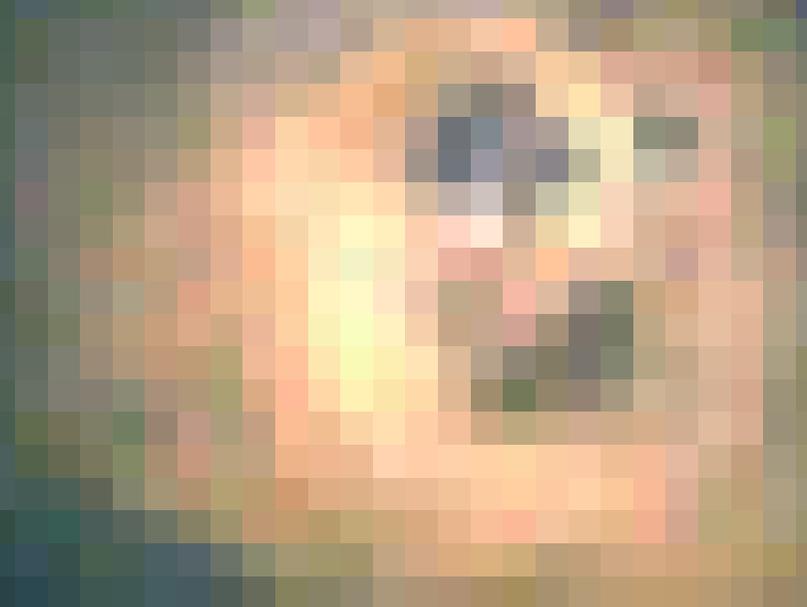


# LES AMAS DE GALAXIES EN LUMIERE VISIBLE ET EN RAYONS X



Florence DURRET  
(Institut d'Astrophysique de Paris  
et Université Pierre et Marie Curie, Paris 6)

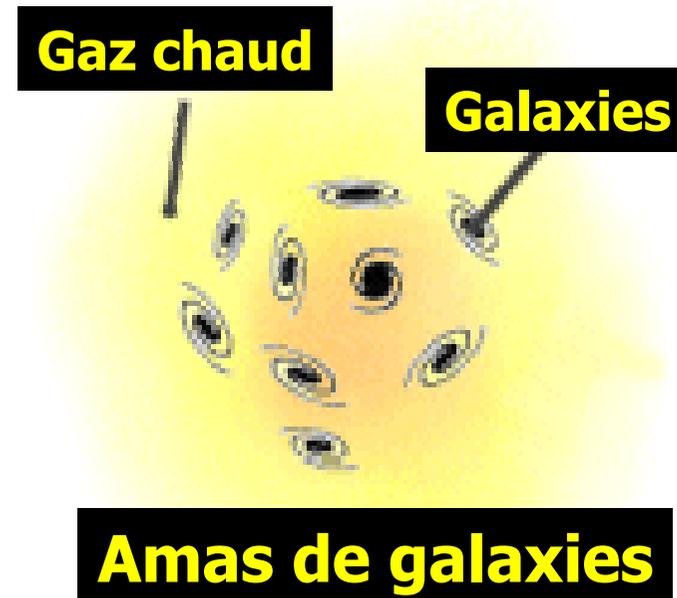
# Les amas de galaxies



George  
Abell

Les amas de galaxies  
comprennent :

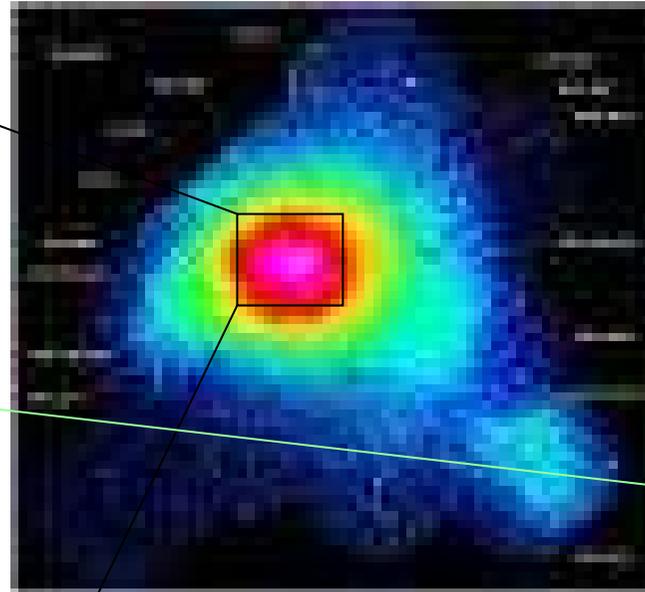
- des **galaxies** (quelques centaines à plusieurs milliers) visibles surtout en lumière visible
- du **gaz** très chaud émettant en rayons X
- de la **matière noire** (ou sombre)



