

Masse manquante dans les amas de galaxies

Florence DURRET
Institut d'Astrophysique de Paris et
Université Pierre et Marie Curie



Institut d'astrophysique de Paris



Les amas de galaxies

- Les amas de galaxies comprennent :
 - des galaxies (quelques centaines à plusieurs milliers) visibles surtout en lumière visible
 - du gaz très chaud émettant en rayons X
 - de la matière noire (ou matière sombre)



Fritz Zwicky
(1898-1974)



George Abell
(1927-1983)



Pourquoi s'intéresser aux amas de galaxies ?

Les amas de galaxies sont les plus grandes structures de l'Univers liées par la gravité

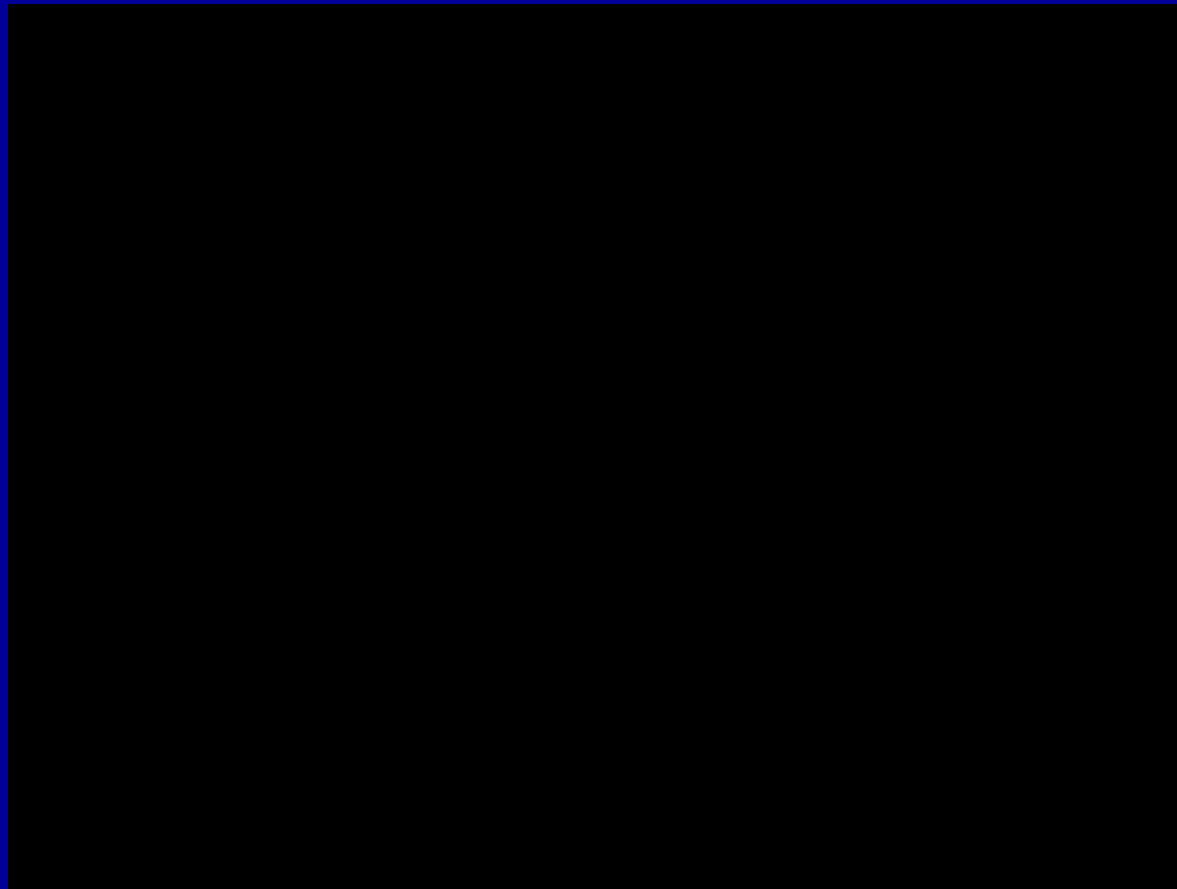
Dimensions : quelques Mpc

Masse : 10^{14} - $10^{15} M_0$

1 Mpc \sim $3 \cdot 10^{22}$ m (Mpc = Megaparsec)

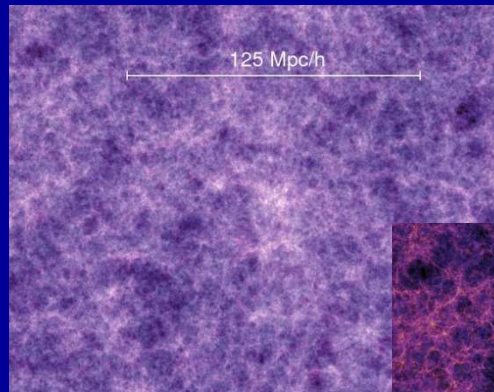
1 M_0 \sim $2 \cdot 10^{30}$ kg (masse du Soleil)

Les amas sont à l'intersection des filaments de matière à grande échelle dans l'univers

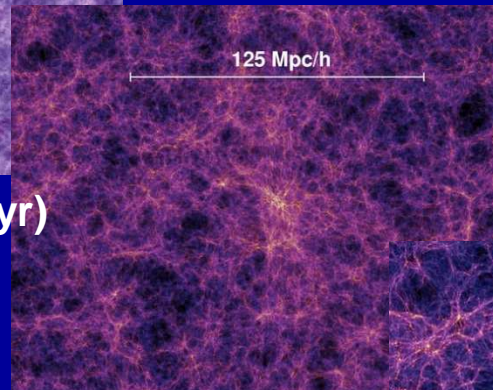


Simulation de S. Colombi et collaborateurs

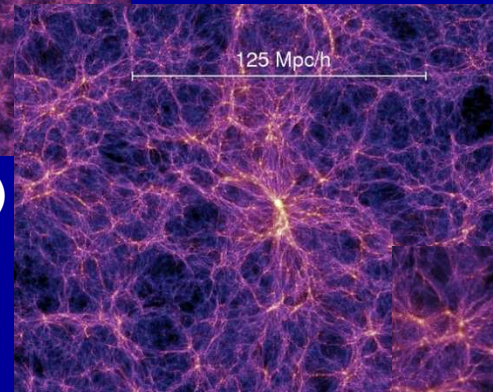
Formation des amas



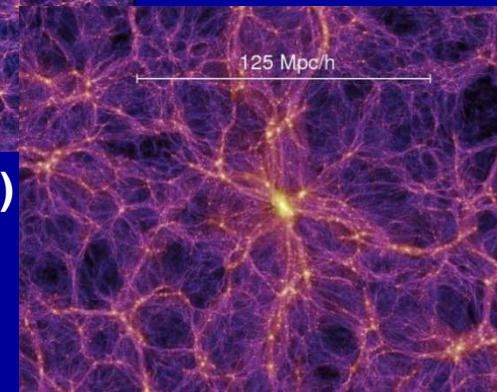
$z=18.3$ (t = 0.21 Gyr)



$z=5.7$ (t = 1.0 Gyr)



$z=1.4$ (t = 4.7 Gyr)



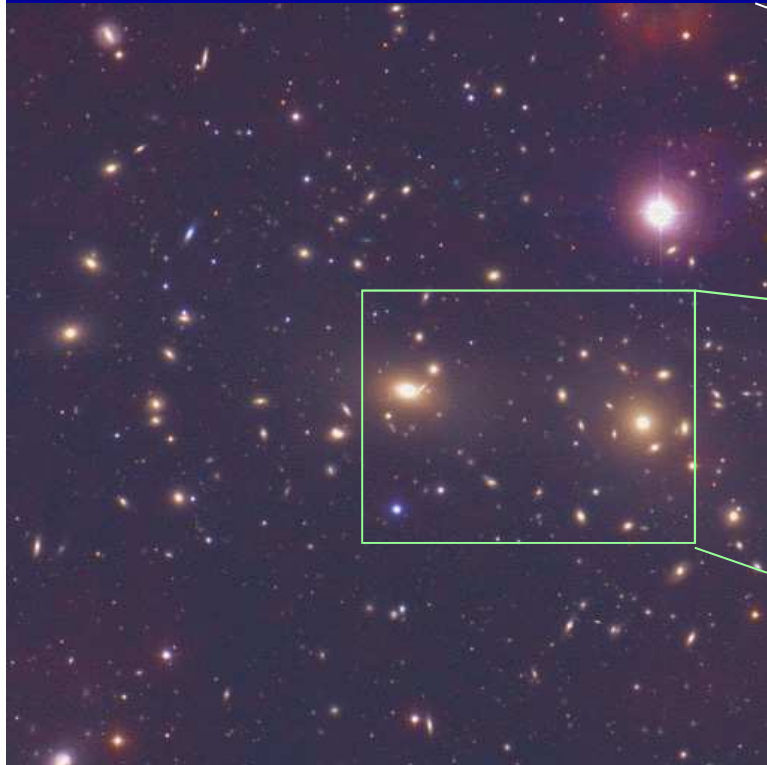
$z=0$ (t = 13.6 Gyr)

Simulation Millenium
Springel+05

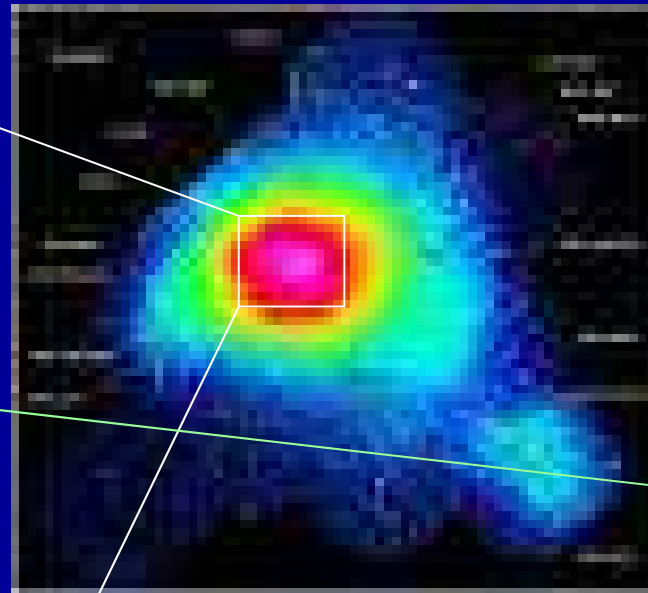
Pourquoi rechercher les amas en grand nombre ?

- Analyse statistique exige de connaître un grand nombre d'amas
- Découvrir des amas lointains : encore en formation (décalage spectral ou redshift $z \sim 1-2$)
- Obtenir des contraintes sur l'abondance de matière noire dans l'univers et sur les paramètres cosmologiques

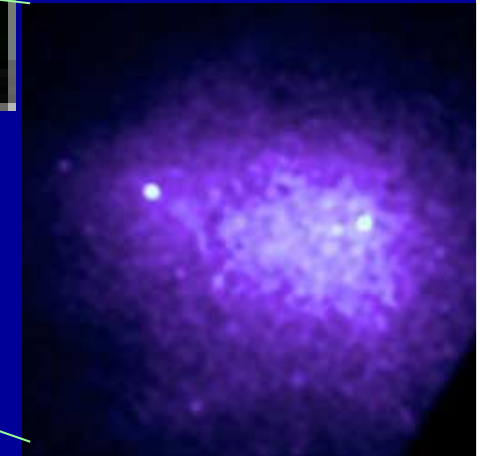
Un amas célèbre : Coma (la chevelure de Bérénice)



Coma en lumière visible



Satellite
XMM-Newton



Satellite
Chandra

Coma en rayons X

Simulation numérique de formation d'un amas de galaxies



Les amas de galaxies en lumière visible

Imagerie dans plusieurs bandes

- redshifts photométriques et distribution spectrale d'énergie
- fonctions de luminosité



masse stellaire des galaxies de l'amas

Spectroscopie des galaxies

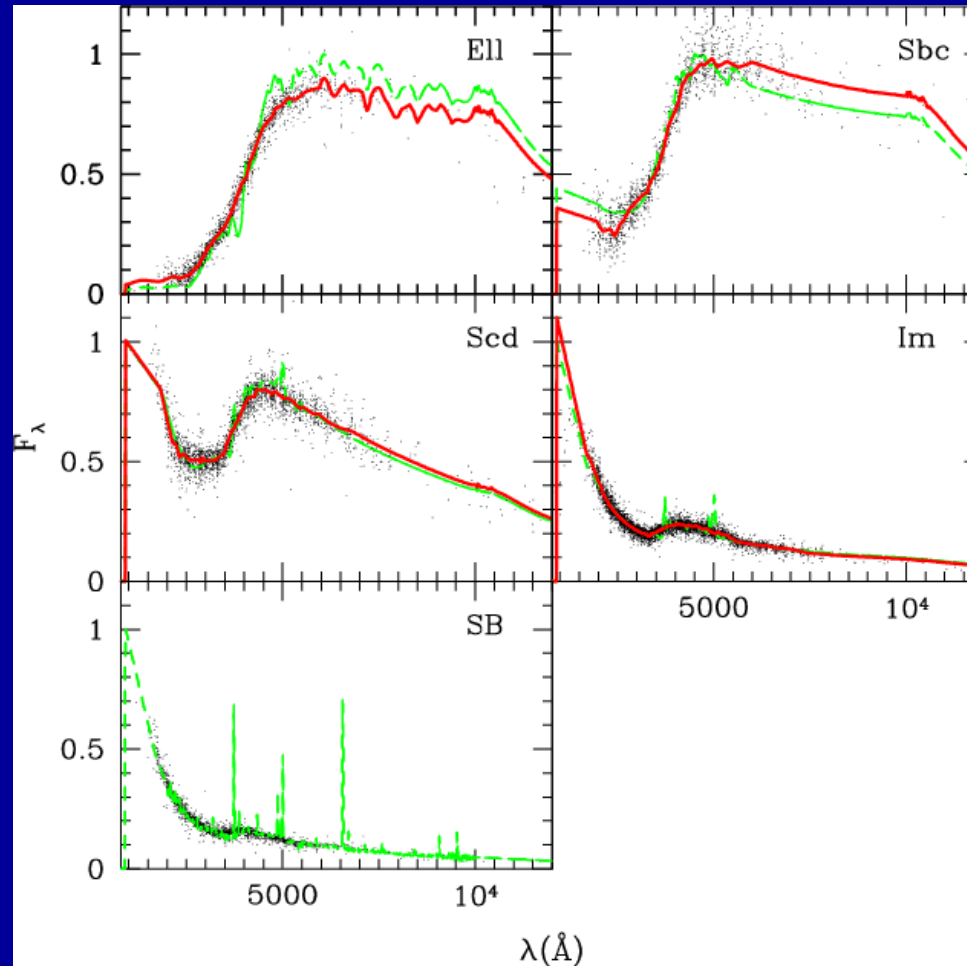
- redshifts spectroscopiques
- dispersion de vitesses des galaxies dans l'amas



