

# 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

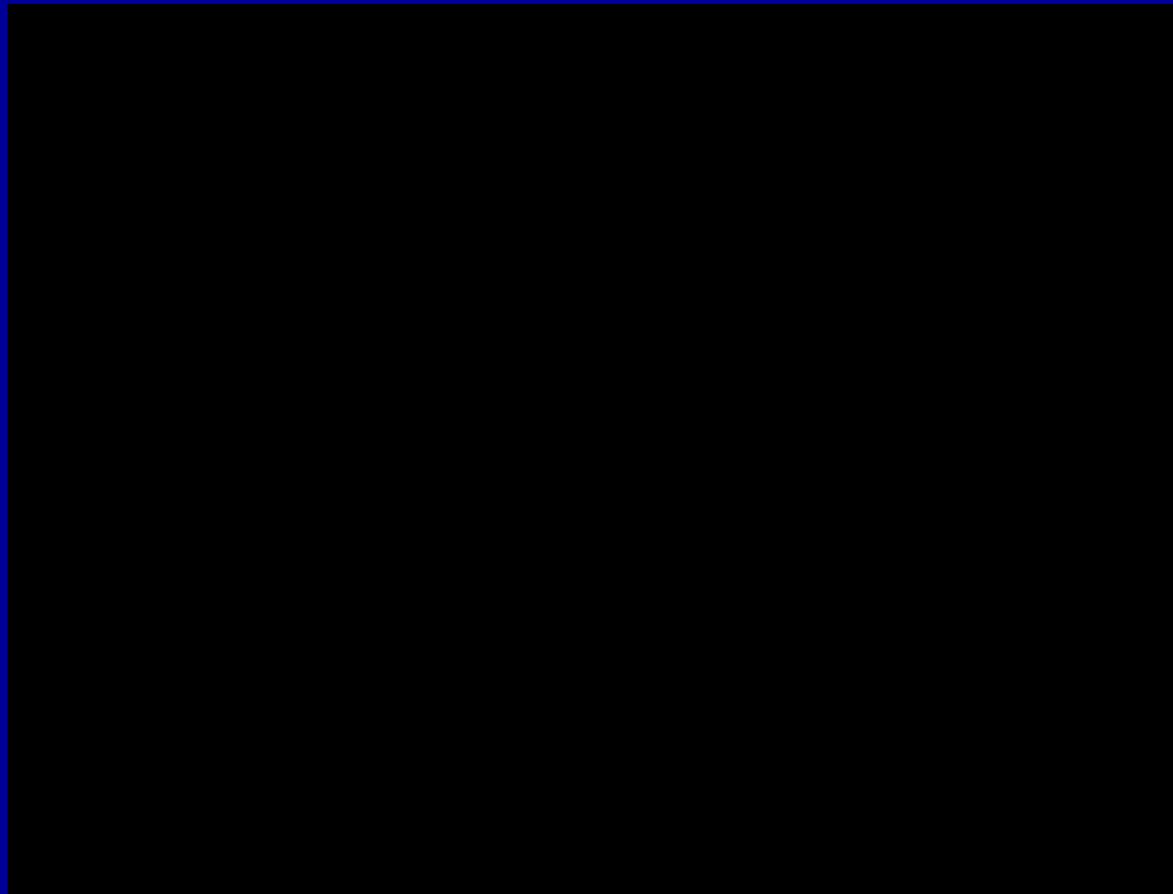
Dimensions : quelques Mpc

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

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

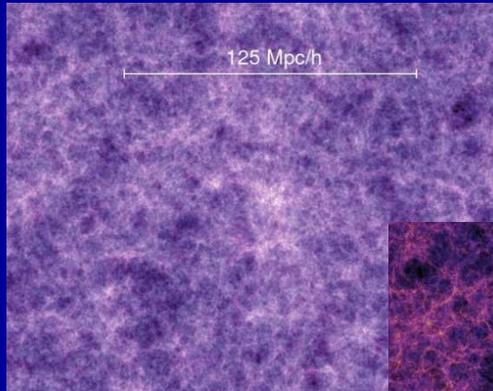
1  $M_0$   $\sim$   $2 \cdot 10^{30}$  kg (masse du Soleil)

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

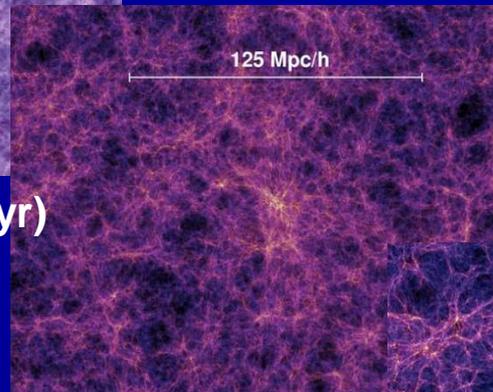


Simulation de S. Colombi et collaborateurs

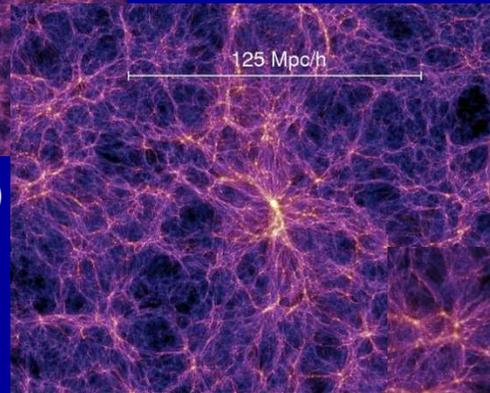
# Formation des amas



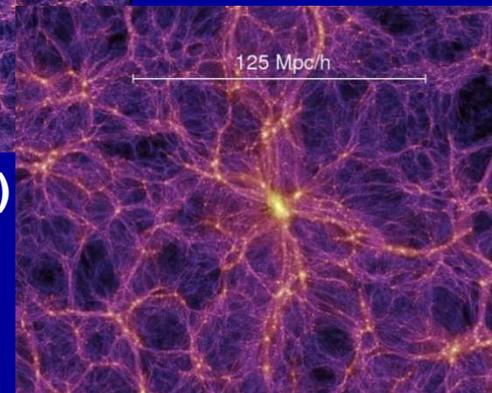
**$z=18.3$  (t = 0.21 Gyr)**



**$z=5.7$  (t = 1.0 Gyr)**



**$z=1.4$  (t = 4.7 Gyr)**



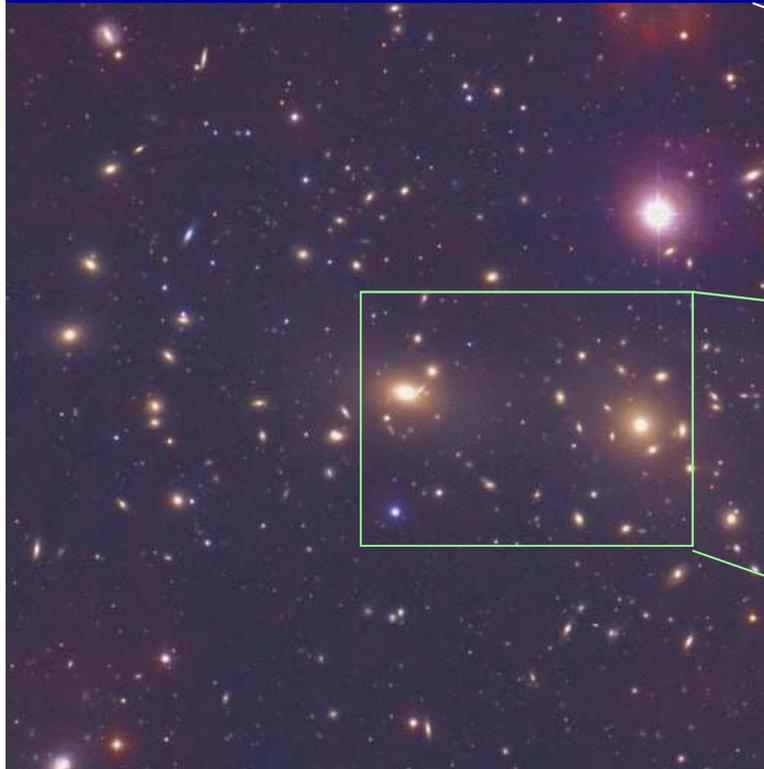
**$z=0$  (t = 13.6 Gyr)**

Simulation Millenium  
Springel+05

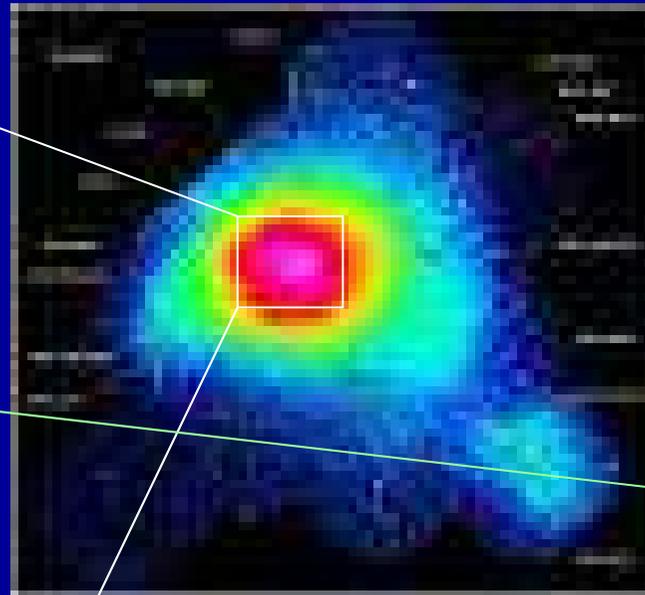
# Pourquoi rechercher les amas en grand nombre ?

- 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

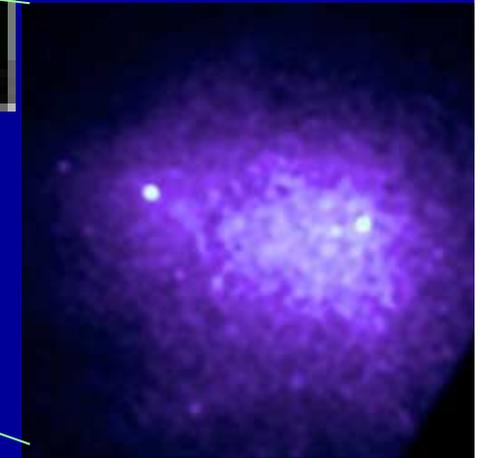
# Un amas célèbre : Coma (la chevelure de Bérénice)



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

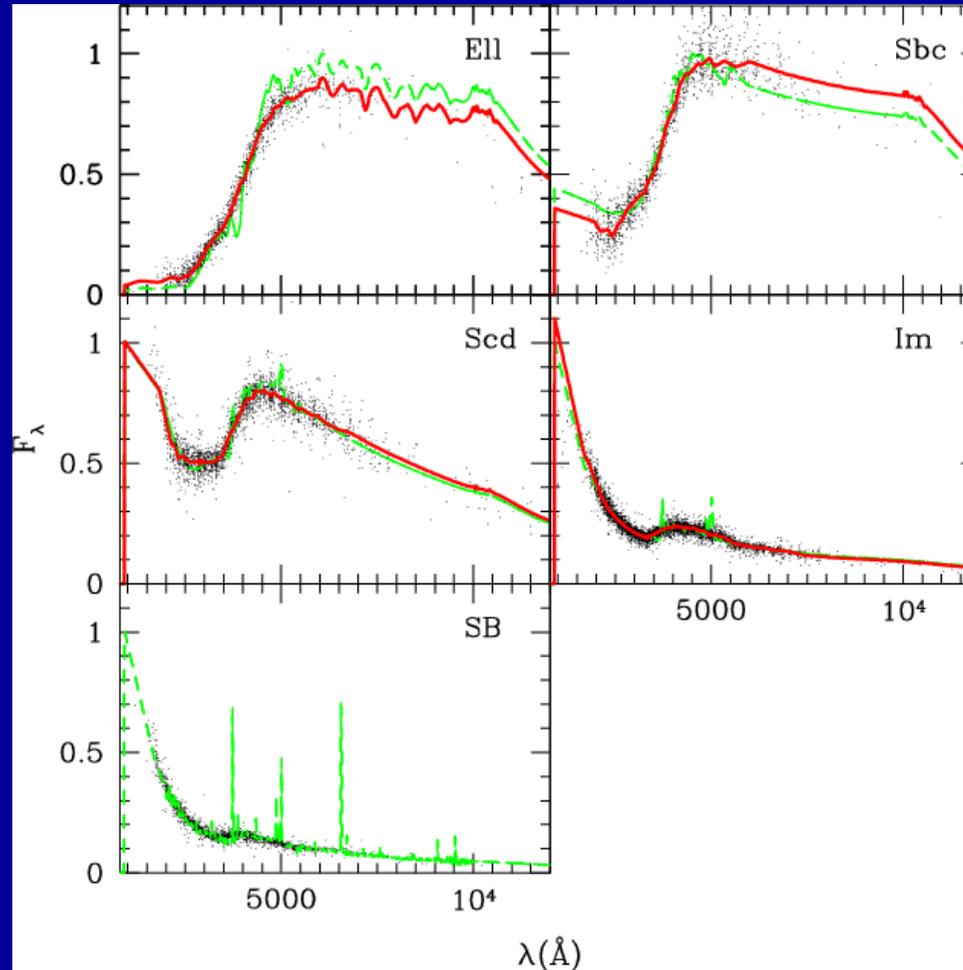
- redshifts spectroscopiques
- dispersion de vitesses des galaxies dans l'amas