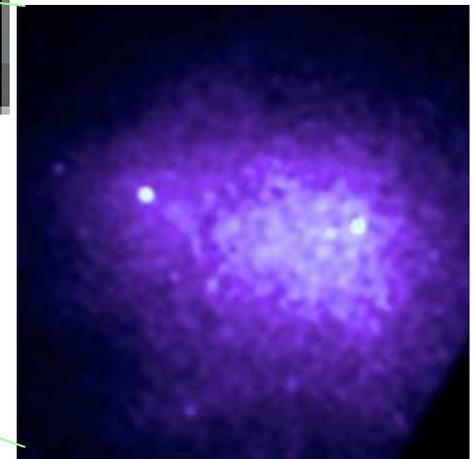
# Un amas célèbre : Coma (la chevelure de Bérénice)



Coma en lumière visible



Satellite  
XMM-Newton



Satellite  
Chandra

Coma en rayons X

# Caractéristiques des amas

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

Dimensions : quelques Mpc

Masse : de l'ordre de  $10^{15} M_0$

1 Mpc  $\sim 3 \cdot 10^{24}$  m (Mpc = Megaparsec)

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

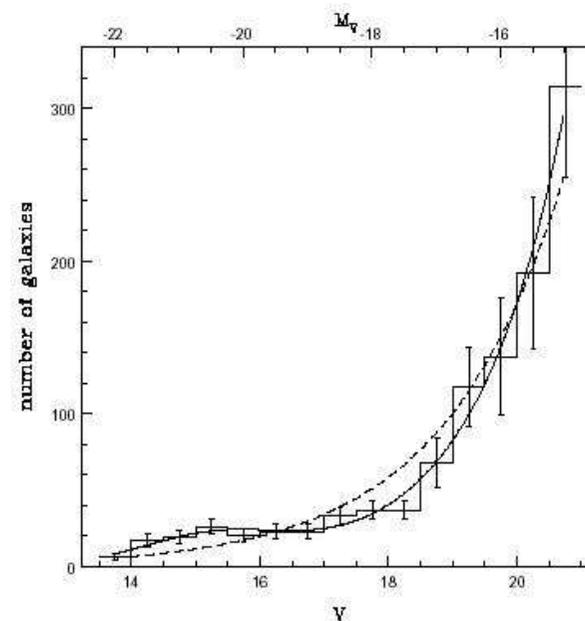
# Les amas de galaxies en lumière visible

## Les galaxies dans les amas

- Les galaxies elliptiques sont probablement formées par la fusion de galaxies spirales
- Dans les amas, on observe plus de galaxies elliptiques dans les régions centrales, et plus de spirales dans les zones extérieures
- Dans les zones extérieures on voit aussi des spirales où la formation d'étoiles est intense, donc on pense que ce sont des galaxies en train de « tomber » sur l'amas : le gaz est alors comprimé et des étoiles se forment

