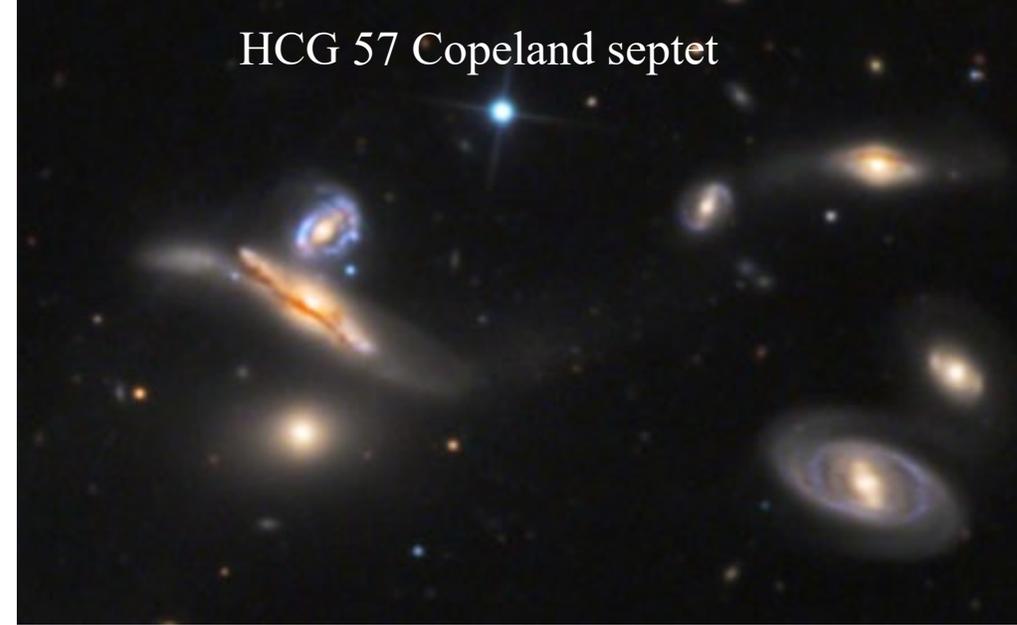
Nombre: ≥ 4 galaxies dans les 3 magnitudes de la plus brillante

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

Compact: brillance de surface

$$\mu < 26 \text{ mag/arcsec}^2$$

→ 100 HCGs ($\geq 90\%$ sont réels).



Paul Hickson 1982

Les groupes compacts ne devraient pas exister

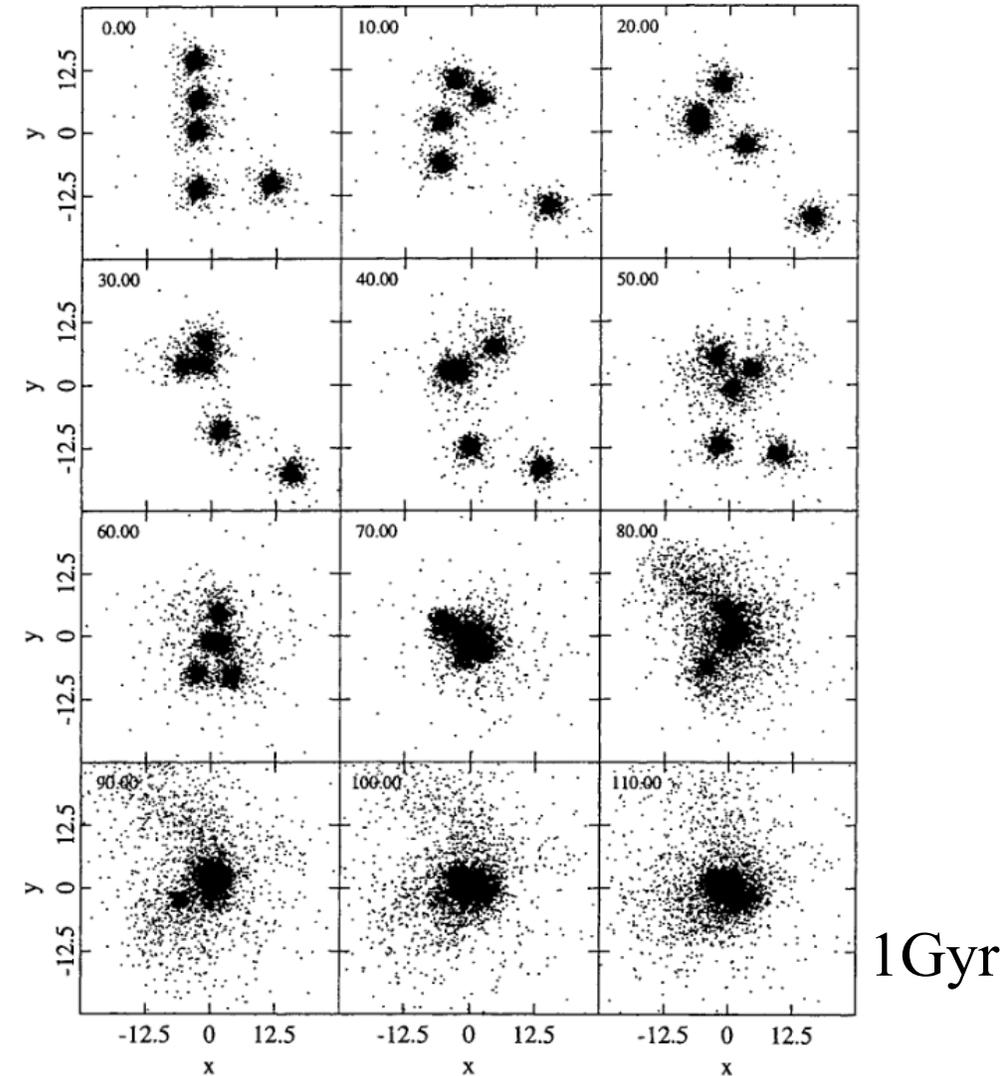
Ils devraient fusionner en une seule galaxie en un temps ~ 1 Gyr

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

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

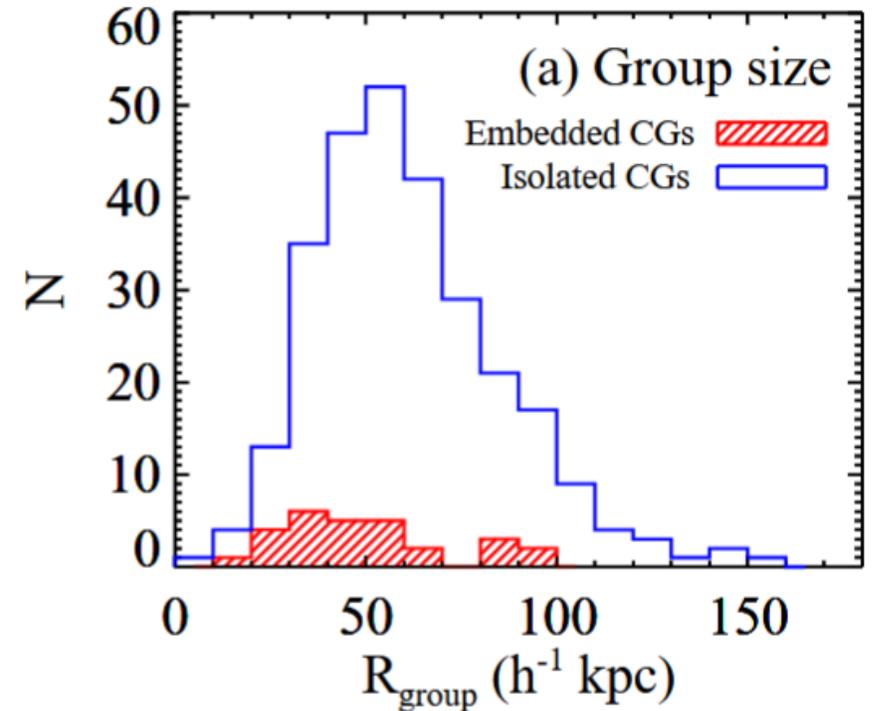
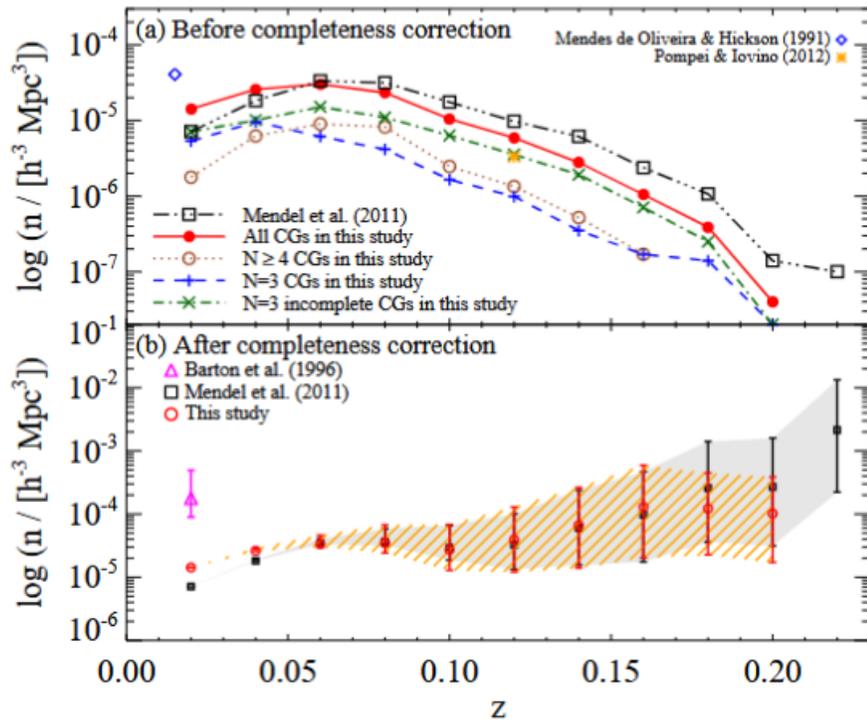
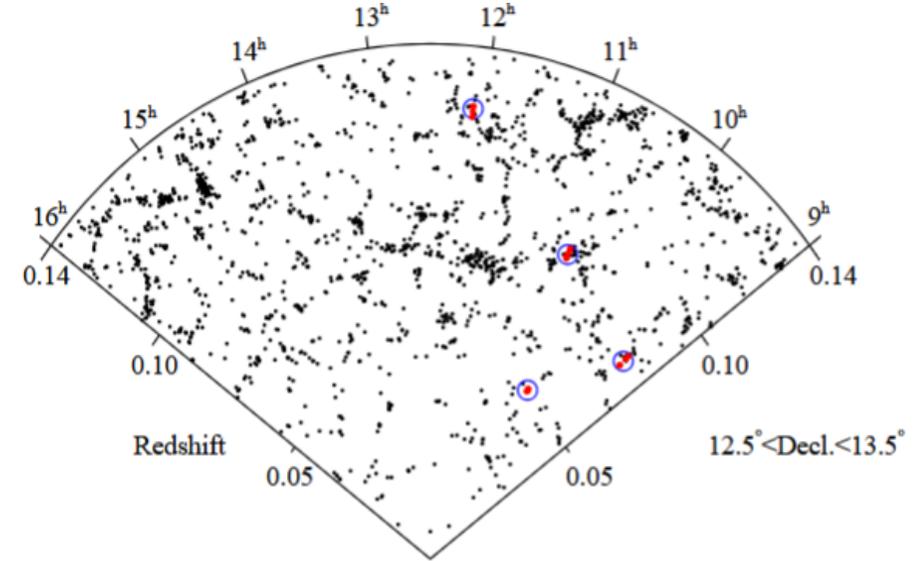
→ Les halos noirs ont fusionné depuis longtemps, et le halo est commun (fusion en $\sim 2-3$ Gyr, selon concentration)

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



Groupes compacts dans le Sloan

- 2300 CG dans le SDSS-DR6 *McConnachie et al 2009*
 $\langle z \rangle \sim 0.1$, $\sigma_V \sim 230 \text{ km/s}$, $R \sim 70 \text{ kpc}$ -- 42% des projections
- Leur abondance est constante jusqu'à $z=0.2$
 une fois les corrections de complétude faites *Sohn et al 2025*
 ➔ 330 groupes compacts, 62% de types précoces (ETG)



Formation dans les simulations cosmologiques

- Sélection des groupes compacts à $z=0$

Puis remonter dans le temps \rightarrow ne sont compacts que dans les derniers 2 Gyr

La majorité des CG sélectionnés sont allongés selon la ligne de visée par un facteur 2!

C'est pourquoi le temps de fusion est sous-estimé

Il est de 2-3 Gyr dans la simulation EAGLE

Explique l'abondance observée de CG à $z=0.2$

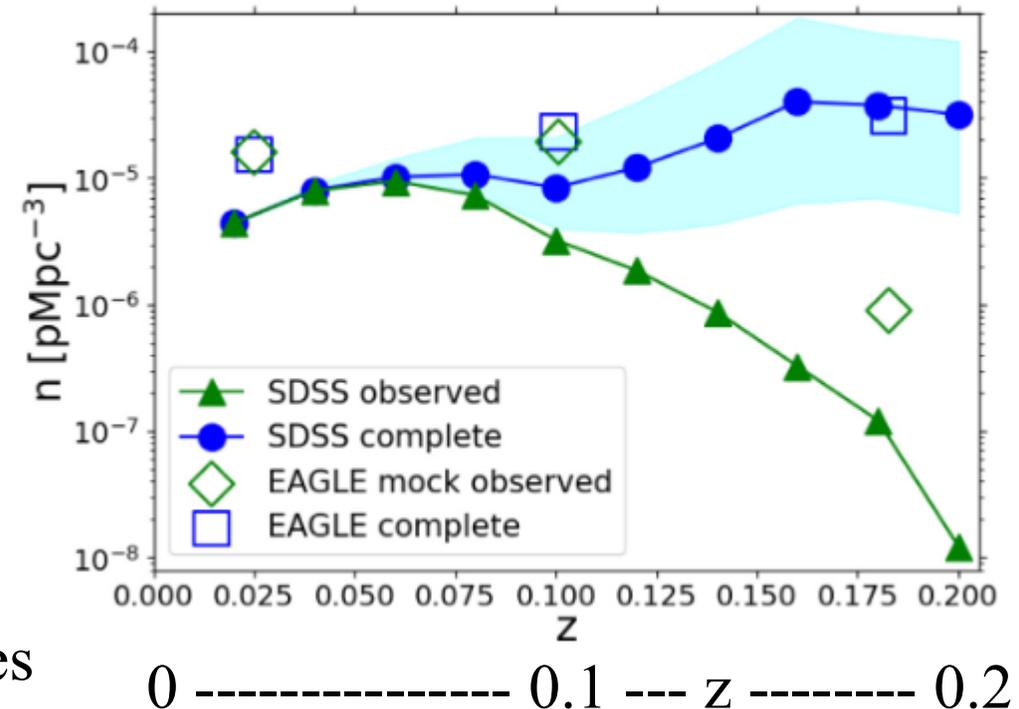
Hartsuiker & Ploekinger 2020

Environ $\lesssim 16\%$ des galaxies non naines ont été membres de CG à un moment donné de leur histoire

96 % CG à $z = 2$ ont fusionné en une seule galaxie à $z = 0$

Wiens et al 2019

$$\langle M(\text{CG}) \rangle = 1.5 \cdot 10^{12} M_{\odot}$$

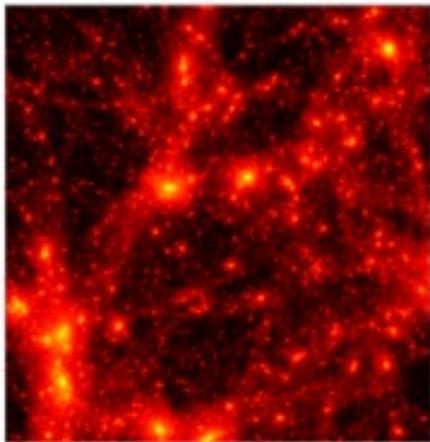


$$\Delta v < 1000 \text{ km/s}$$

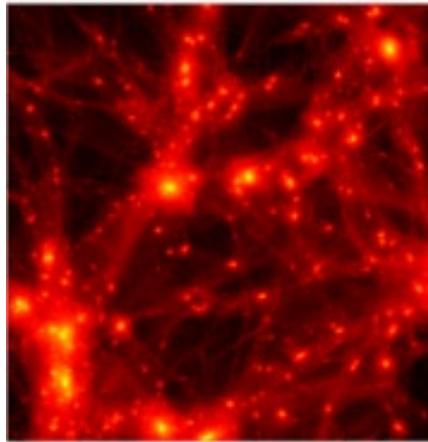
Formation dans les simulations WDM-GDM

- **Warm Dark Matter, Generalized Dark Matter**
- Modèles de DM où les petites échelles sont supprimées
- Les groupes compacts se forment en plus grand nombre dans les modèles GDM (fluide avec pression)

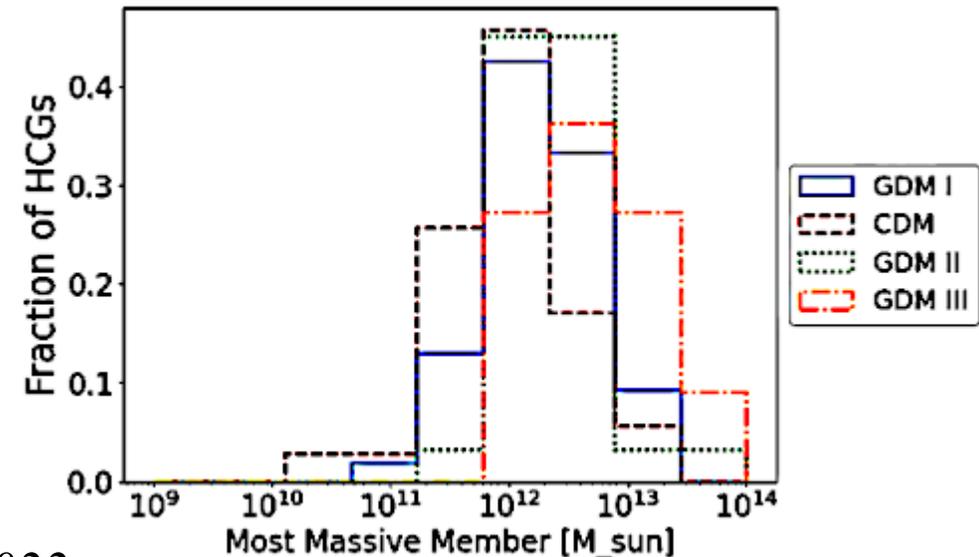
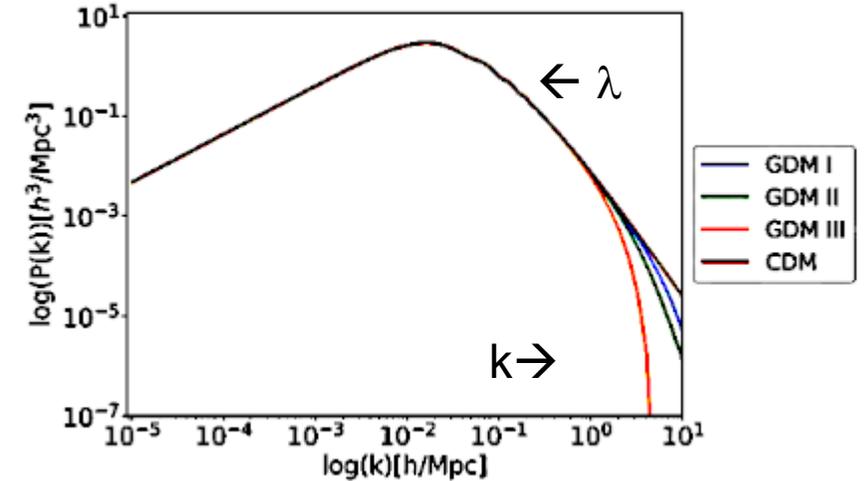
Paramètres: Vitesse du son, viscosité, équation d'état



CDM



GDM



Malgré la puissance moindre à petite échelle! *Lopez-Sanchez et al 2022*

Gaz diffus détecté en UV dans les groupes

Galaxies
individuelles

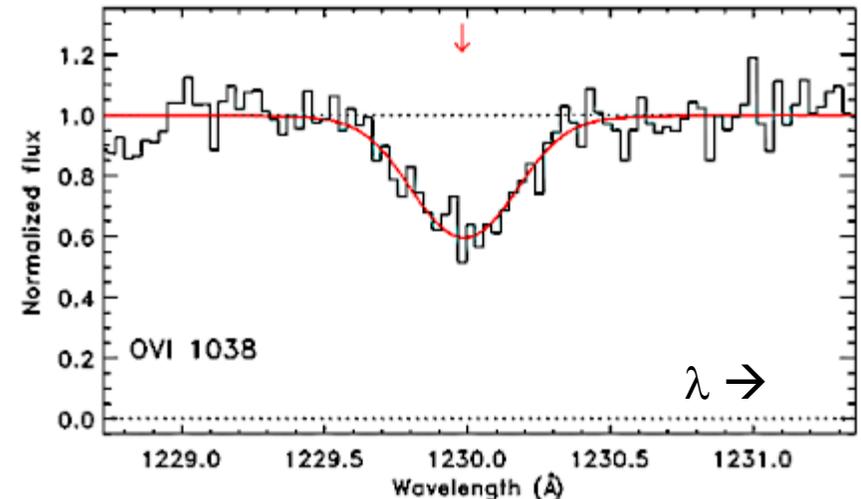
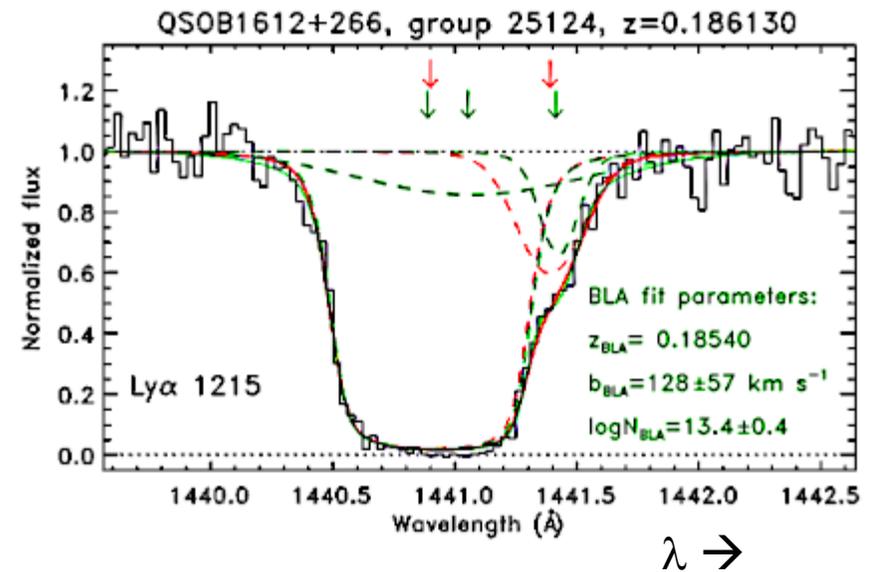
Quelques groupes compacts sont détectés en X,
mais les groupes diffus doivent contenir
du gaz moins chaud (10^7k) \rightarrow UV