**masse totale de l'amas**

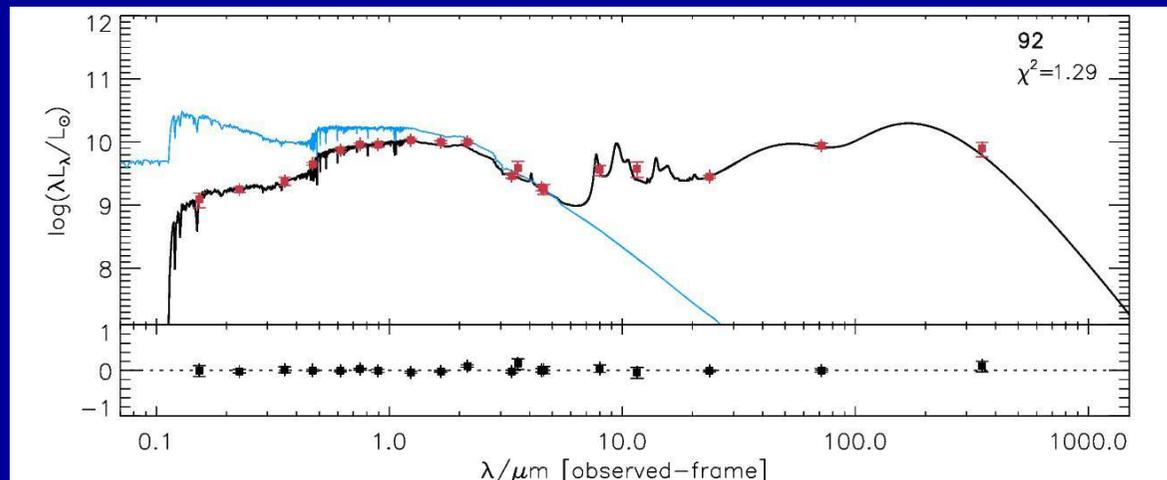
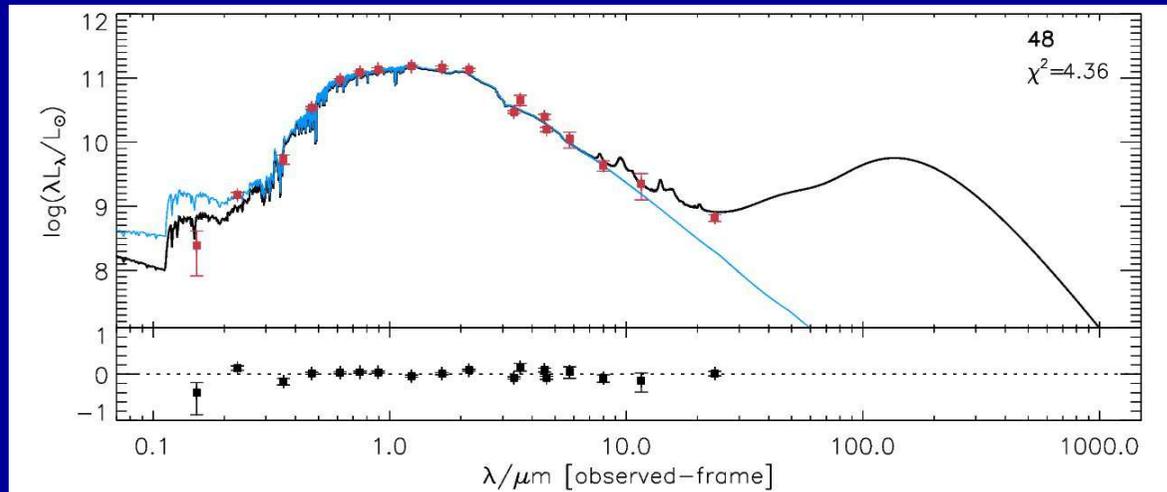
# Masses stellaires calculées à partir des distributions spectrales d'énergie

# Redshifts photométriques



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

# Distribution spectrale d'énergie

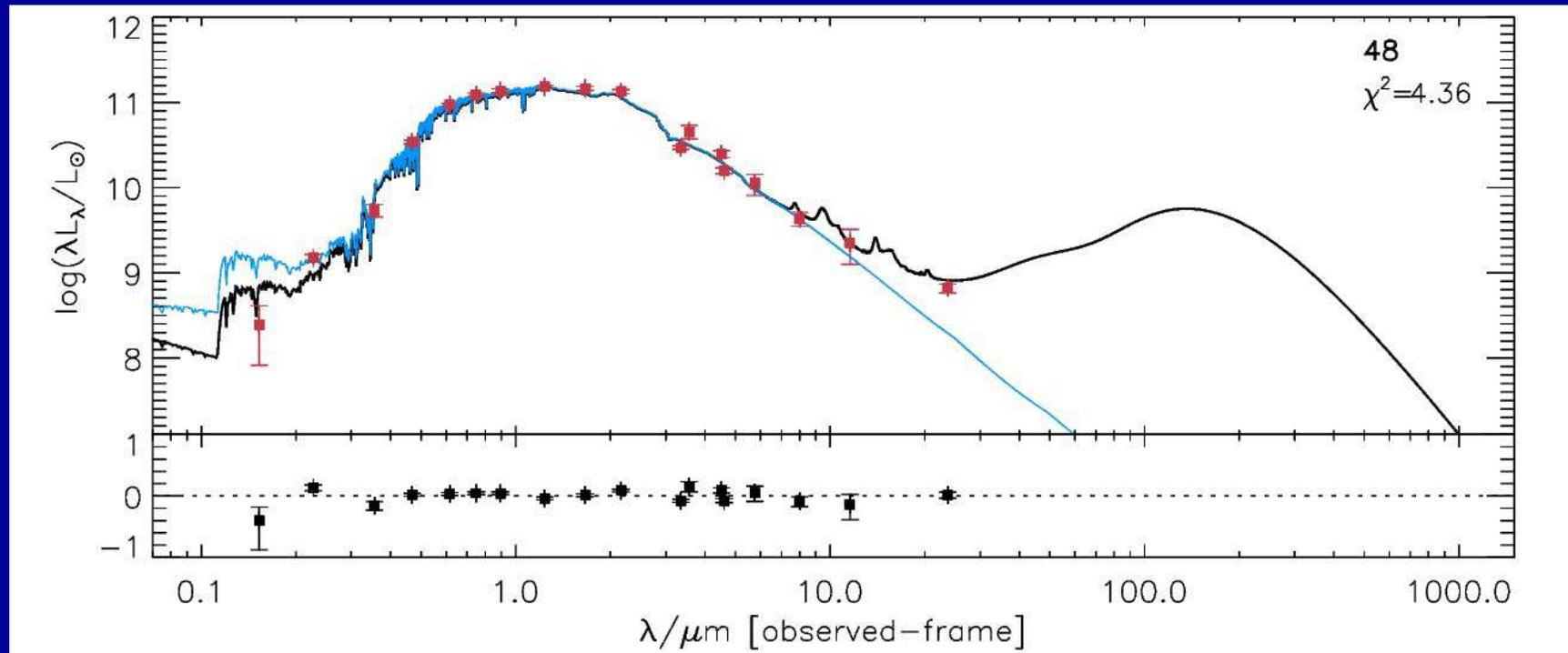


En rouge : points d'observation

En noir : ajustement de la distribution spectrale d'énergie

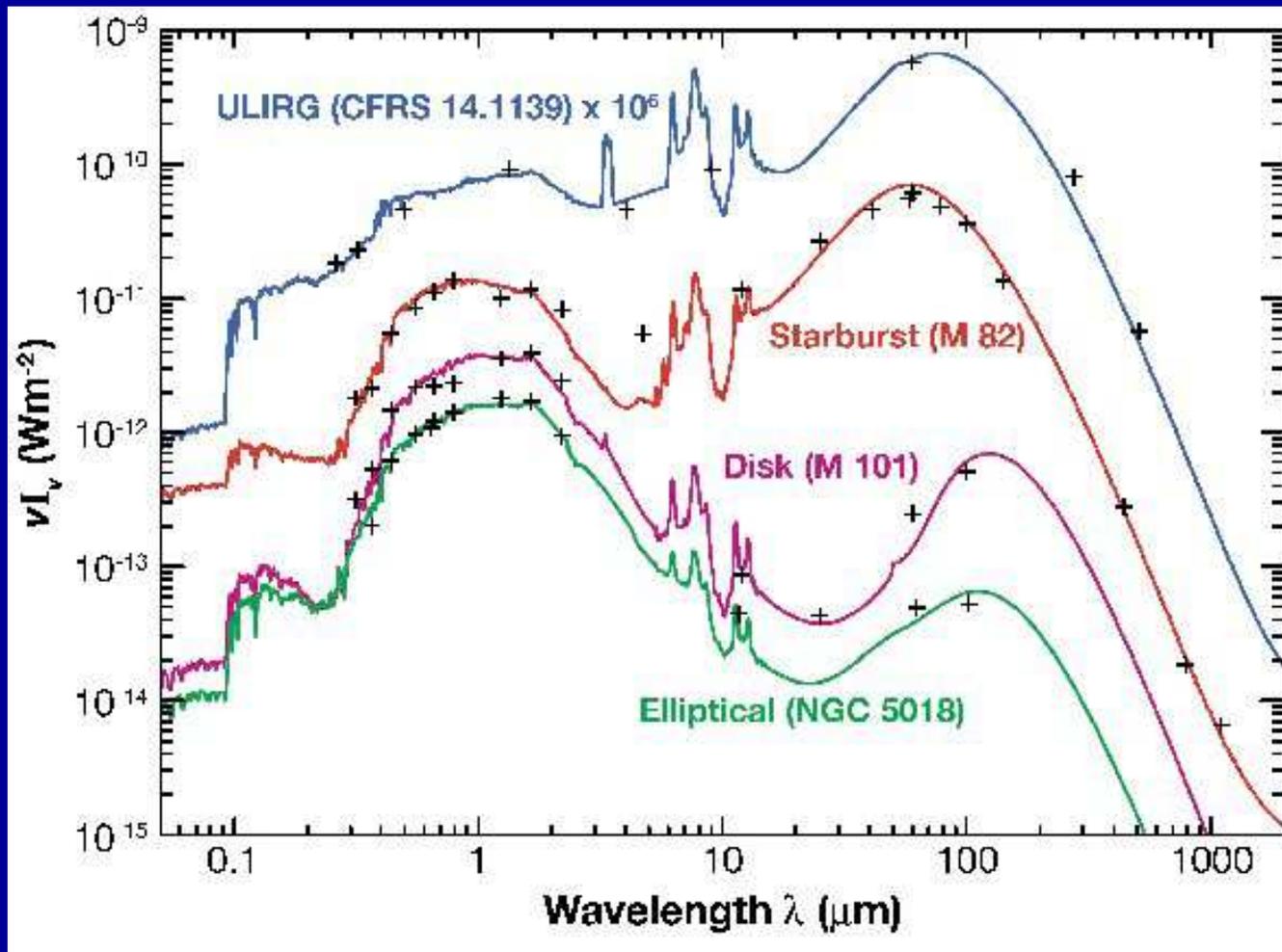
En bleu : spectre s'il n'y avait pas de poussière

# 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

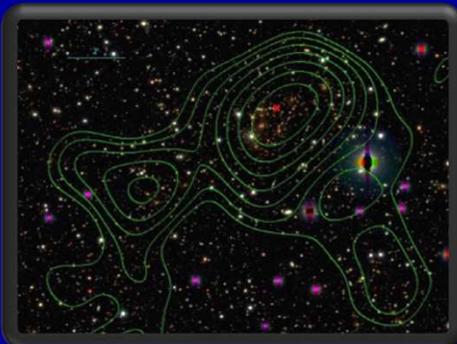
~ 90 amas

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

Effet de lentille faible



Effet de lentille fort

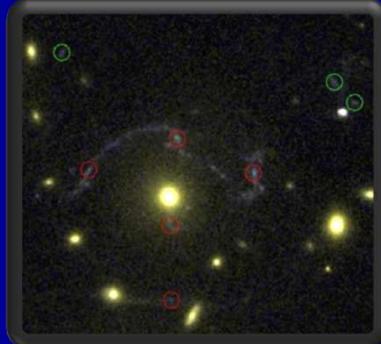
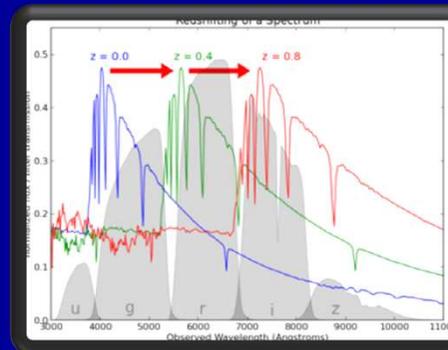
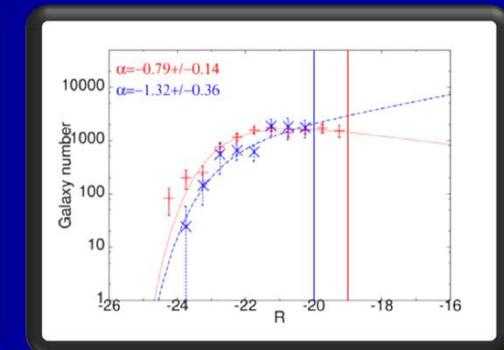