masse totale de l'amas

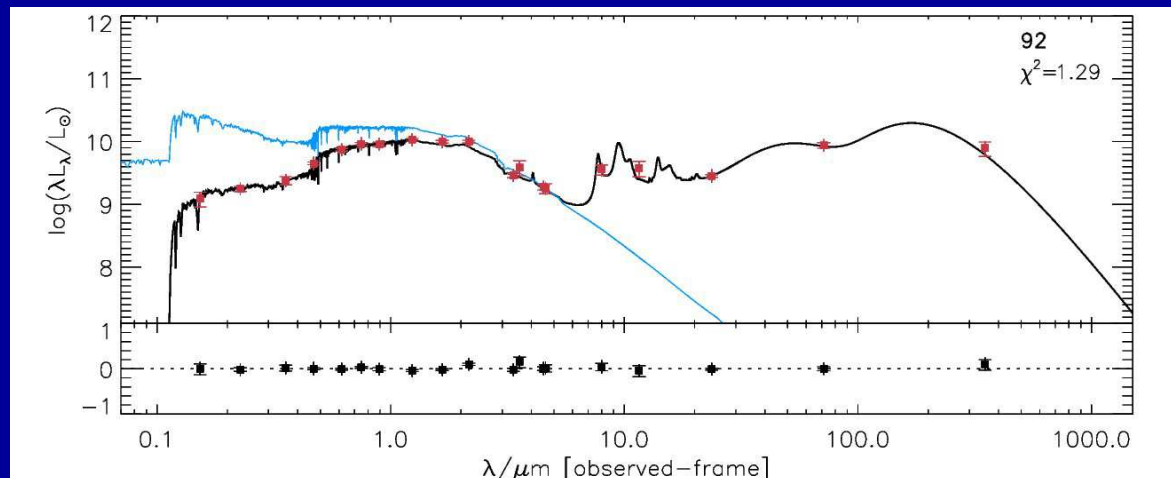
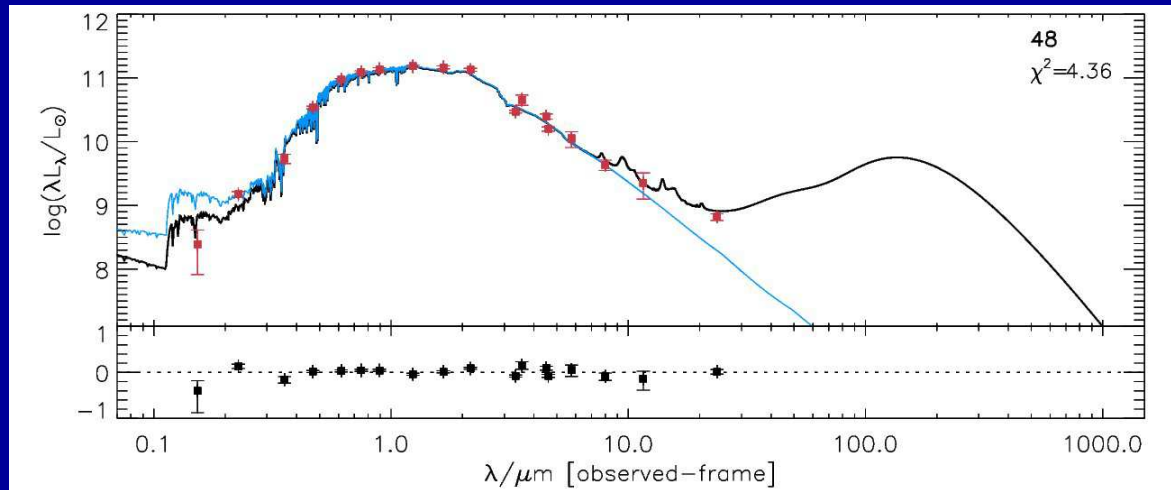
Masses stellaires calculées à partir des distributions spectrales d'énergie

Redshifts photométriques



Librairie de spectres modèles par type de galaxie
Ilbert et al. 2006, A&A 457, 841

Distribution spectrale d'énergie

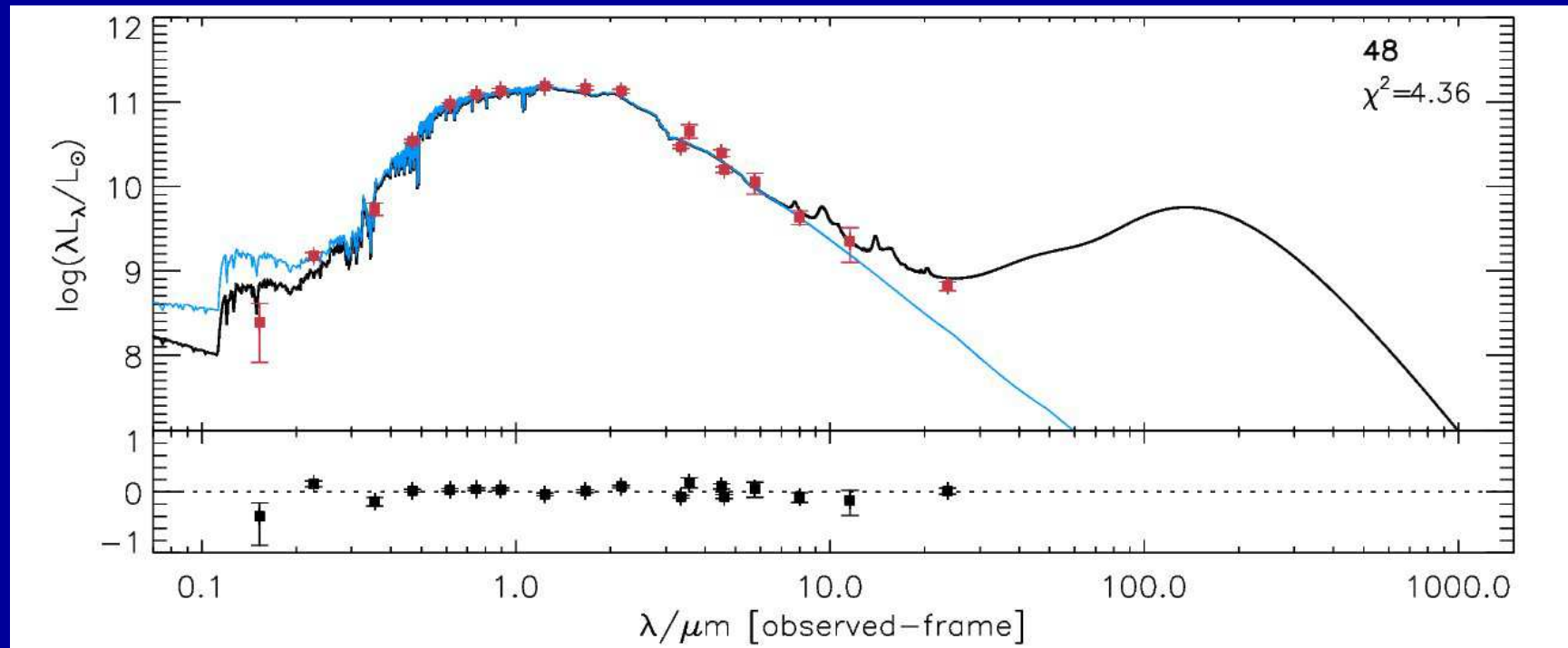


En rouge : points d'observation

En noir : ajustement de la distribution spectrale d'énergie

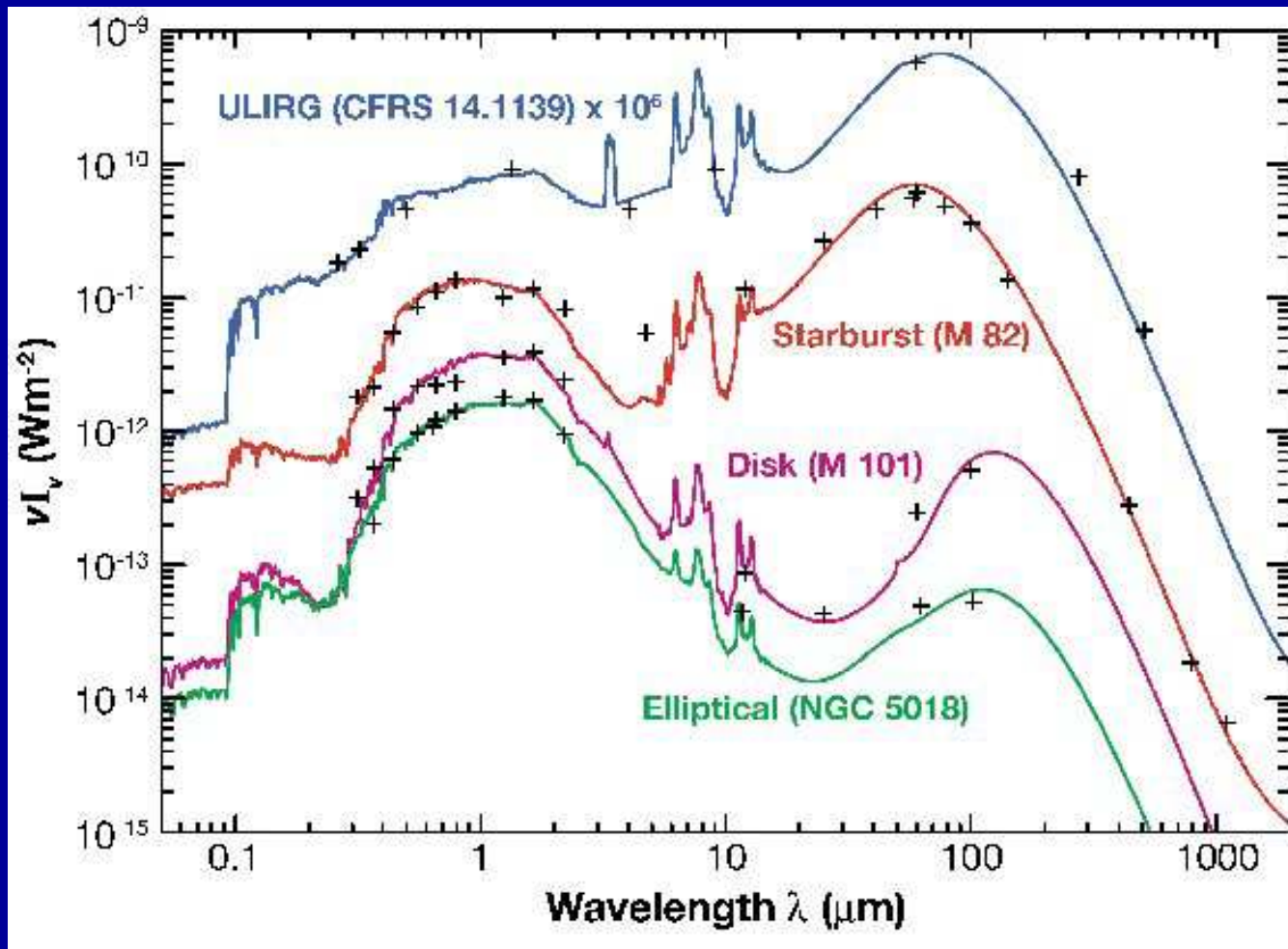
En bleu : spectre s'il n'y avait pas de poussière

Masse stellaire des galaxies



Ajustement de la distribution spectrale d'énergie et
intégration \longrightarrow $M_{\text{stellaire}}$

Quelques distributions spectrales d'énergie



Formation d'étoiles

Masses stellaires calculées à partir des fonctions de luminosité des galaxies

Le relevé DAFT/FADA (Dark energy American French Team)

C. Adami, M. Ulmer, D. Clowe

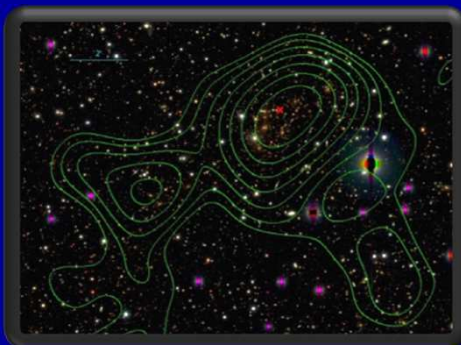
~ 90 amas

- redshift $0.4 < z < 0.9$
- massifs ($M > 2 \times 10^{14} M_{\odot}$)
- avec images HST

- Imagerie profonde en BVRIZ J
- Spectroscopie ($N_z > 15$)
- Données X (XMM-Newton ou Chandra) pour la moitié

- 1^{er} but : contraintes sur l'énergie noire par tomographie par effet de lentille gravitationnelle faible avec des amas
- 2^{ème} but : étudier un grand échantillon homogène d'amas massifs et relativement lointains

Effet de lentille faible



Effet de lentille fort

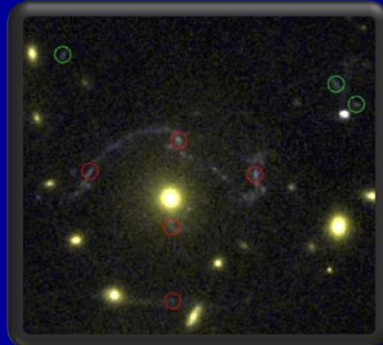
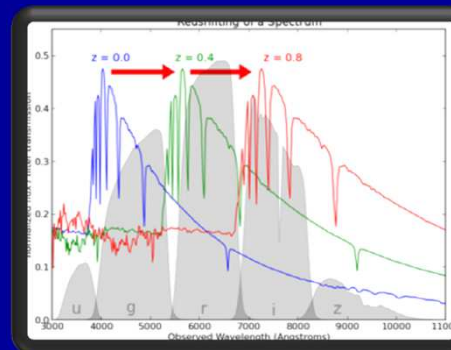
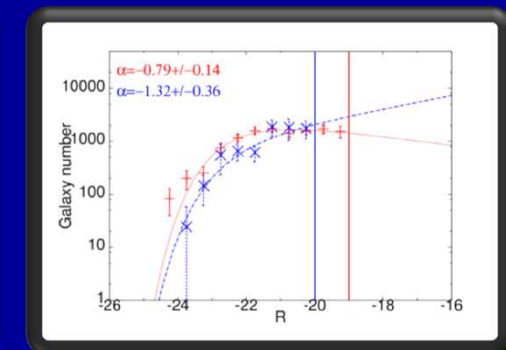


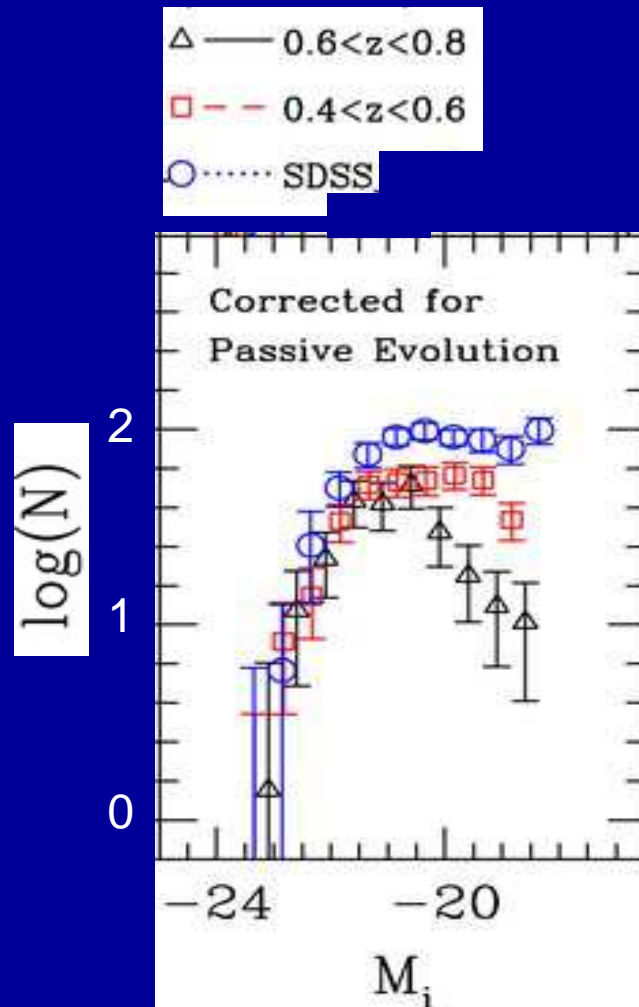
Photo-zs



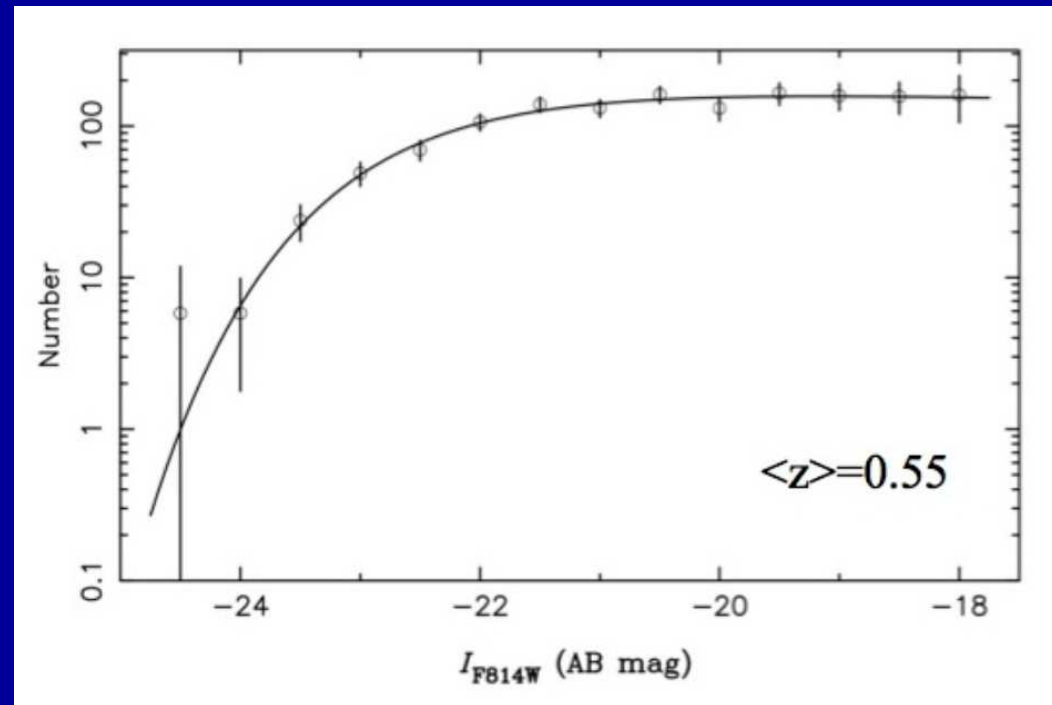
Fonctions de luminosité



Les fonctions de luminosité des galaxies d'amas



Rudnick et al. (2009)