Raies en absorption de OVI, NeVIII
ou HI raies larges de Ly α

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

\rightarrow Mais pas partout, et ne suffit pas à
compléter les baryons



Emission en rayons X des groupes

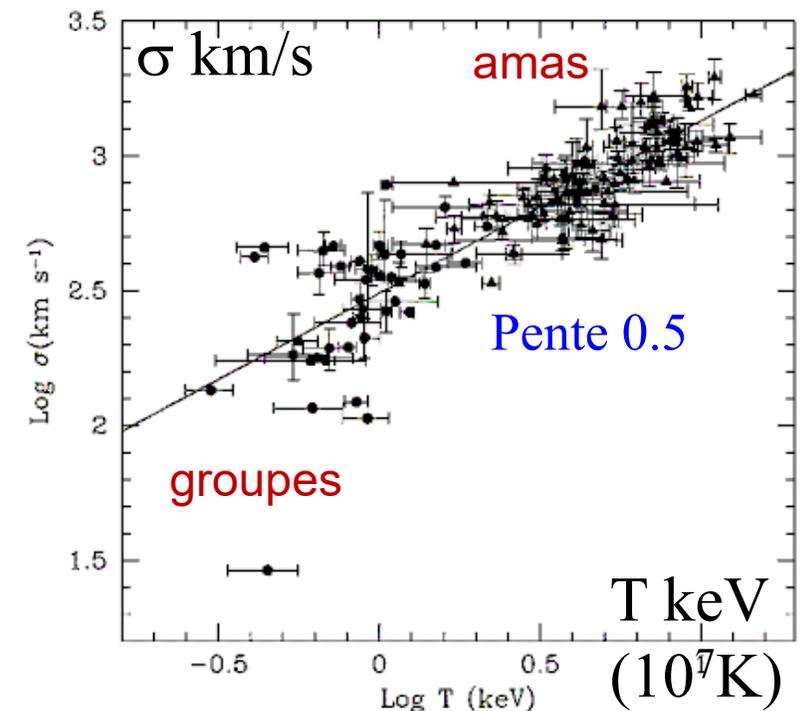
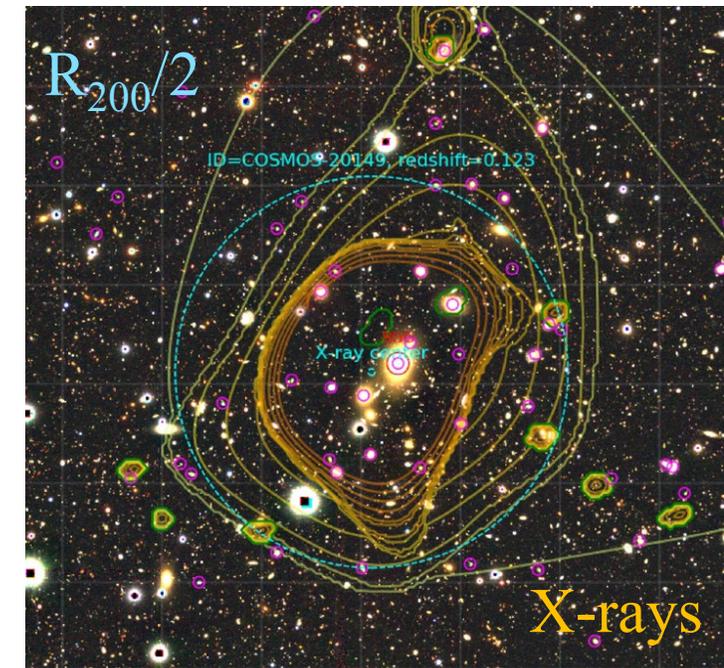
- La moitié des groupes sont émetteurs X, la plupart du temps quand ils possèdent une galaxie elliptique au centre
- Extension 10-50% R_{vir} , Température 0.3-2 keV
- Au-delà, transition vers les amas: relation L_x - T , avec des écarts dûs au pré-chauffage par formation d'étoiles et feedback
- Equilibre hydrostatique donne $M \sim 1.5 \cdot 10^{13} M_{\odot}$

à l'intérieur de R_x

Uniquement gravité: $T \propto \sigma^2$

$L_x \propto T^2$ avec self-similarité

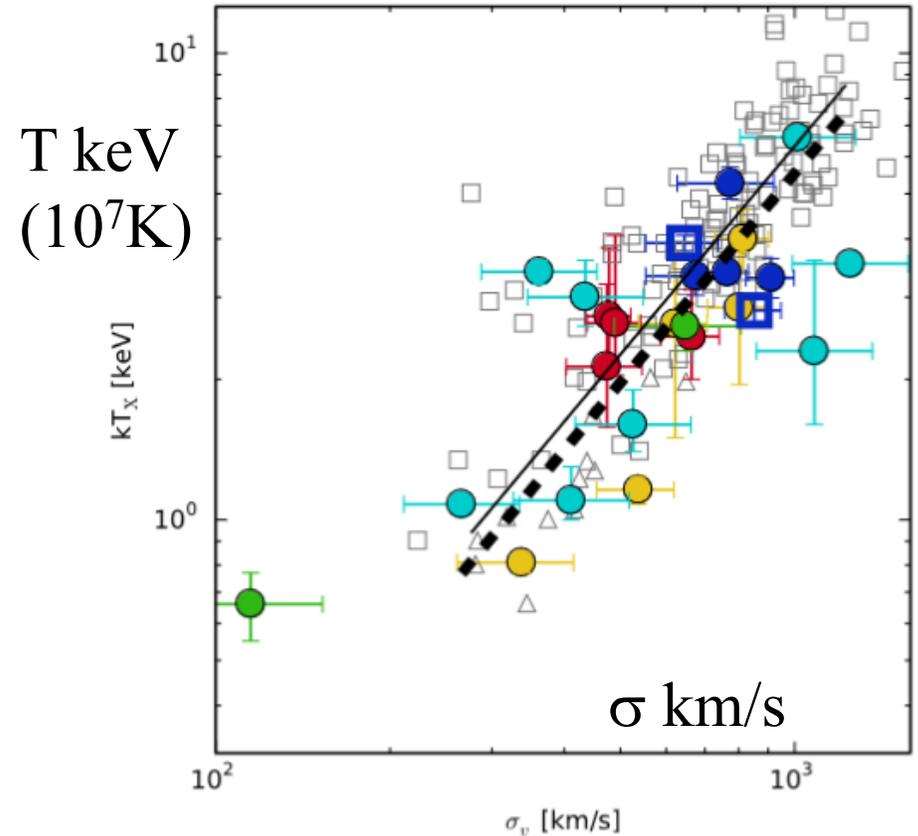
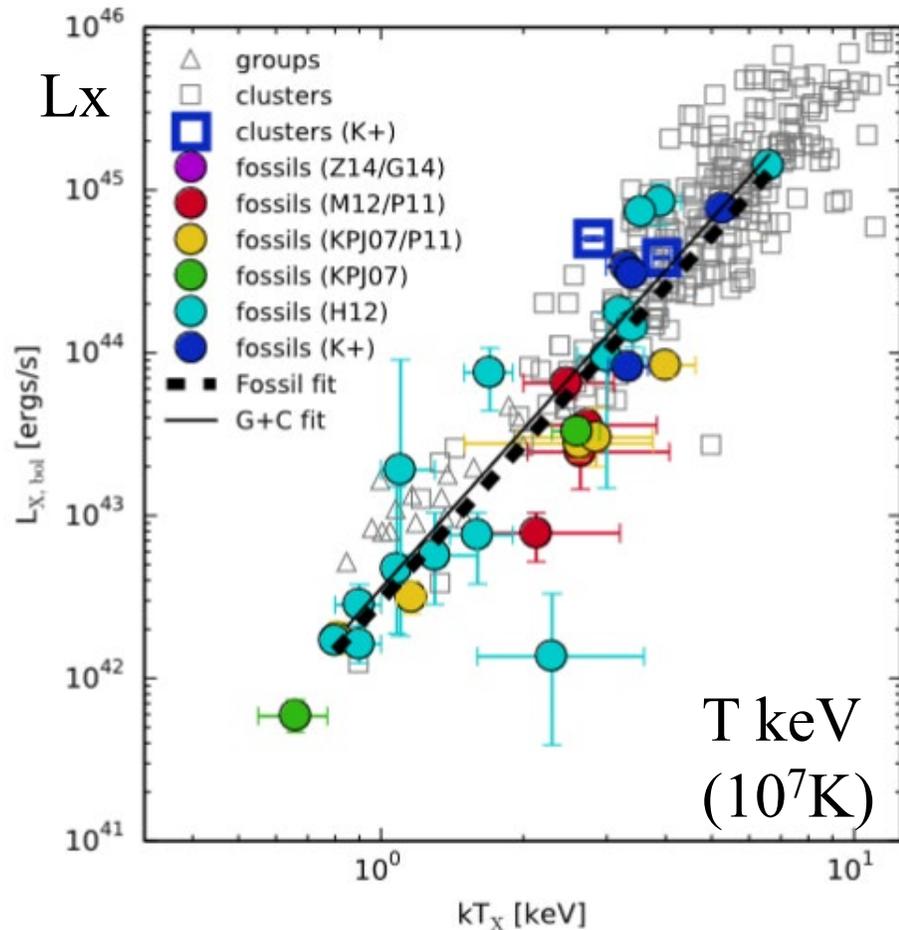
$L_x \propto \sigma^4$



Formation de groupes fossiles

- Une fois les premières galaxies fusionnées, la galaxie la plus brillante est environ 10 fois plus lumineuse et massive que les suivantes → fossile

Gaz X relaxé
 $2.8 < T_X < 5.3$ keV
 $M_{500} > 10^{14} M_{\odot}$



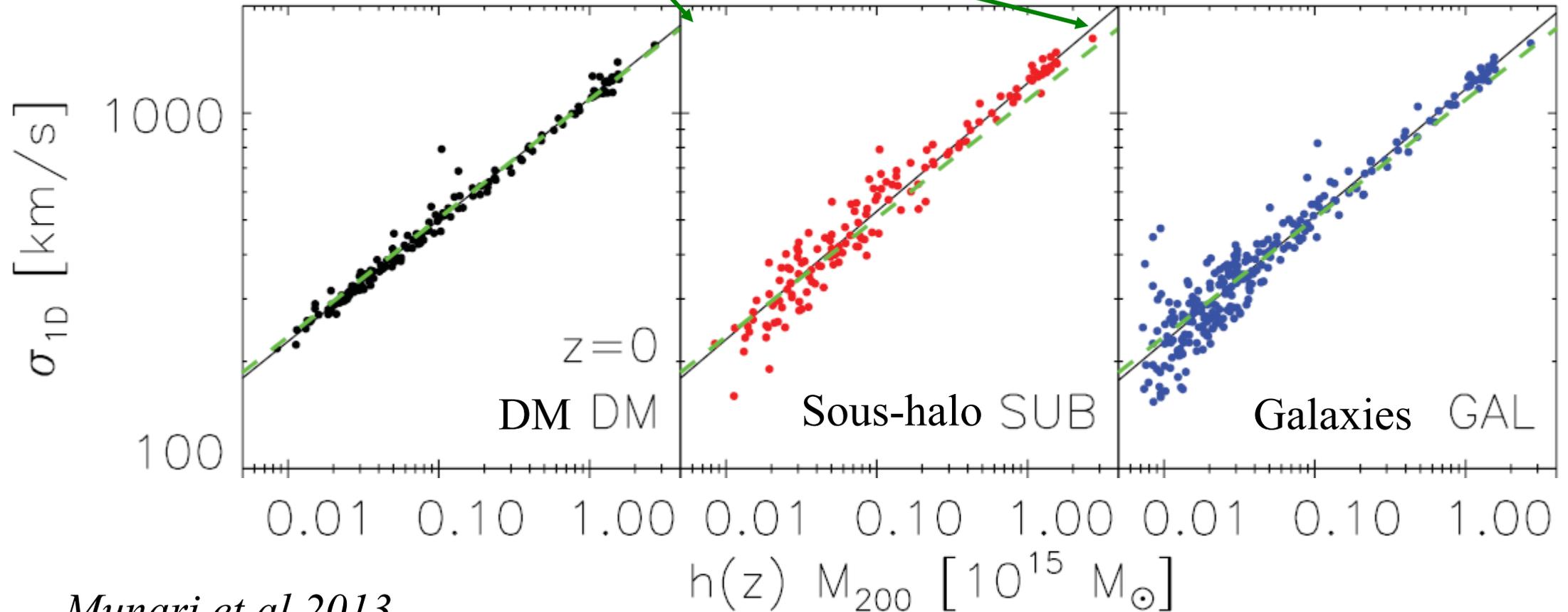
Kundert et al 2015

Le Viriel dans les amas de galaxies

- La relation $\sigma_v \propto M^\alpha$, avec $\alpha = 1/3$ est obtenue comme attendu, entre $z=2$ et $z=0$

Même si la physique des baryons est mal connue dans les halos

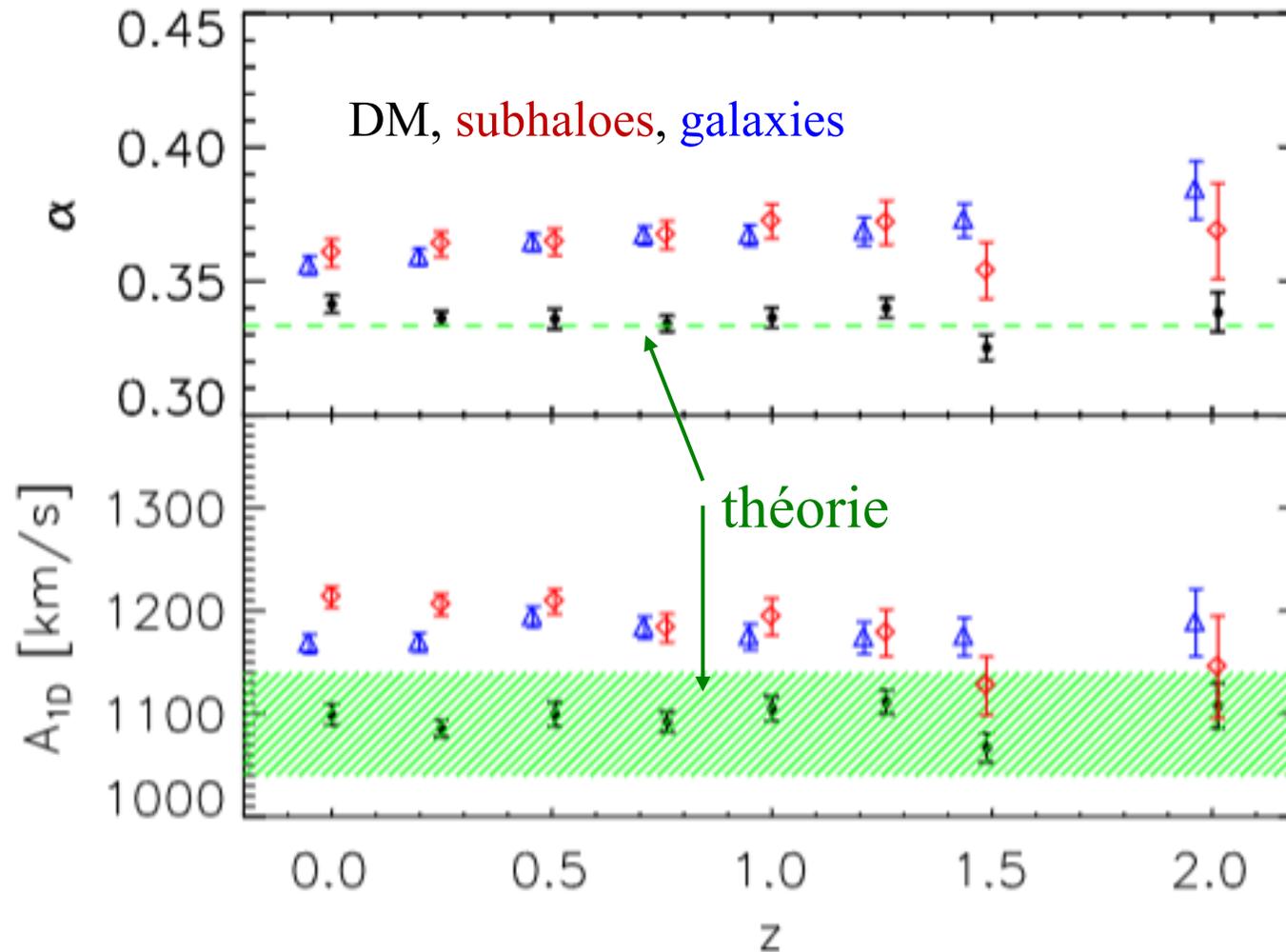
- $V^2 \propto GM/R$, $M \propto R^3$ $M \propto \sigma_v^3$
- Calibrations dans les simulations



Dispersion des galaxies vs halos

- Le rapport entre σ_{gal} et σ_{halo} est appelé le **biais**, pas plus que 10%, >1 ou <1 ?

$$\sigma \propto M^\alpha$$



$$\frac{\sigma_{1D}}{\text{km s}^{-1}} = A_{1D} \left[\frac{h(z) M_{200}}{10^{15} M_{\odot}} \right]^{\alpha}$$

Friction dynamique et destruction de marée agissent sur les sous-halos et les galaxies, mais pas sur la DM

→ Dépend de la physique des baryons

Emission X des amas de galaxies vs z

La relation $L_x \propto T^2$, est très bien vérifiée, si on excise la région centrale des flots de refroidissement

Cette relation est satisfaite lorsqu'uniquement l'énergie gravitationnelle joue un rôle. Des perturbations surviennent lorsqu'il y a des AGN ou du feedback SN, etc

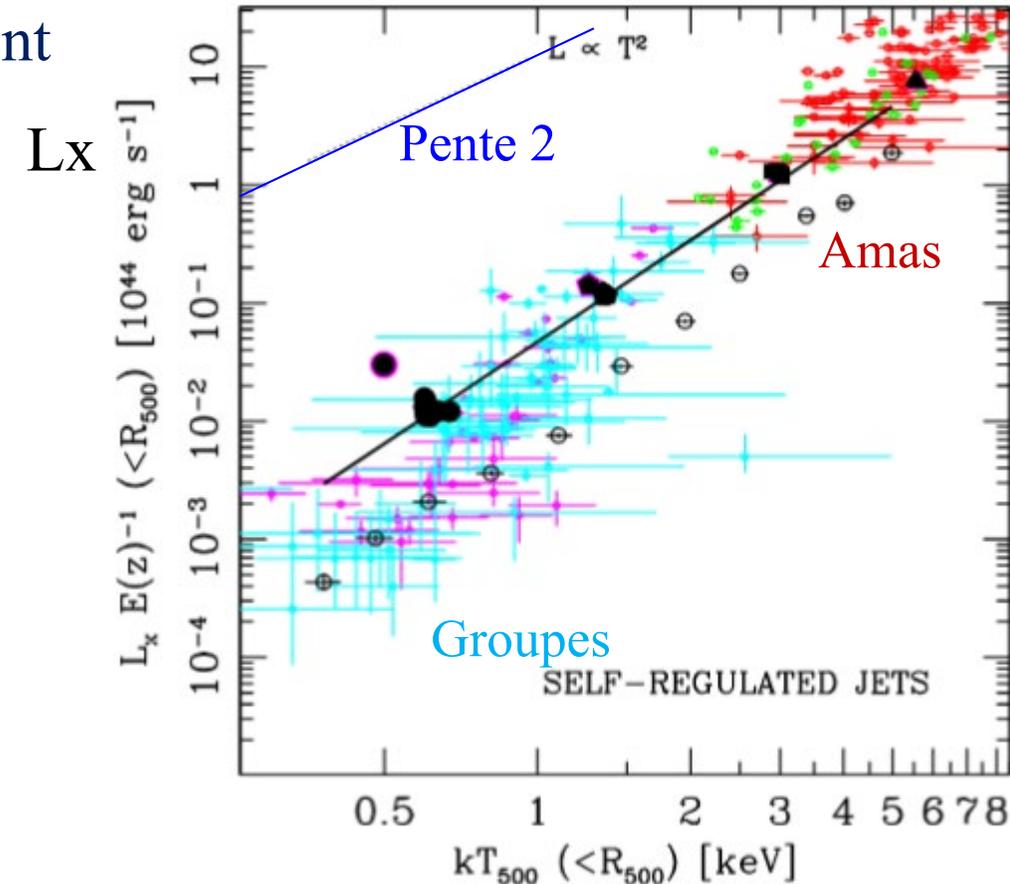
A T fixée, $L_x \propto (1+z)^{1.5}$,

M_{gaz} à L_x fixée, $\propto (1+z)^{-1.8}$,

M_{gaz} à T fixée, $\propto (1+z)^{-0.5}$,

A grand z, gaz plus dense, plus chaud, plus lumineux

Chauffage du gaz?
Est-ce que la fraction de gaz égale f_b à chaque z?



Fraction de baryons visibles

Fraction de baryons détectée $f = M_b / (0.17 M_{500})$ dans les diverses structures, normalisée à la fraction universelle 0.17

M_{500} = masse dynamique dans R500

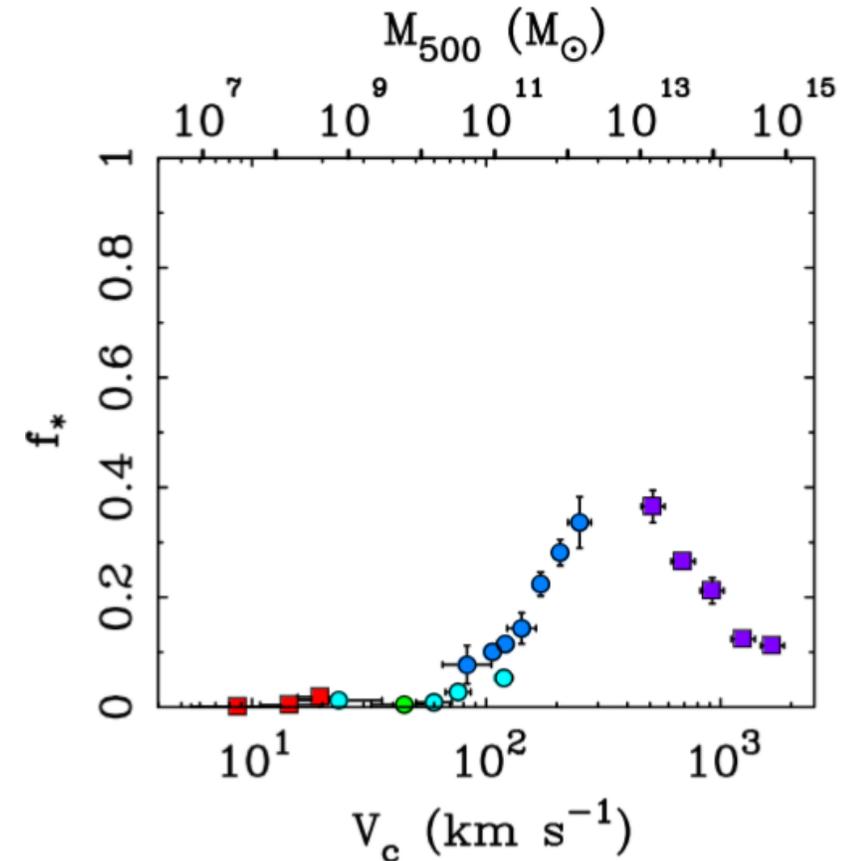
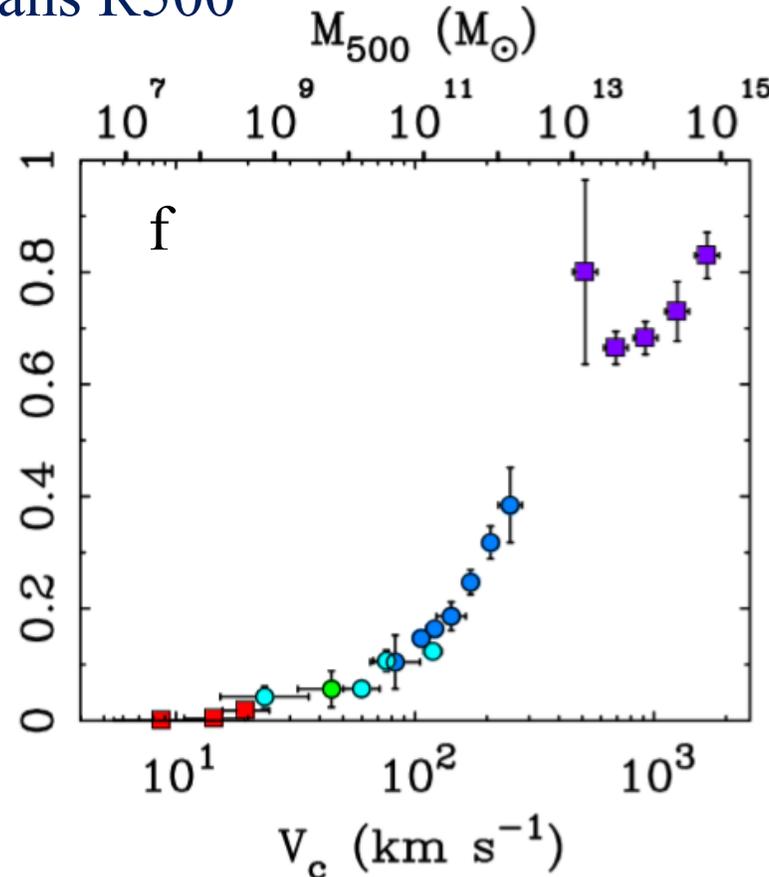
Faible f : feedback?