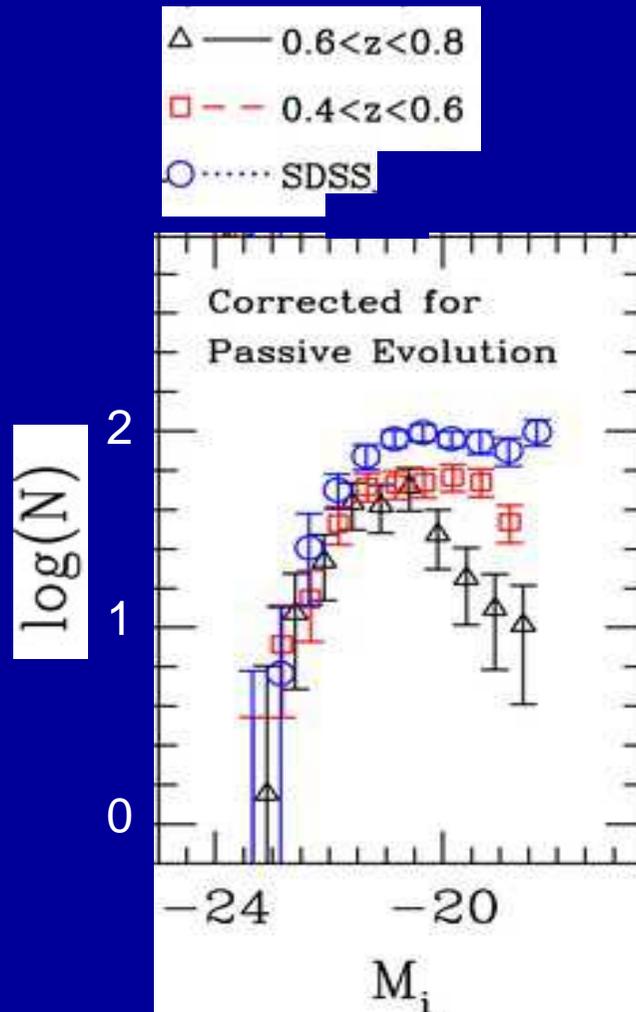
Photo-zs



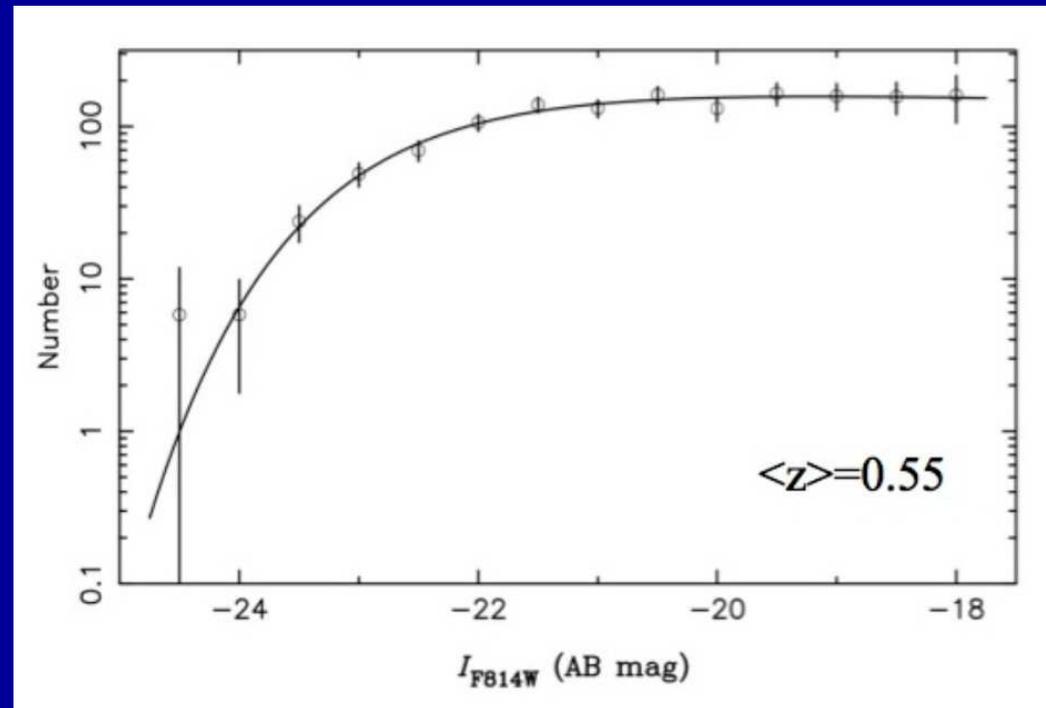
Fonctions de luminosité



# 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**

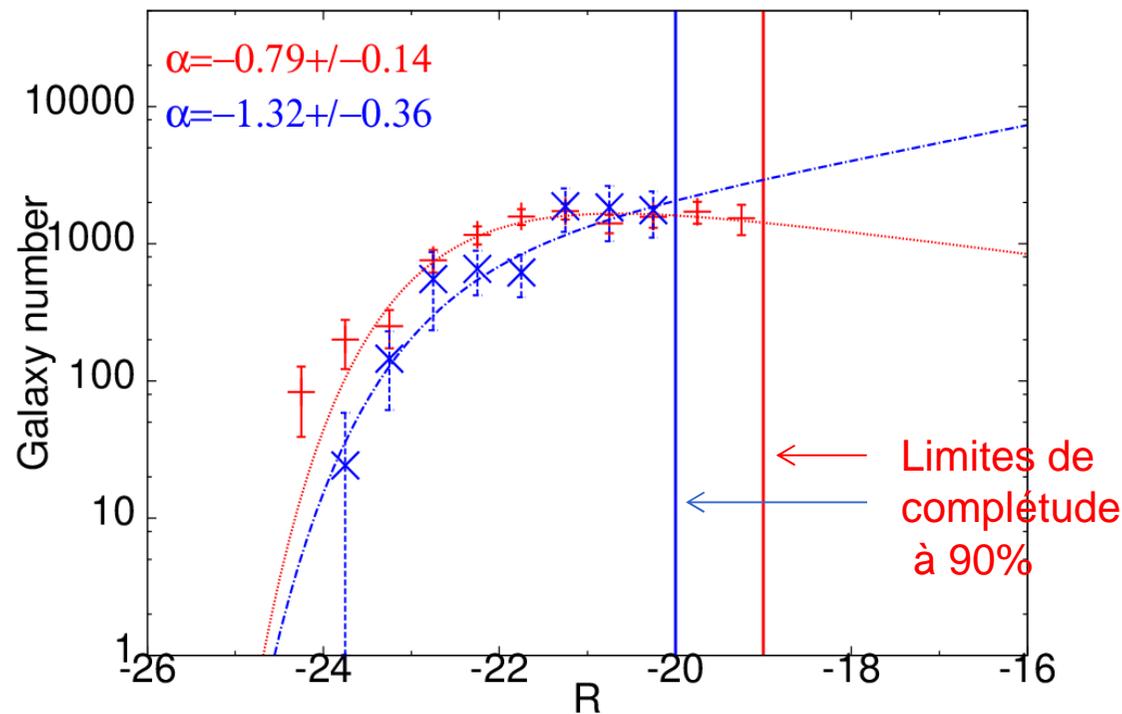


# Somme (« stacking ») d'amas et ajustement par une fonction de Schechter

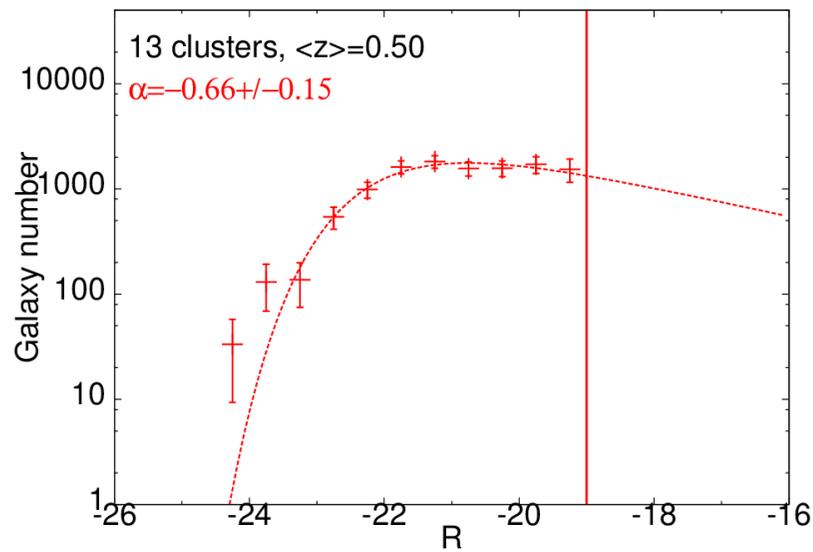
$$N(M) = 0.4 \log(10) \phi^* [10^{0.4(M^* - M)}]^{\alpha+1} \exp(-10^{0.4(M^* - M)})$$

Galaxies rouges

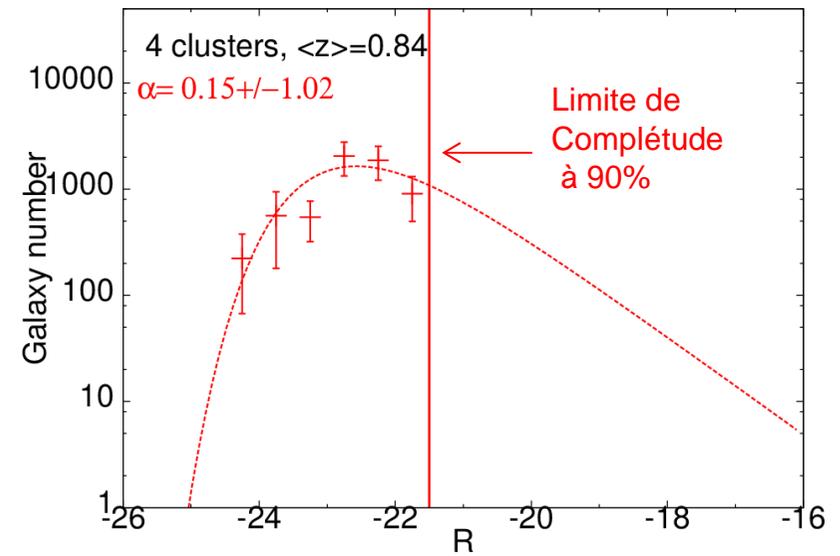
Galaxies bleues



# Variation avec le décalage spectral



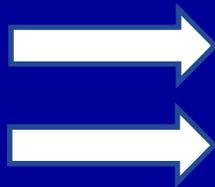
$0.40 < z < 0.65$



$0.65 < z < 0.90$

# 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

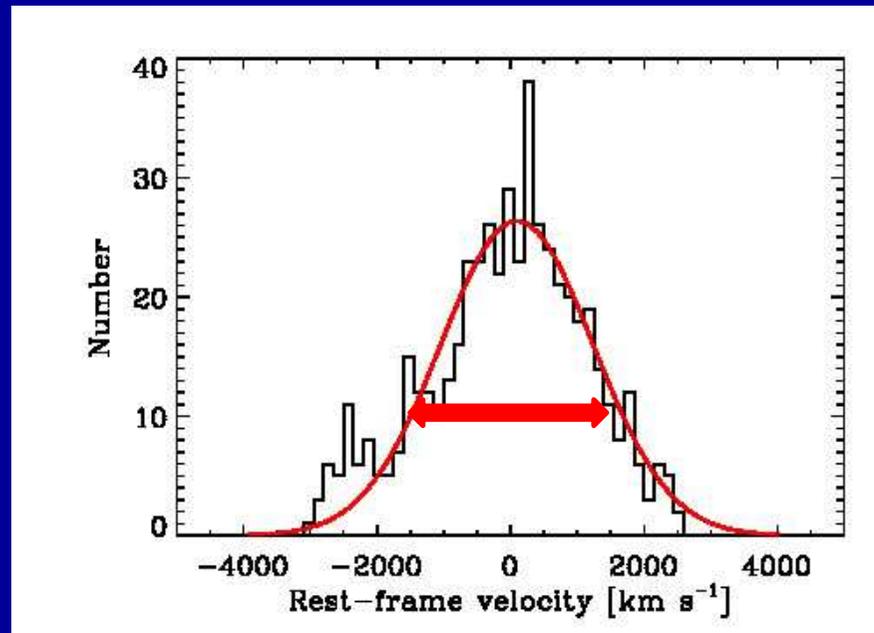
**Masse stellaire ~ quelques  $10^{12}$  -  $10^{13} M_0$**

# 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  $\sigma_v$

# 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

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

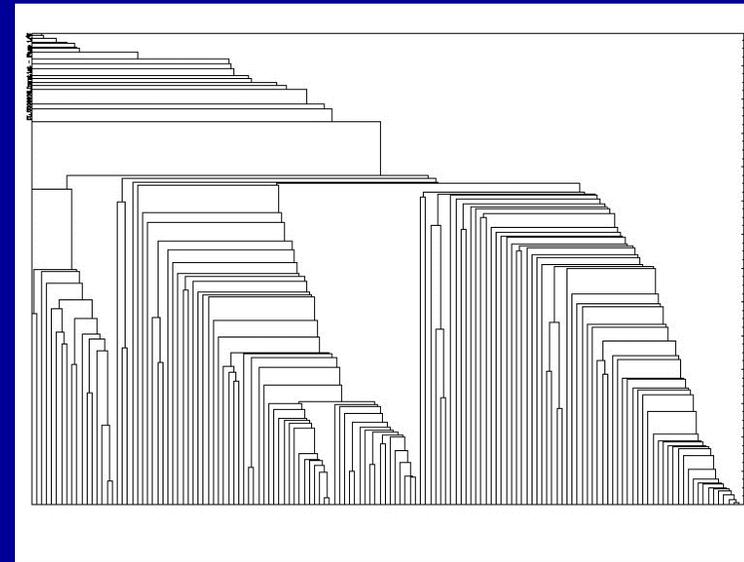
Zwicky (1937) a le premier trouvé que

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

# 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

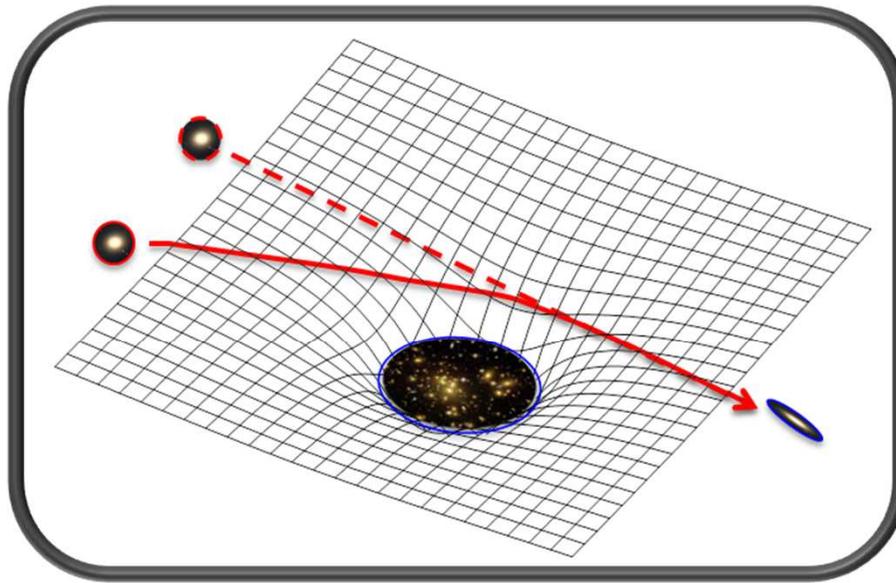


- Calcul de l'énergie potentielle de liaison entre des paires de galaxies et détection de sous-structures
- En supposant une valeur pour  $M/L$  on obtient la masse totale de chaque structure, donc la masse totale de l'amas