De Propris et al. (2013)

Fonctions de luminosité pour 25 amas à $0.4 < z < 0.9$

- ~25 amas du relevé DAFT/FADA
- Imagerie dans 5 bandes optiques + 1 bande infrarouge
 - >15 zspec
 - Catalogue COSMOS de galaxies de champ
 - Photozs avec LePhare
- Fonctions de luminosité en BVRI (bandes au repos), avec limite de complétude estimée précisément

Nicolas Martinet,
Thèse UPMC, 2015

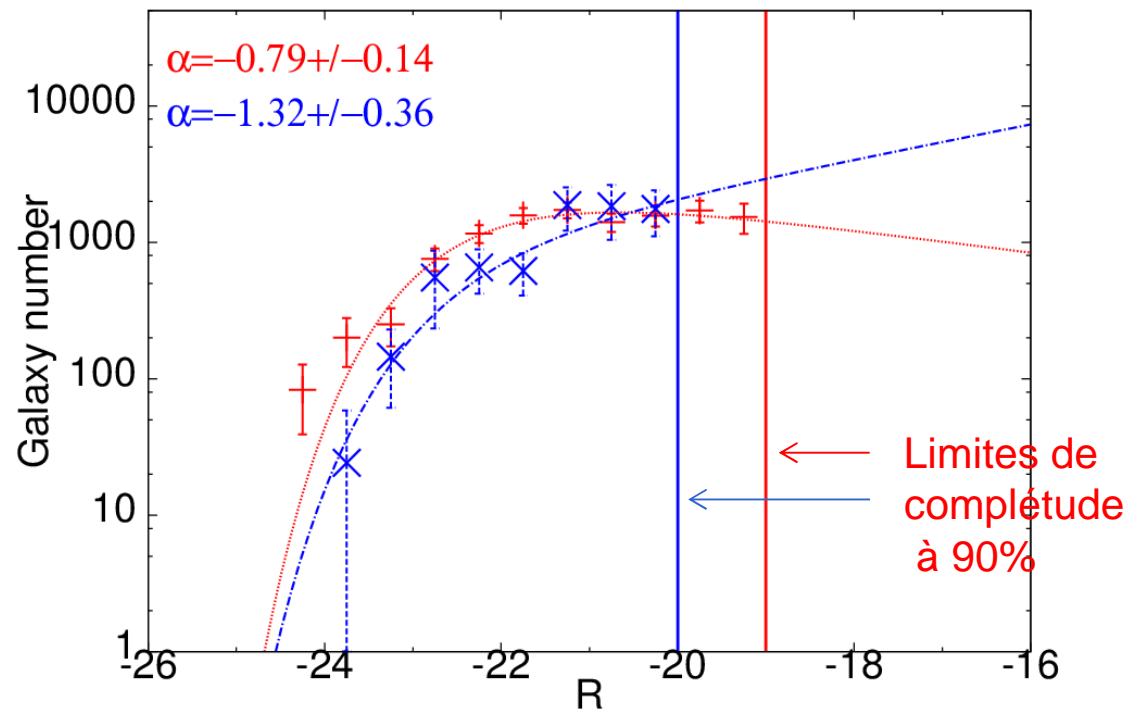


Somme (« stacking ») d'amas et ajustement par une fonction de Schechter

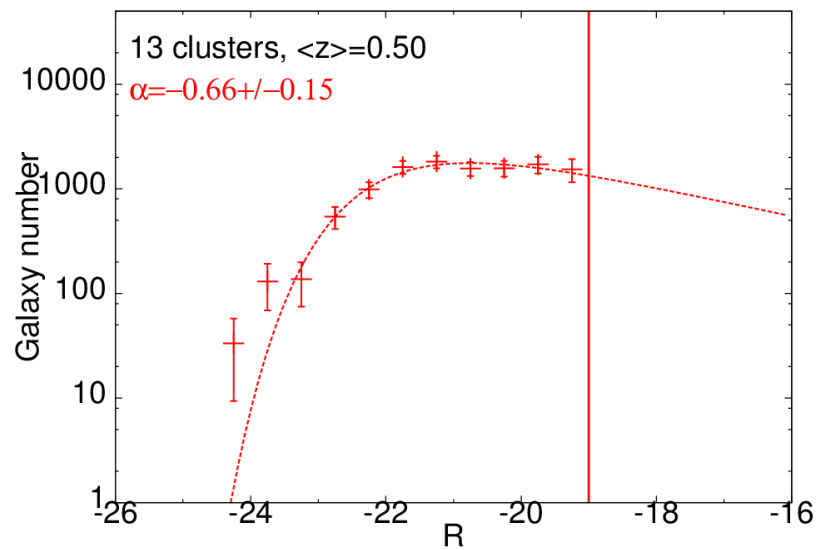
$$N(M) = 0.4 \log(10) \phi^* [10^{0.4(M^* - M)}]^{\alpha+1} \exp(-10^{0.4(M^* - M)})$$

Galaxies rouges

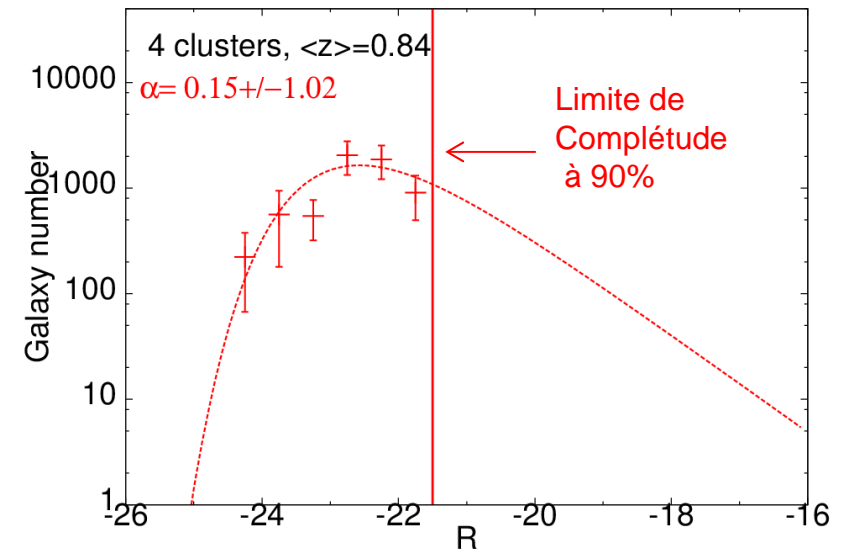
Galaxies bleues



Variation avec le décalage spectral



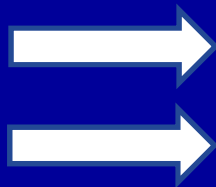
$0.40 < z < 0.65$



$0.65 < z < 0.90$

Masse stellaire des amas

- Ajustement de la distribution spectrale d'énergie pour chaque galaxie de l'amas



masse stellaire de chaque galaxie

masse stellaire de l'amas

- Intégration des fonctions de luminosité



masse stellaire de l'amas

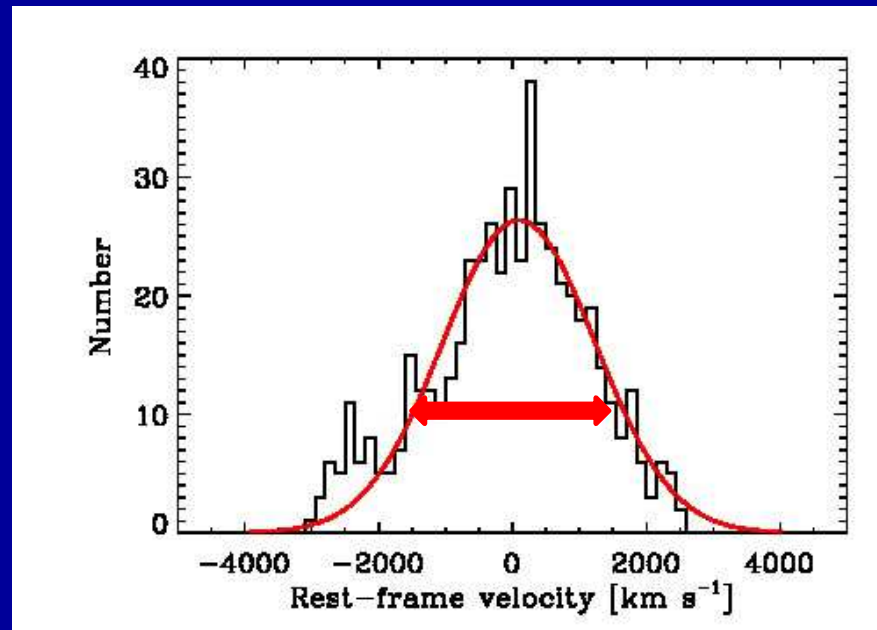
Masse stellaire ~ quelques 10^{12} - $10^{13} M_0$

Masses totales des amas estimées à partir des propriétés dynamiques

Dispersion de vitesses des galaxies dans les amas

Spectroscopie des galaxies

➔ redshifts et vitesses des galaxies



La largeur à mi-hauteur de la gaussienne donne la dispersion de vitesses σ_v

Le théorème du viriel

Dans un système en équilibre dynamique

$$2E_c + E_p = 0$$

$$E_c = \frac{1}{2} M \sigma_v^2$$

$$E_p = - G M^2 / 2R$$

Puisque $2E_c = - E_p$ on peut calculer

$$M_{\text{dyn}} = 2RV^2/G \quad \underline{\text{masse totale de l'amas}}$$

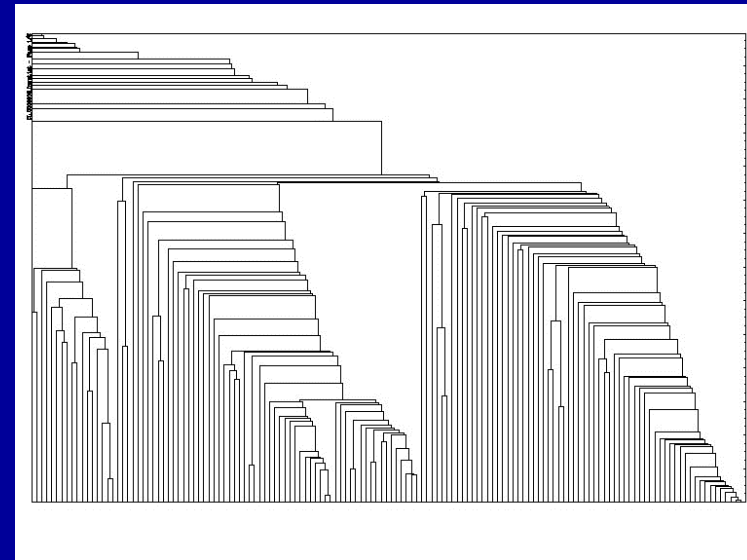
Zwicky (1937) a le premier trouvé que

$$M_{\text{dyn}} = 10-100 M_{\text{stellaire}} \longrightarrow \text{matière noire}$$

Estimation de la masse totale des amas par la méthode de Serna & Gerbal (SG)

(Serna & Gerbal 1996, A&A 309, 65)

Galaxies avec magnitudes et
redshifts spectroscopiques
mesurés



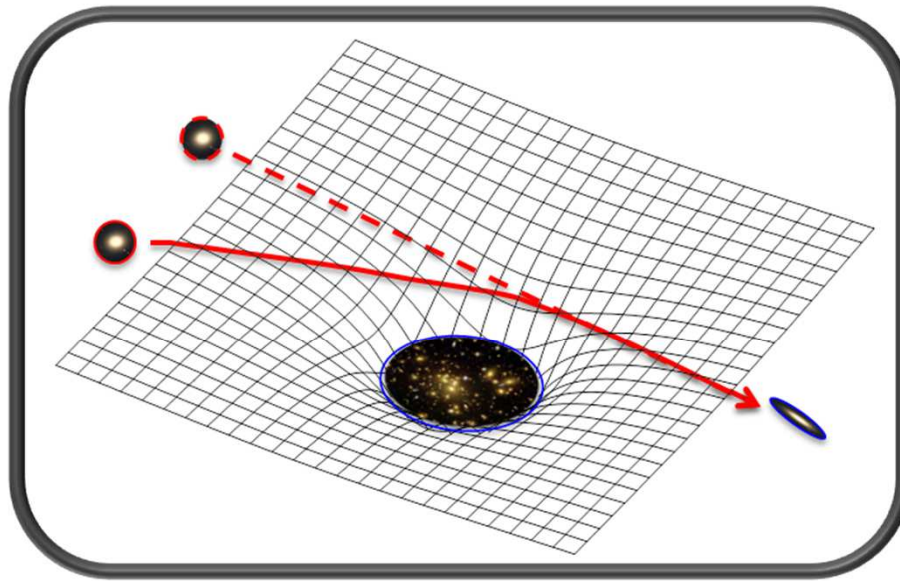
E_p

- Calcul de l'énergie potentielle de liaison entre des paires de galaxies et détection de sous-structures
- En supposant une valeur pour M/L on obtient la masse totale de chaque structure, donc la masse totale de l'amas