# Un moyen d'analyse pour les galaxies : les fonctions de luminosité

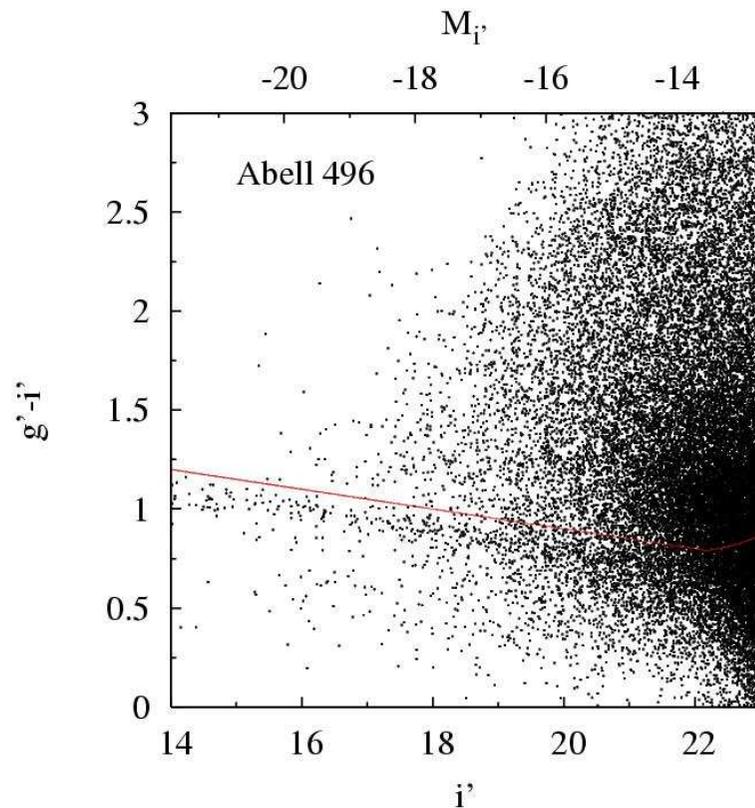
- Les fonctions de luminosité (FDL) représentent le nombre de galaxies par intervalle de magnitude ou de luminosité
- Les FDL des galaxies dans les amas nous renseignent sur la proportion de galaxies à différentes magnitudes



- La pente de la FDL aux faibles magnitudes indique la proportion de galaxies naines
- Cette pente semble dépendre de l'environnement : elle est plus plate au centre des amas (les galaxies faibles sont accrétées par les grosses galaxies) et plus « pentue » dans les zones externes