# Les limites de la méthode SG

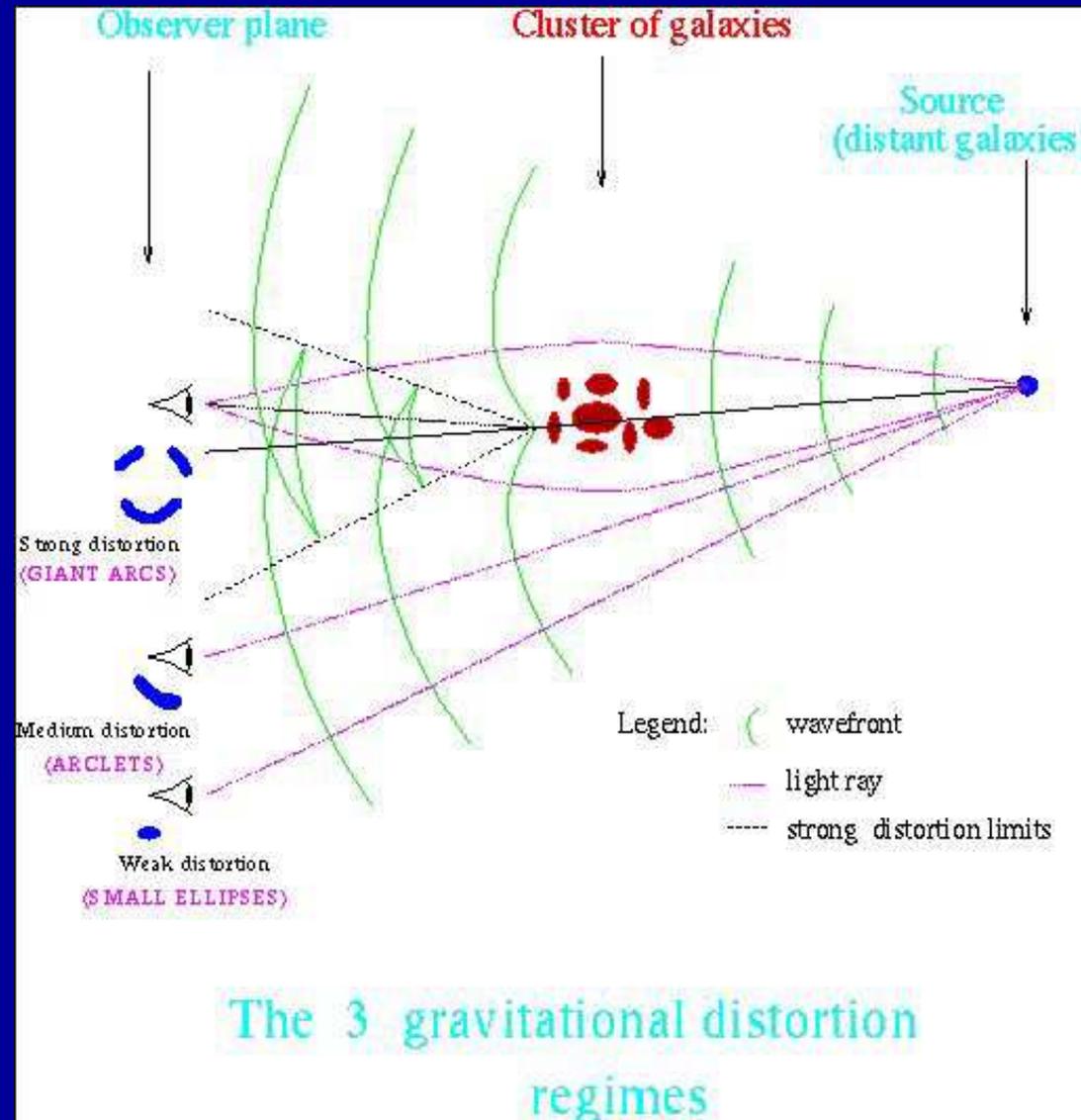
- La masse totale de l'amas n'est pas mesurée avec précision (incomplétude de l'échantillon de redshifts, rapport M/L...)
- Mais les rapports de masse entre structures sont bien connus (à 10-20% près)

# Masse des amas déduite de l'effet de lentille gravitationnelle



Effet fort

Effet faible



# Abell 2218 et ses arcs

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

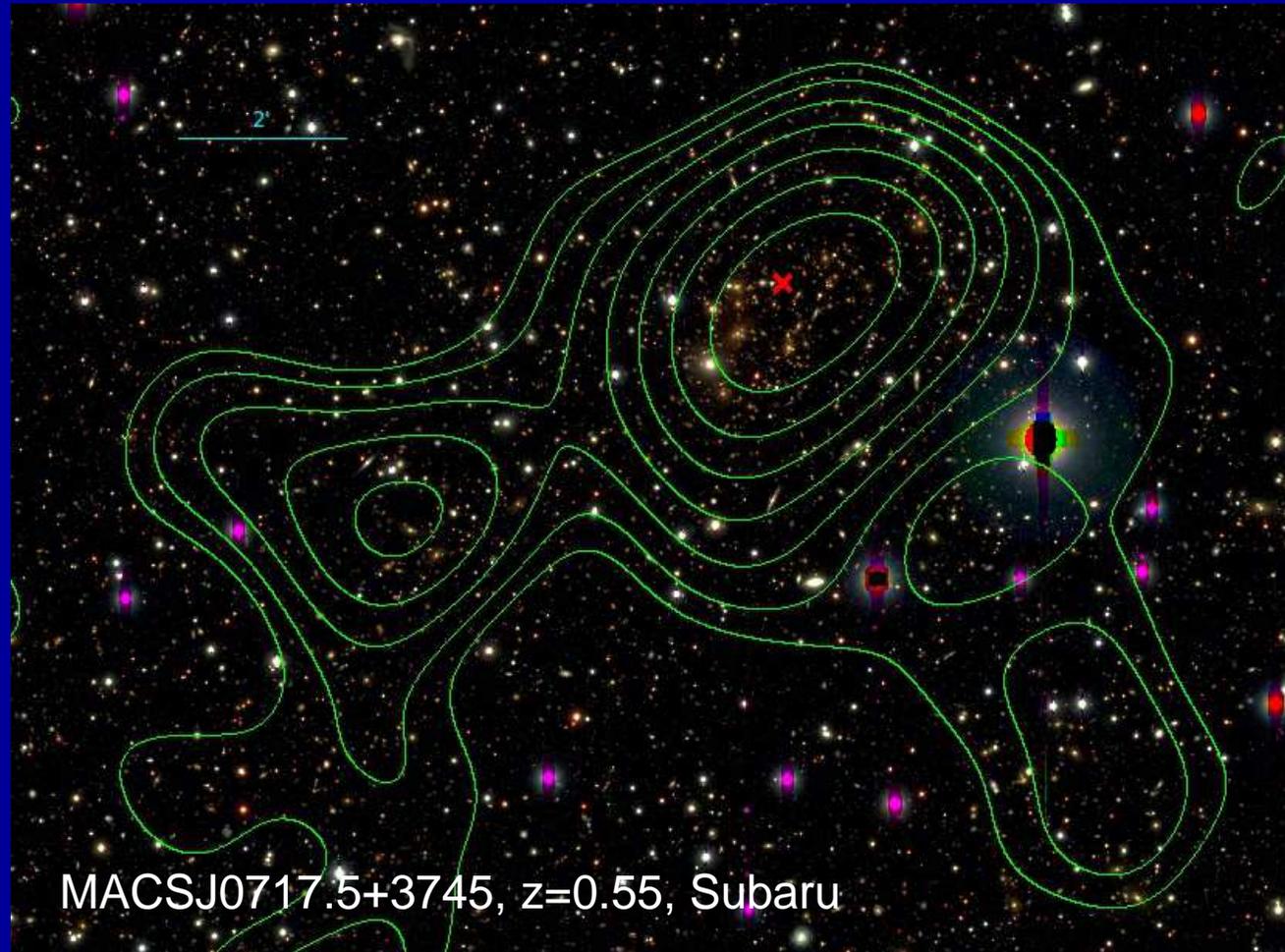


W. Couch (UNSW), NASA, HST 04/1995

# 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



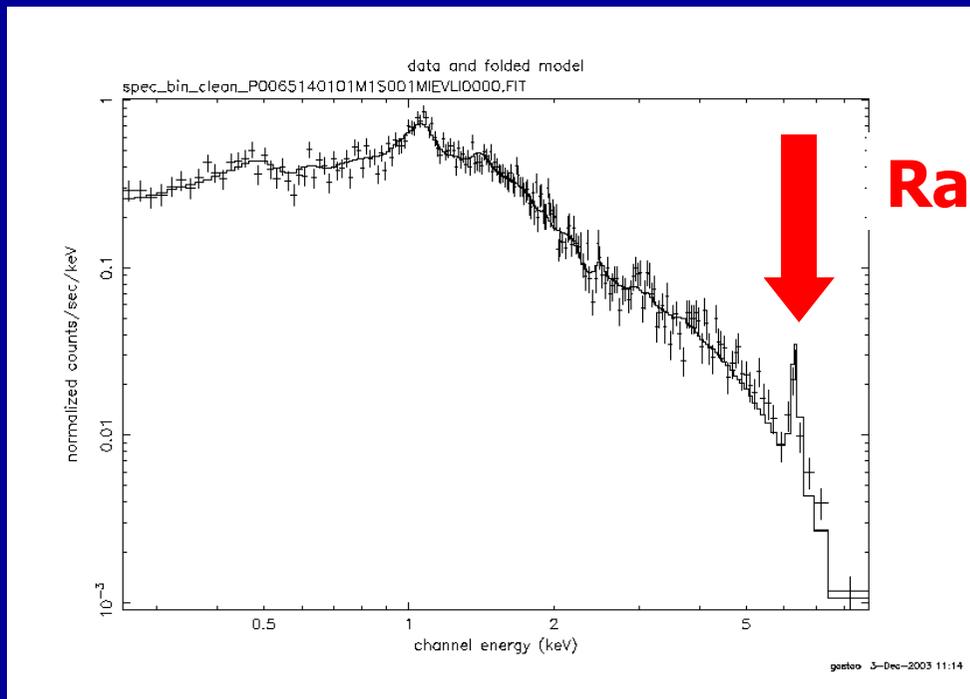
Abell 2142 ( $z=0.09$ )  
NASA/CXC/SAO



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  $\nu$  :

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

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*

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

**$M_{\text{gaz}} \sim$  quelques  $10^{13}$  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  $M_{\text{dyn}}$

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

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

$$PV = NkT$$

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

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

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

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

Équation d'Euler:

$\Phi$  = potentiel gravitationnel

$P$  = pression,  $\rho$ =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:

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

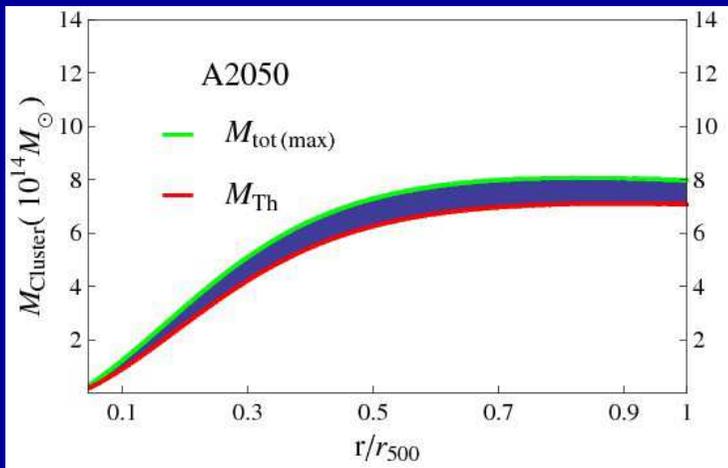
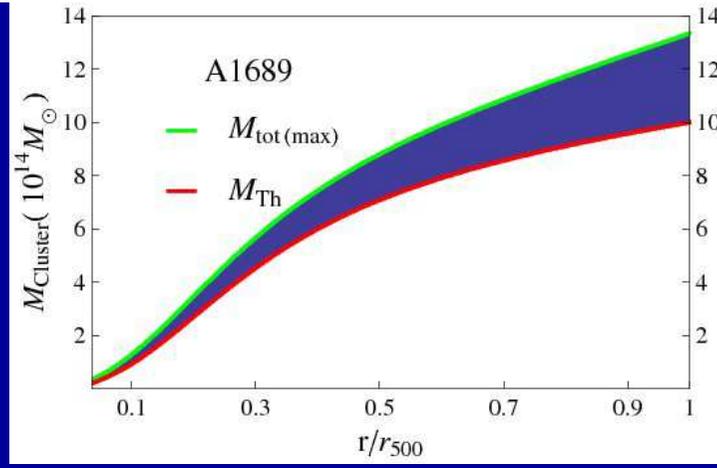
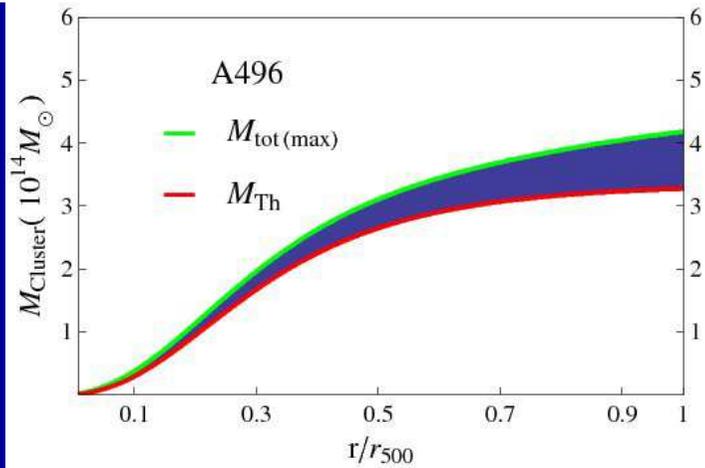