Mais pourquoi sans dispersion?

Pourquoi f remonte pour les grandes masses?

$M_{\text{tot}} \propto v^3$, auto-similarité

McGaugh et al 2010



$$f^* = M_* / (0.17 M_{500})$$

Equilibre Hydrostatique, beta-modèle

Densité de surface X

$$\Sigma_X \propto [1+(r/rc)^2]^{-3\beta+1/2}$$

Grad P = $\rho_g g = \rho_g G/r^2 \int 4\pi r^2 \rho_M dr$ densité du gaz ρ_g , de la matière totale ρ_M

$$P = kT \rho_g/m$$

$$d/dr [r^2/\rho_g d/dr (kT \rho_g/m)] = 4\pi Gr^2 \rho_M$$

→ La densité ρ_g et la température T donnent la DM = $\rho_M - \rho_g$

En symétrie sphérique, en appelant $kT_\phi(r) = G M(r) m/(2r)$

T_ϕ = température de la sphère isotherme avec le même $M(r)/r$

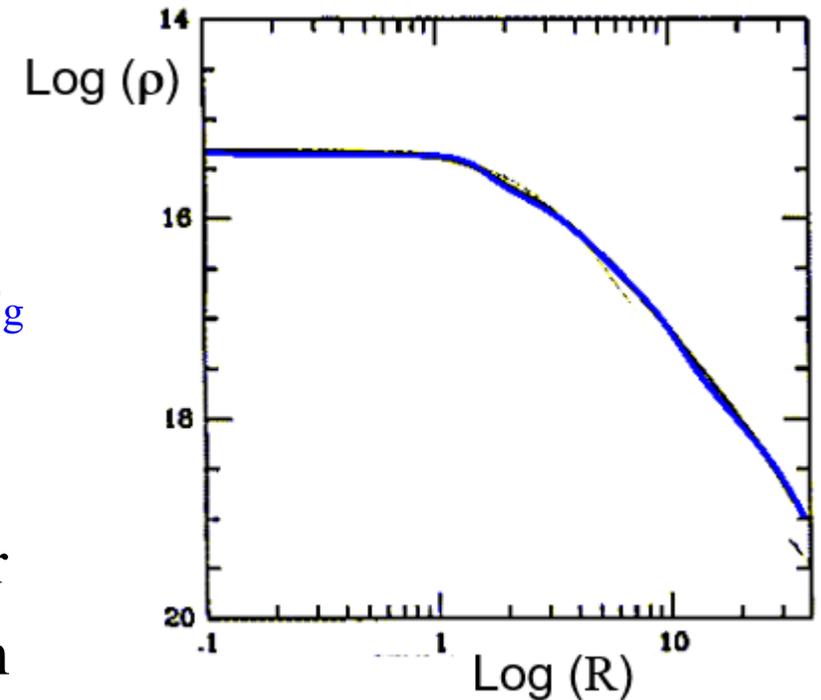
$$\frac{d \ln \rho_g}{d \ln r} + \frac{d \ln T}{d \ln r} = -2 \frac{T_\phi(r)}{T} \quad \sigma \text{ dispersion, avec Poisson}$$

Soit $d \ln \rho_g/dr = \beta d \ln \rho_M/dr$

avec $\beta = m \sigma^2/kT$

en général $\beta \sim 2/3$

et $M(r)/r = 2kT/(Gm)$



$$\rho_M \propto [1+(r/rc)^2]^{-3/2}$$

$$\rho_g \propto [1+(r/rc)^2]^{-3\beta/2}$$

Profils de lumière et de masse des amas

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

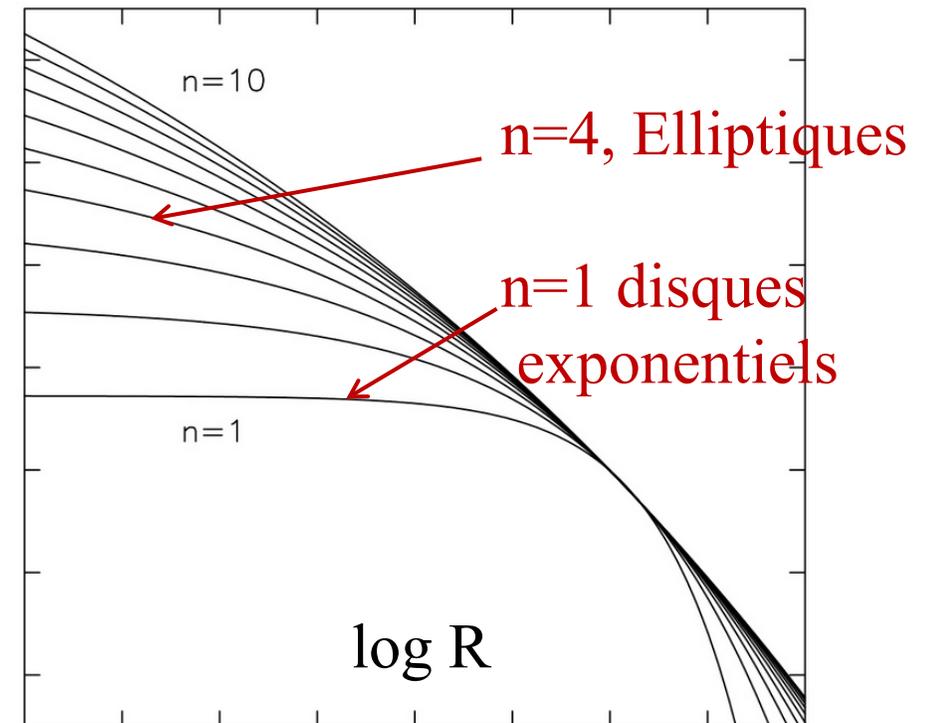
gravitationnellement et “relaxés”

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

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

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

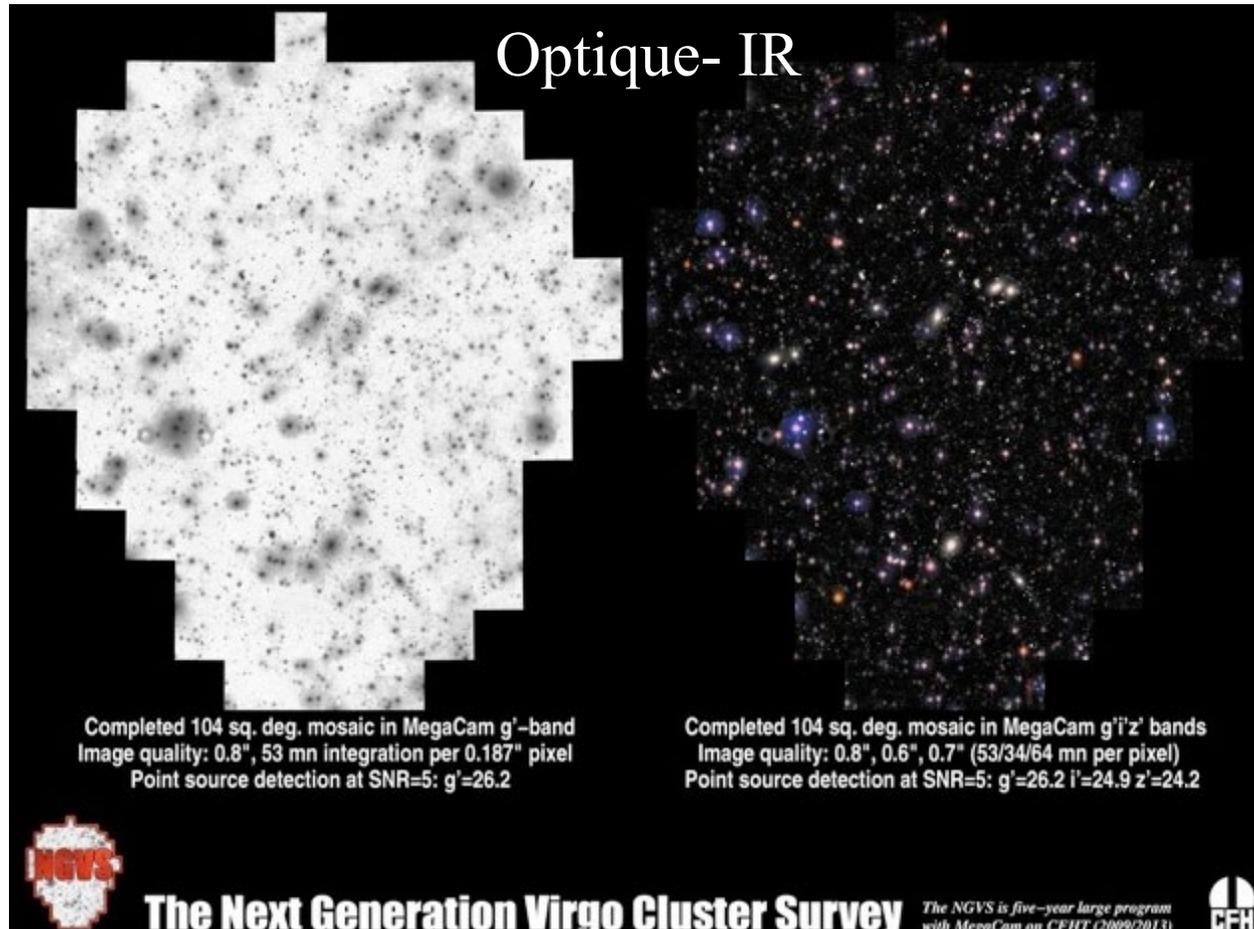
log I (brillance de surface)



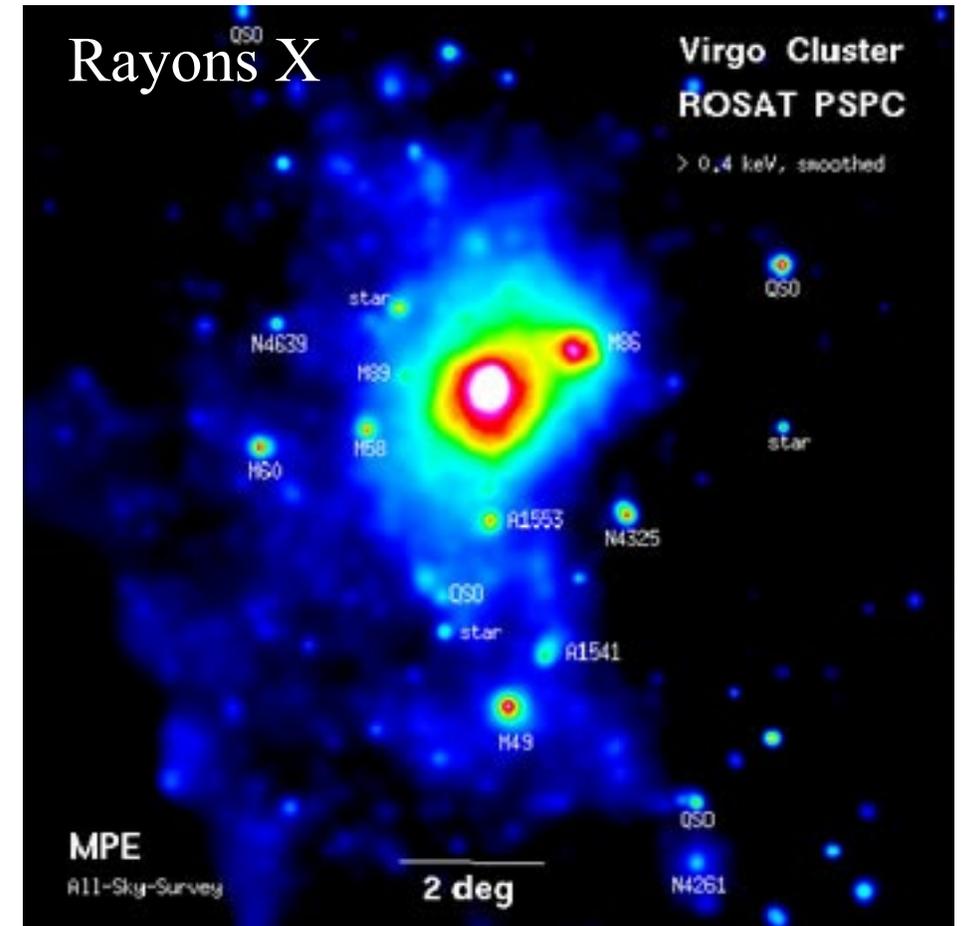
Distribution de masse

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

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

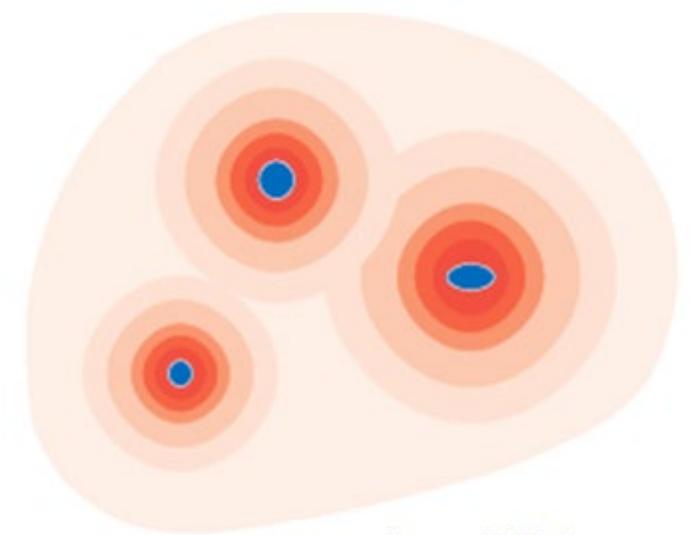
Lors de la formation de l'amas, la matière des galaxies est balayée

→ Matière noire mise en commun

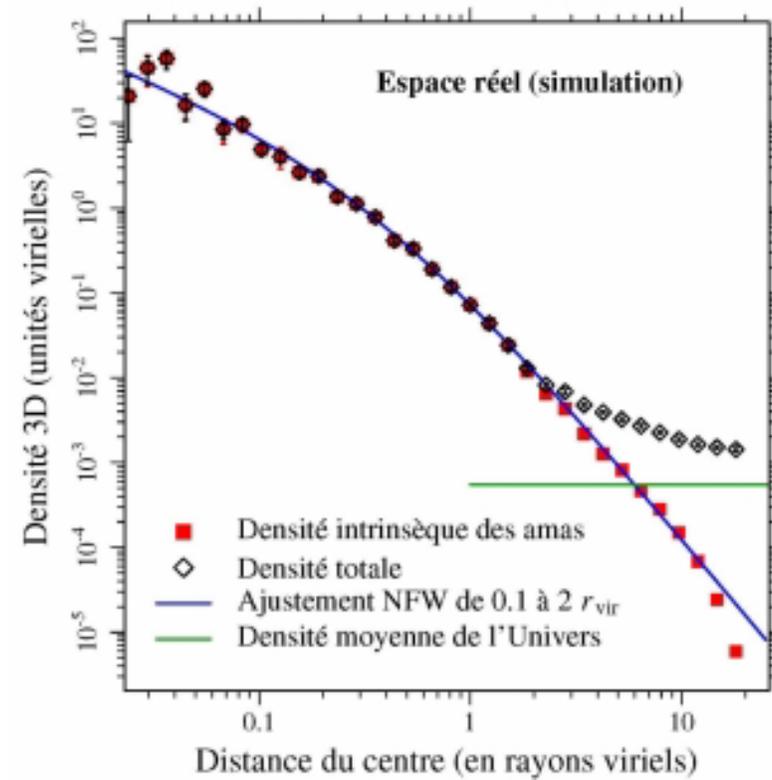
→ Le gaz est chauffé à $T_{\text{vir}} \sim 10^7 - 10^8$ K

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



ρ Moy
Univers

Profils de masse et relations d'échelle

Profils plutôt NFW (cuspidés) $\rho_M(r) \propto r^{-p} (r + r_s)^{p-q}$

$1 < p < 1.5$ $2.5 < q < 3$ (isotherme tronquée)

On définit M_Δ , dans le rayon r_Δ , où la densité est $\Delta \rho_{cr}$

$\Delta = 200$ (Viriel), ou 500 pour S/N ou relaxation

$M_\Delta \propto \sigma^3 / \Delta^{1/2}$ $T \propto M^{2/3}$

$$\sigma \propto M^{1/3}$$

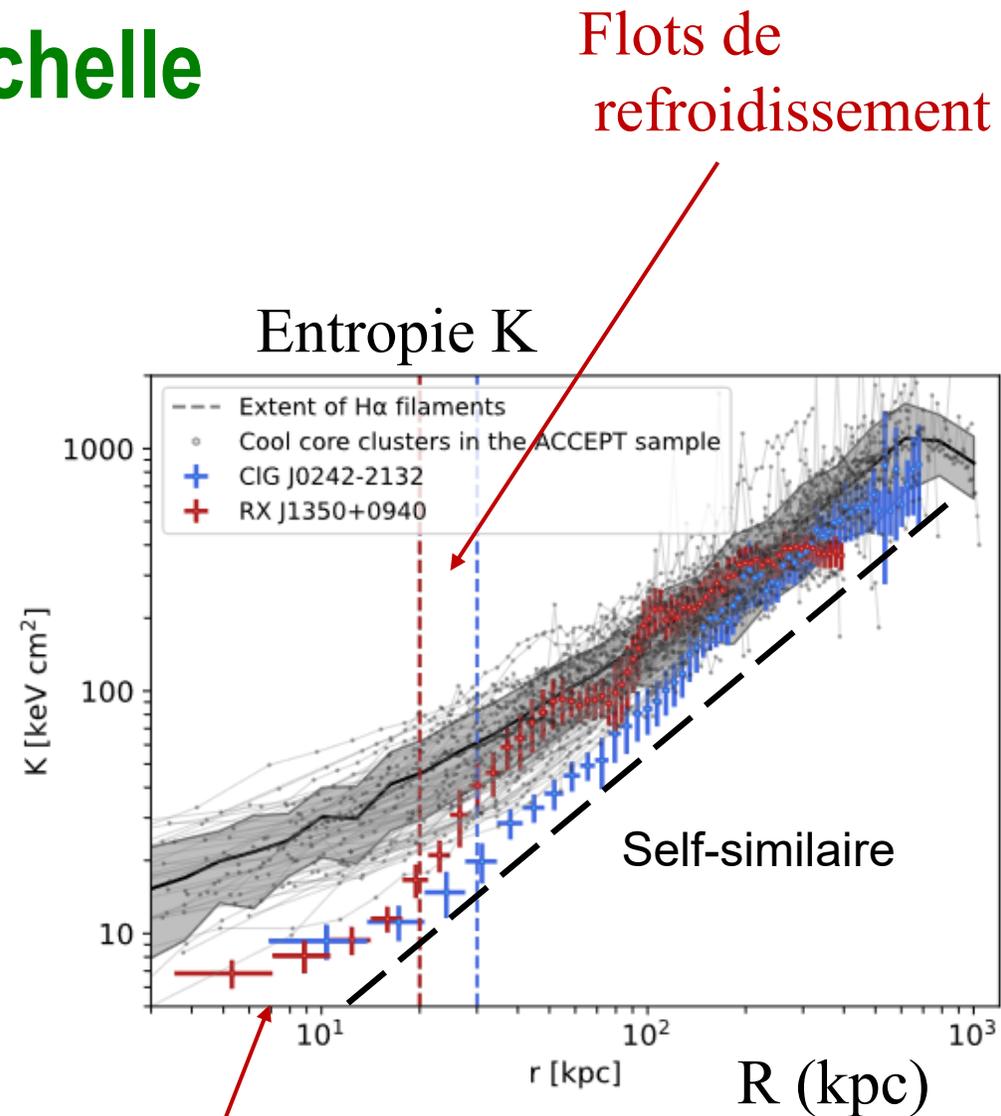
Relation avec la luminosité X

Si la distribution du gaz est self-similaire,

quelle que soit M ,

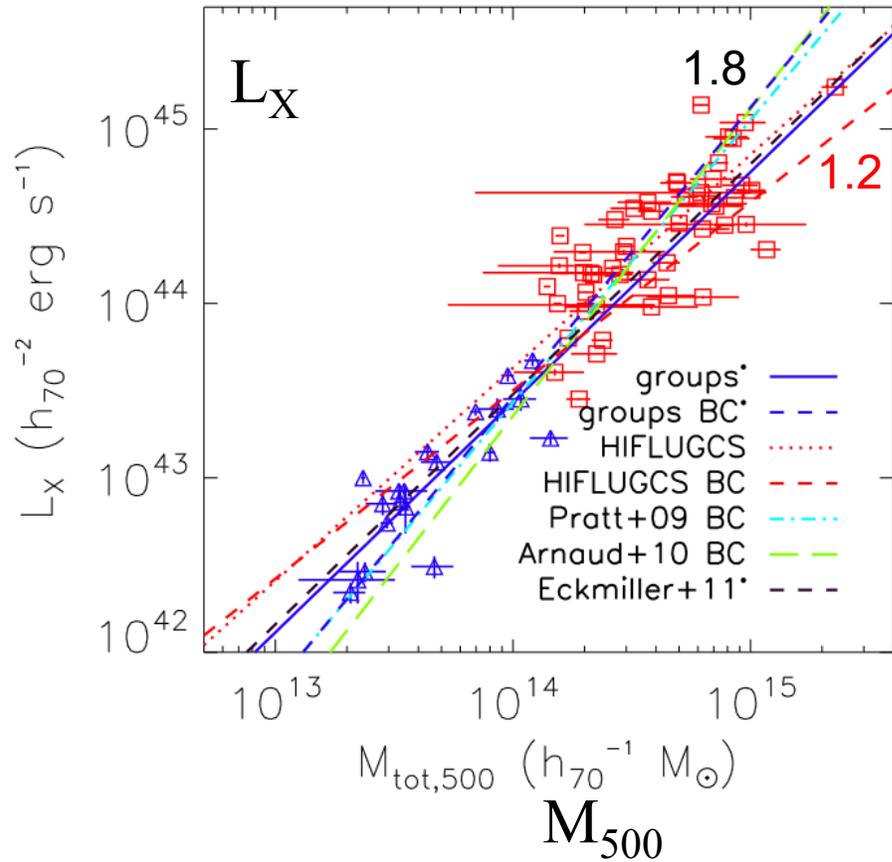
On attend $L_X \propto T^2 \propto \sigma^4 \propto M^{4/3}$