Les limites de la méthode SG

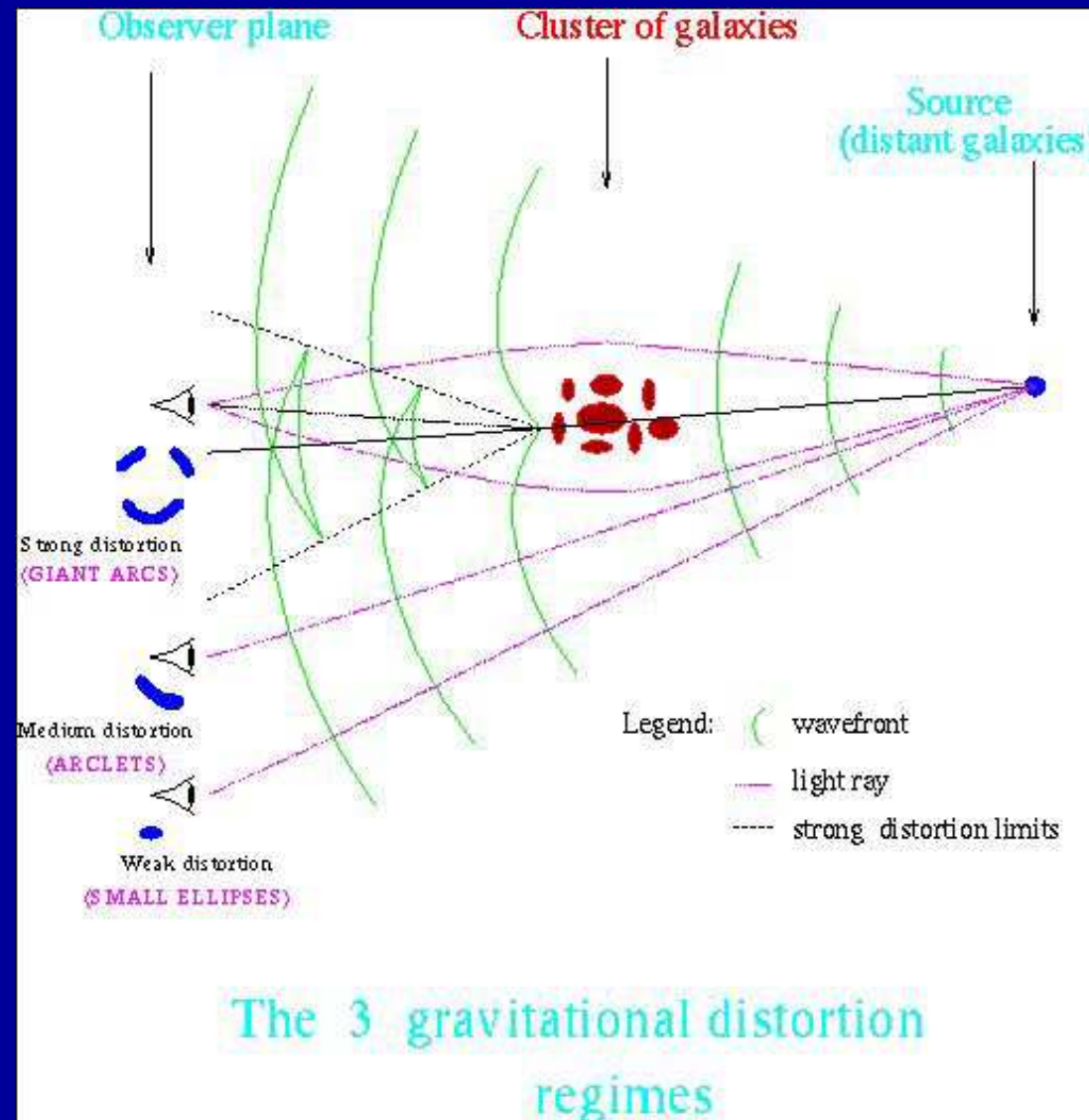
- La masse totale de l'amas n'est pas mesurée avec précision (incomplétude de l'échantillon de redshifts, rapport M/L...)
- Mais les rapports de masse entre structures sont bien connus (à 10-20% près)

Masse des amas déduite de l'effet de lentille gravitationnelle



Effet fort

Effet faible




Abell 2218 et ses arcs

$$z_{\text{amas}} = 0.1710$$

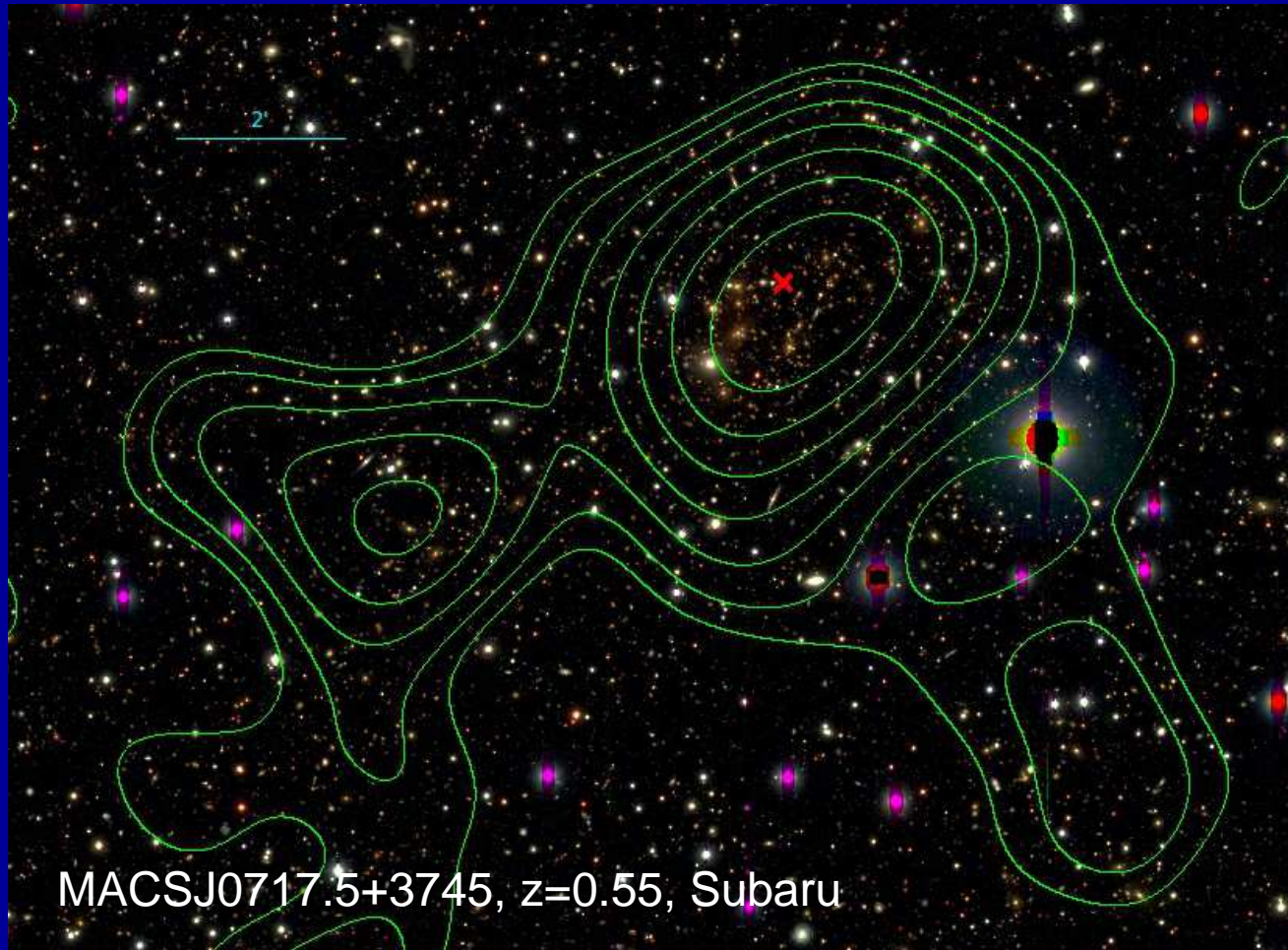


W. Couch (UNSW), NASA, HST 04/1995

Masse totale de l'amas à partir de l'effet de lentille fort

- Ajustement du profil de masse permettant de retrouver les images des sources d'arrière-plan détectées sur l'image
- Intégration du profil de masse  masse totale dans le rayon d'Einstein (petit)

Masse totale de l'amas à partir de l'effet de lentille faible



Martinet, Clowe, Durret et al. 2015, en préparation

- Déformation des galaxies d'arrière-plan due au potentiel de la lentille
- Mesure statistique de cette déformation
- Hypothèse : ellipticité moyenne nulle

- Ajustement d'un potentiel gravitationnel (NFW ou autre)
- Profil de masse
- Masse par intégration de ce profil

Masse des amas à partir des observations en rayons X

Les satellites en rayons X

Les rayons X ne traversent pas l'atmosphère terrestre

➔ Observations par satellite

Trois satellites en vol depuis
~15 ans

En projet :

eROSITA 2016

Astro-H 2016

Athena 2028

Chandra



XMM-Newton



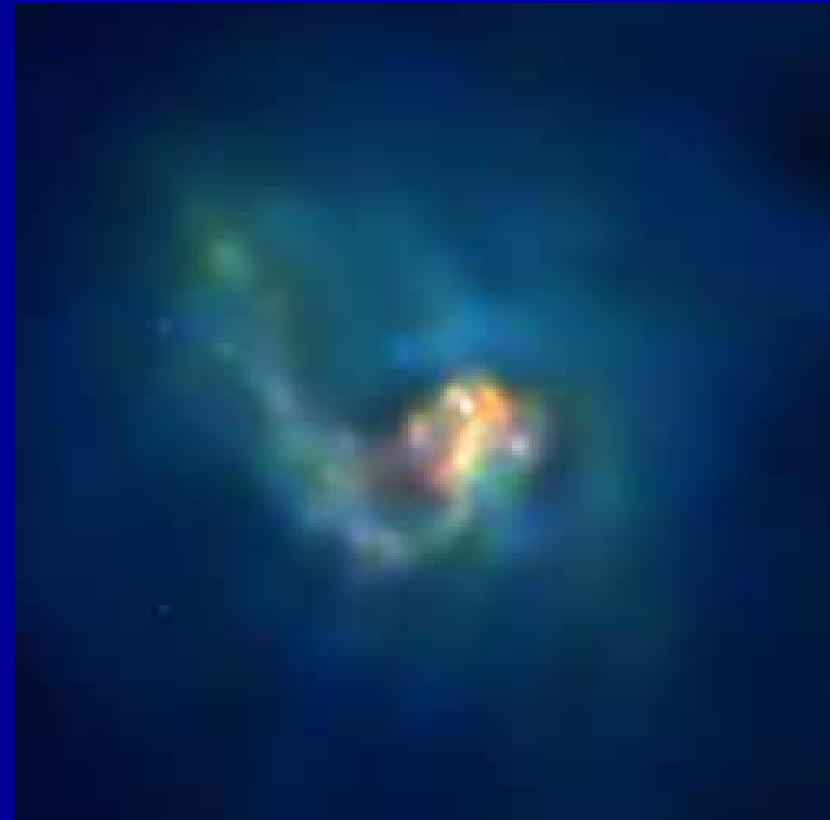
Suzaku



Les amas de galaxies en rayons X



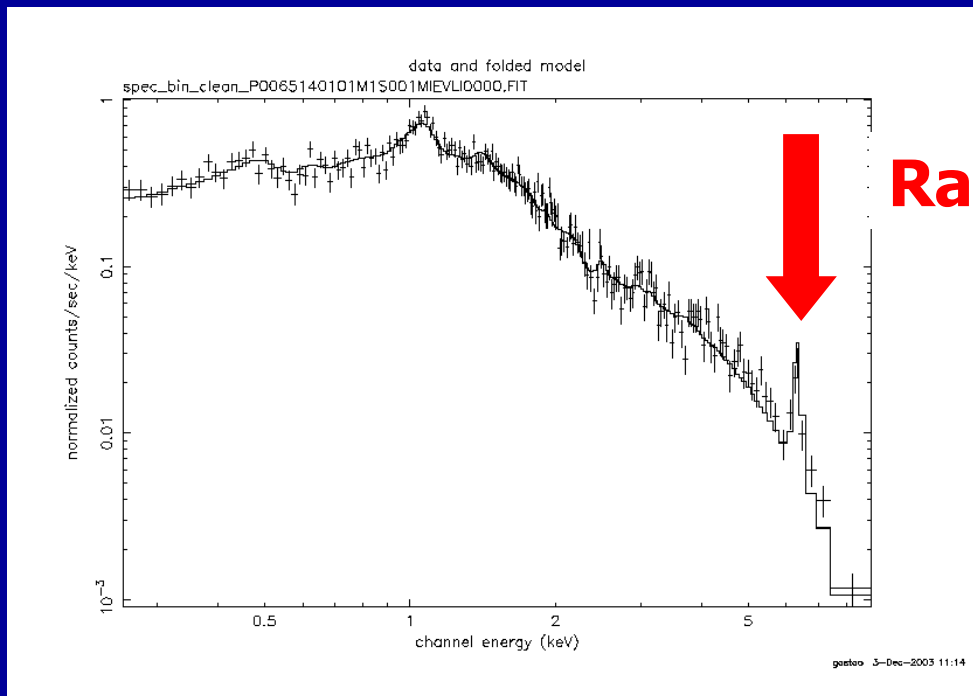
Abell 2142 ($z=0.09$)
NASA/CXC/SAO



L'amas du Centaure ($z=0.011$)
NASA/IOA/Sanders & Fabian

Les spectres d'amas en rayons X

Ces spectres sont interprétés comme dus à un gaz très chaud (des millions de degrés) et très peu dense (10^8 particules par mètre cube, alors que l'atmosphère terrestre au niveau de la mer en contient environ 10^{25} par mètre cube)



Raie du fer

Le spectre X de
L'amas Abell 85
($z=0.055$)
Satellite XMM-Newton

- Les amas de galaxies en X apparaissent comme des sources diffuses et étendues
- Ce gaz est fortement ionisé (protons, électrons, FeXXV, FeXXVI)
- Les électrons du gaz sont freinés lorsqu'ils passent près des protons et émettent des photons X par rayonnement de freinage (bremsstrahlung)
- Emissivité à la fréquence ν :

$$\epsilon(n, T) \propto n^2 T^{-1/2} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$$

T=température du gaz (dix à cent millions de degrés)
n=densité électronique

Les spectres en rayons X permettent d'estimer :

- la température et la densité du gaz
- la variation de ces quantités en fonction de la distance au centre de l'amas
- l'abondance des éléments « lourds » qui ont été fabriqués dans les étoiles et rejetés dans le milieu intergalactique, en particulier le fer

Estimation de la masse de gaz X

A partir de la densité $n(r)$ du gaz on peut calculer la masse de gaz $M_{\text{gaz}}(r)$ en fonction du rayon et par intégration la masse de gaz de l'amas jusqu'au rayon R

Hypothèse (souvent fausse) : *symétrie sphérique*

$$M_{\text{gaz}}(r) = \int_0^R 4\pi r^2 \rho_{\text{gaz}}(r) dr$$

$M_{\text{gaz}} \sim \text{quelques } 10^{13} \text{ à } 10^{14} M_0$

Estimation de la masse totale de l'amas à partir de l'émission X

En supposant que le gaz est en équilibre hydrostatique avec l'ensemble de la matière de l'amas, on peut calculer la masse totale de l'amas en fonction du rayon $M_{\text{dyn}}(r)$

Par intégration sur le rayon on calcule ensuite la masse totale de l'amas M_{dyn}

$$\nabla\Phi = -\frac{1}{\rho}\nabla P$$

$$\frac{1}{\rho(r)} \frac{dP(r)}{dr} = -\frac{d\Phi(r)}{dr}$$

$$PV = NkT$$

$$\rho(r) = \mu m_H n(r), \mu = 0.6, n = N/V$$

$$\frac{1}{\rho \mu m_H} \frac{d(\rho T)}{dr} = -\frac{d\Phi(r)}{dr}$$

$$\frac{d\Phi(r)}{dr} = -F(r) = \frac{GM_{dyn}(r)}{r^2}$$

$$\frac{k}{\mu m_H} \frac{d(\rho T)}{dr} = -\rho \frac{GM_{dyn}(r)}{r^2}$$

Équation d'Euler:

Φ = potentiel gravitationnel

P = pression, ρ =densité

Si symétrie sphérique

Si loi des gaz parfaits s'applique
(faible densité du gaz)

$\mu=0.6$ poids
moléculaire moyen
 m_H masse atome H

- Masse totale en fonction du rayon:

$$M_{\text{dyn}}(r) = -rT(r) \frac{k}{G\mu m_p} \left[\frac{d \log \rho}{d \log r} + \frac{d \log T}{d \log r} + \frac{P_{\text{nt}}}{P} \frac{d \log P_{\text{nt}}}{d \log r} \right]$$

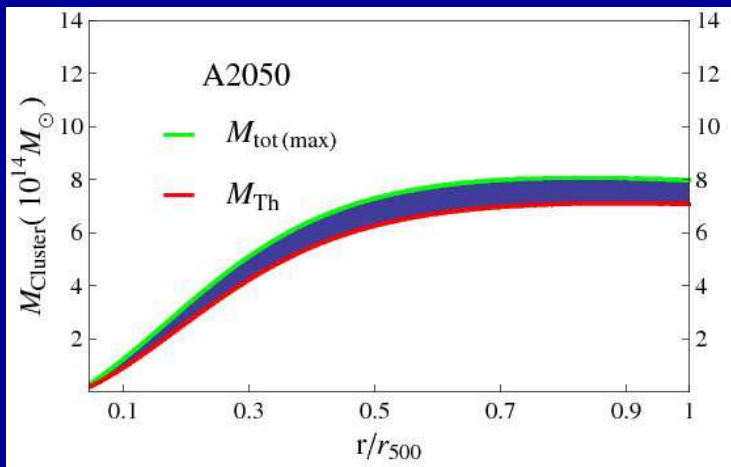
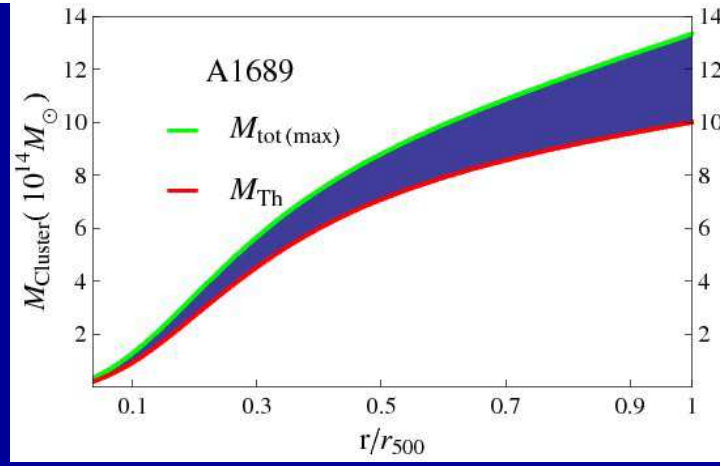
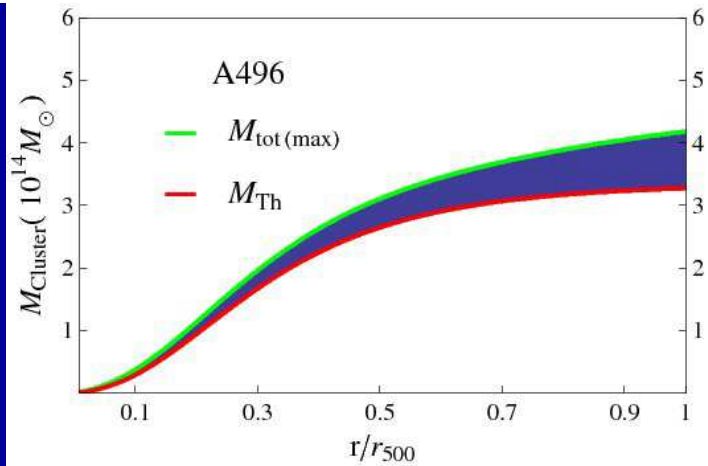


Terme de pression
non thermique

où P_{nt} = pression supplémentaire (magnétique, rayons cosmiques, turbulence...) souvent négligée mais ce n'est pas forcément justifié

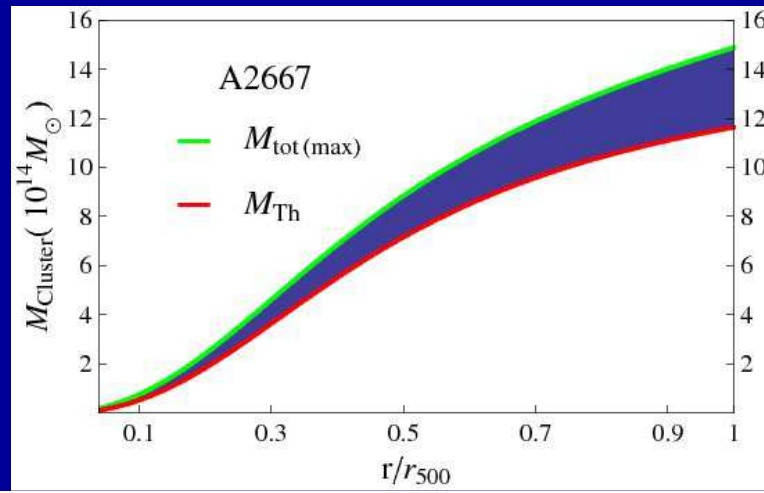
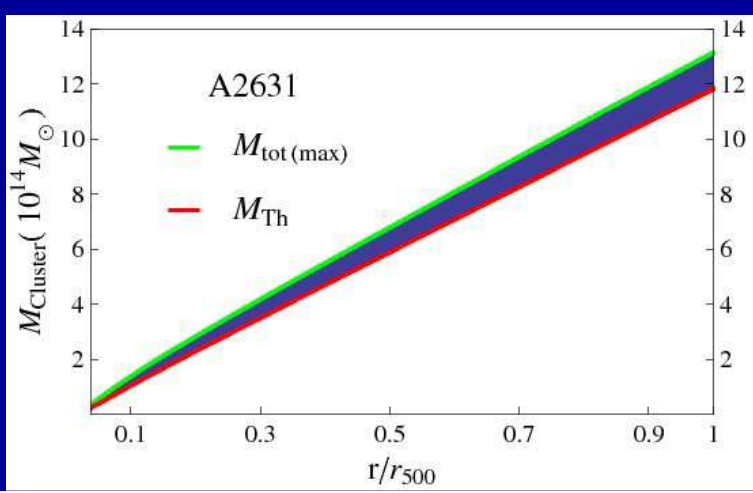
- Masse totale M_{dyn} s'obtient par intégration sur r

$$M_{\text{dyn}} \sim \text{quelques } 10^{14} \text{ à } 10^{15} M_0$$



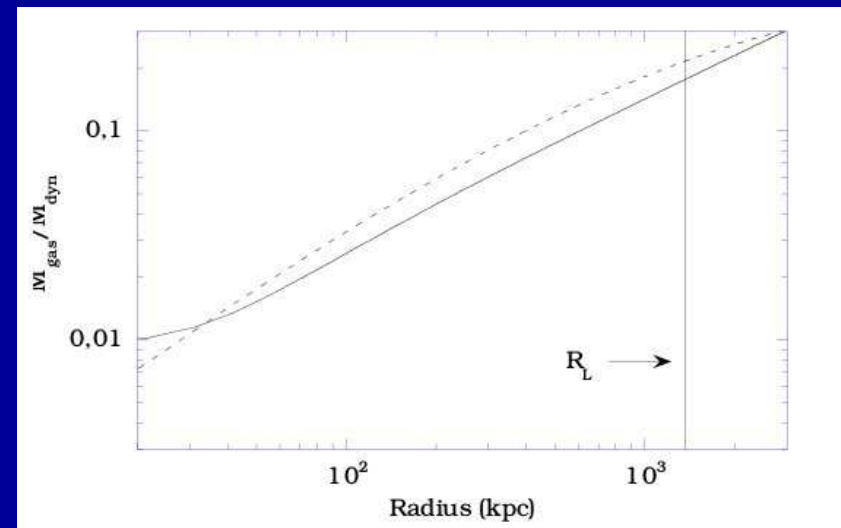
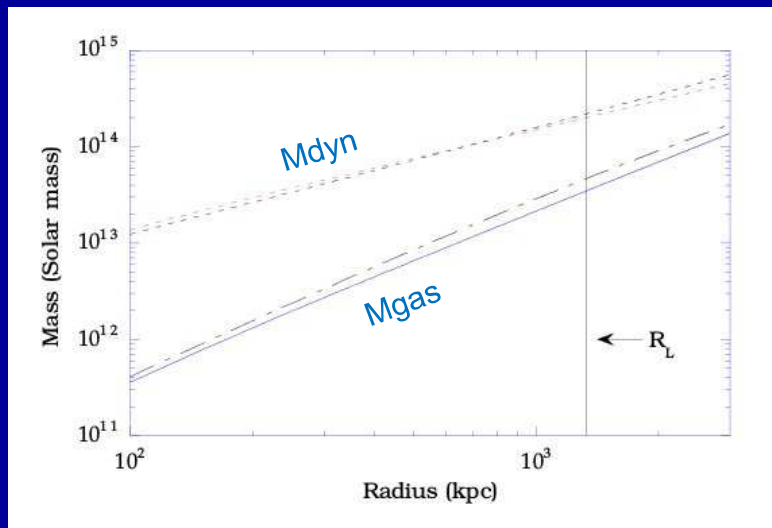
Influence de la pression non thermique (rayons cosmiques, champs magnétiques et turbulence du gaz émetteur X) : *non négligeable !*

Laganá et al. 2010, A&A 510, 76



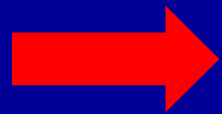
Les profils des distributions de gaz X et de matière noire sont différents

La matière noire est plus concentrée que le gaz X au centre des amas



Résultats

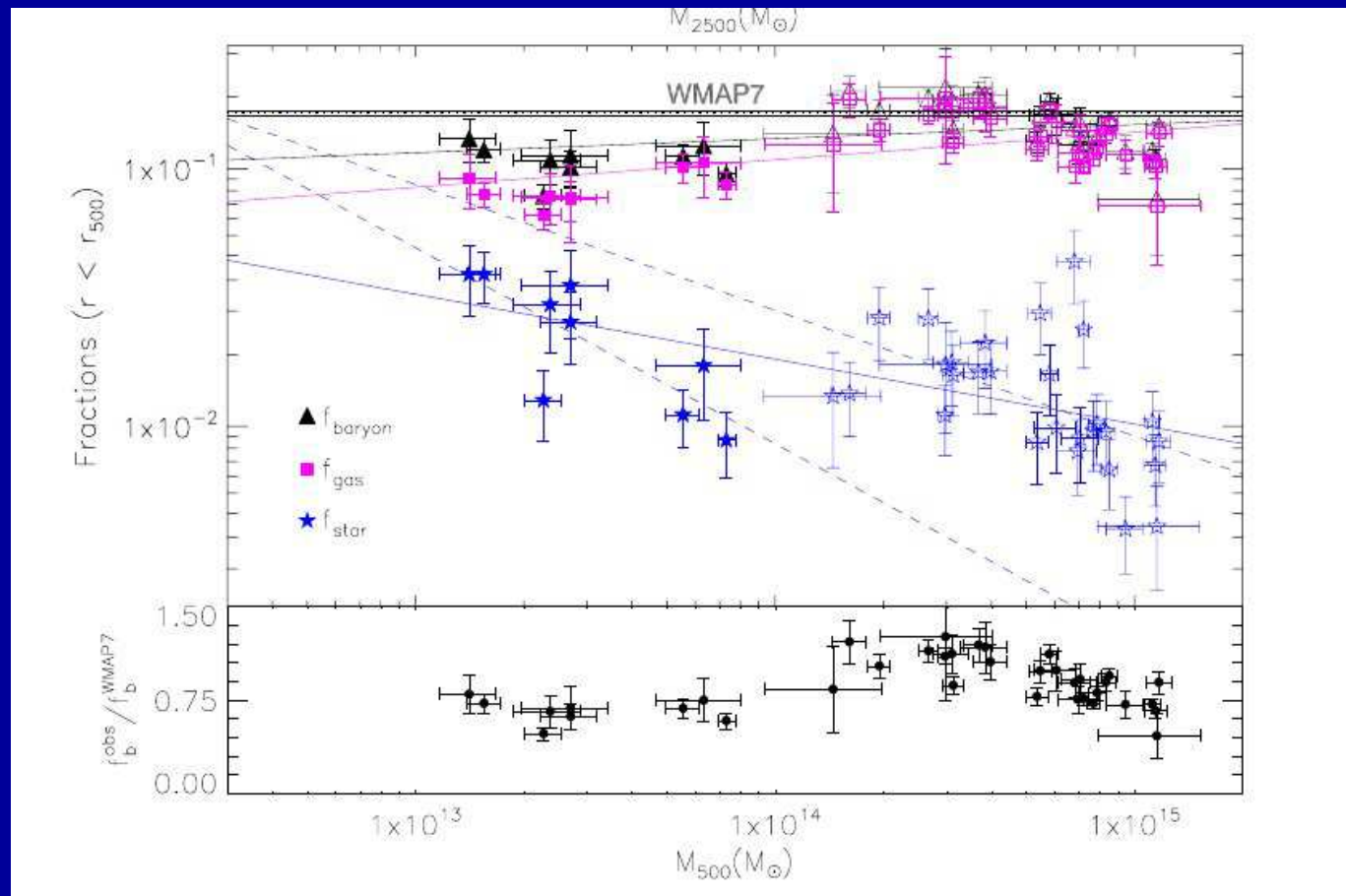
La masse de gaz X est seulement environ 15-20% de la masse totale, et la masse des galaxies représente quelques % de la masse de l'amas



présence de matière noire

La masse totale des amas calculée à partir des données en rayons X et à partir des lentilles gravitationnelles est à peu près la même (sauf si sous-structures importantes)

Fraction de baryons dans les groupes et amas



Total

Gaz X

Etoiles

Rapport à
WMAP

Mais...