Terme de pression  
non thermique

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

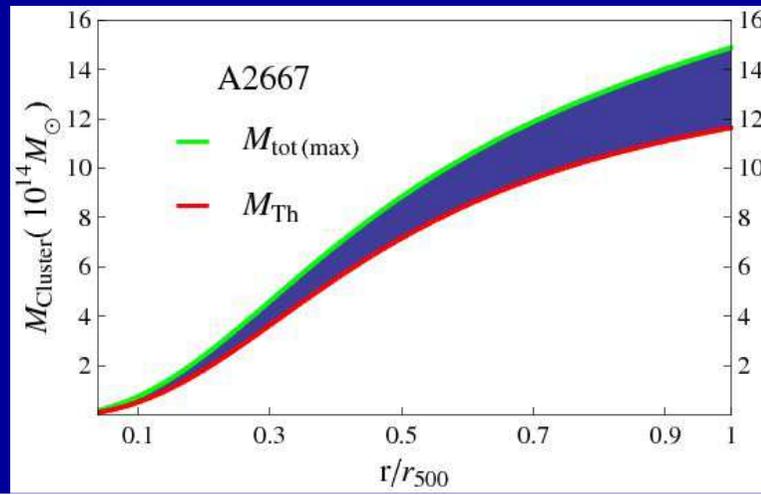
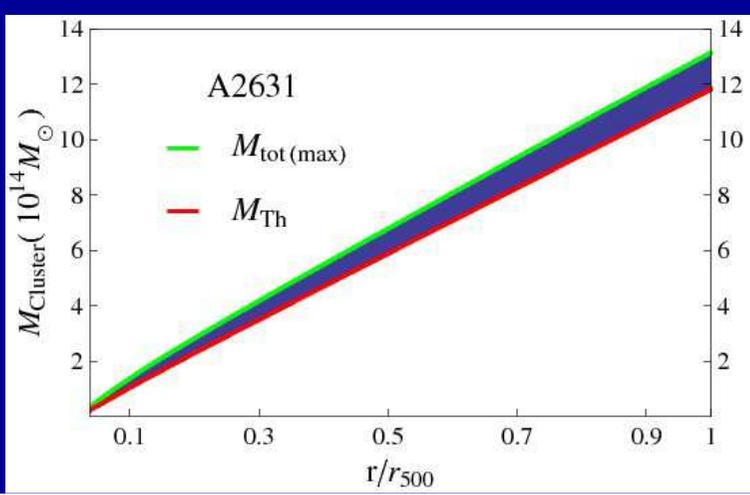
- Masse totale  $M_{\text{dyn}}$  s'obtient par intégration sur  $r$

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



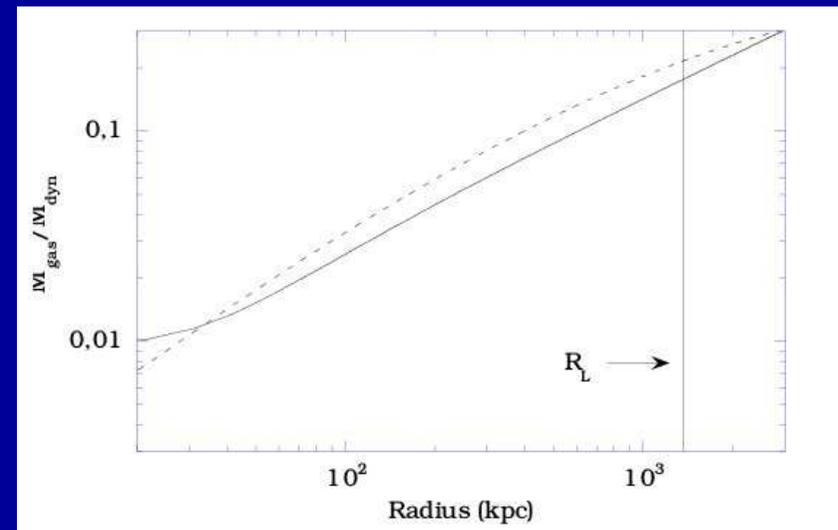
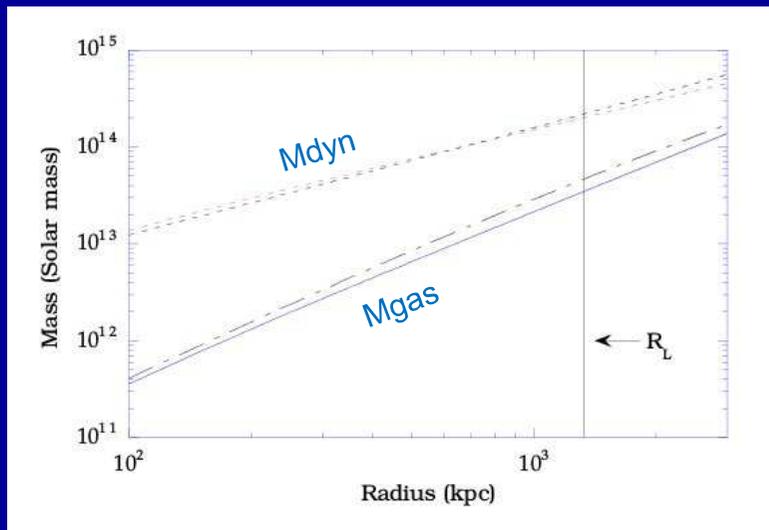
Influence de la pression non thermique (rayons cosmiques, champs magnétiques et turbulence du gaz émetteur X) : *non négligeable !*

Laganá et al. 2010, A&A 510, 76



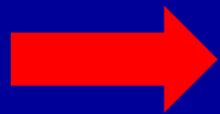
# Les profils des distributions de gaz X et de matière noire sont différents

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



# Résultats

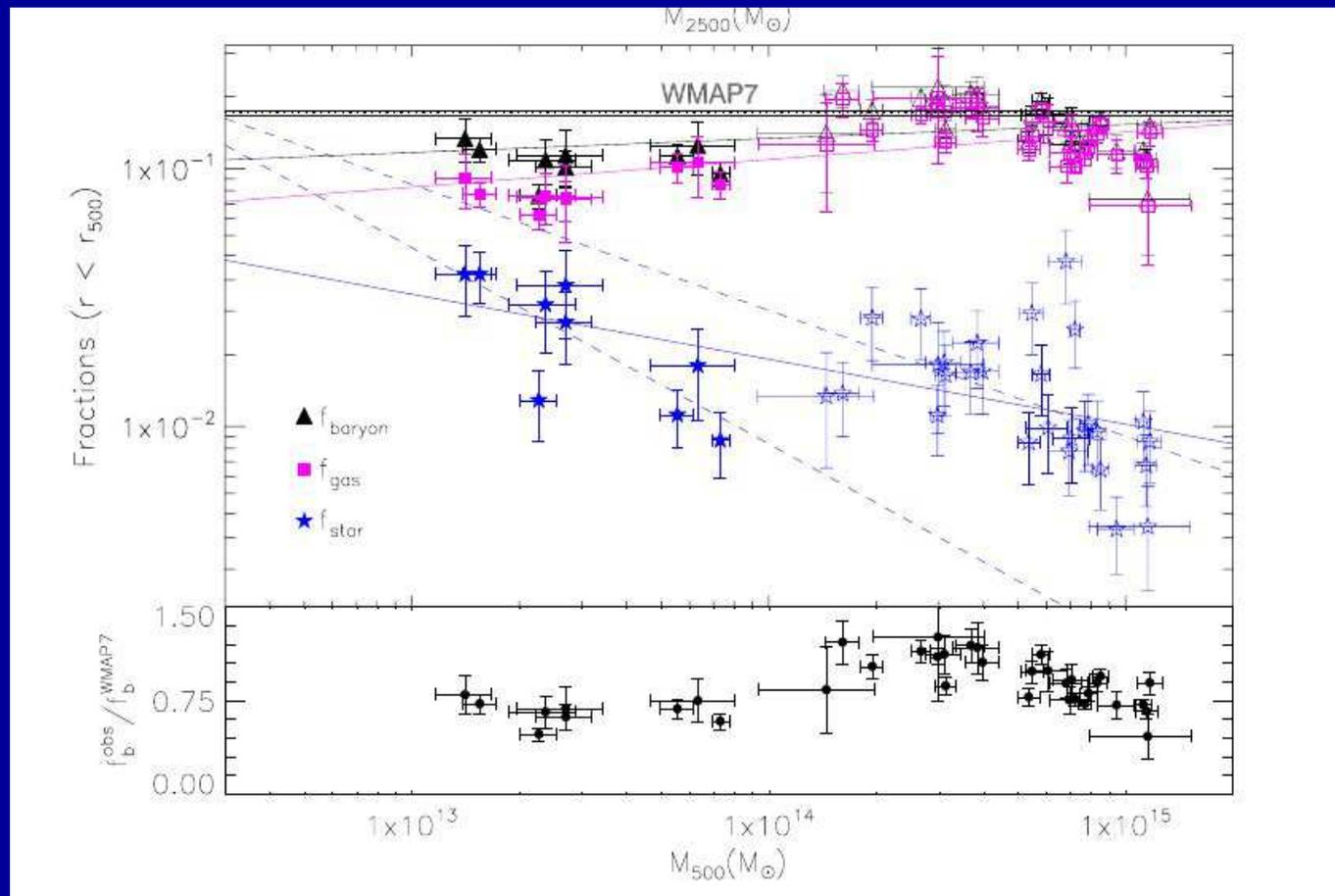
La masse de gaz X est seulement environ 15-20% de la masse totale, et la masse des galaxies représente quelques % de la masse de l'amas



**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...

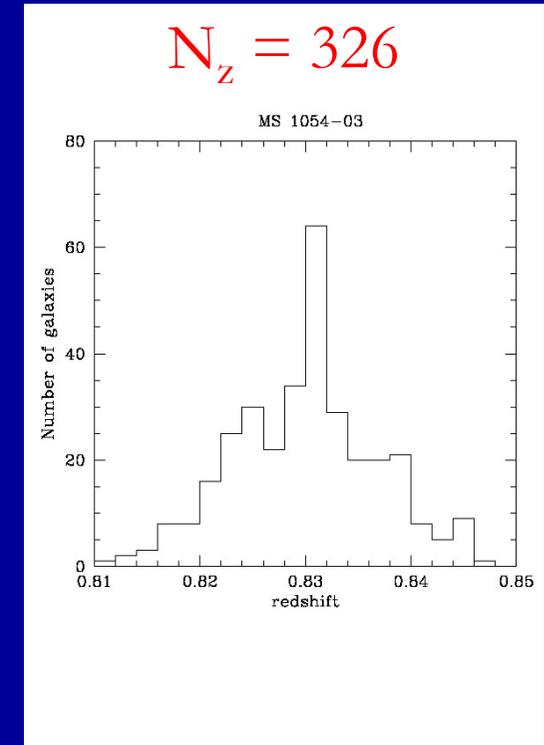
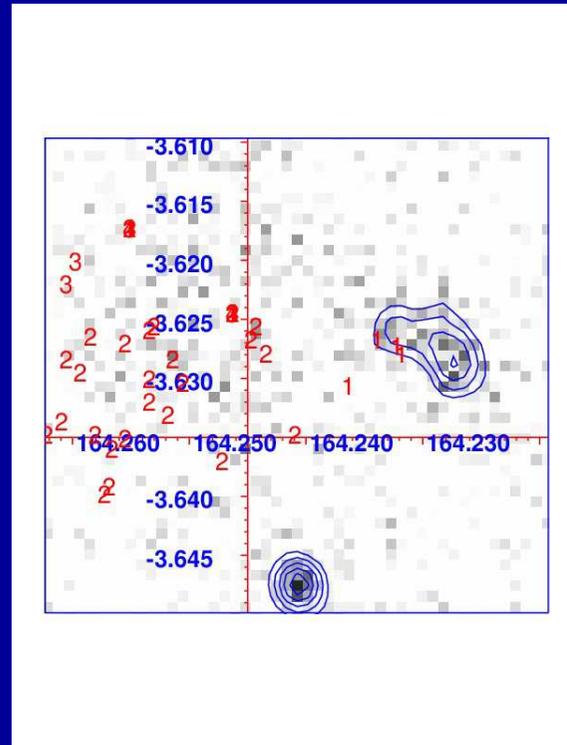
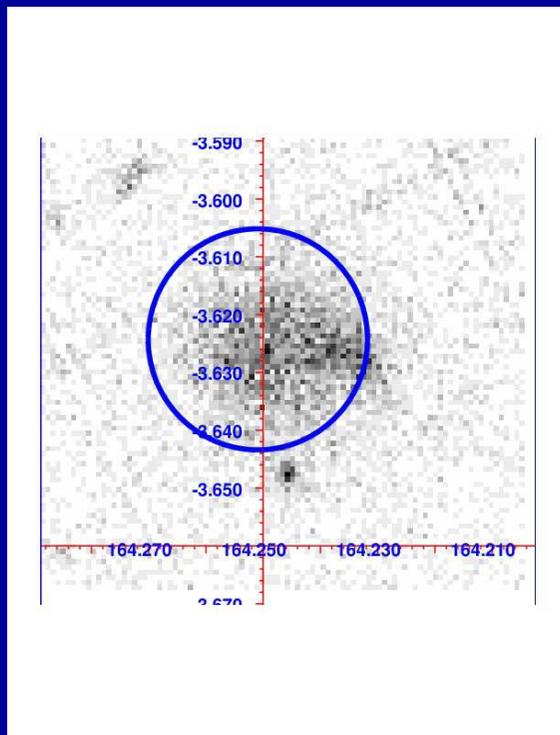
# Masse contenue dans les sous-structures des amas