Observations proches, $L_X \propto M^{1.8}$



Relations d'échelle incluant les groupes

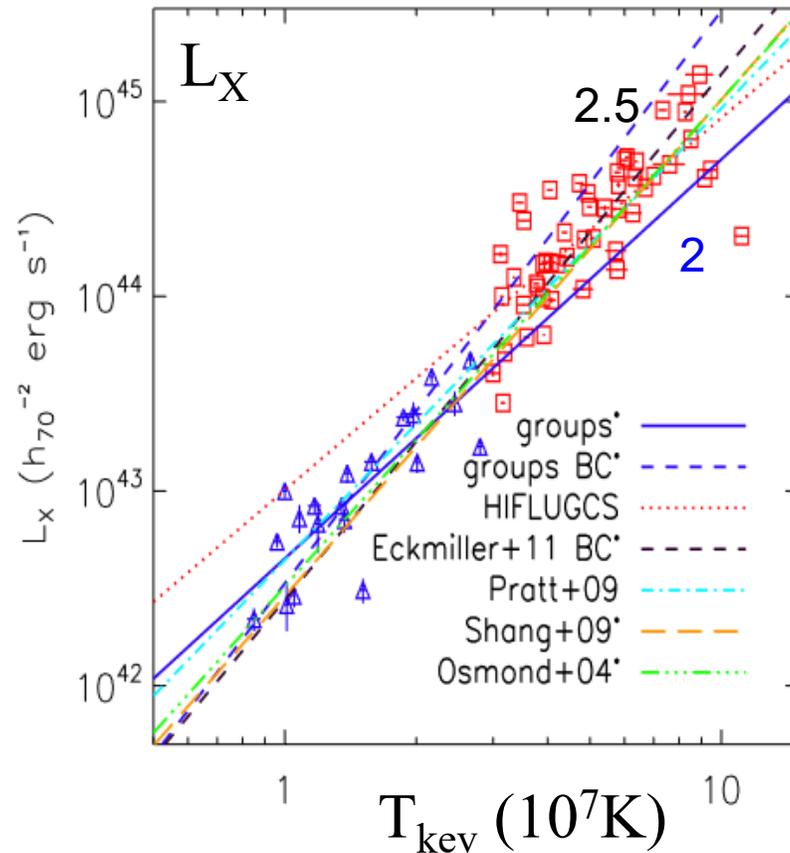
Self-similaire: pente 1.3



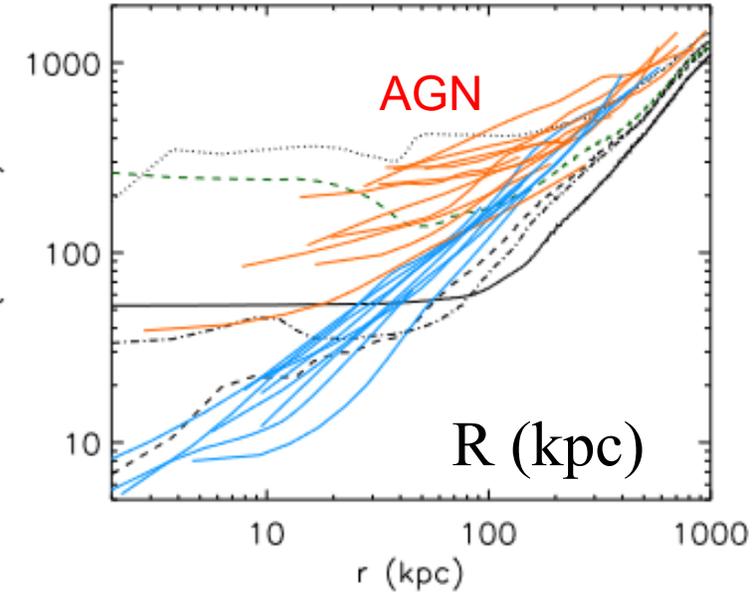
Lovisari et al 2015

Biais de Malmquist →
Corriger de la complétude

Self-similaire: 2



Entropie K



Dubois et al 2011

Simulations: cœurs
froids ou non
Se réchauffent avec
les AGN
→ Empêchent le gaz
de se concentrer

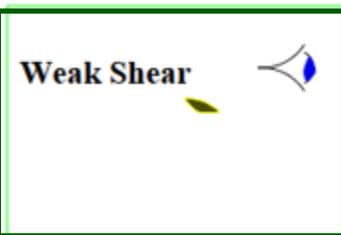
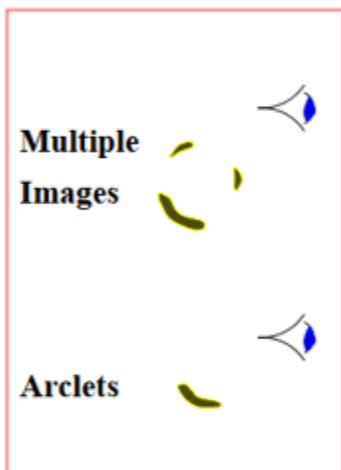
Outil: lentille gravitationnelle

Observateur

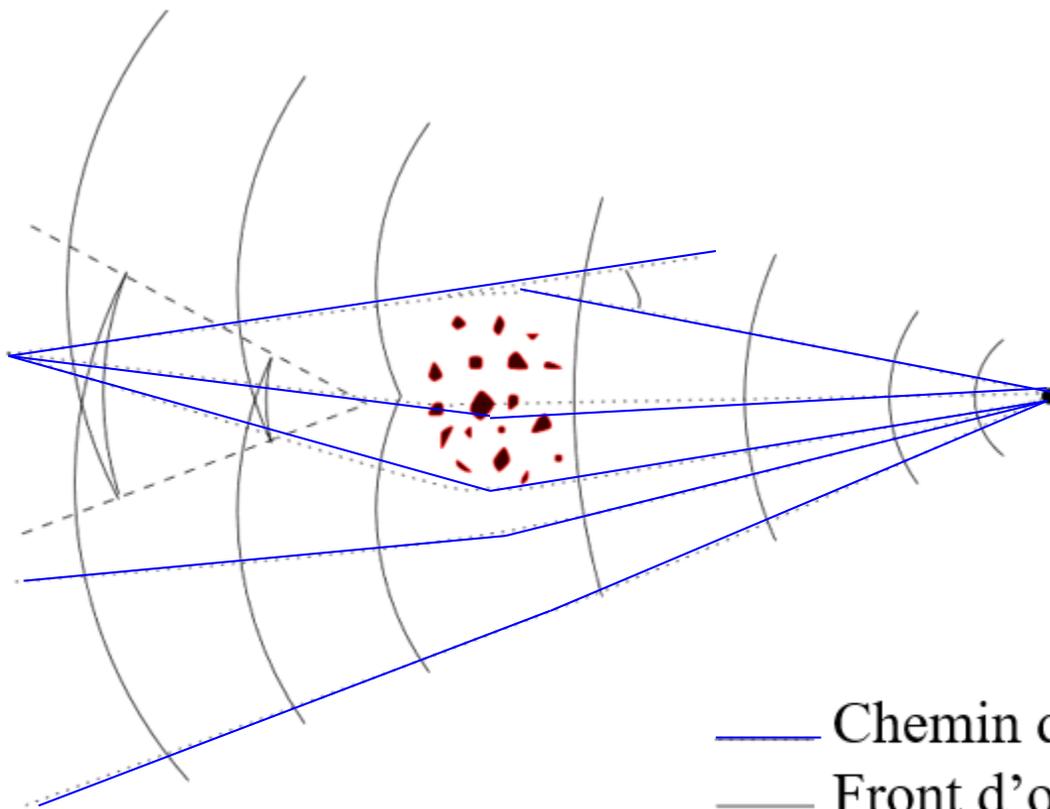
Amas de galaxies

Galaxie de fond

Non-linéaire



Linéaire

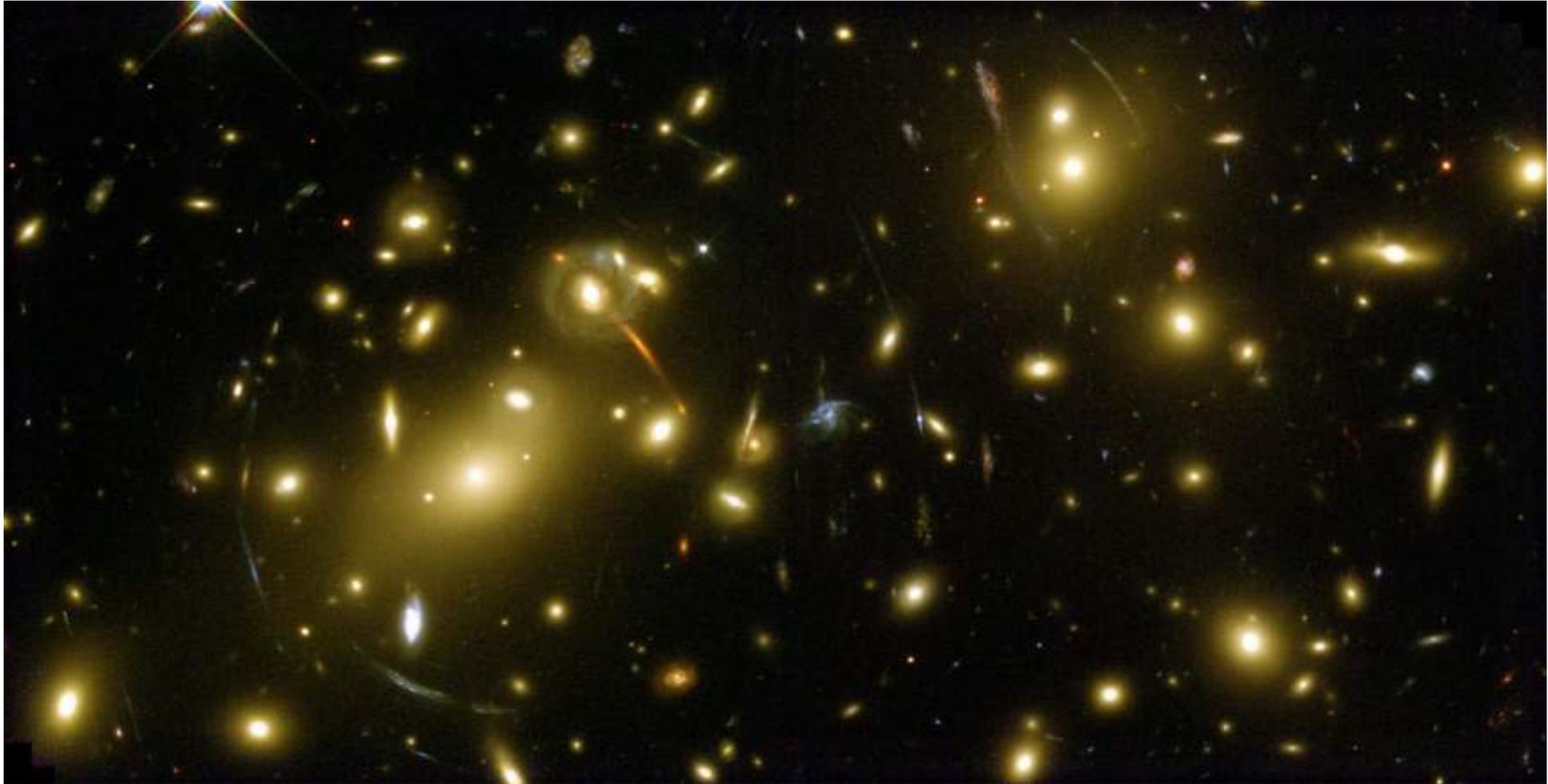


→ Permet de cartographier la matière noire

- Chemin de la lumière
- Front d'onde
- - - Images multiples

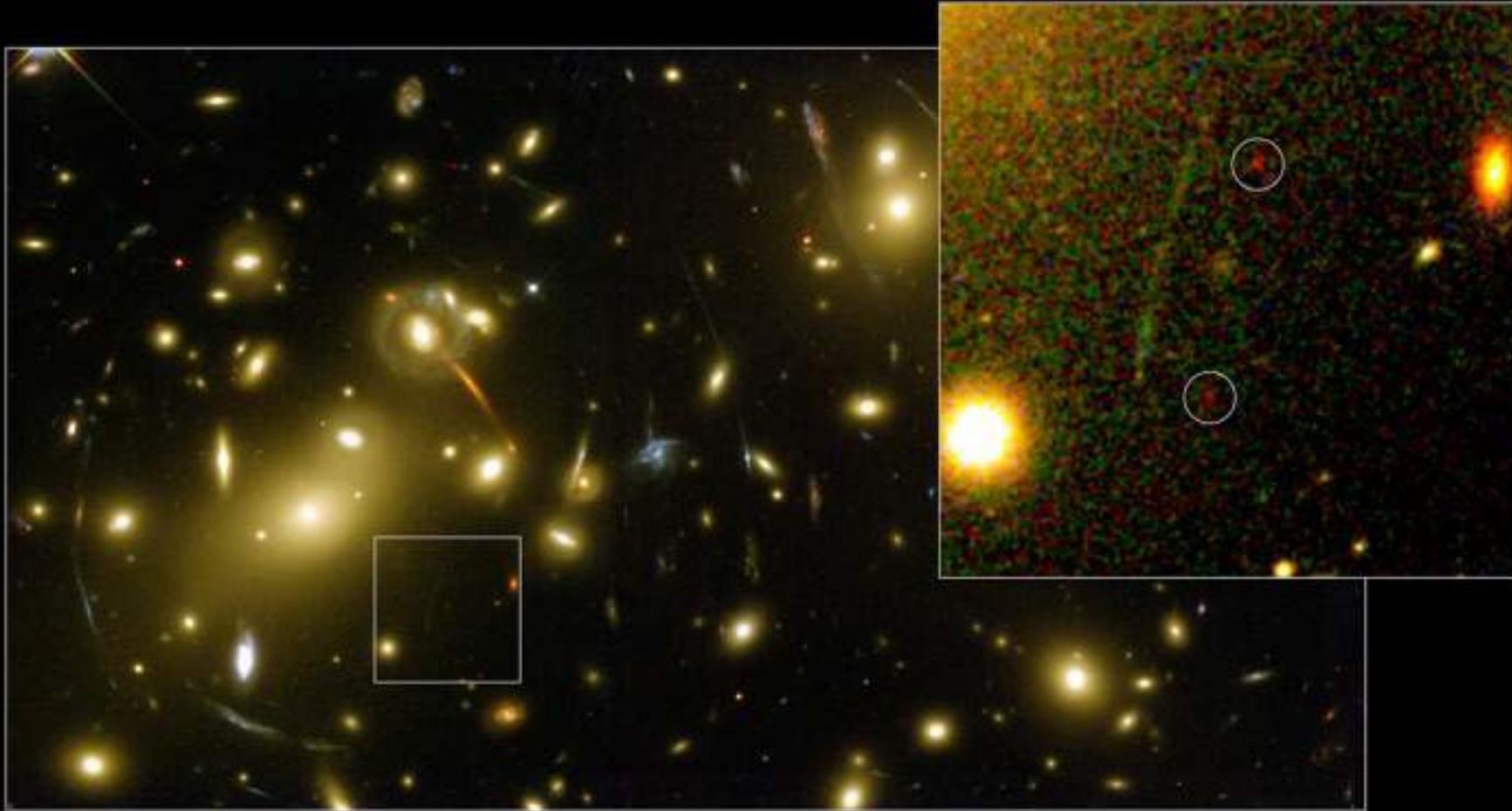
Lentilles et arcs dans Abell 2218

Arcs: galaxies de fond, à différents redshifts → couleurs différentes



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

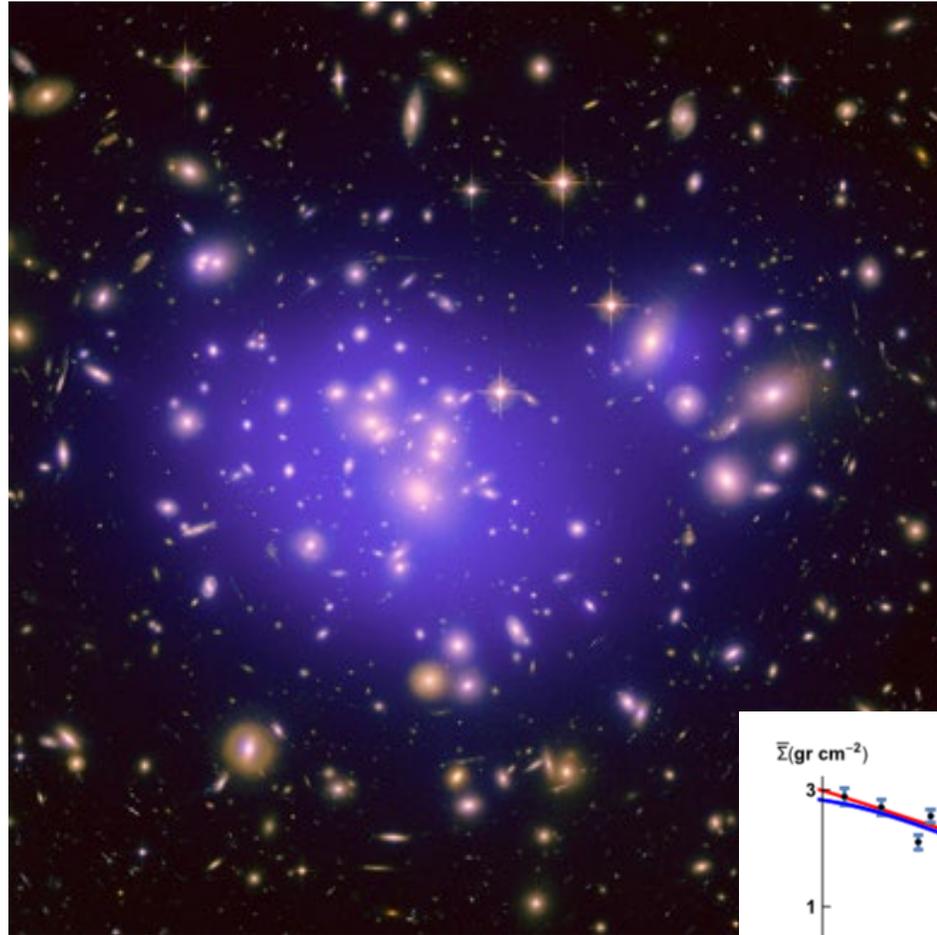
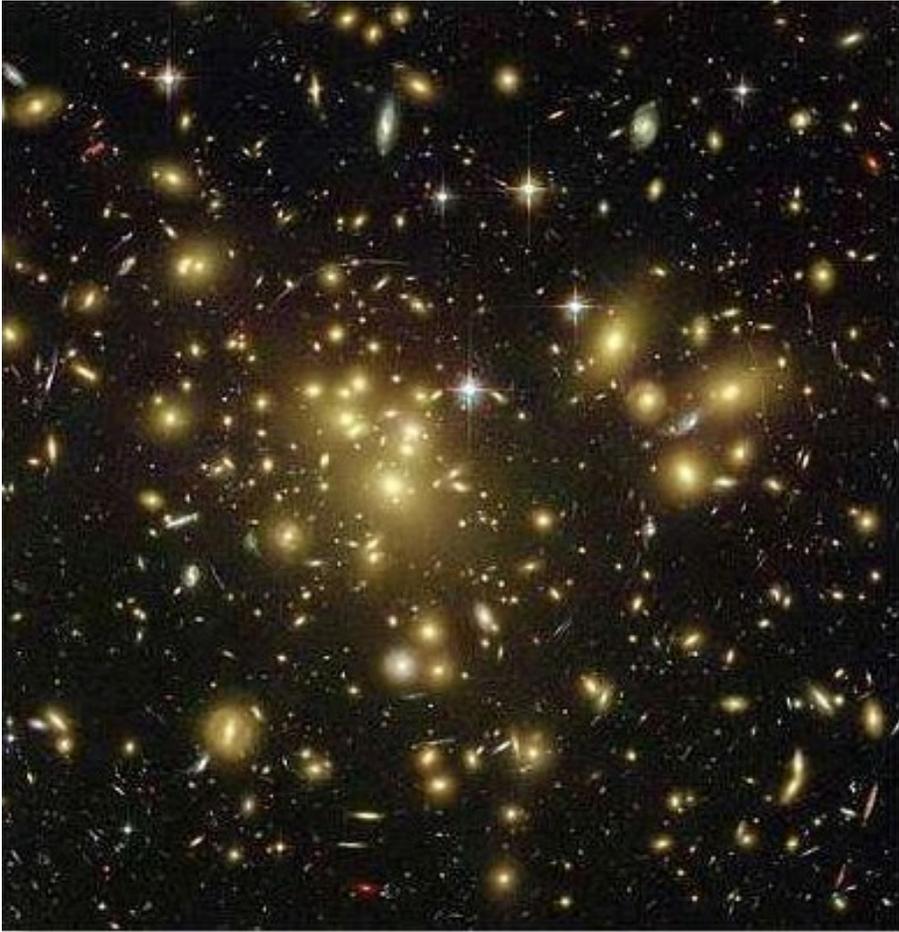
Abell 2218 (Details)



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, $z=0.183$, 800Mpc

En bleu: matière totale



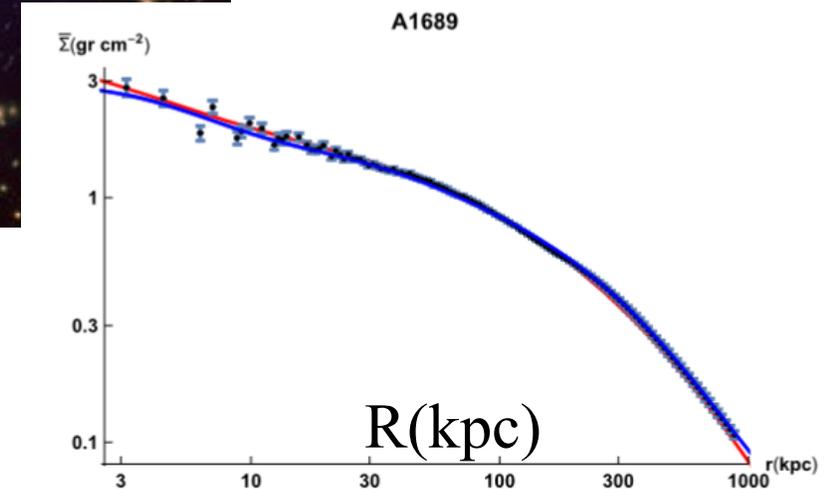
Nieuwenhuizen et al 2021

Densité de surface

Un des plus grands anneaux 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*)





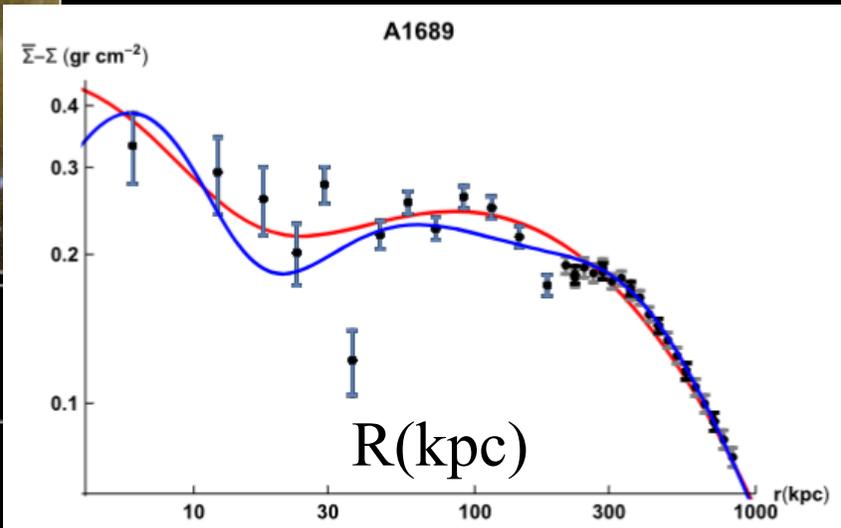
Rouge double exponentielle
 Bleu: fermions thermiques 1eV

Nieuwenhuizen et al 2021

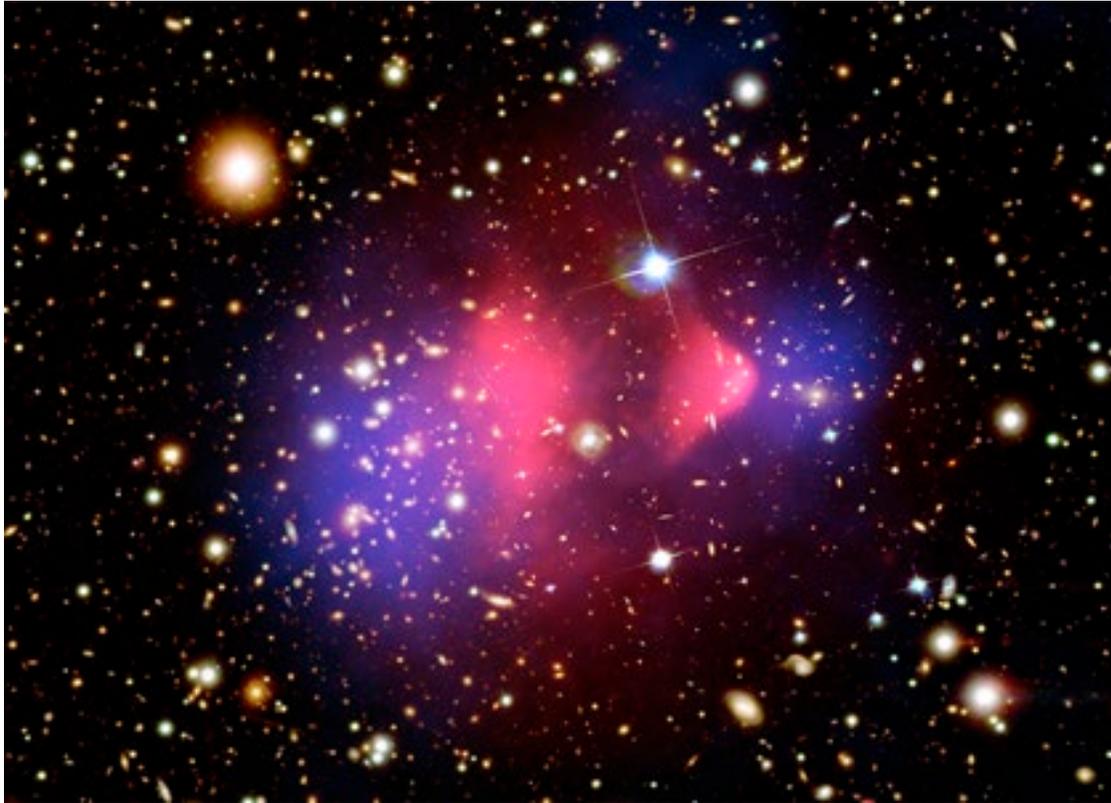
Densité de surface $\Sigma - \langle \Sigma \rangle$

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

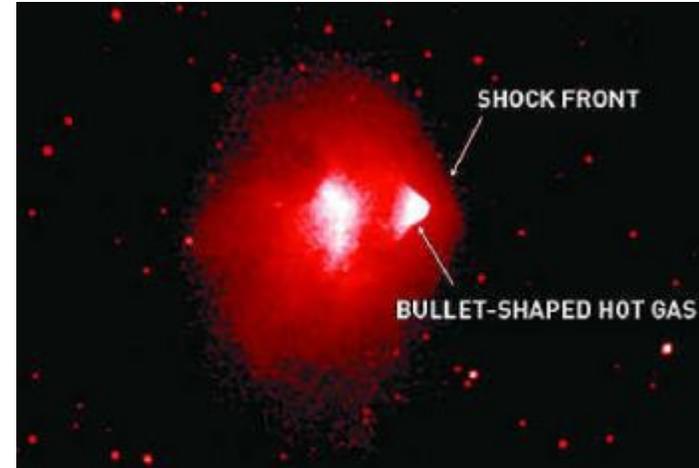
NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA • STScI-PRC03-01b



L'amas du boulet



Gaz X



$V=4700$ km/s
Problem for
CDM



Masse totale

Preuve de l'existence de matière non-baryonique?