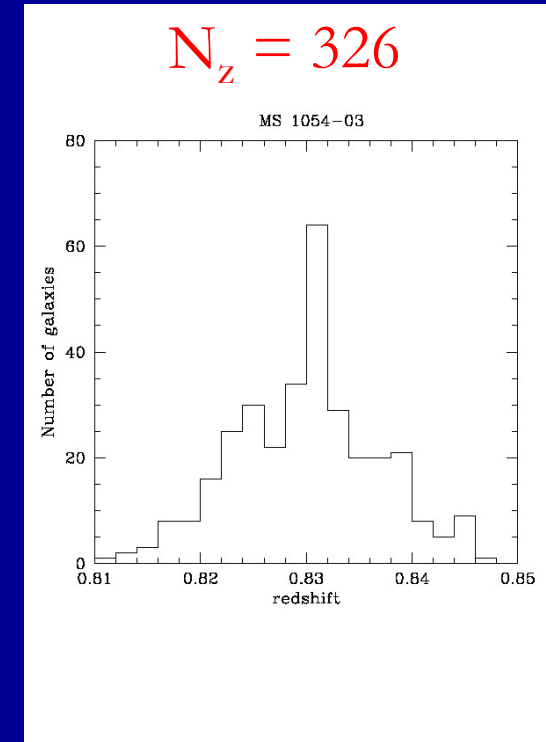
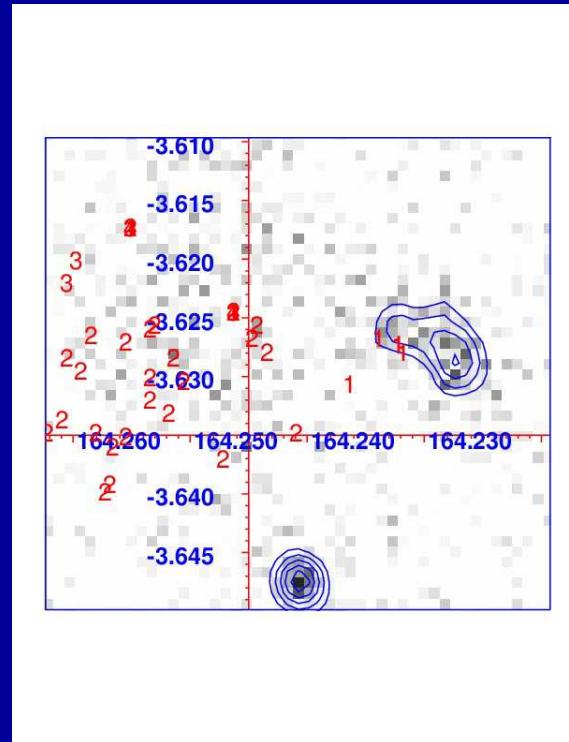
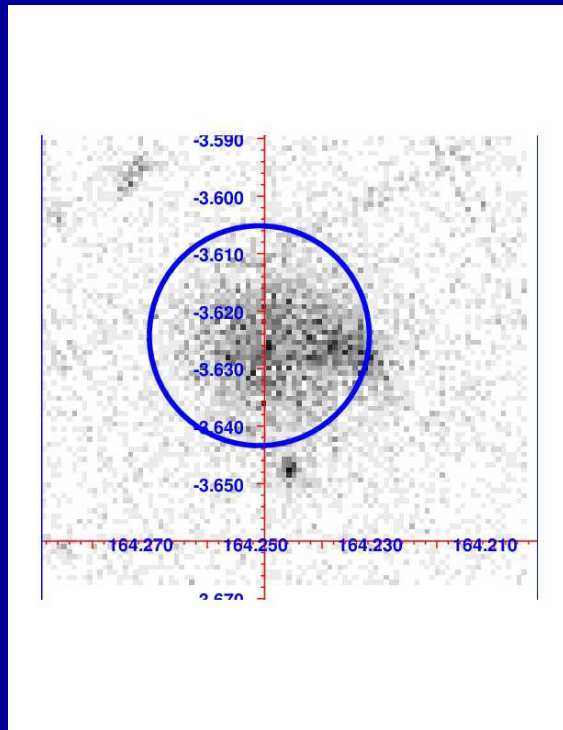
Masse contenue dans les sous-structures des amas

Cas des amas DAFT/FADA

Le rapport entre la masse contenue dans les sous-structures et la masse totale de l'amas est **constant avec le redshift entre $z=0.4$ et $z=0.9$: 5% – 15%**

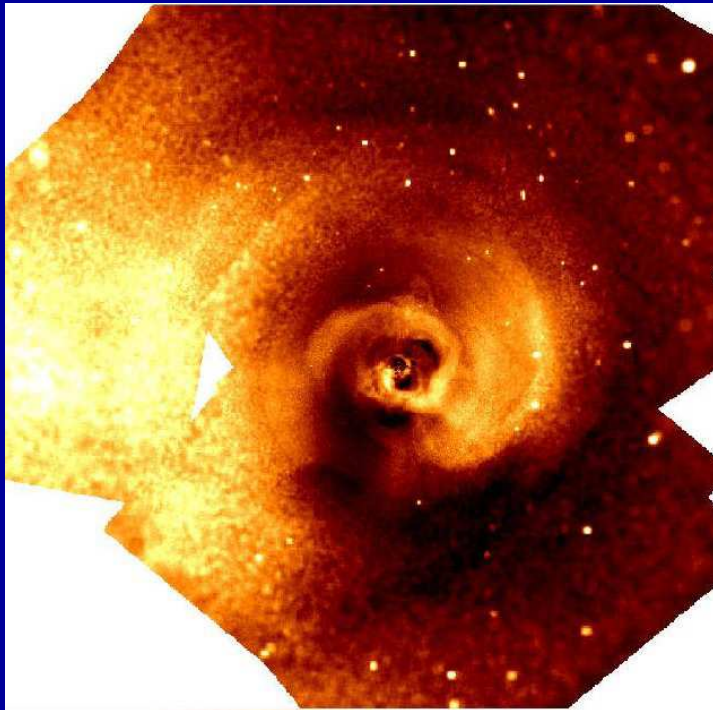
Donc les amas étudiés se sont formés à $z > 0.9$

MS 1054-03, un amas DAFT/FADA avec une sous-structure à $z=0.826$



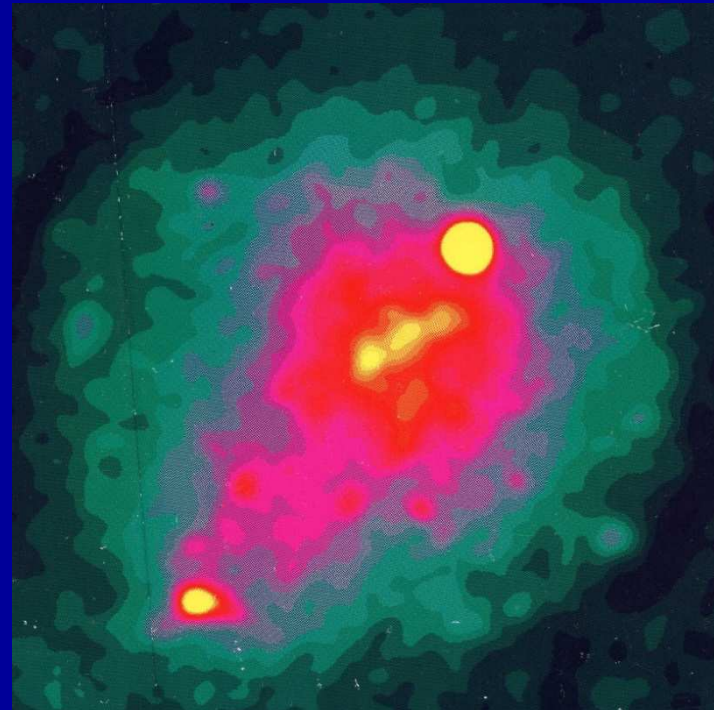
Amas principal + une sous-structure étendue, 1 AGN

Les amas vus en rayons X ne sont pas souvent des structures lisses et homogènes (amas dits « relaxés »)



Perseus

Fabian et al. 2011, MNRAS 418, 2154

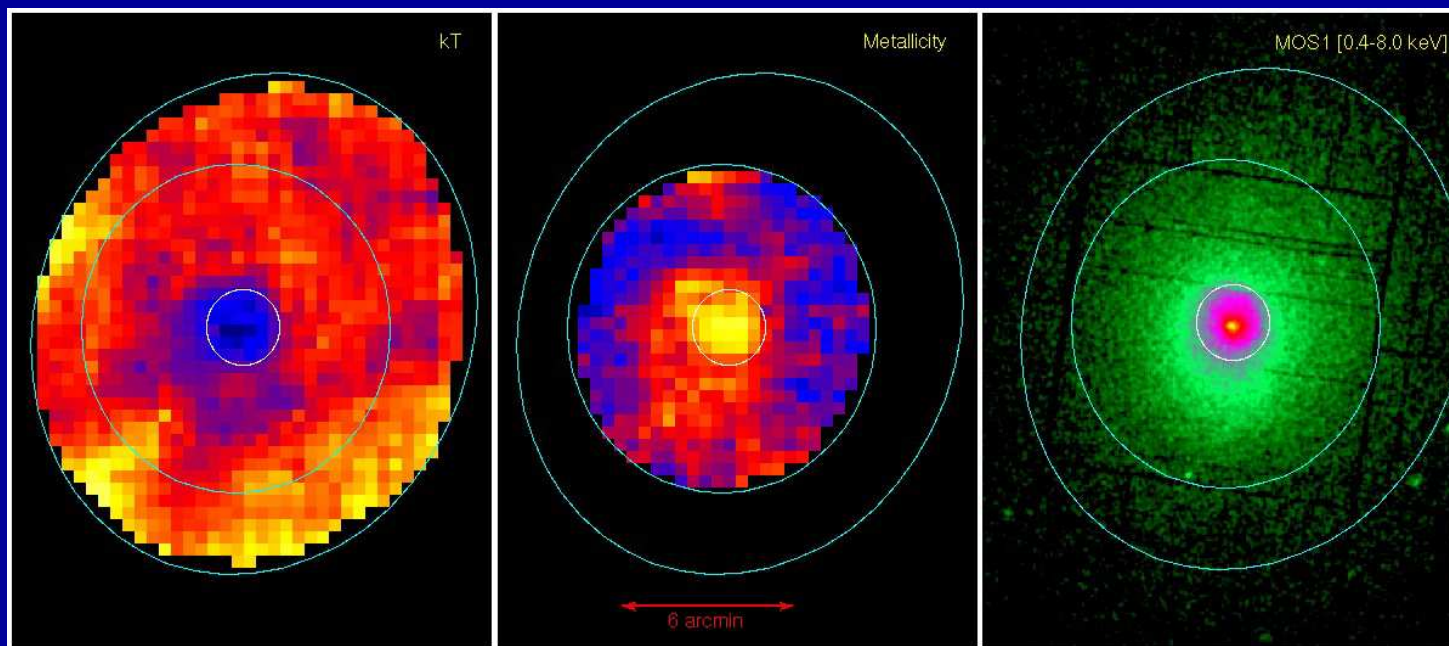


Abell 1367

Sun et al. 2005, ApJ 619, 169

Même quand l'émissivité en rayons X semble homogène, les cartes de température et de métallicité peuvent ne pas l'être