## 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%**

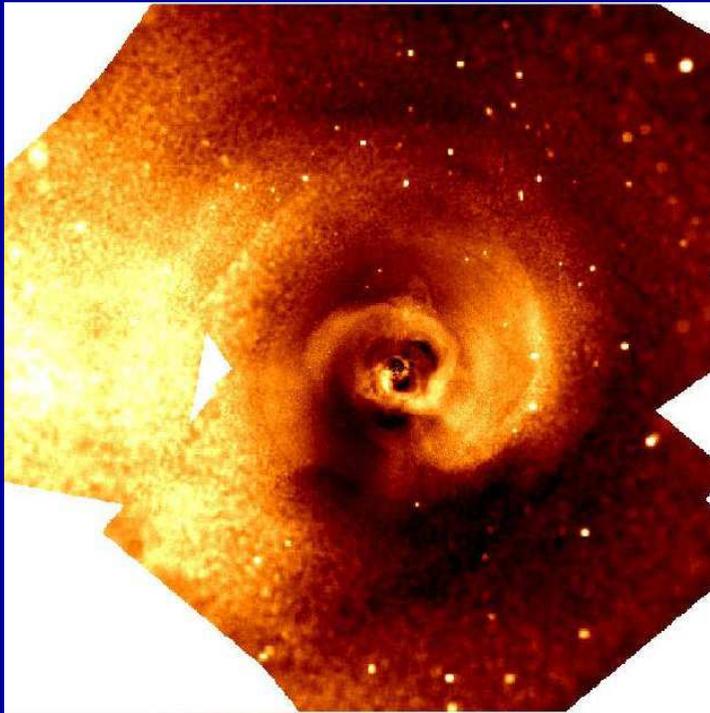
**Donc les amas étudiés se sont formés à  $z > 0.9$**

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



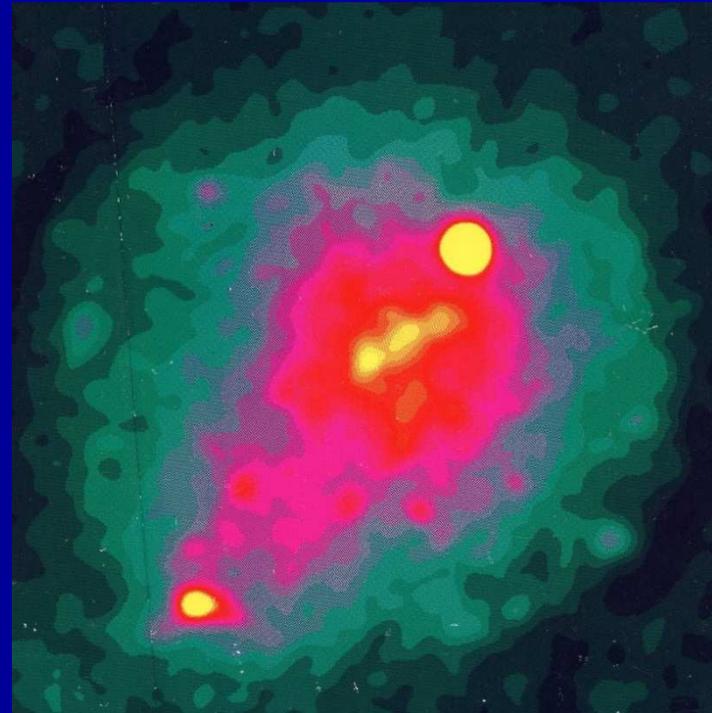
Amas principal + une sous-structure étendue, 1 AGN