Possible d'expliquer les observations avec MOND + neutrinos,
stériles, ou bien baryons *Angus et al 2006*

Les amas sont toujours un problème pour MOND, pas seulement le boulet

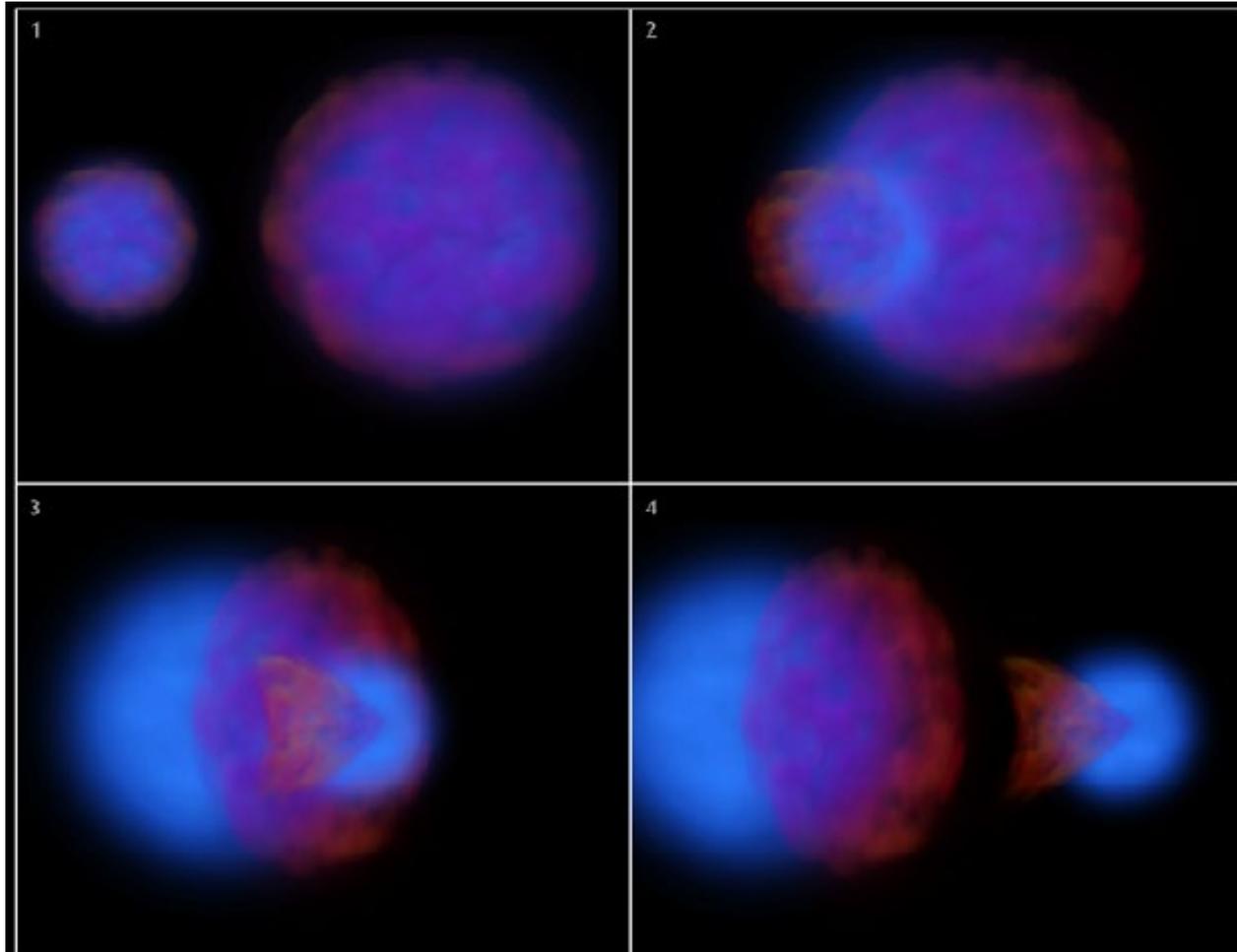
Simulation CDM

La vitesse de la collision est obtenue

à partir de la forme du choc = $4700_{\pm 500}$ km/s (Mach 3)

→ impossible de réconcilier avec CDM (*Lee & Komatsu 2010*)

Masse de l'amas
 $2 \cdot 10^{15} M_{\odot}$



CDM peut seulement
 $V < 3500$ km/s
MOND > 4500 km/s

Collision à 16%
sur-estimée?

$V(\text{gaz})$ pourrait être
 $> V(\text{CDM})$

Vitesse du choc 16% supérieure à celle des amas

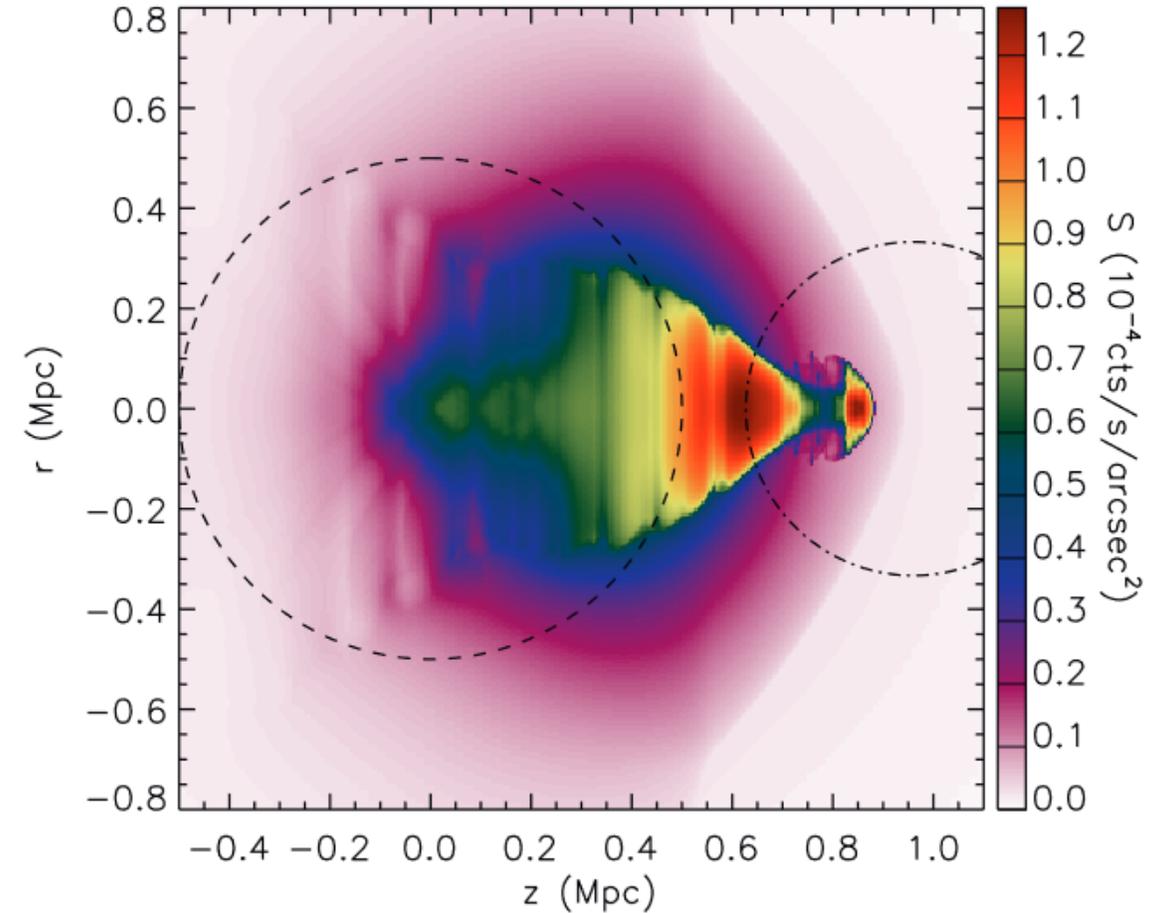
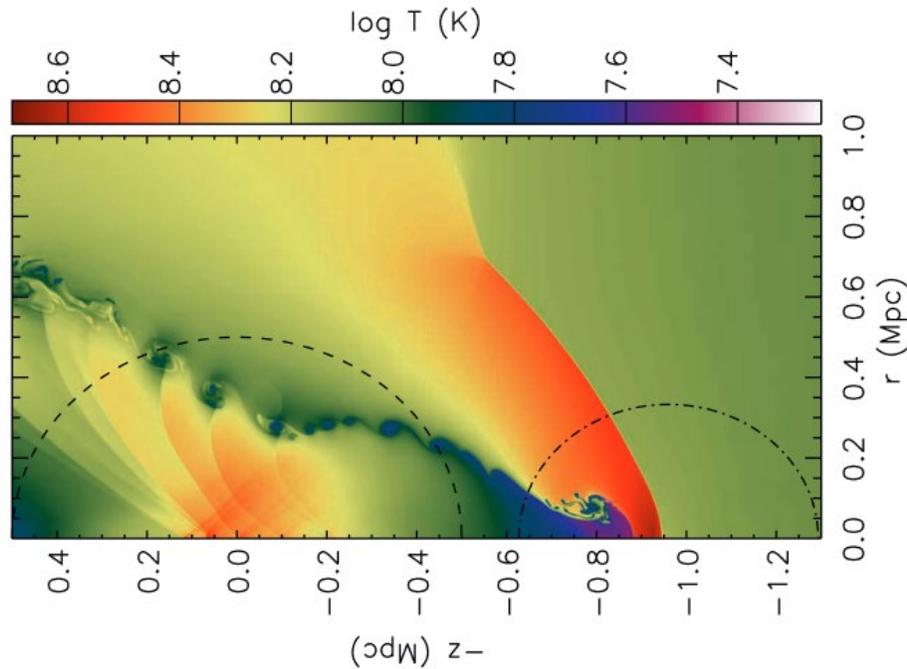
Il est possible dans une collision de plein fouet, d'avoir un choc à 4700km/s, mais des amas en vitesse relative de 3000km/s seulement

Besoin d'une 5^{ème} force?

Le gaz est projeté en avant du choc à 1100km/s

Front de choc plus rapide que les amas

Ce qui permettrait de résoudre en partie le problème CDM (*cf Springel & Farrar 2007*)



Milosavljevic et al 2007

Abell 520 $z=0.201$



Rouge= gaz X

Contours= lentilles

→ Matière noire

coincide avec le gaz X

Mais vide de galaxies

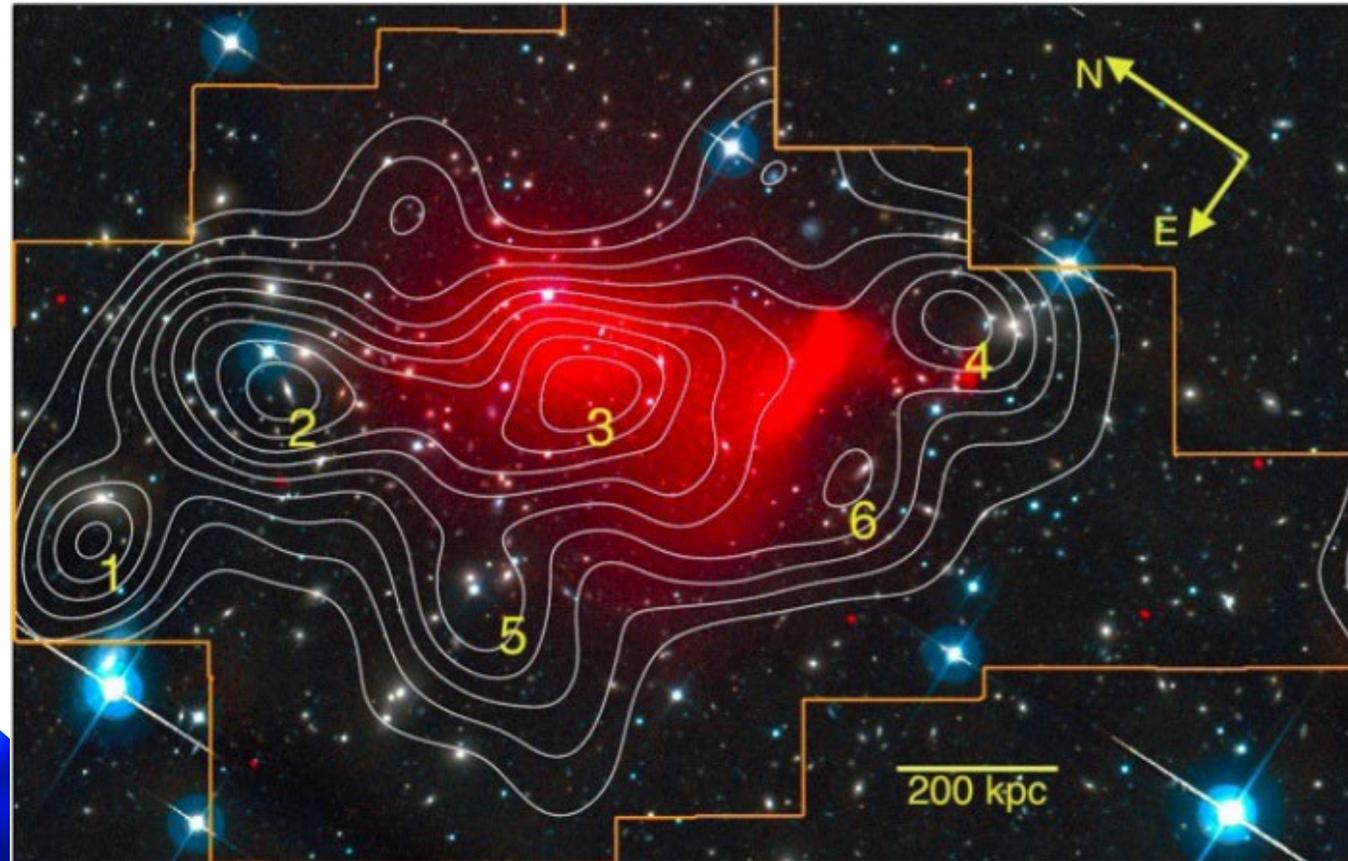
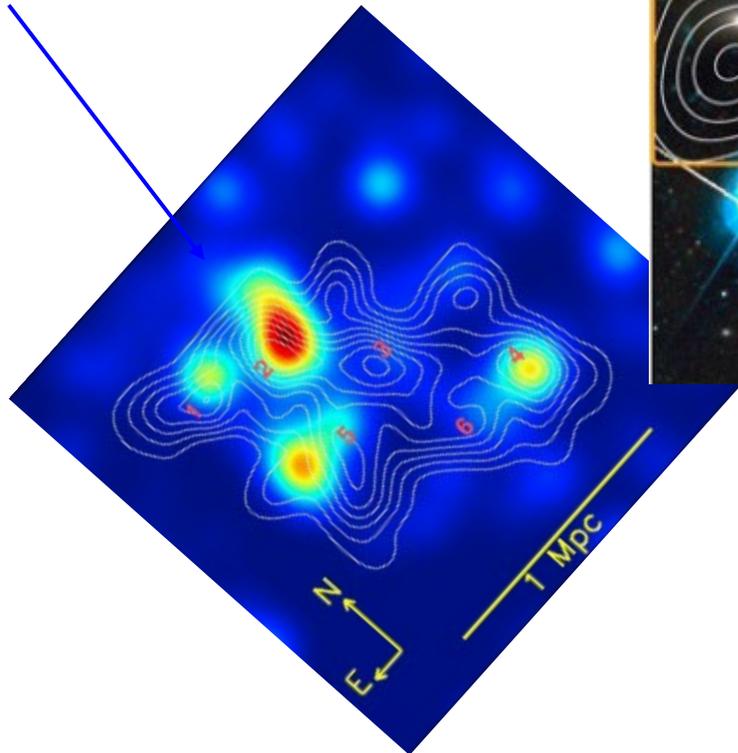
Cas opposé!

Nécessaire de rassembler un grand nombre de cas

Jee et al 2012

A520: Cœur noir // rayons X

La matière noire est au centre 10σ
Contours de DM
(cisaillement gravit)
X-ray (rouge)
B-band CFH (blue)

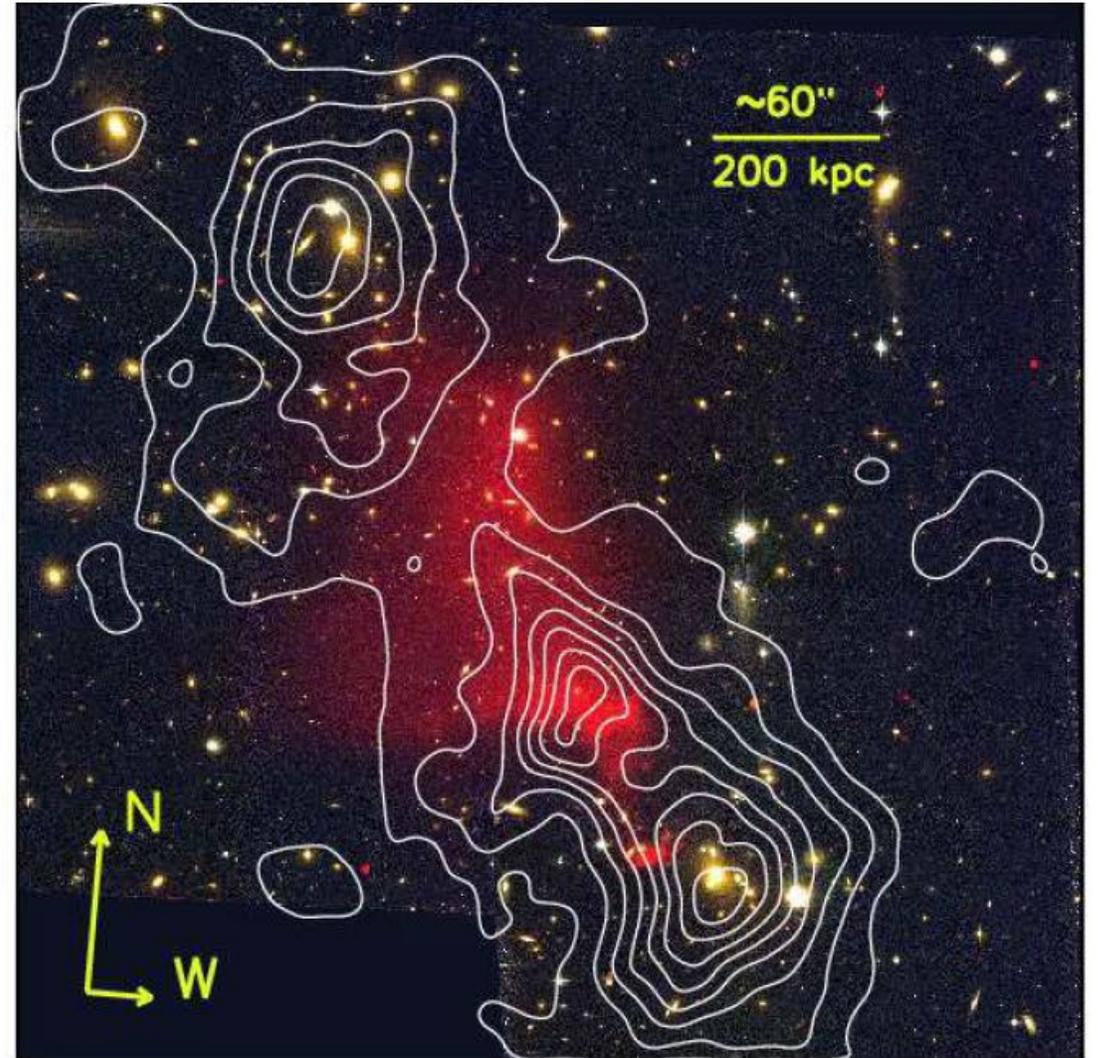
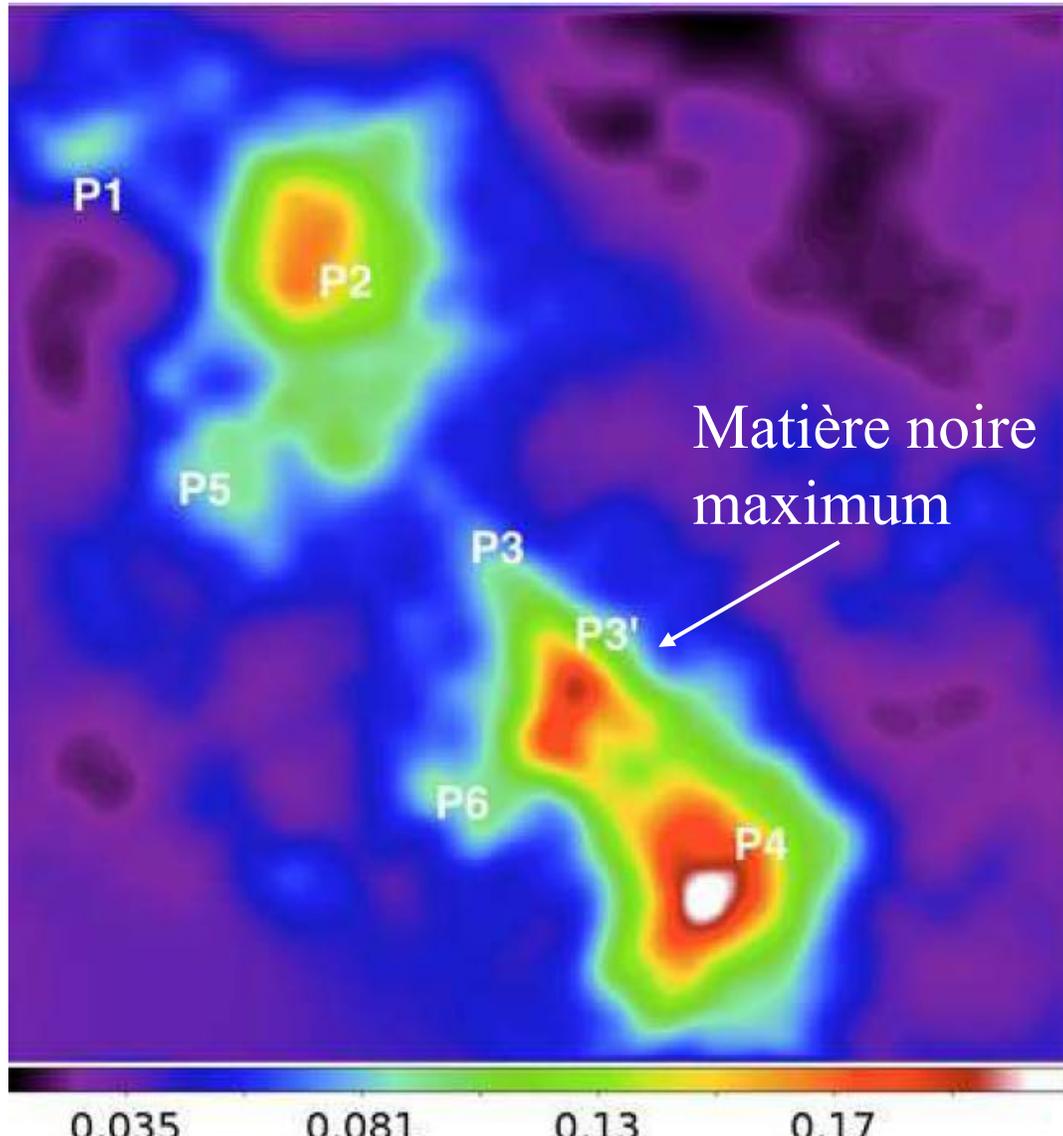


Matière noire collisionnelle?
Contre-exemple du boulet
où $\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} < 1 \text{ cm}^2/\text{g}$

$$\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} \sim 3.8 \text{ cm}^2/\text{g}$$

Une section efficace de collision pour la DM?