Abell 496

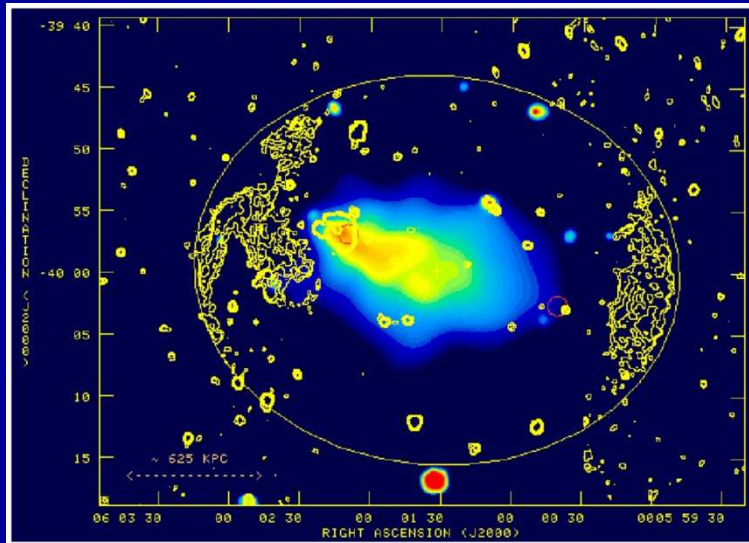


Température

Métallicité

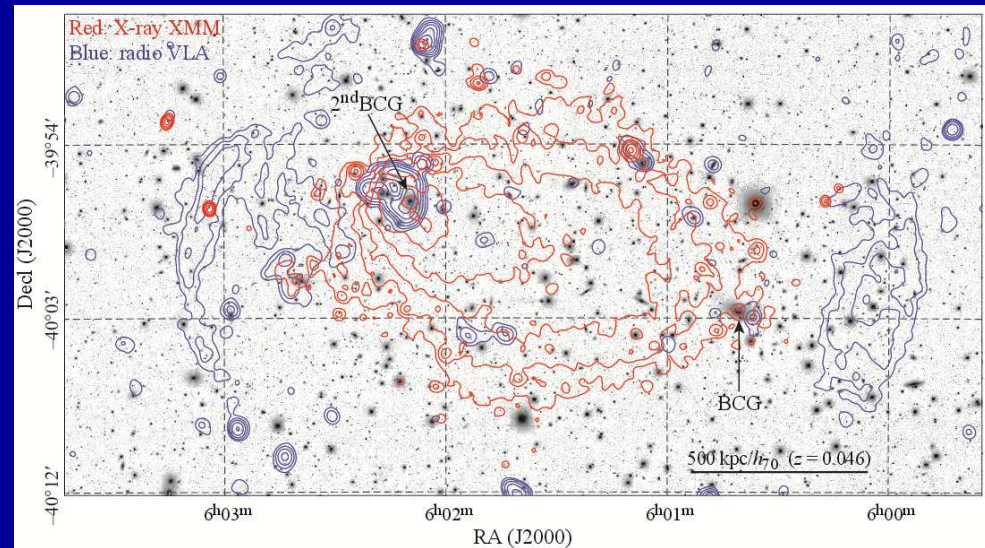
Emissivité

Les fusions d'amas sont fréquentes : Abell 3376



Couleurs : émission X
Jaune : émission radio

Bagchi, Durret, Lima Neto, Paul 2006,
Science 314, 791



Rouge : émission X
Bleu : émission radio

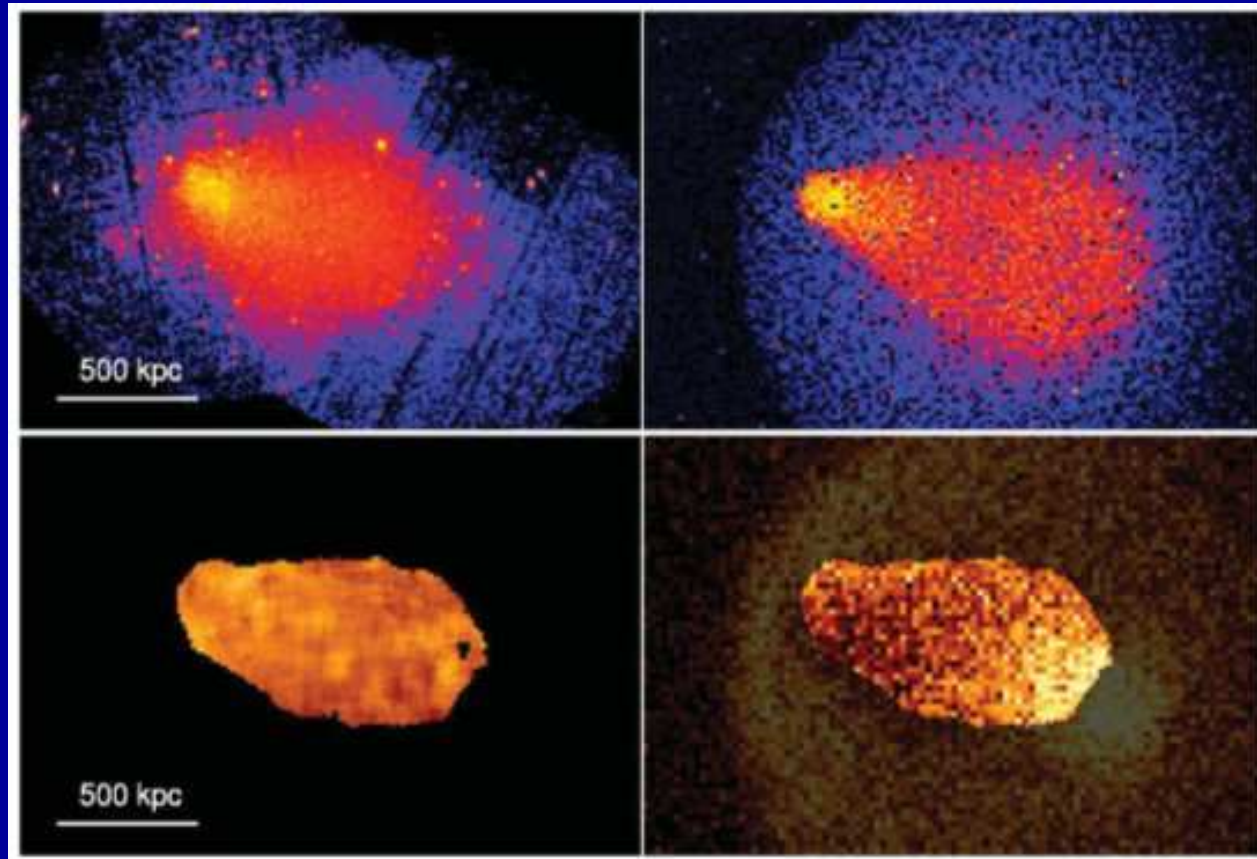
Durret et al. 2013, A&A 560, 78

Abell 3376 en rayons X

Observations

Simulations numériques

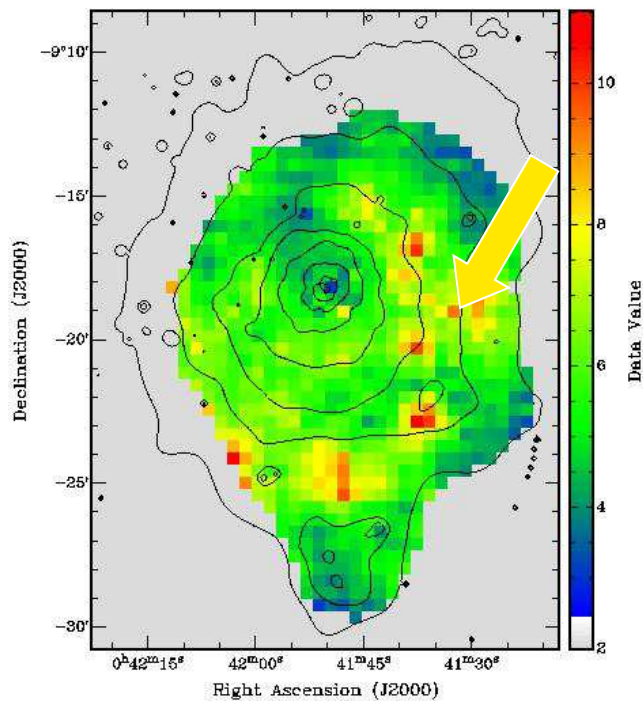
Emissivité



Température

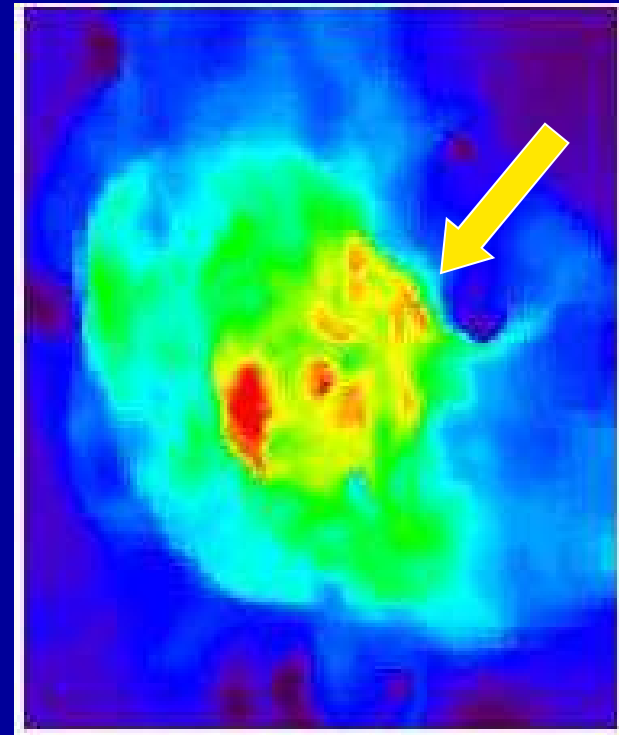
Carte de température XMM

Abell 85



Durret, Lima Neto & Forman
2005, A&A 432, 809

Carte de température obtenue
par simulation numérique



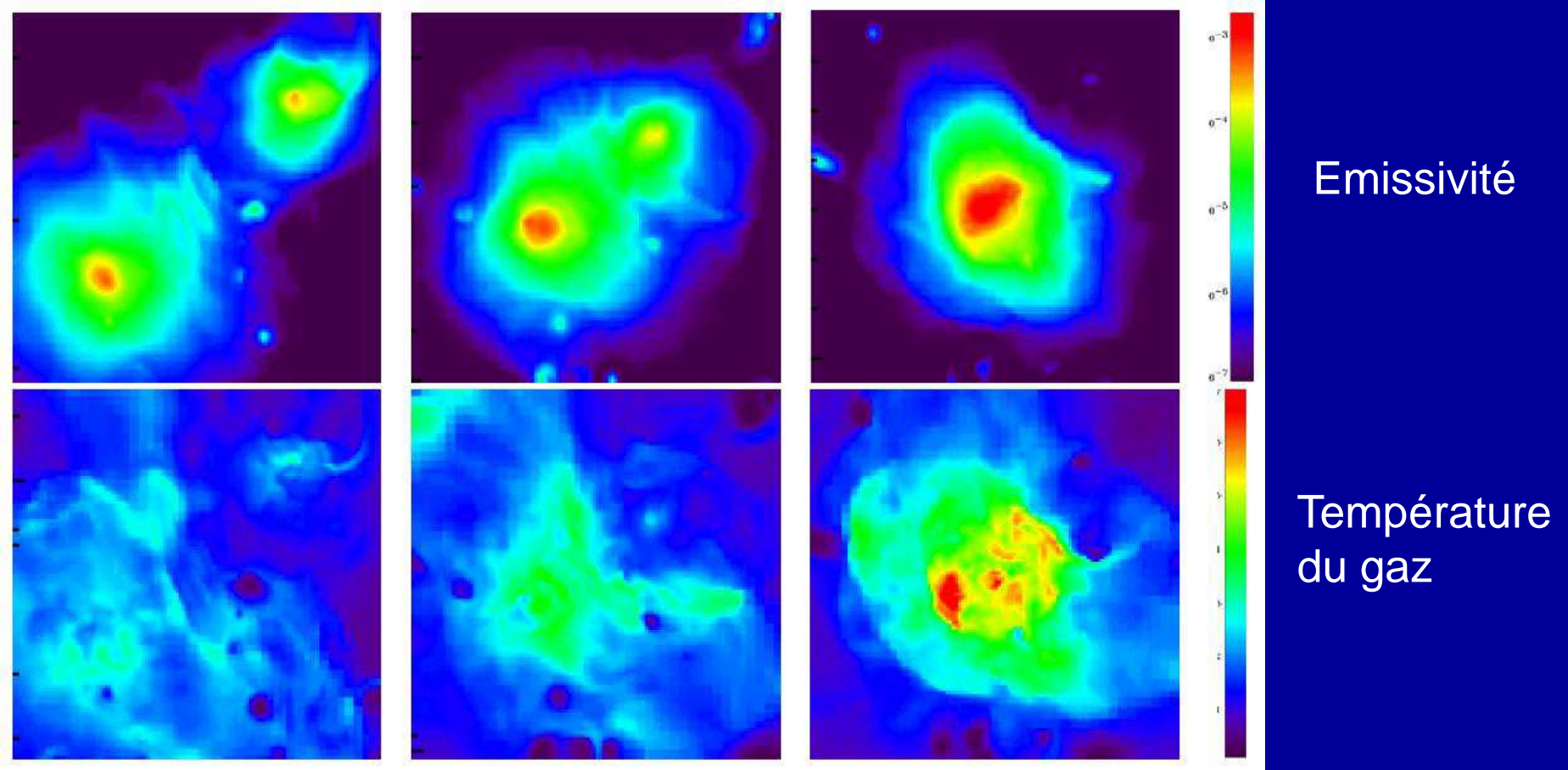
Bourdin, Sauvageot, Slezak,
Bijaoui, Teyssier 2004,
A&A 429, 443

Comparaison avec des simulations numériques

$z=0.13$

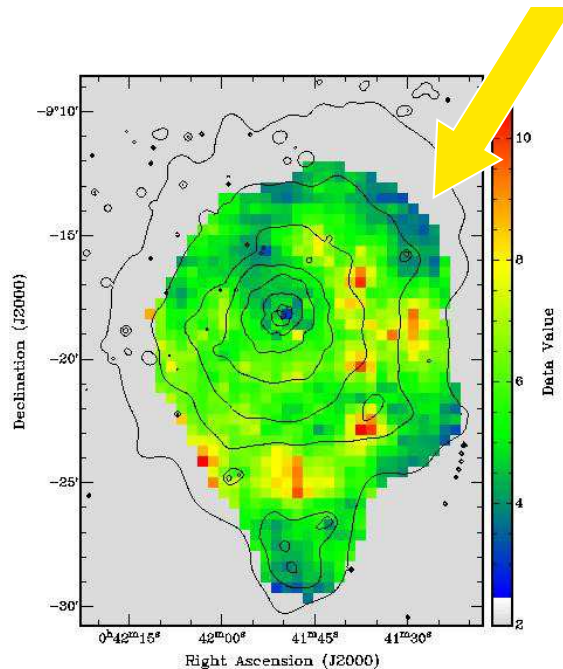
$z=0.09$

$z=0$

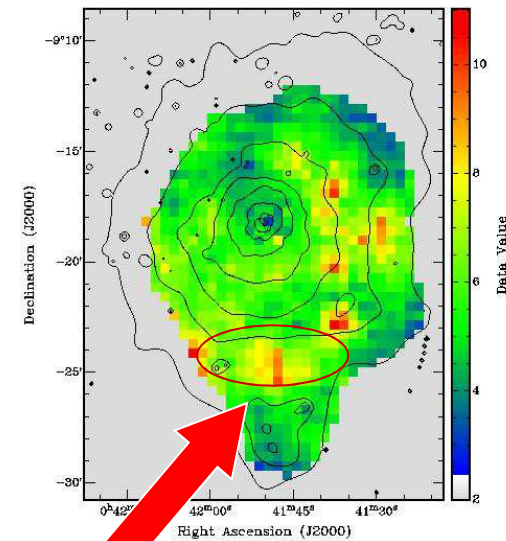


Un scénario pour Abell 85 : cet amas a subi plusieurs fusions

- Fusion plus ancienne avec un amas moins massif venant du NW



- Chute (encore en cours) de groupes venant du sud-est et arrivant sur la zone d'impact

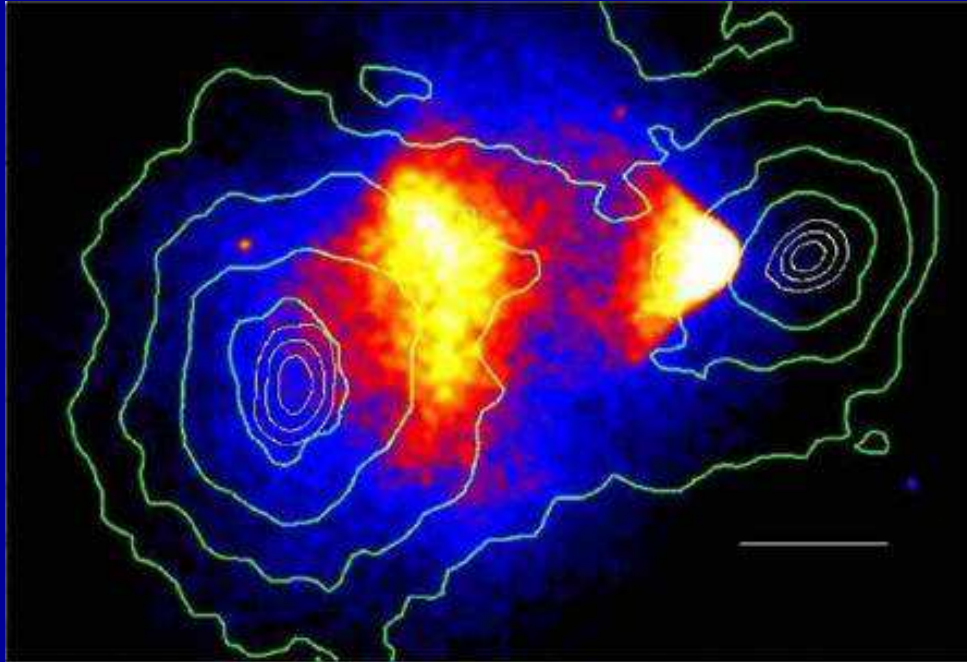


Chute de groupes

Conséquences des fusions d'amas

- Le gaz est comprimé entre les deux amas, donc son émissivité en rayons X augmente (elle est proportionnelle à n^2)
- Le gaz (hydrogène neutre froid) contenu dans les galaxies peut aussi être comprimé, donc le taux de formation d'étoiles dans les galaxies augmente
- Mais ce gaz peut aussi être arraché des galaxies, et alors le taux de formation d'étoiles diminue

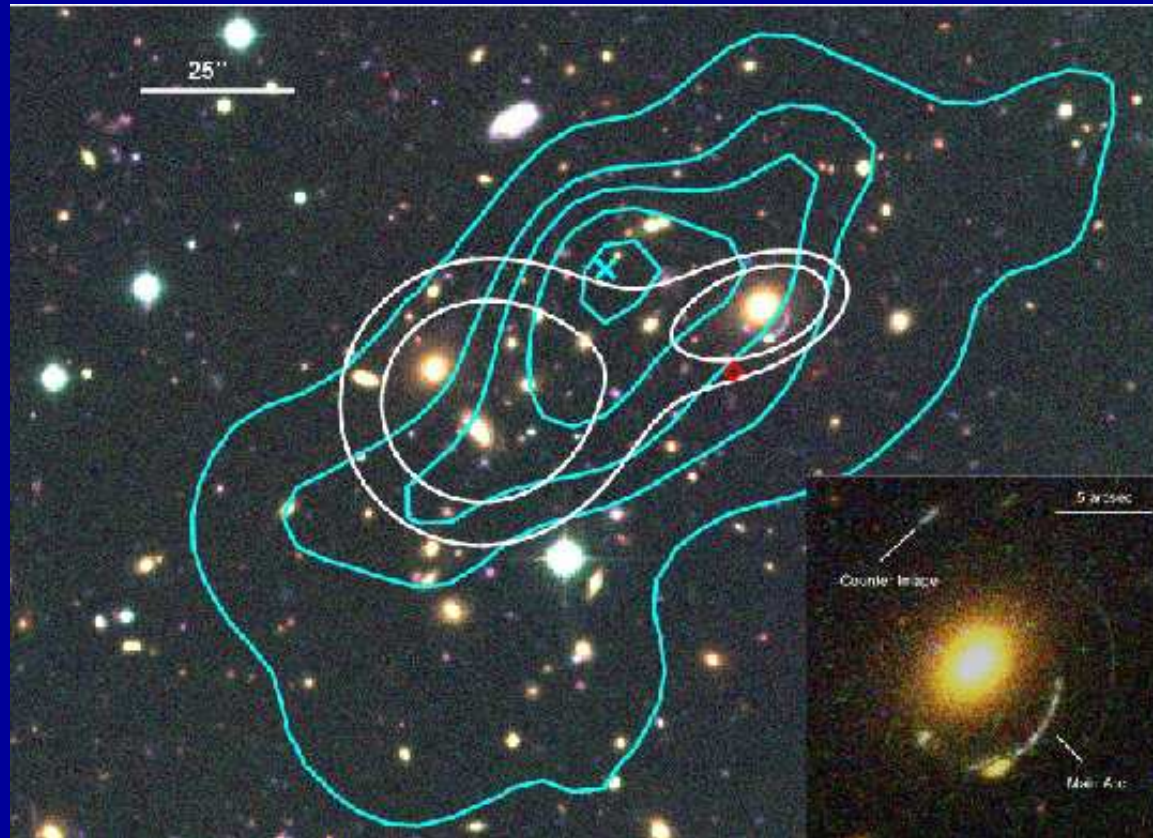
Un cas d'école : l'amas du boulet



Couleurs: émissivité du gaz X
Contours verts : distribution de
matière noire calculée par effet
de lentille gravitationnelle faible