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

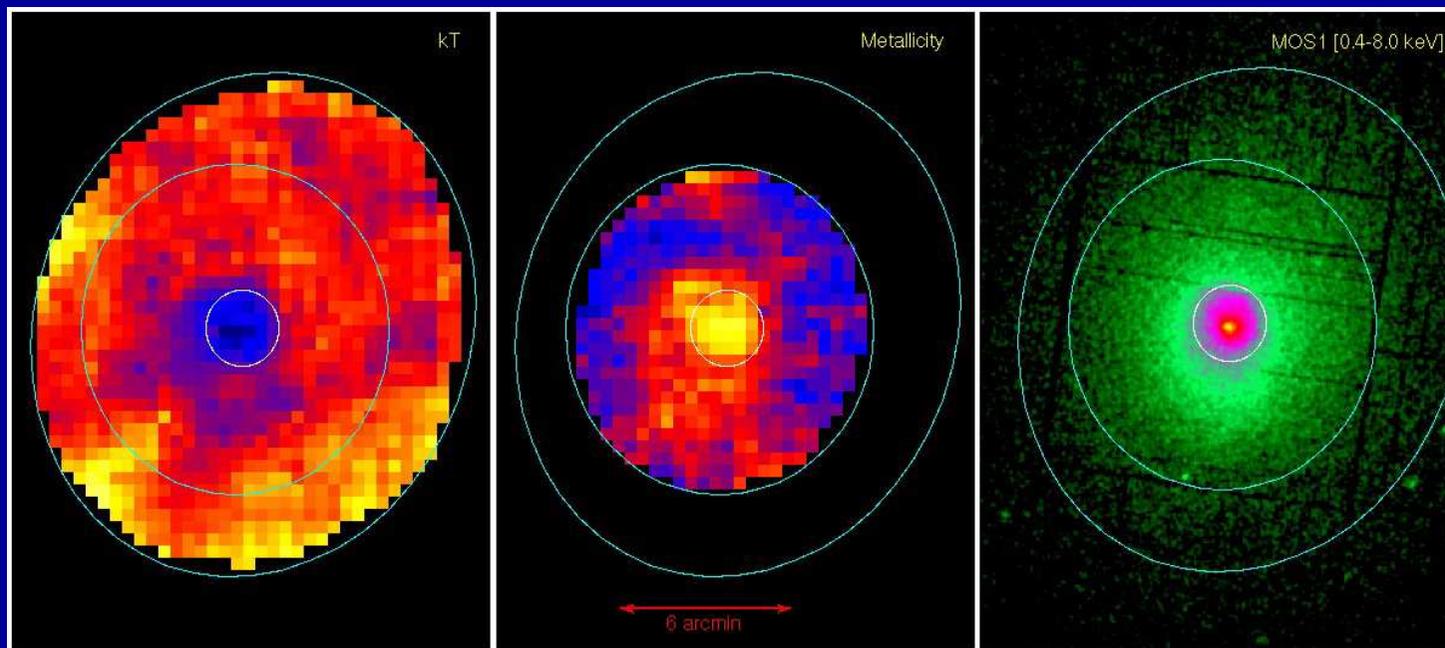


**Abell 1367**

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

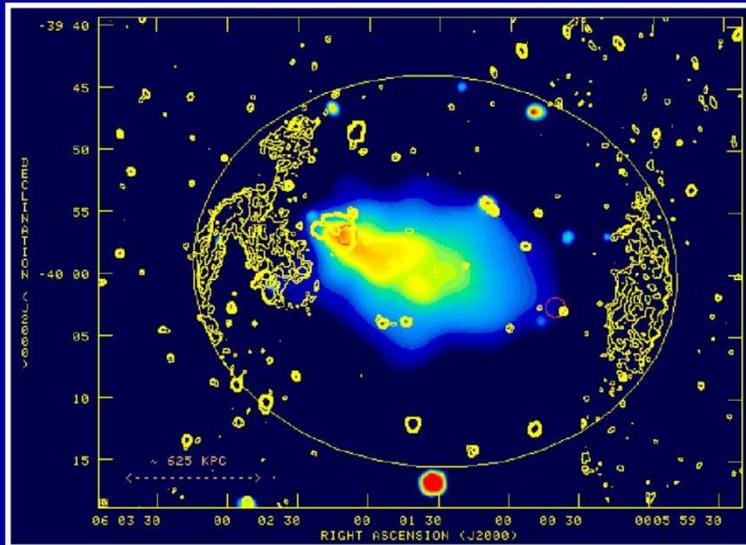


Température

Métallicité

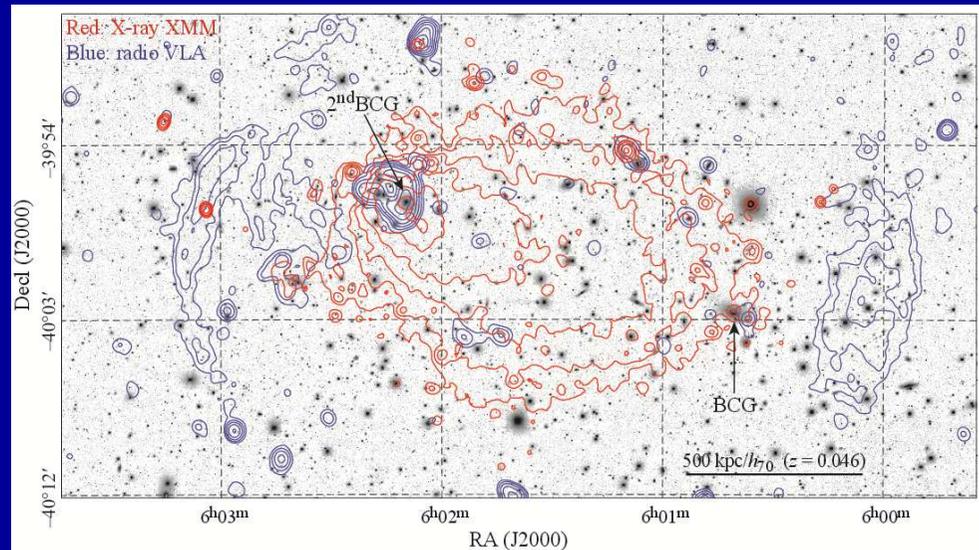
Emissivité

# 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

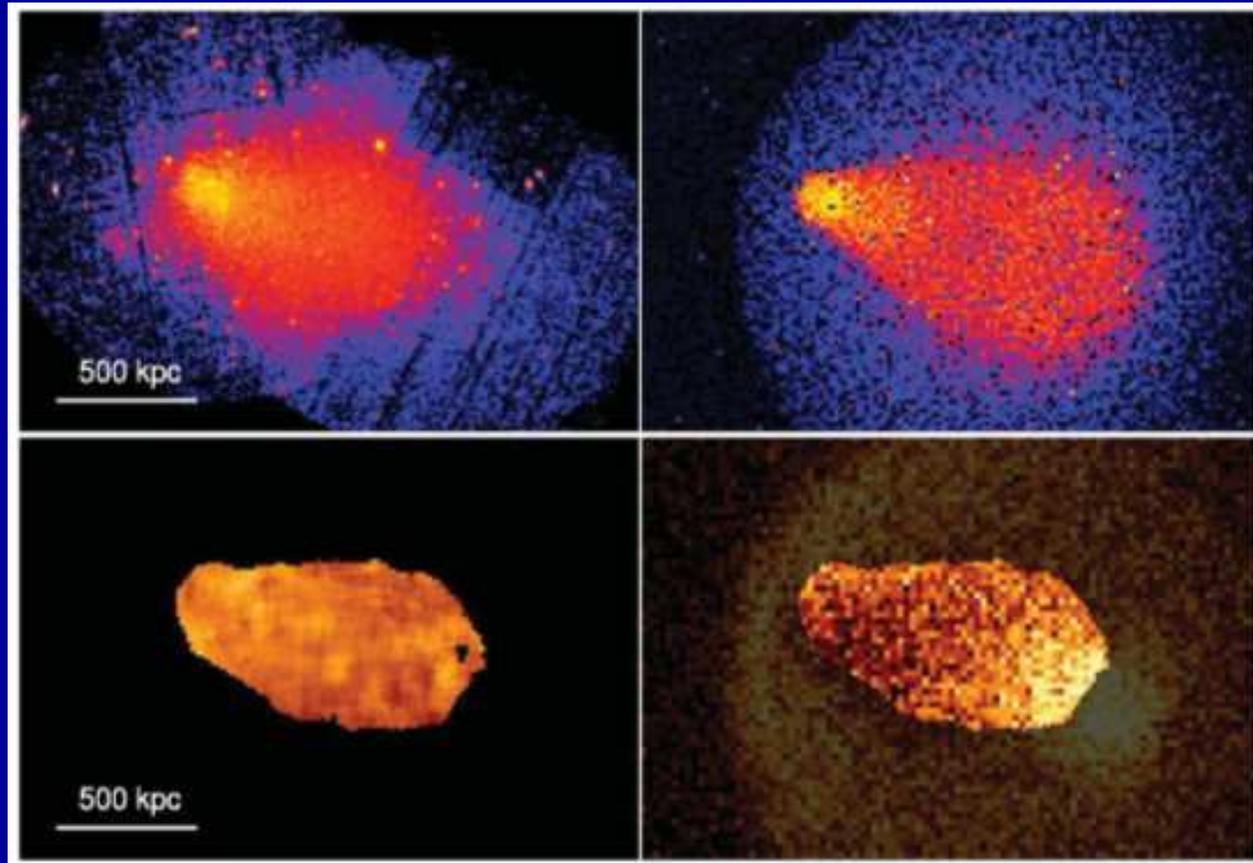
Durret et al. 2013, A&A 560, 78

# Abell 3376 en rayons X

Observations

Simulations numériques

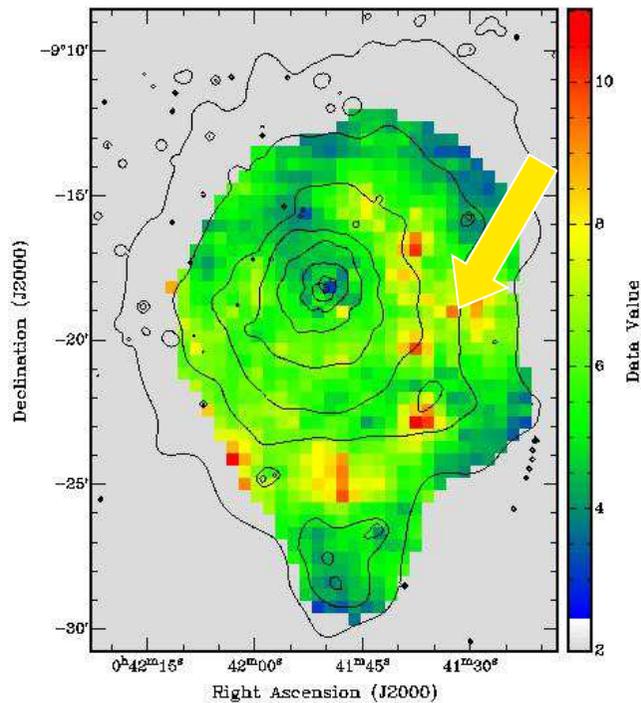
Emissivité



Température

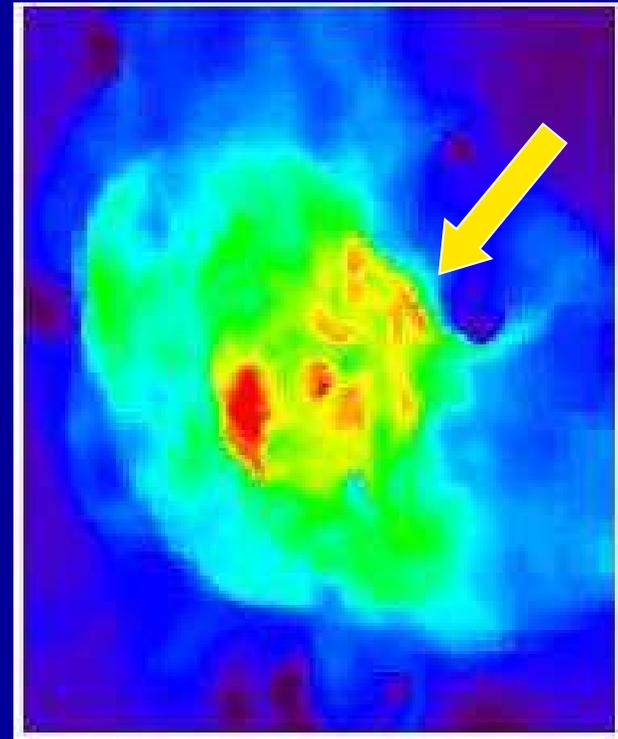
## Carte de température XMM

### Abell 85



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

Carte de température obtenue  
par simulation numérique



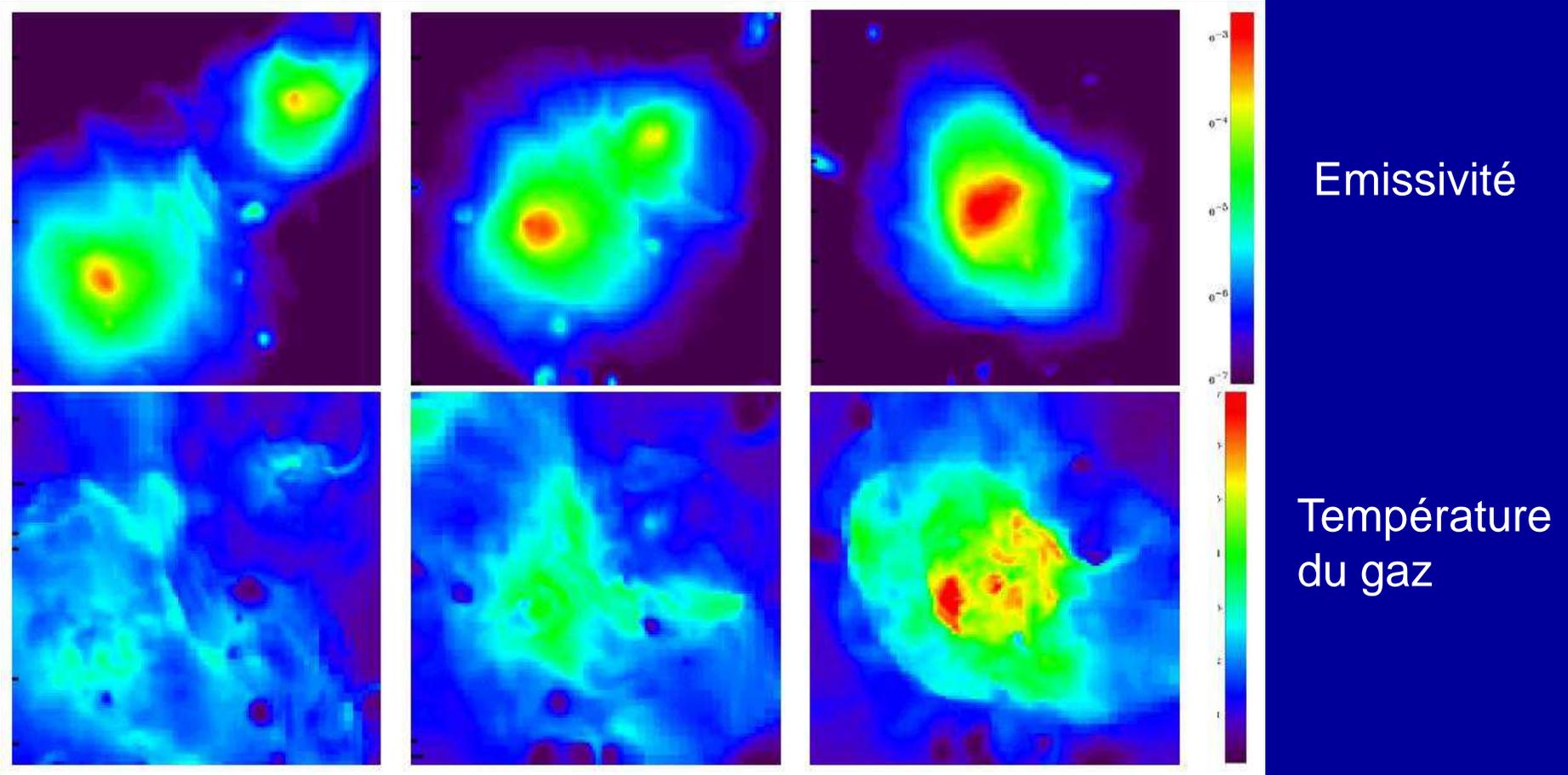
Bourdin, Sauvageot, Slezak,  
Bijaoui, Teyssier 2004,  
A&A 429, 443