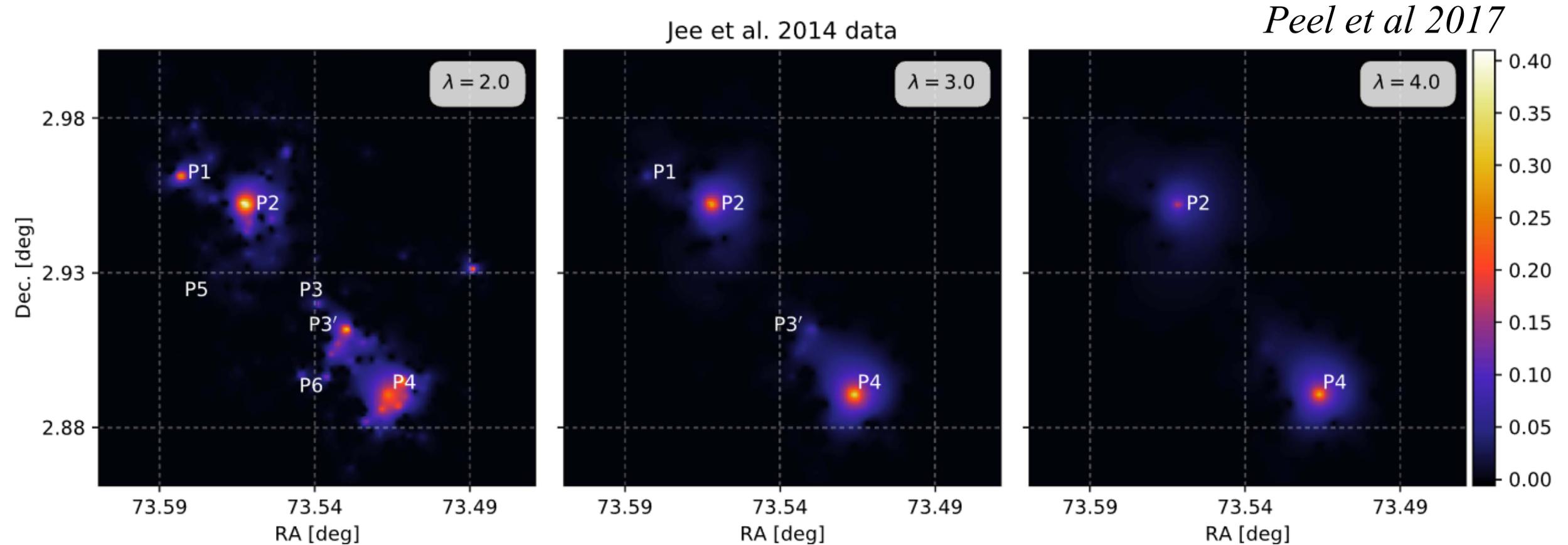
Modèle de matière noire self-interacting SIDM, s'arrête au centre



Jee et al 2014

Paramètre de régulation λ

Traiter de façon optimale la parcimonie, avec un paramètre λ de régularisation
« Sparsity parameter » Compromis entre le bruit et l'effacement des data faibles



Peel et al 2017

➔ Plus de résolution, conforme aux résultats précédents, mais moins de poids sur le centre
Au final, le résultat serait compatible avec Λ CDM

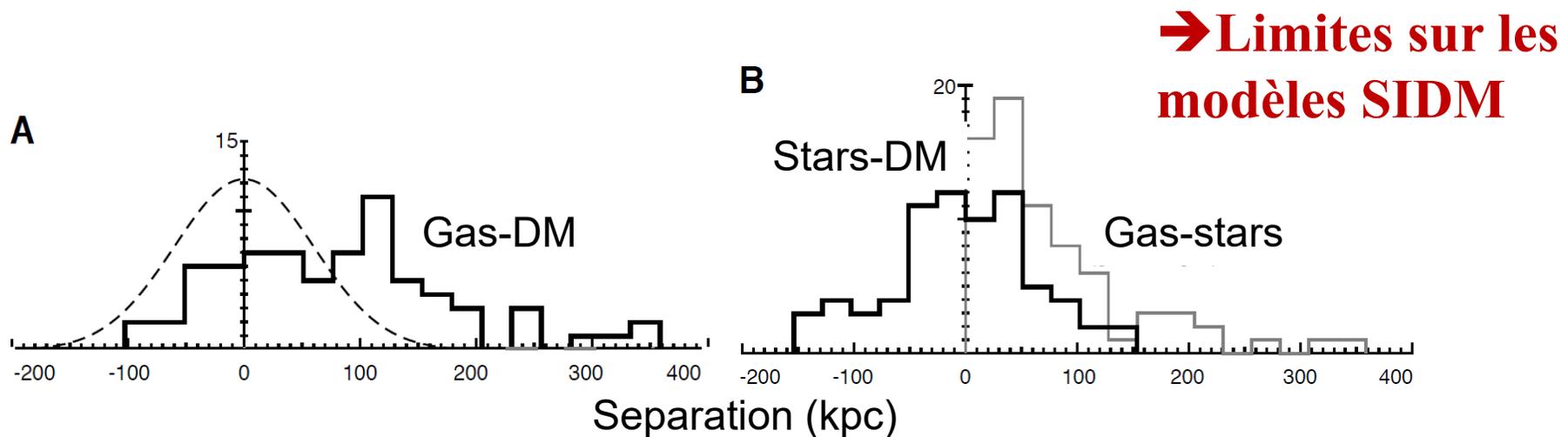
Un grand nombre de collisions

Aujourd'hui, échantillon de 72

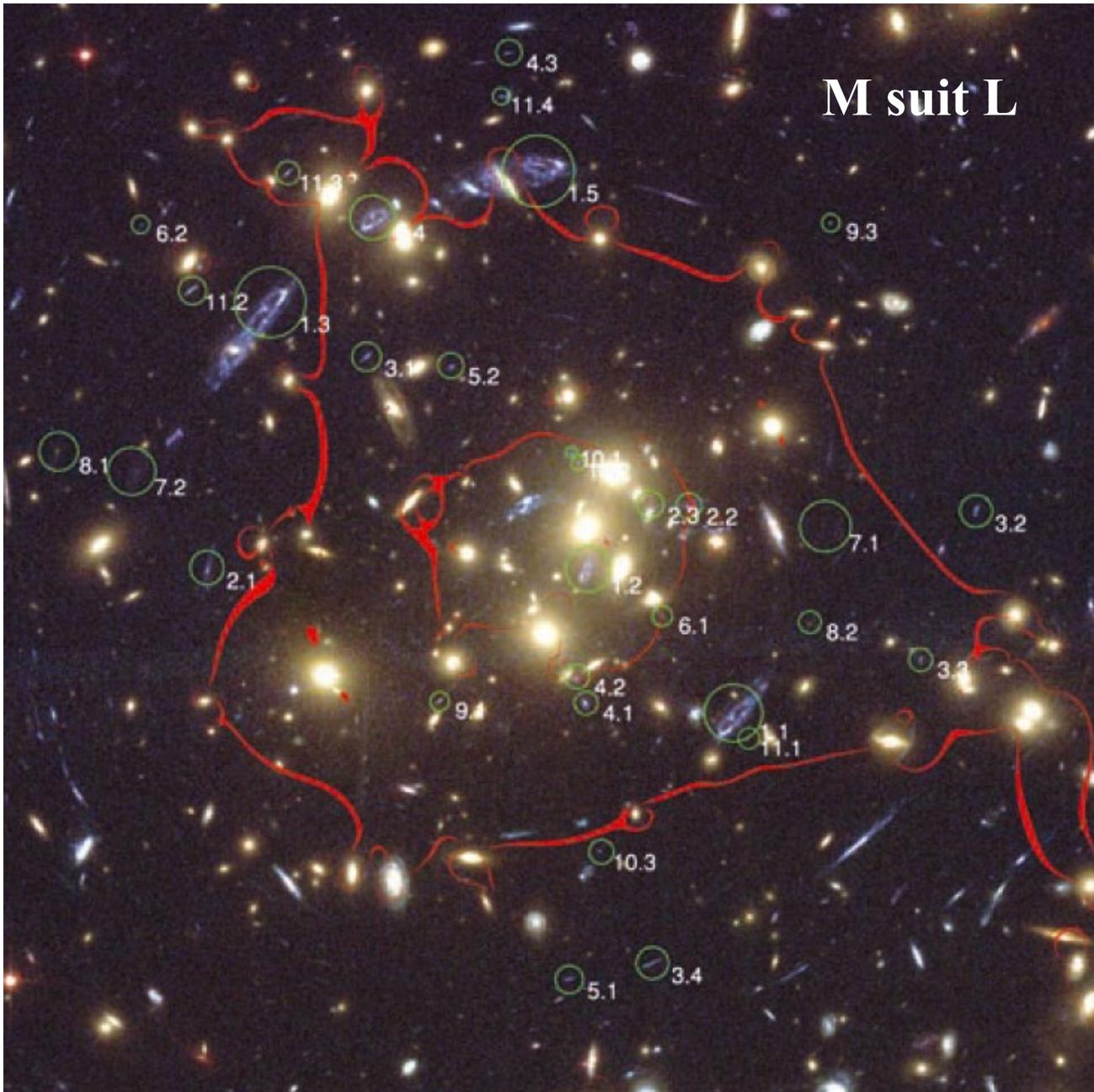
Avec des amas de faible masse et des groupes, *Harvey et al 2015*

$\sigma/m < 0.47 \text{ cm}^2/\text{g}$

[requis $\sigma/m = 0.5-3 \text{ cm}^2/\text{g}$ (*Valli & Yu 17*)]

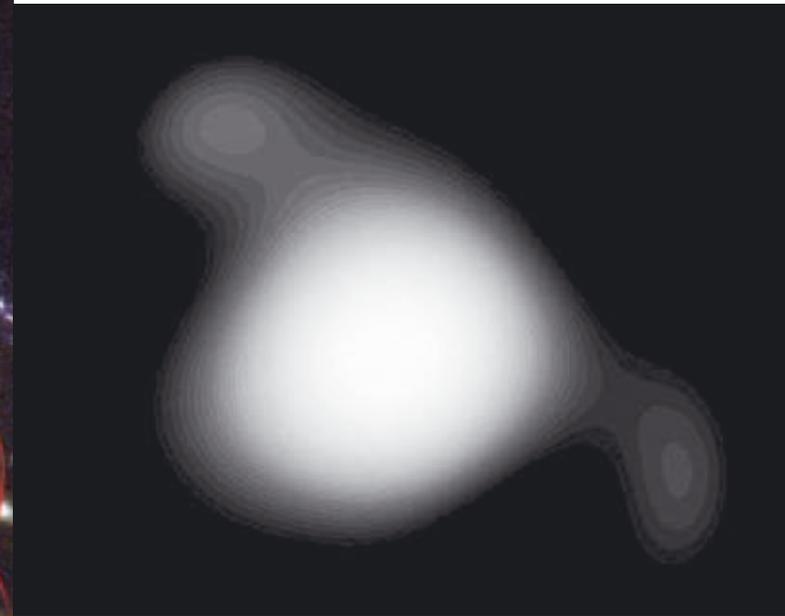


Amas en collision/fusion



CI0024+1654 plusieurs Modèles de lentilles fortes

Modèles paramétriques comme LENStool,
empêchent de suivre les condensations locales
Lentilles fortes // lentilles faibles



Plus de
concentration
que NFW!

Fusion de
Sous-amas

Code GRALE, non paramétrique

→ La luminosité trace la masse

Zitrin et al 2009, Wagner et al 2018

Principal composant baryonique: gaz chaud

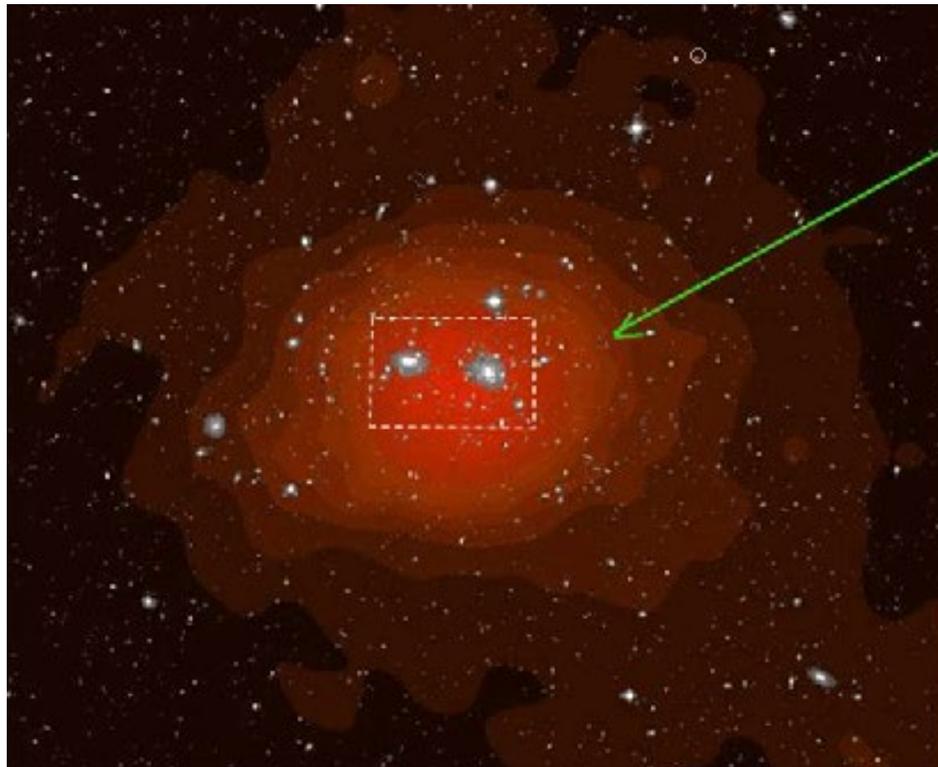
Gaz chaud, $T=1-10\text{keV}$ ou 10^7-10^8 K

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

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

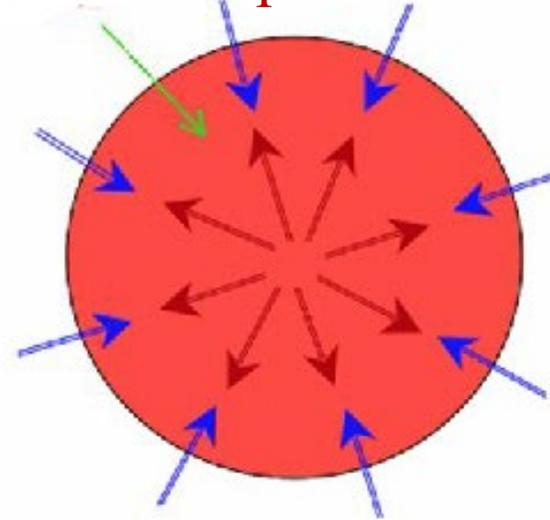
Métallicité $Z \sim 0.3 Z_{\odot}$, enrichi par les supernovae

Il y a plus de métaux en dehors des galaxies \rightarrow perte de masse très importante



Amas de Coma: gaz chaud en rouge

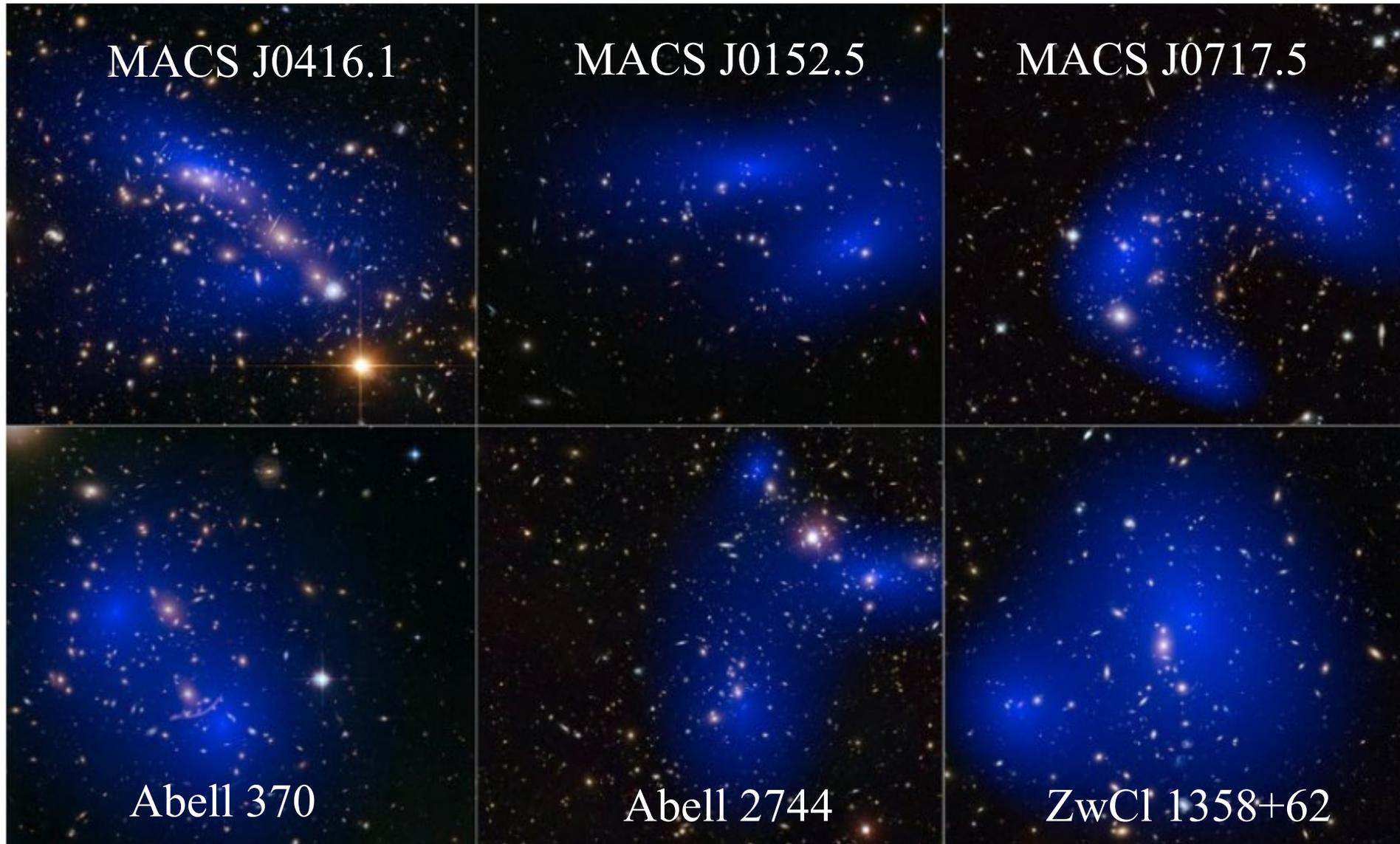
Gaz chaud: pression



gravité

Equilibre hydrostatique

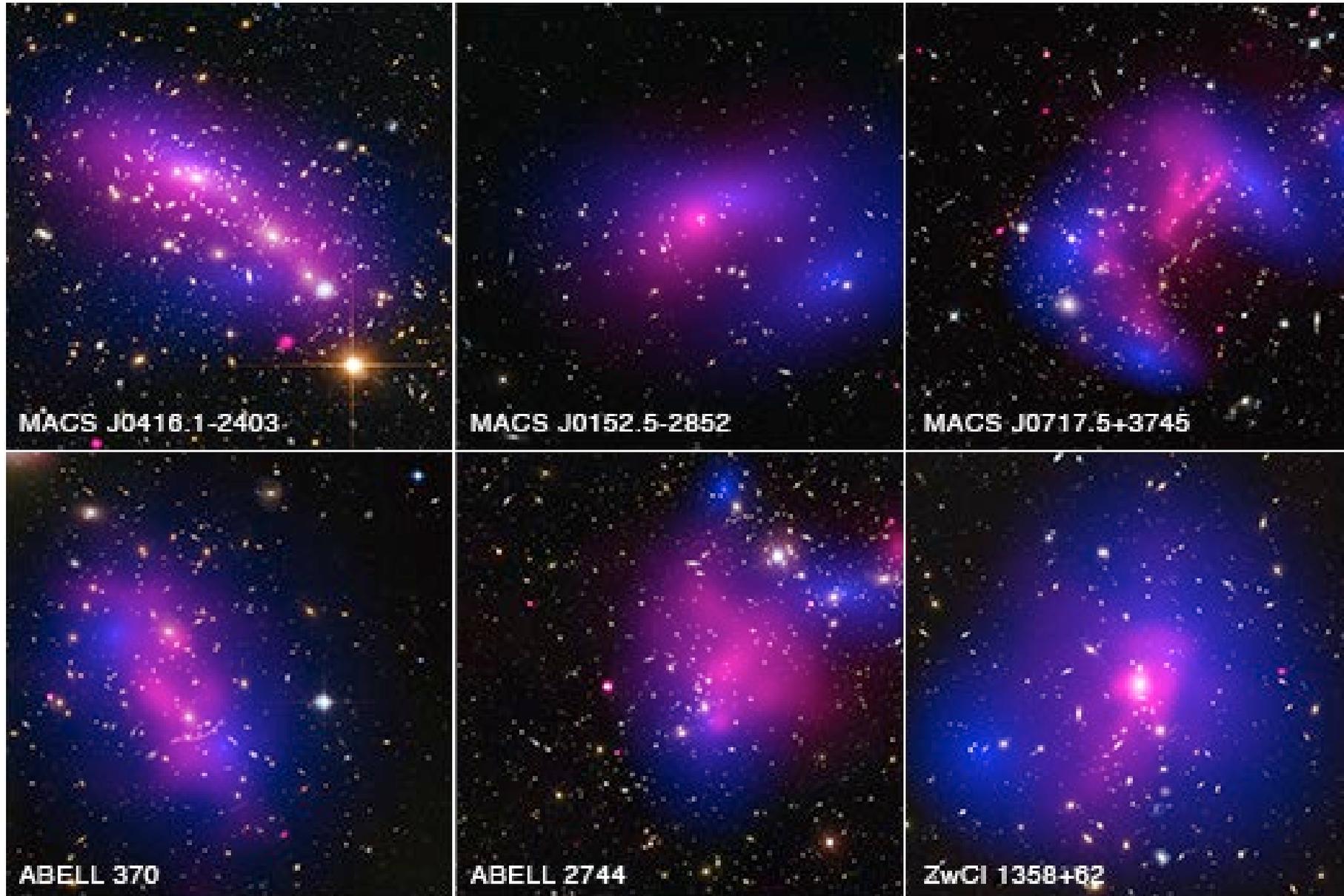
Cartographie de la matière noire (Weak Lensing)