Le gaz et la matière noire peuvent être distribués différemment

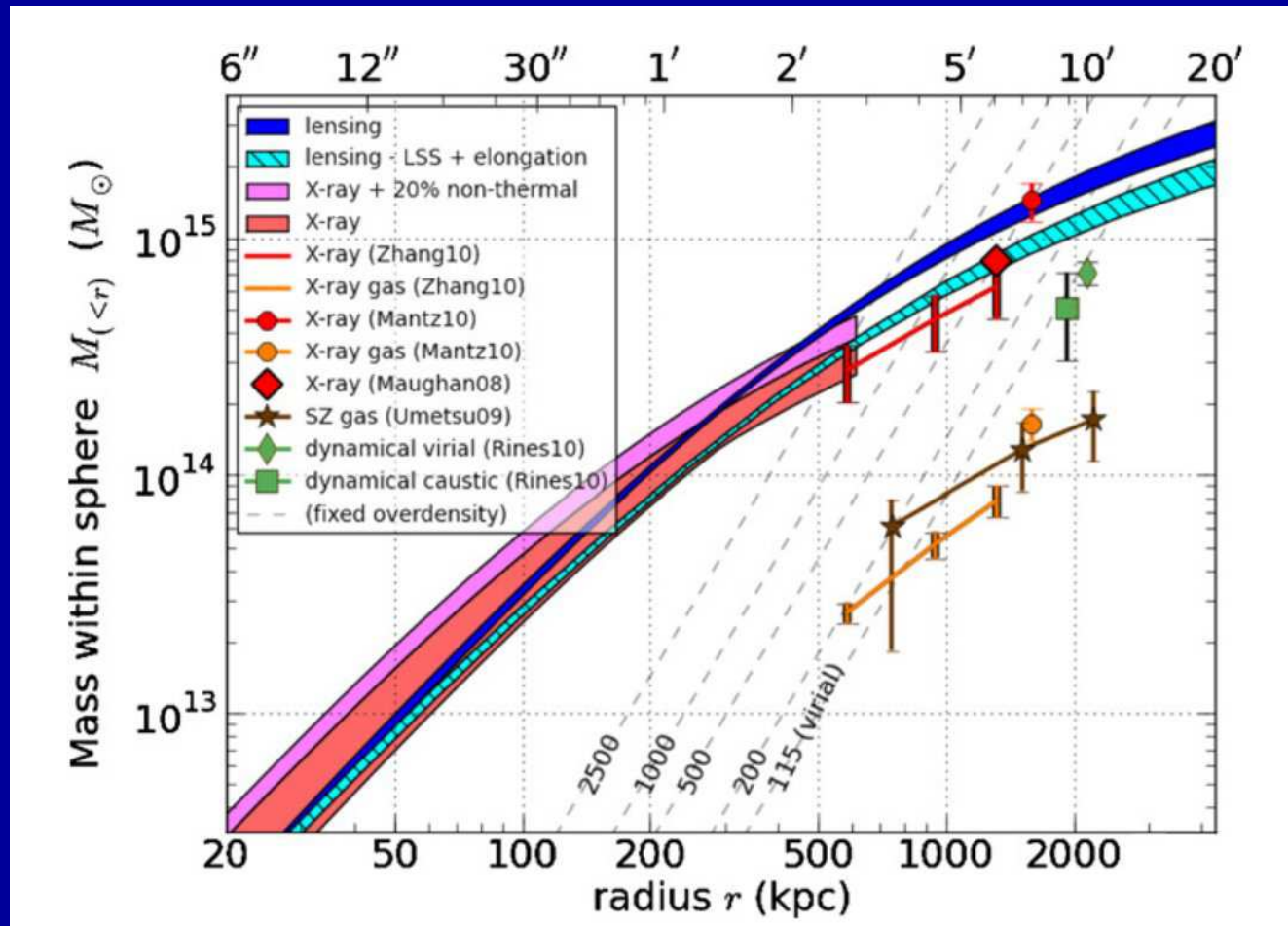
Le groupe du boulet



Turquoise : émissivité
du gaz X

Blanc : distribution de
matière noire calculée
par effet de lentille
gravitationnelle fort

Comparaison des masses d'amas obtenues par différentes méthodes



Et MOND?

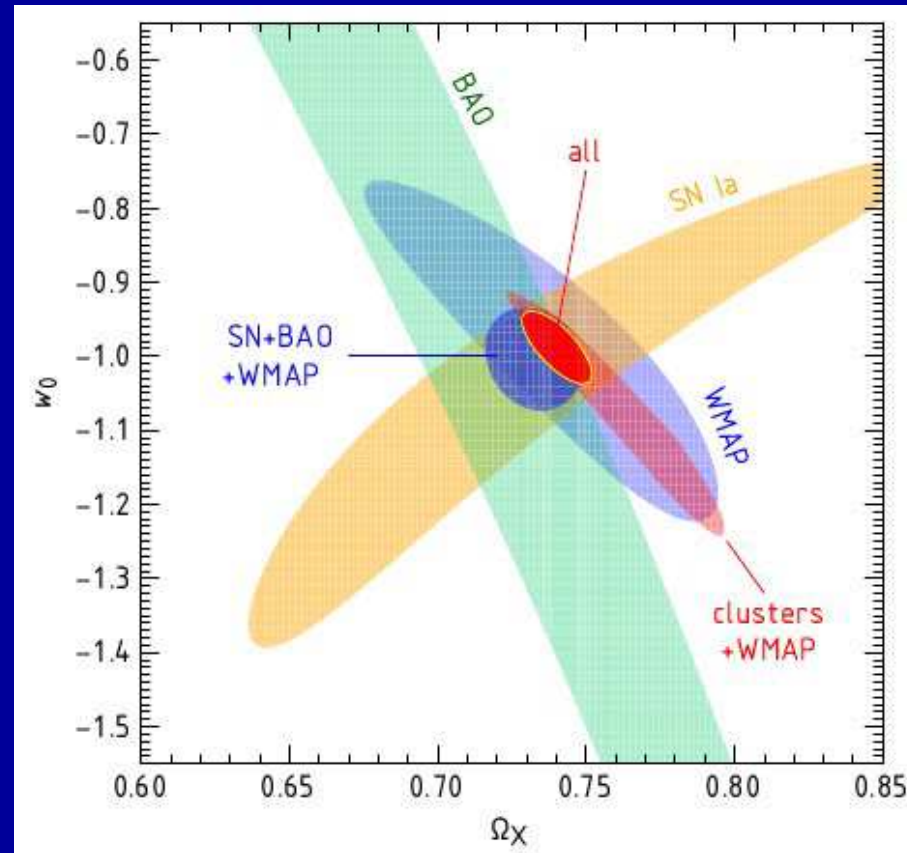
- MOND = MOdified Newtonian Dynamics
appliqué aux amas ne suffit pas, on a quand même besoin de matière noire

Gerbal, Durret, Lachièze-Rey, Lima Neto 1992,
A&A 262, 395

Confirmé par Pointecouteau & Silk 2005, MNRAS 364, 654

Faire de la cosmologie avec les amas

Contraindre les paramètres cosmologiques avec les amas



Recherche systématique d'amas

- Canada France Hawaii Telescope Legacy Survey (CFHTLS)
- Stripe 82 du Sloan Digital Sky Survey
- Des milliers de « candidats amas », dont plusieurs dizaines à $z > 1$

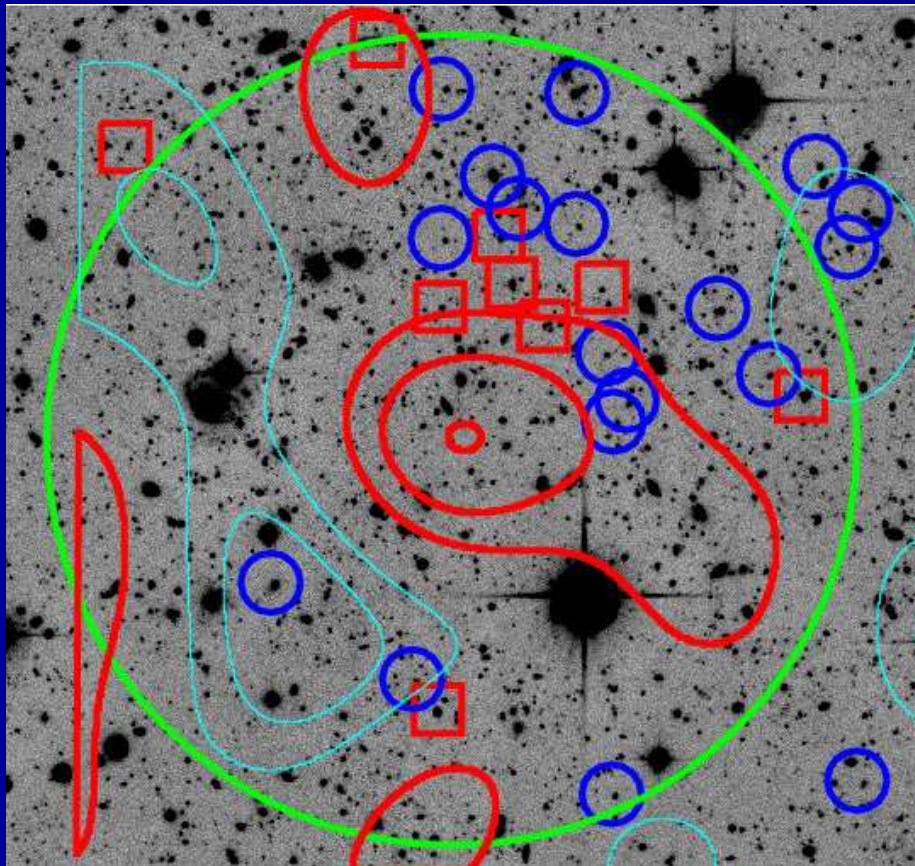
Mazure, Adami Pierre et al. 2007, A&A 467, 49

Adami, Durret, Benoist et al. 2010, A&A 509, 81

Durret, Adami, Cappi et al. 2011, A&A 535, 65

Durret, Adami, Bertin et al. 2015, A&A en révision

Confirmation spectroscopique de plusieurs candidats amas du CFHTLS



L'amas D3-43
($z=0.739$)

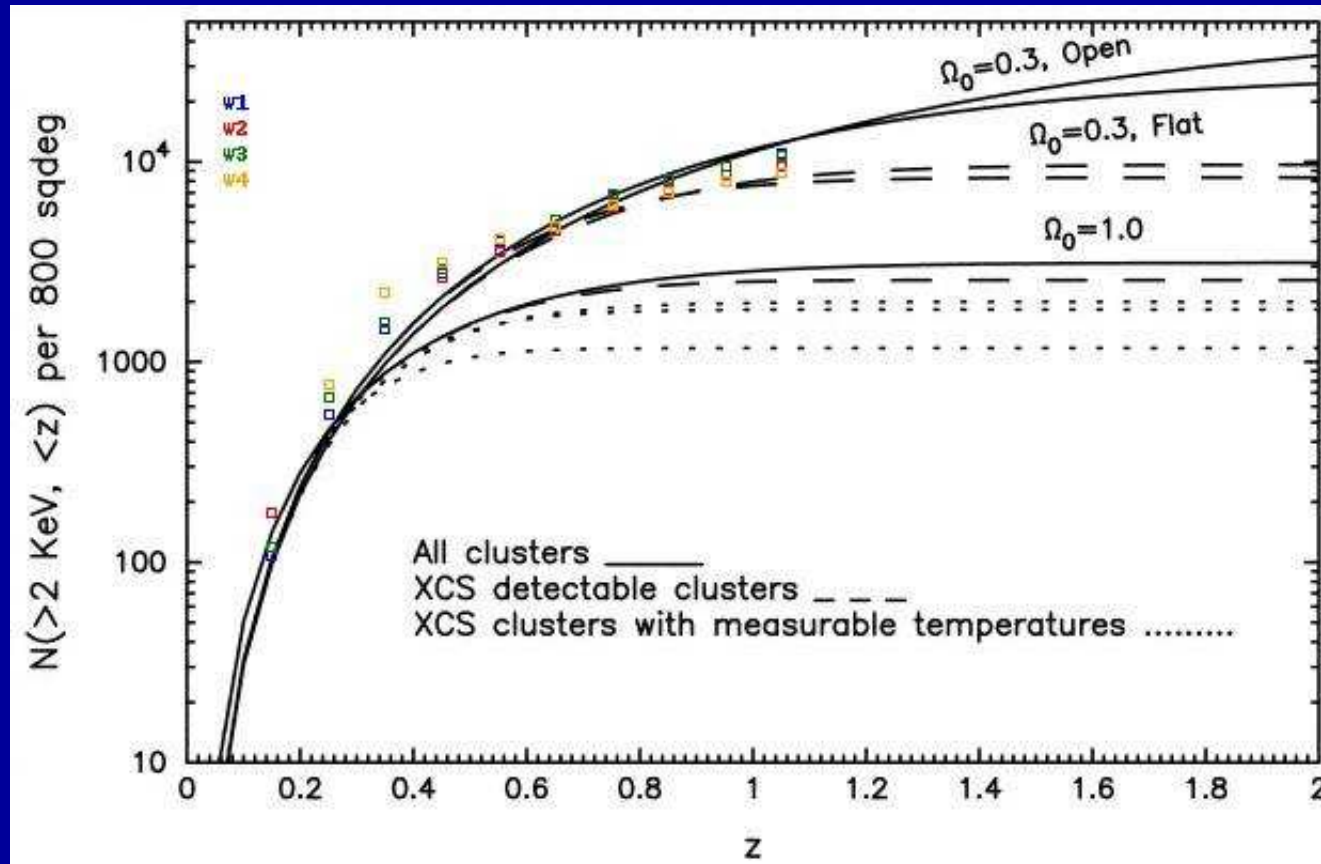
Vert : rayon 1 Mpc

Rouge/bleu ciel : contours
de masse (lentille faible)

Carrés rouges et cercles
bleus : galaxies dans les
deux sous-structures de
l'amas

Adami, Cypriano, Durret et al. 2015, A&A sous presse

Distribution en redshift des amas détectés à $\geq 4\sigma$ dans les champs Wide du CFHTLS



Courbes de Romer et al. 2001, ApJ 547, 594

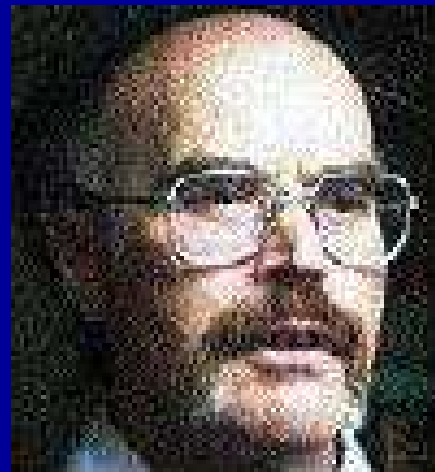
Quelques conclusions

- Les amas se sont formés entre $z=2$ et $z=1$
- Ils peuvent être utilisés en cosmologie
- Le satellite Planck en a découvert un grand nombre et le satellite Euclid (lancement prévu 2020) en découvrira encore bien plus !

Merci à mes principaux collaborateurs

- Christophe Adami
- Emmanuel Bertin
- Andrea Biviano
- Gwenaël Boué
- Véronique Cayatte
- Eugene Churazov
- Douglas Clowe
- William Forman
- Loïc Guennou
- Markus Haider
- Olivier Ilbert
- Tatiana F. Laganá
- Gastão B. Lima Neto
- Marceau Limousin
- Gary Mamon
- Nicolas Martinet
- Alain Mazure
- Eric Slezak
- Laerte Sodré
- Melville Ulmer
- Marcus Vinicius Costa Duarte

Daniel Gerbal
(1935 – 2006)



Alain Mazure
(1947 – 2013)