# Comparaison avec des simulations numériques

$z=0.13$

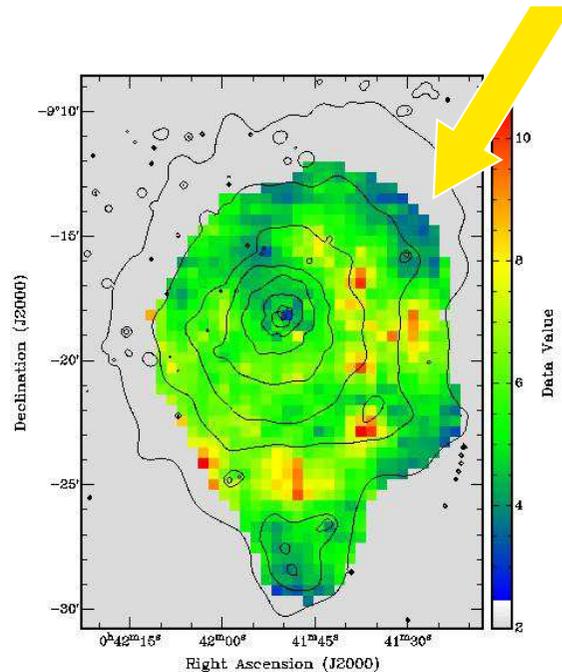
$z=0.09$

$z=0$

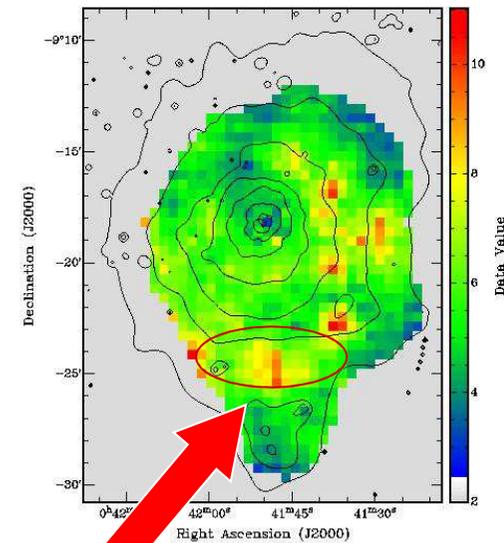


# Un scénario pour Abell 85 : cet amas a subi plusieurs fusions

- 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

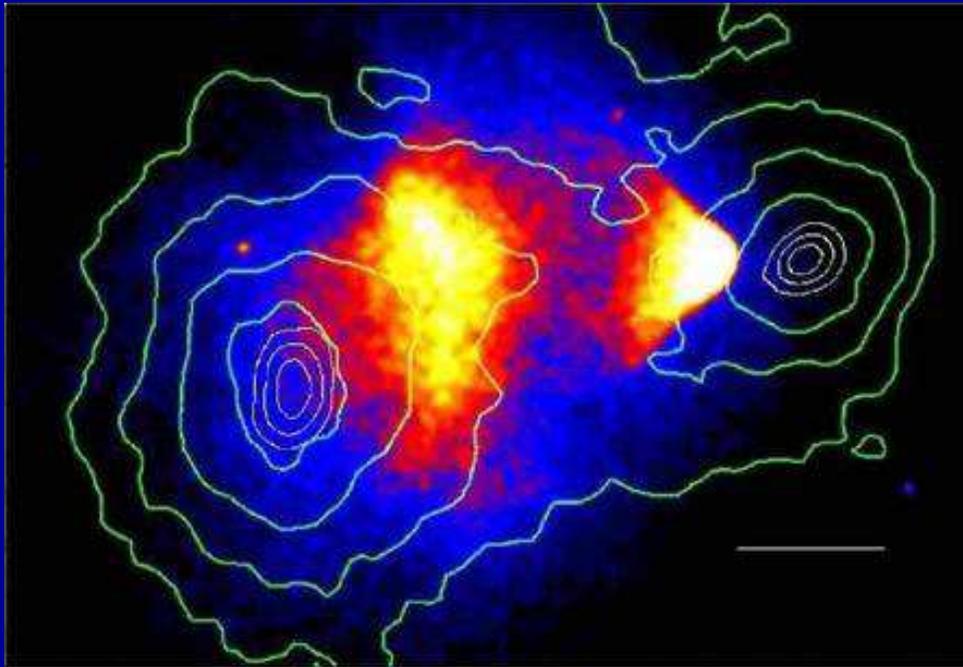


Chute de groupes

# 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

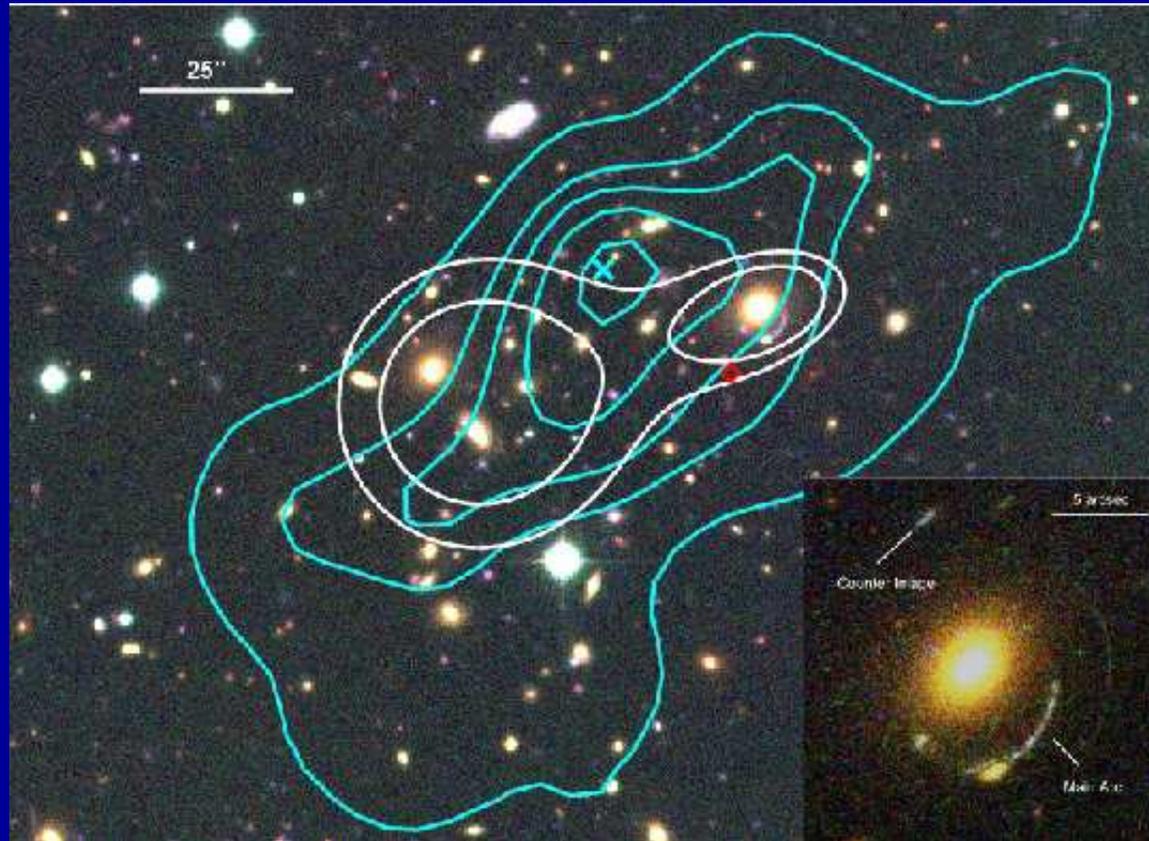
# Un cas d'école : l'amas du boulet



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

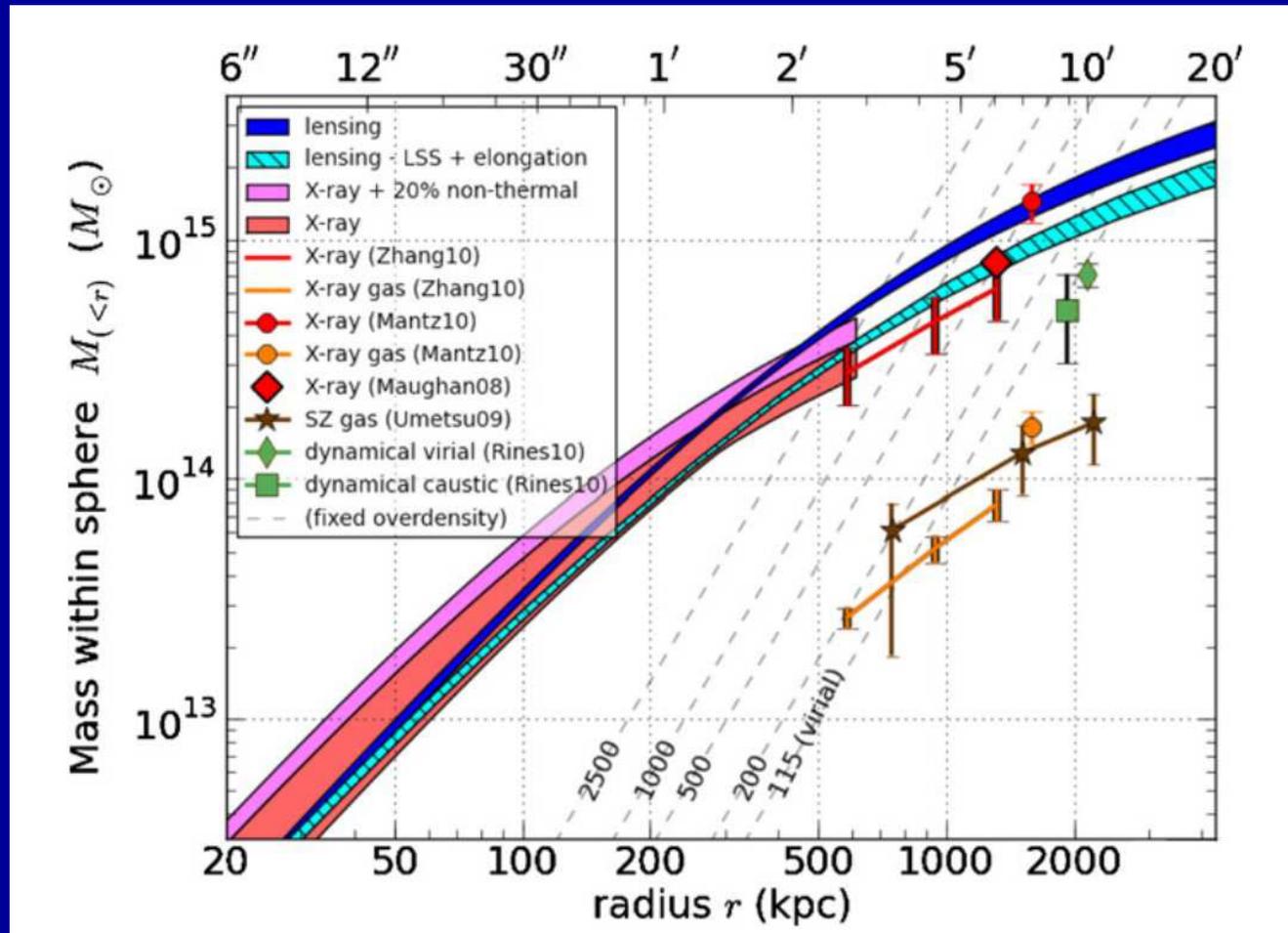
# Le groupe du boulet



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?

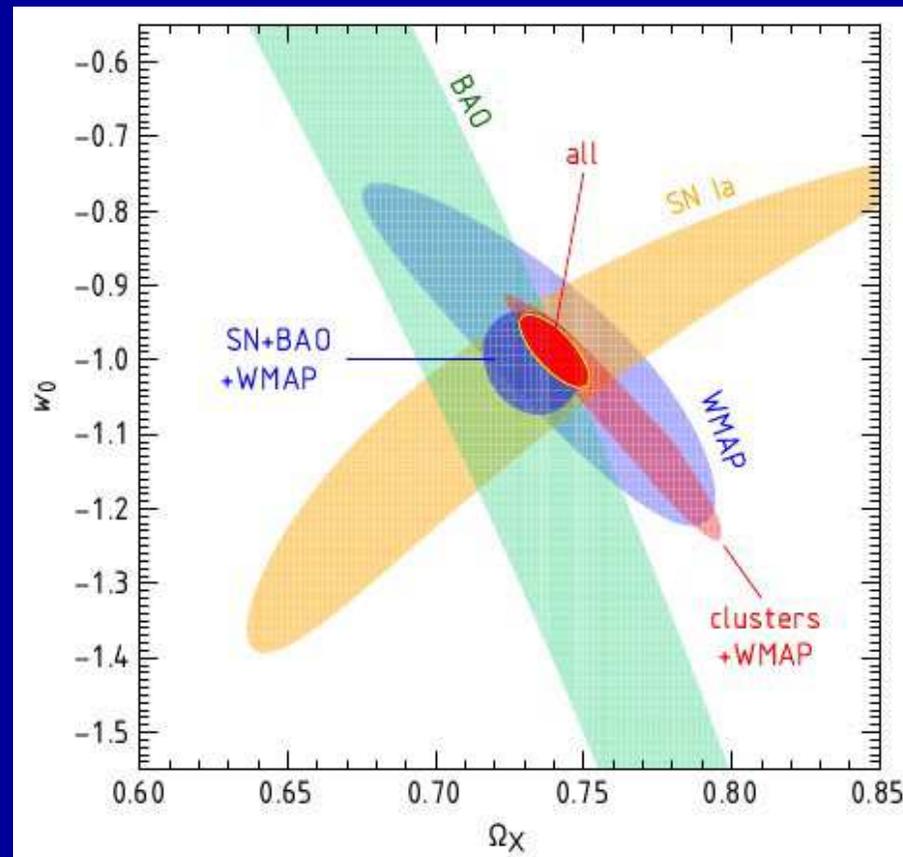
- MOND = MOdified Newtonian Dynamics  
appliqué aux amas ne suffit pas, on a quand même besoin de matière noire

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  $z > 1$

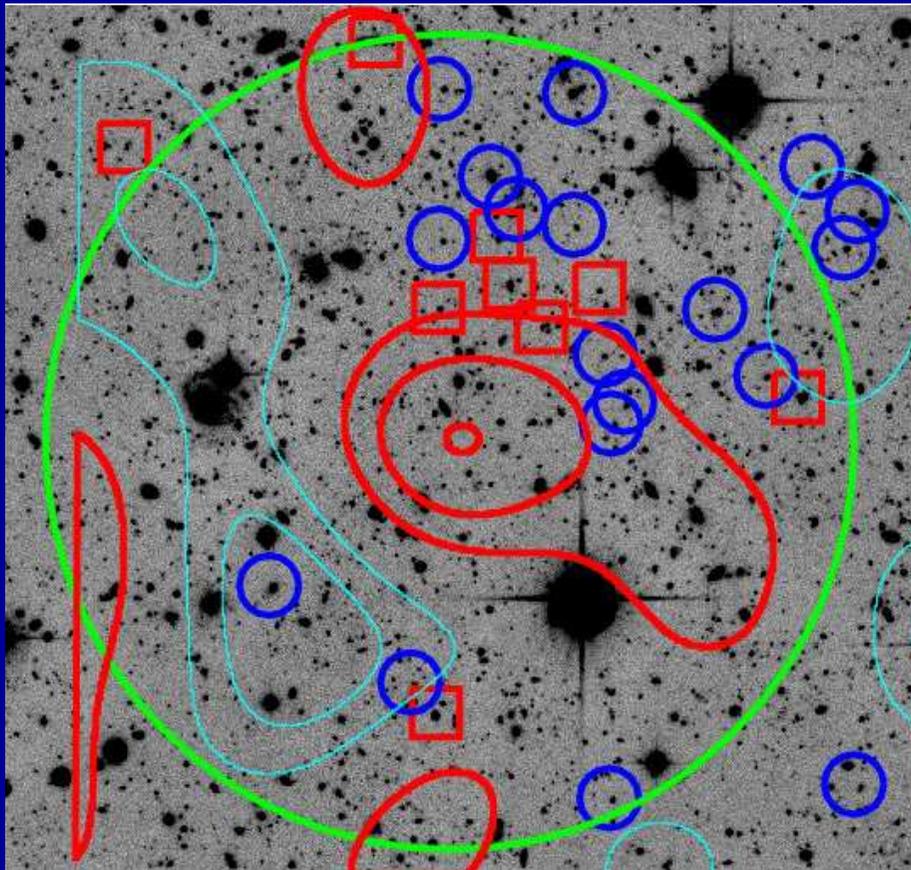
Mazure, Adami Pierre et al. 2007, A&A 467, 49

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  
( $z=0.739$ )

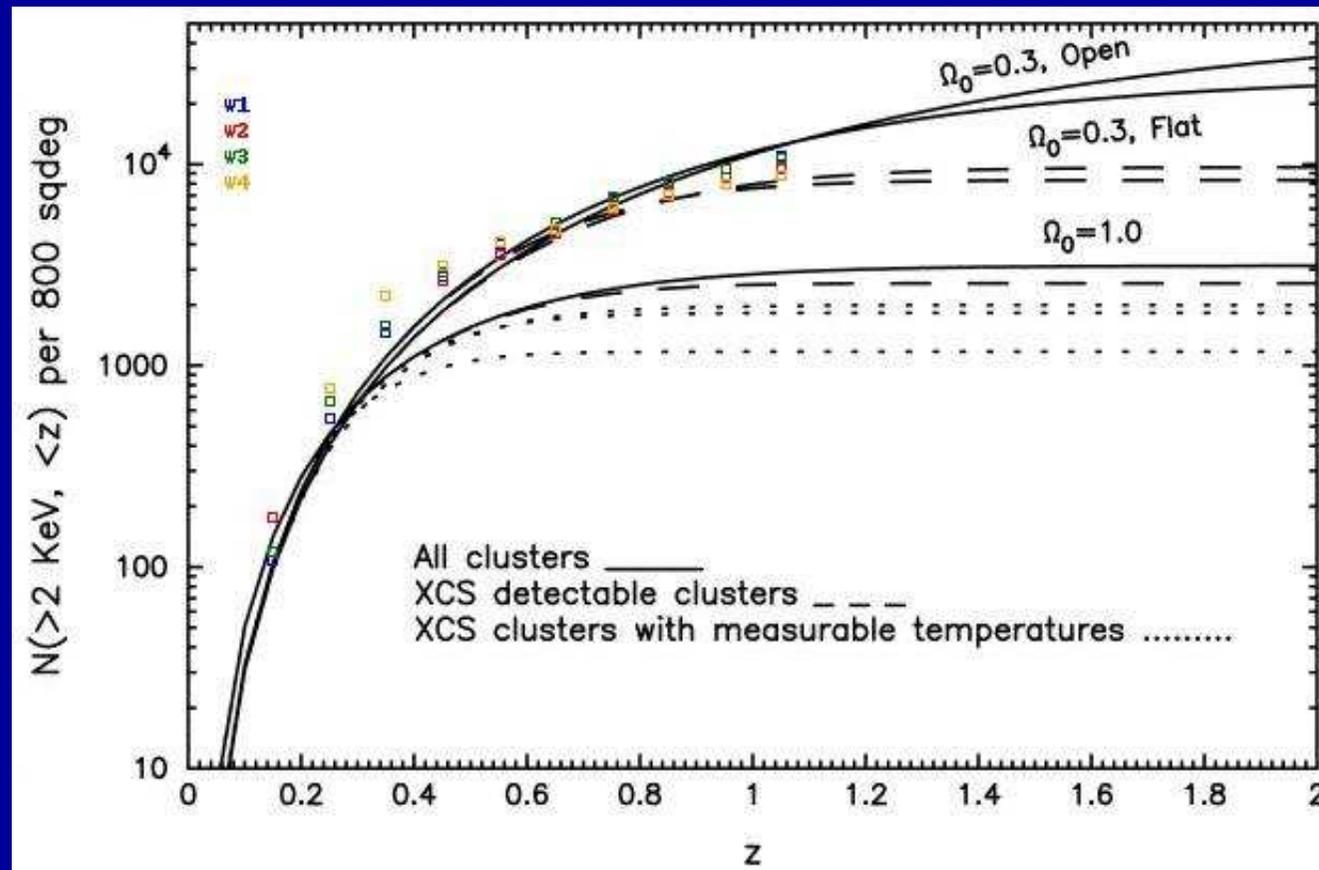
Vert : rayon 1 Mpc

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

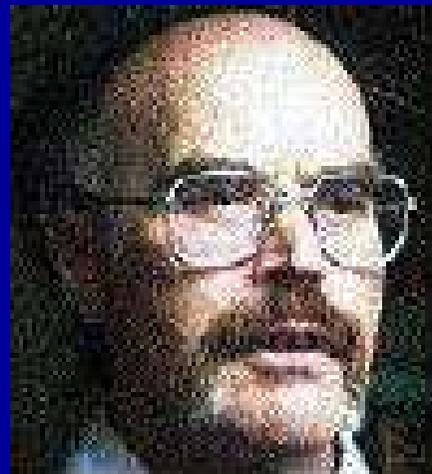
# Quelques conclusions

- 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 Sodr 
- Melville Ulmer
- Marcus Vinicius Costa Duarte

Daniel Gerbal  
(1935 – 2006)



Alain Mazure  
(1947 – 2013)