La lumière des galaxies trace la masse

Sauf en cas de collision violente

Comparaison avec les rayons X



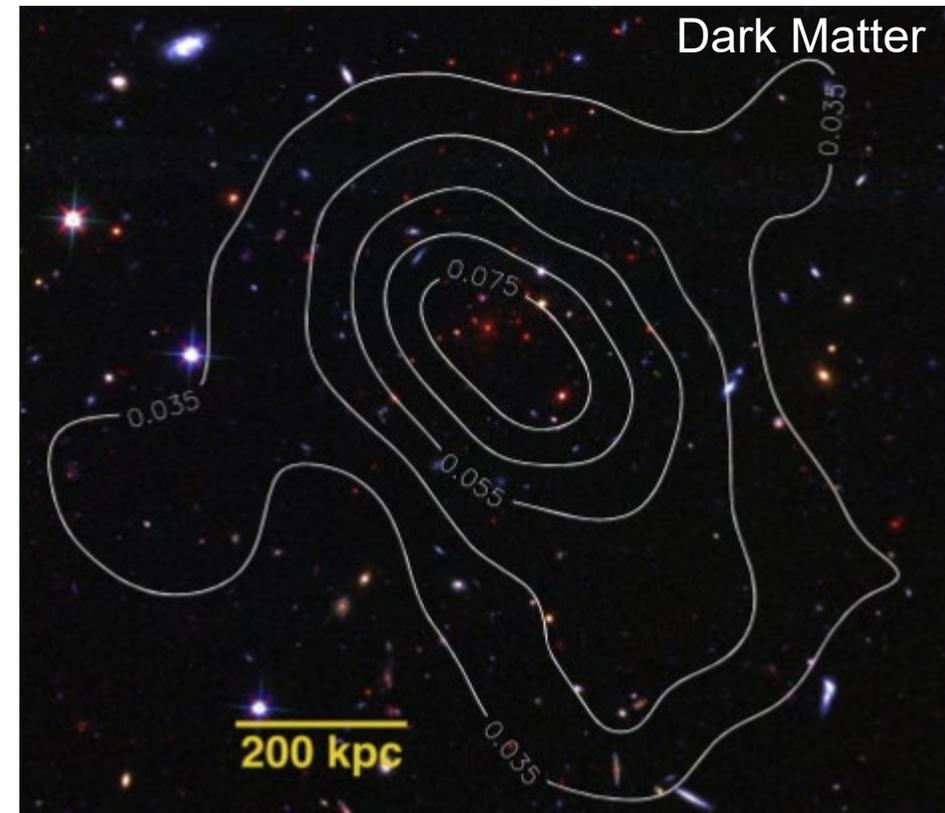
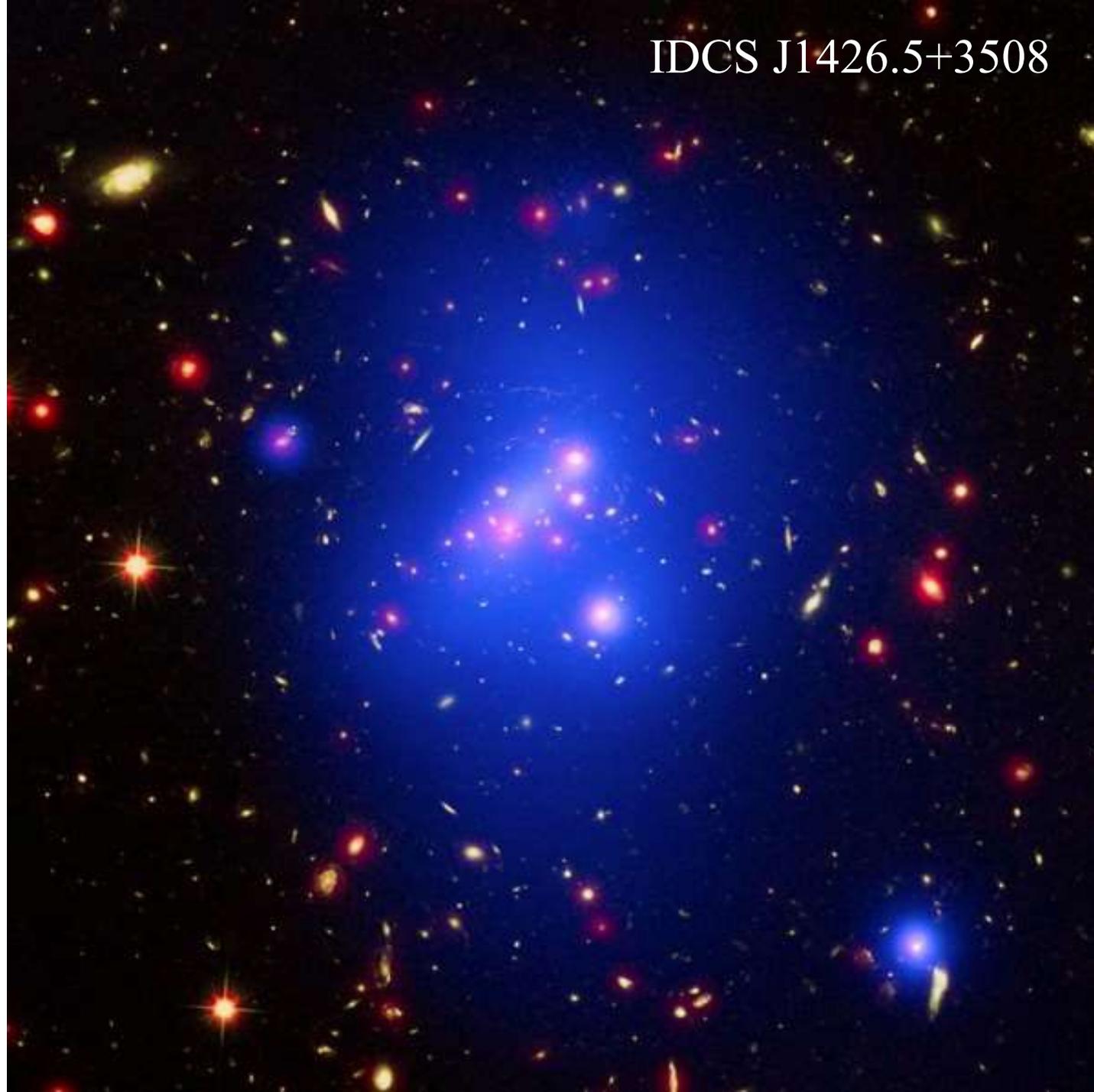
IDCS J1426.5+3508

Un amas à très grand redshift $z=1.75$
Bleu: X-ray Rouge Spitzer Blanc: HST

Le plus lointain avec weak lensing

$$M = 2.3 \cdot 10^{14} M_{\odot}$$

Mo, Gonzalez, Jee et al 2016

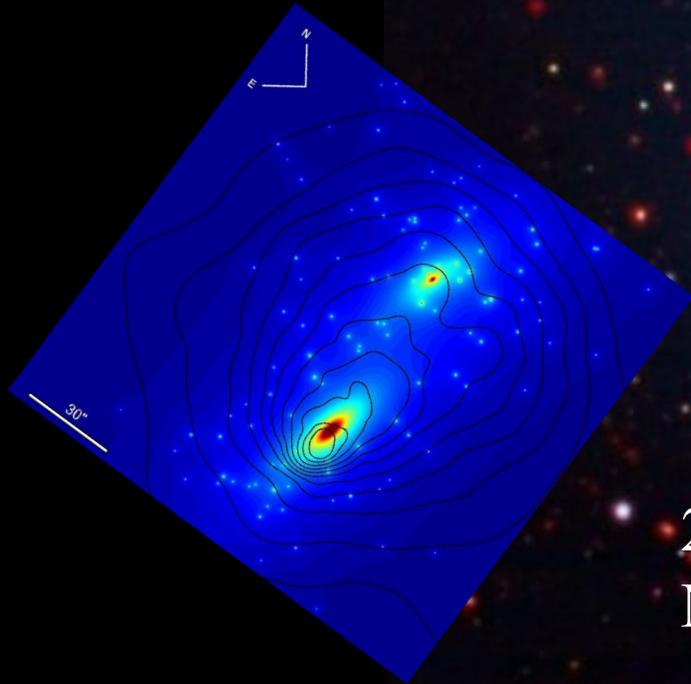


L'amas le plus massif: El Gordo

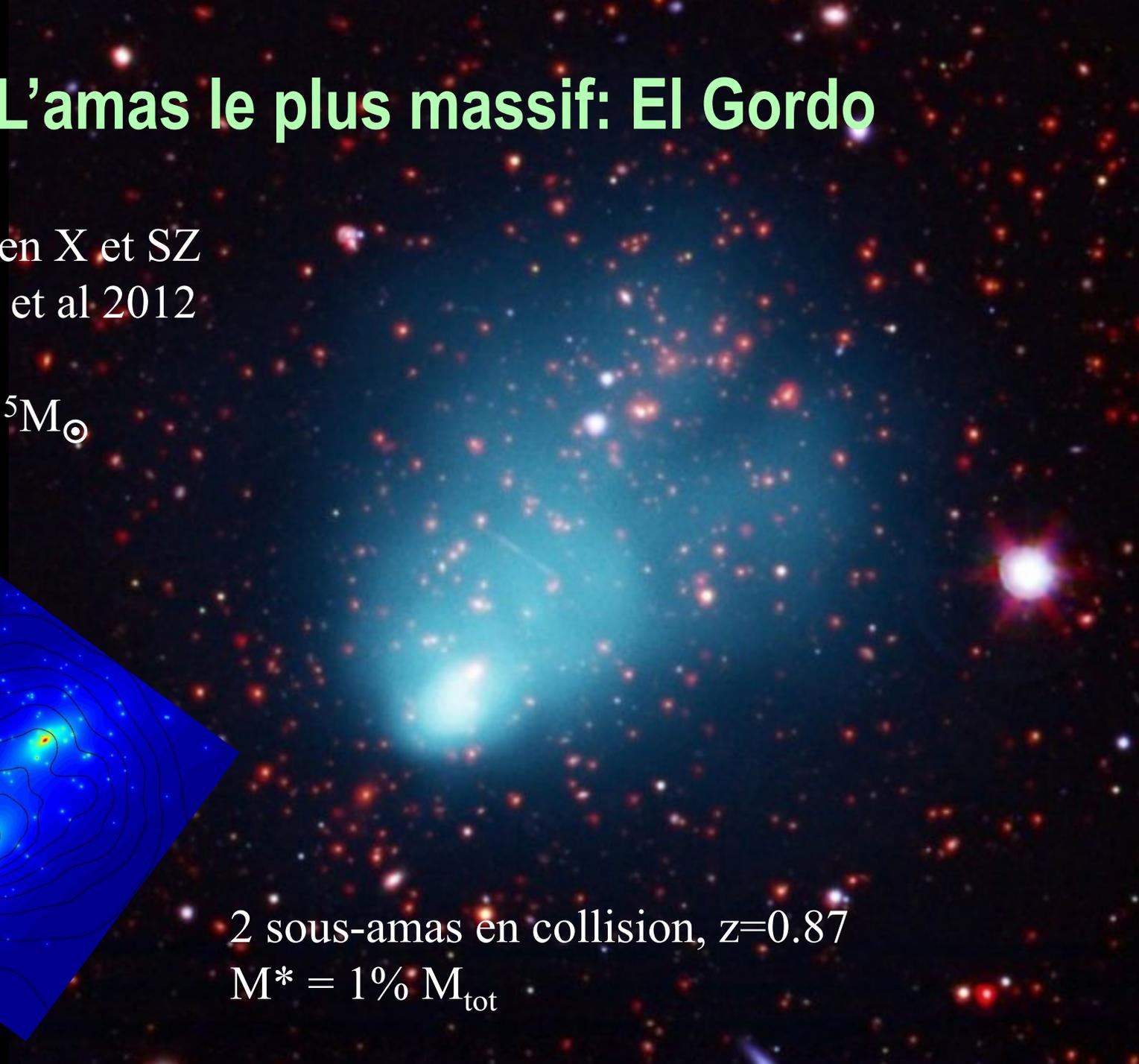
Découvert en X et SZ
Menenteau et al 2012

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

Offset
50-100kpc
X-DM
-BCG



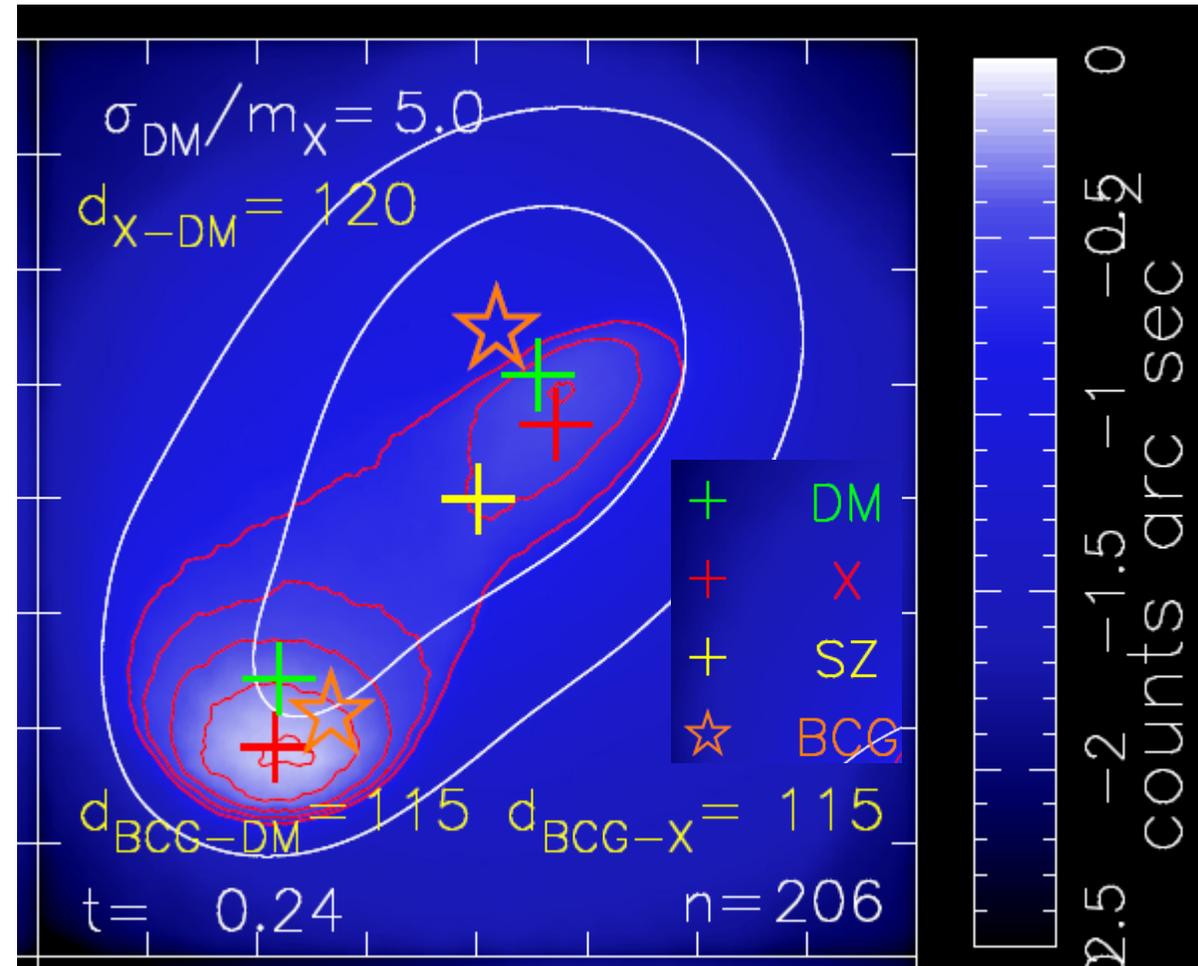
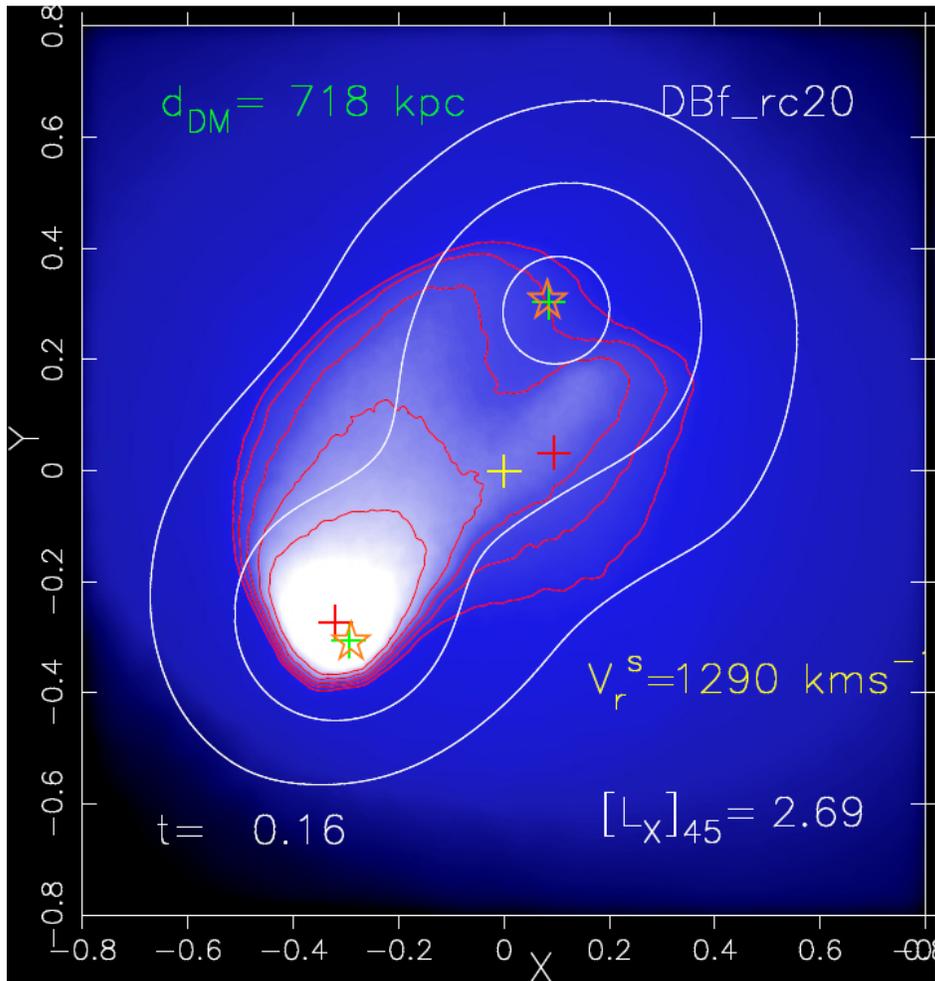
2 sous-amas en collision, $z=0.87$
 $M^* = 1\% M_{\text{tot}}$



Simulations de la collision

Valdarnini 2024

Parvient à reproduire les offsets entre masse visible et noire, avec $2000 < V < 2500 \text{ km/s}$
 $66 < P < 800 \text{ kpc}$, $\sigma/m = 4-5 \text{ cm}^2/\text{g}$ **10 fois plus** que les limites supérieures, $M = 1.6 \cdot 10^{15} M_{\odot}$



V peut être plus petite avec SIDM

Processus différents?

Dissociation baryons (gaz) - matière noire

Simulations Nbody-Hydro : reproduisent Abell 56 où le gaz est dissocié de la DM, plusieurs paramètres d'impact

V seulement 180km/s sur la ligne de visée

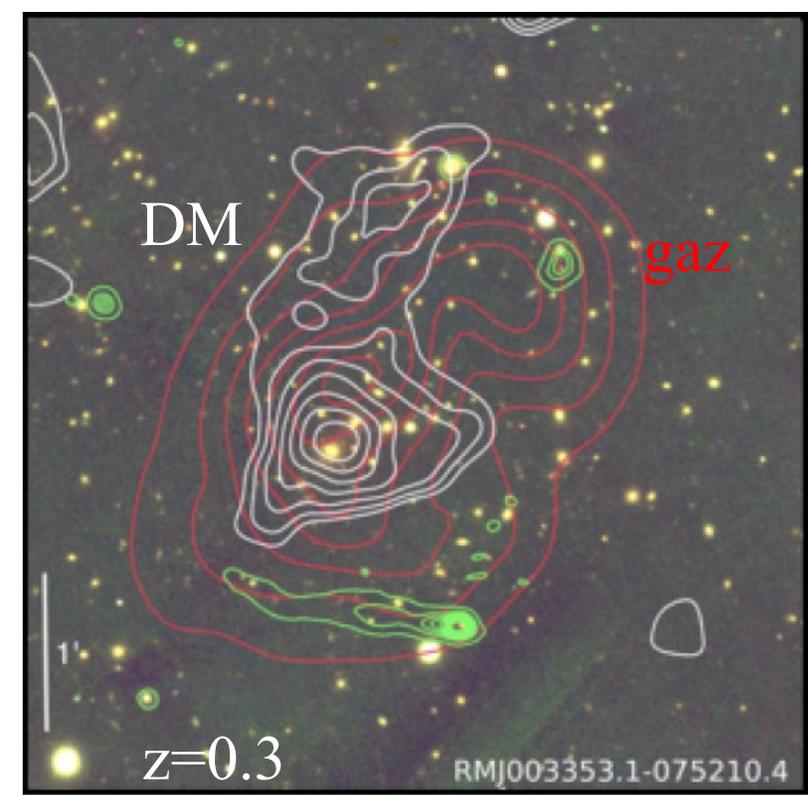
120 Myr après le passage: gaz trop chaud

520 Myr après, conforme

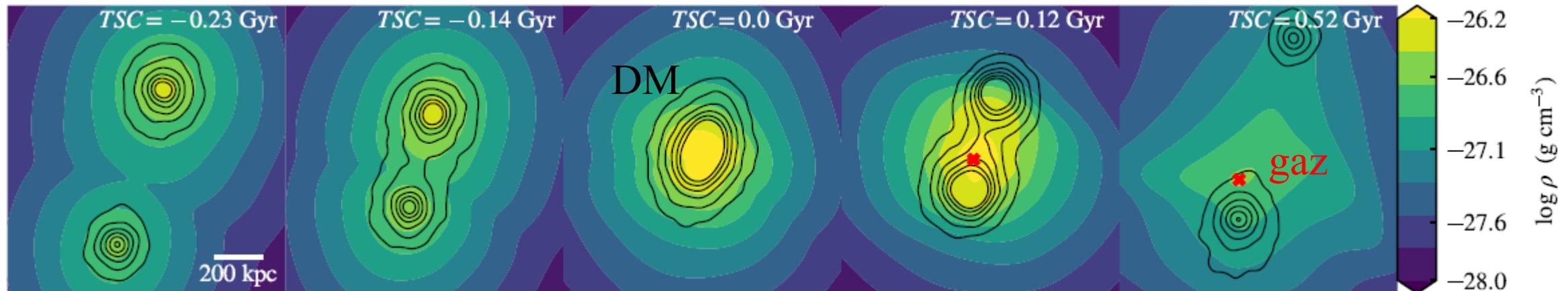
Séparation entre les pics de gaz et DM = 103 kpc

Séparation entre Galaxies et DM: SIDM?

+Biais de la détermination de la masse par lensing,



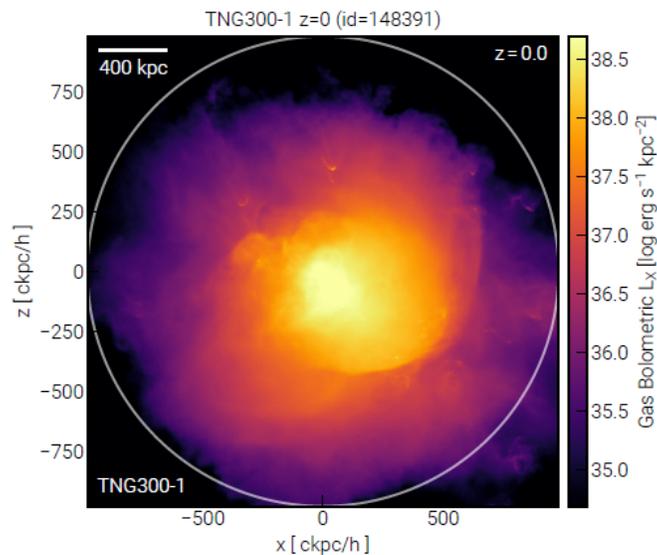
Albuquerque et al 2024



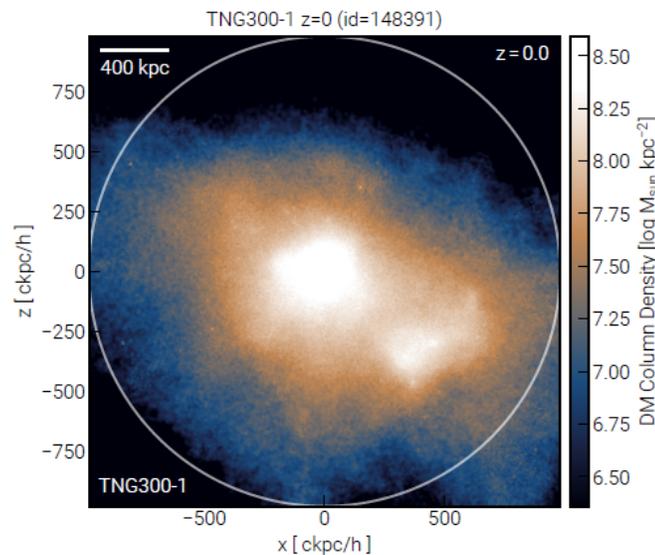
Sélection dans TNG 300

- Plusieurs collisions de plein fouet, avec des rapports de masse 1:10 dans Illustris TNG-300, avec bow shock, toujours similaires, quelle que soit la masse (jusqu'à $1.4 \cdot 10^{14} M_{\odot}$)
- Péricentre 0.3-0.9 Gyr, $V < 3400$ km/s
- Le petit amas perd tout son gaz et matière noire derrière le choc, Mach 2, cas semblables à A520 ou Coma

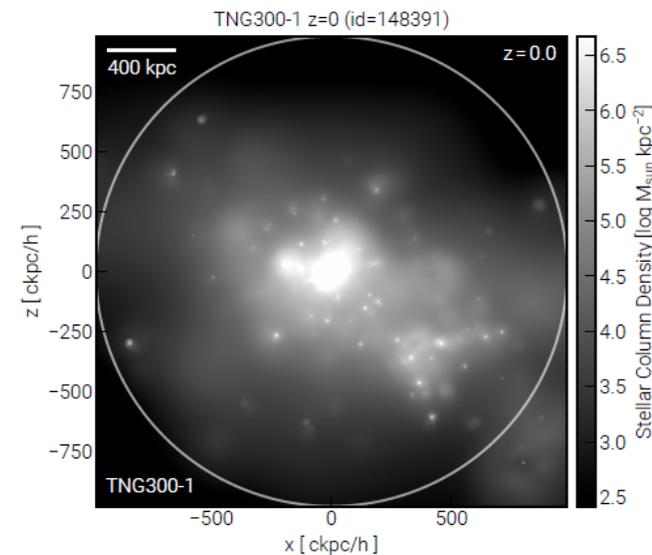
Trop petit volume pour retrouver un boulet



X-rays



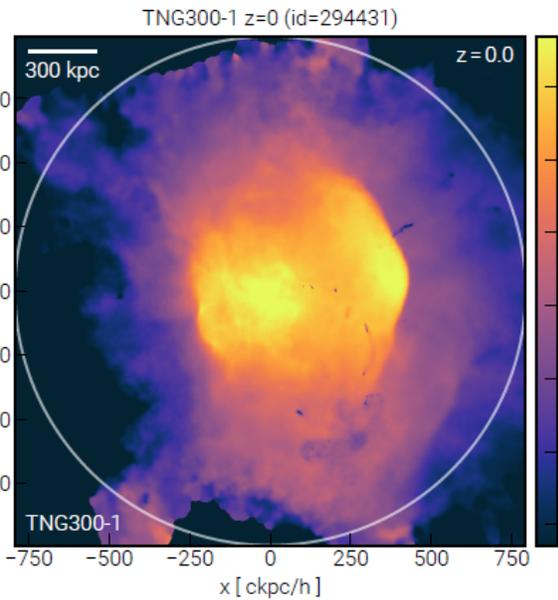
DM



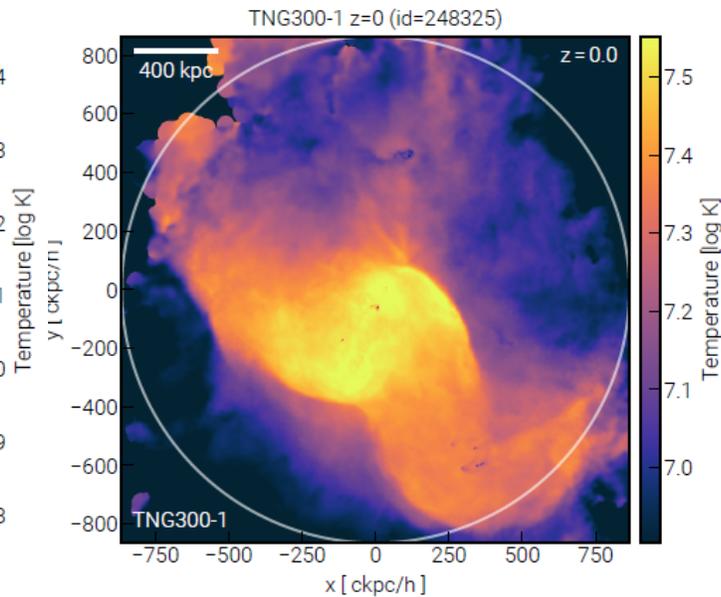
stars

Collisions d'amas de galaxies dans TNG 300-1

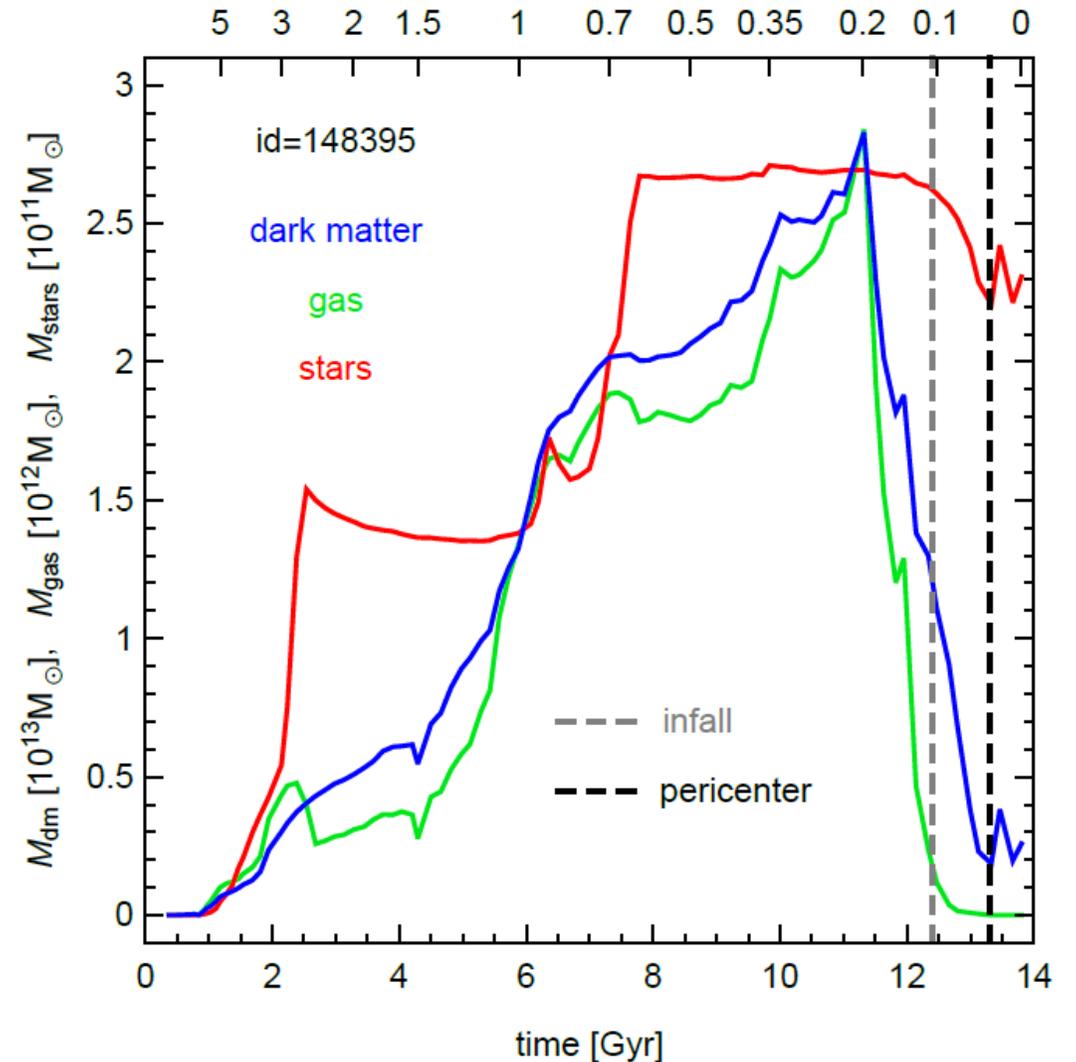
- La séparation n'est jamais aussi forte que dans le boulet, qui est un cas très rare



Minor merger



Major merger

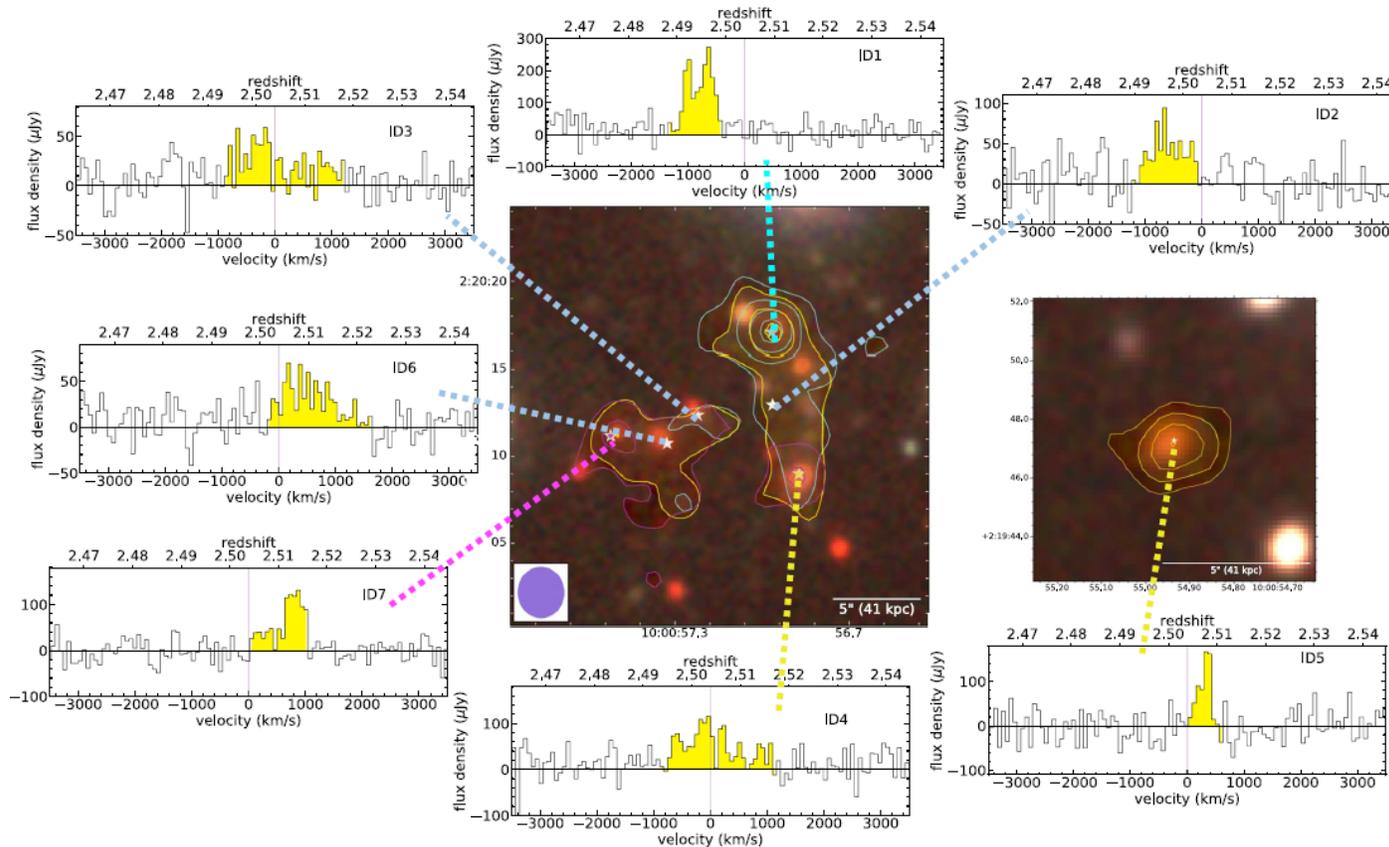


Evolution du plus petit amas

Proto-amas à grand redshift: Hyperion

→ Optiquement, ou avec ALMA $z \sim 2$, starburst
Filaments: rayons X dûs au Compton inverse
des jets radio éteints récemment

Amas détectés en X jusqu'à $z=1.3$
Puis SZ (Planck, SPT-SZ, NIKA2)



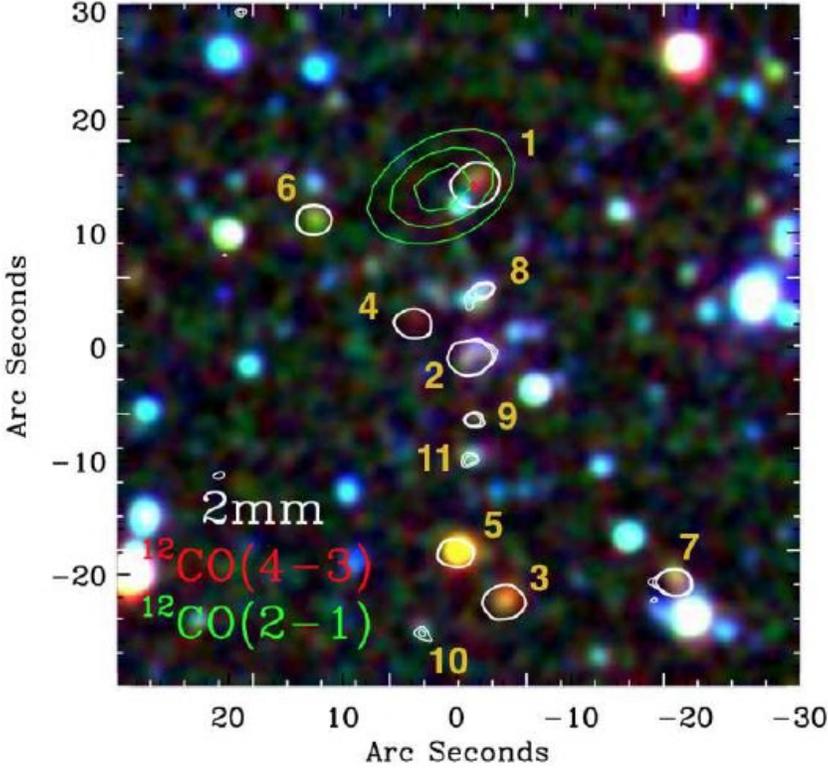
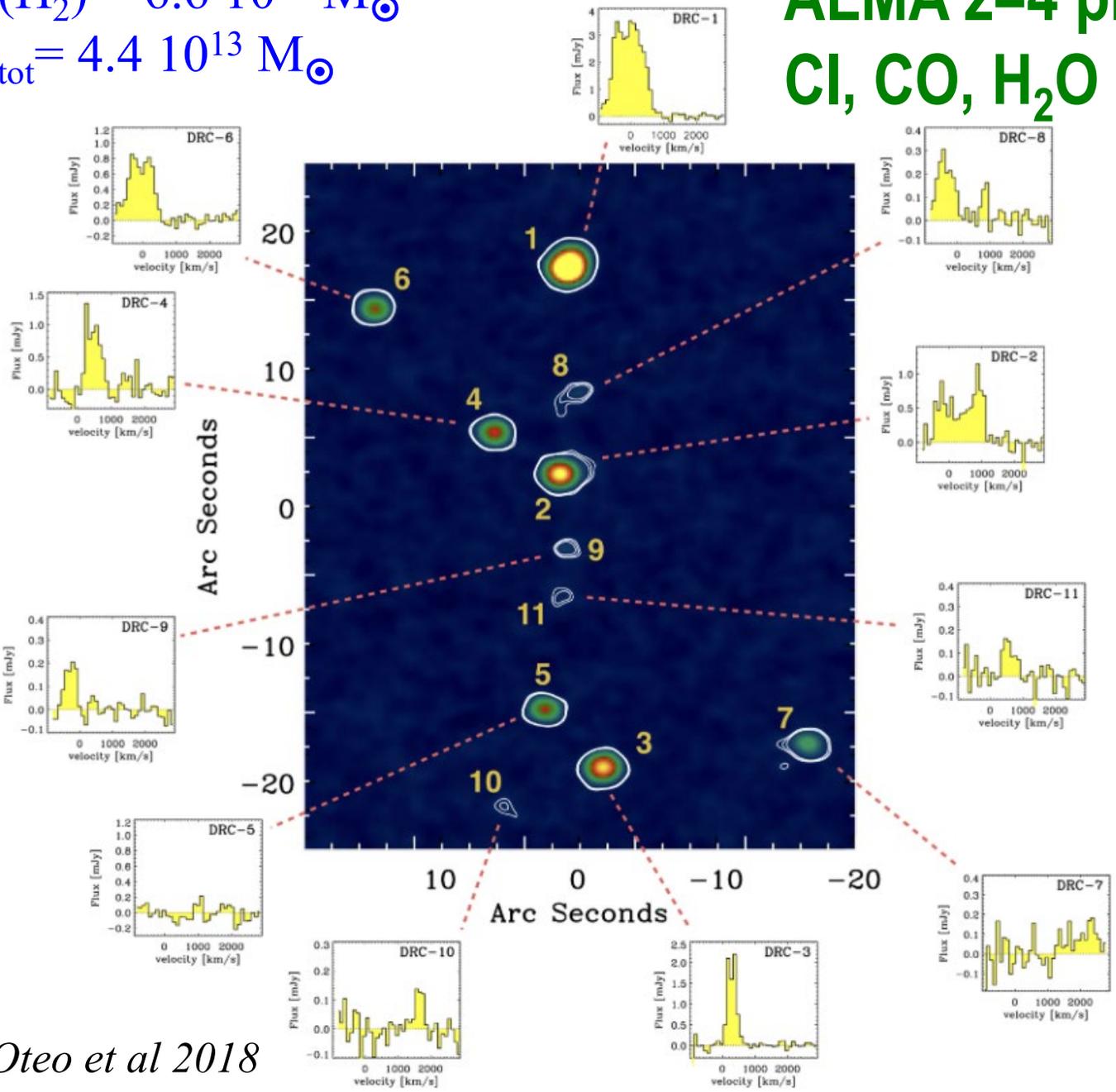
Proto-amas à $z=2.5$ en train de se virialiser, poussière avec ALMA
CO détecté au VLA

$$M(\text{H}_2) = 7 \cdot 10^{10} M_{\odot}$$
$$M_{\text{tot}} = 2-5 \cdot 10^{14} M_{\odot}$$

$M(\text{H}_2) = 6.6 \cdot 10^{11} M_{\odot}$
 $M_{\text{tot}} = 4.4 \cdot 10^{13} M_{\odot}$

ALMA z=4 proto-amas extrême Cl, CO, H₂O

10 galaxies formant des étoiles
 310 x 260 kpc, 6500 M_⊙/yr
 Progéniteur d'un amas aussi
 massif que Coma?



Oteo et al 2018

Image Optique /IR IRAC

Conclusion: Matière noire aux grandes échelles

Pour le Groupe Local, appliquer le Viriel donne la meilleure estimation de la masse

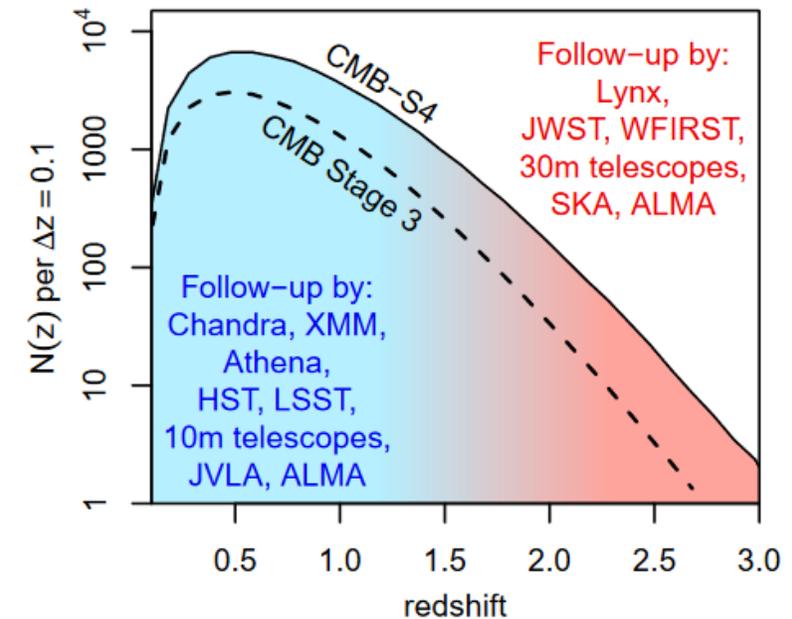
Groupes Compacts: ne sont pas compacts depuis longtemps

Amas de galaxies

- Le Viriel, vitesses longues à obtenir
- Equilibre hydrostatique du gaz (si équilibre)
- lentilles gravitationnelles fortes
- cisaillement gravitationnel
- cas violents: séparation gaz –matière noire

- Relations d'échelle $L_x \propto T^2$, $L_x \propto M^{4/3}$
- Proto-amas avec ALMA, JWST

Abell 520



Mantz et al 2019