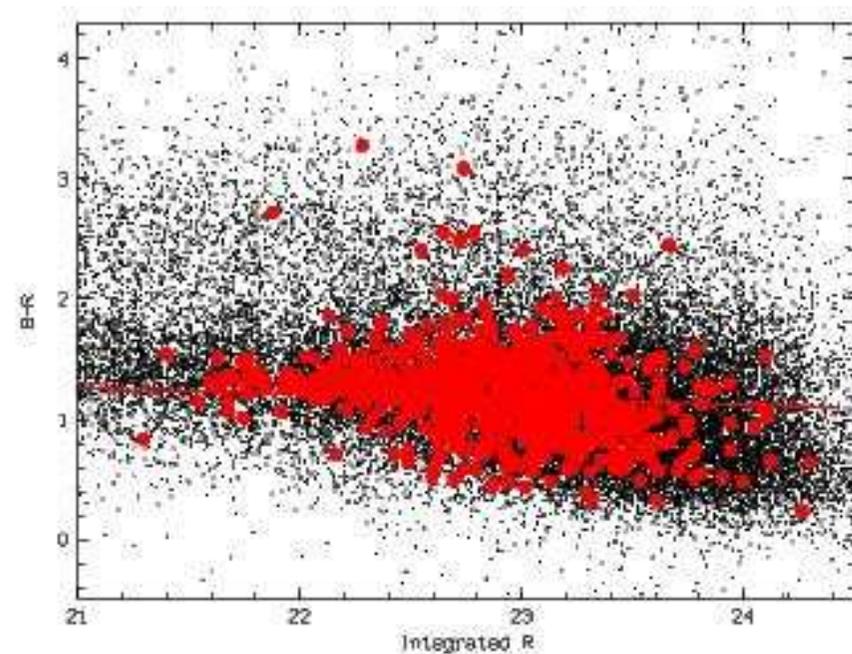
# La relation couleur-magnitude

Abell 496



Boué et al. 2008,  
A&A 479, 335

Coma



Adami et al. 2006, A&A 459, 659

# Qu'arrive-t-il aux galaxies dans les amas ?

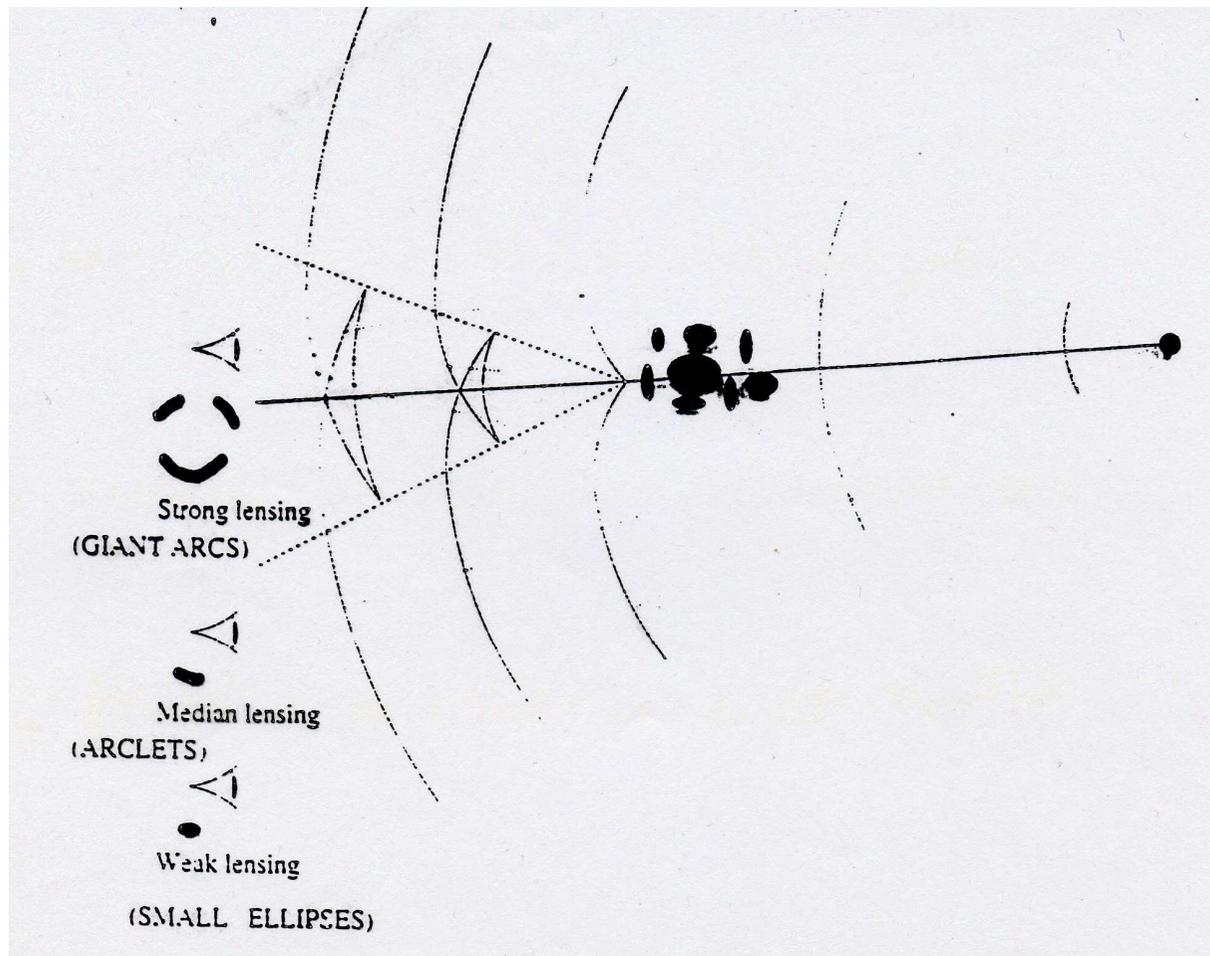
- « Ram pressure stripping », déficience HI : la pression exercée par le gaz interamas arrache leur gaz aux galaxies
- « Harrassment » : les fusions et interactions de marée successives arrachent aussi du gaz aux galaxies
- « Starvation/strangulation » : du fait de la diminution du gaz disponible, le taux de formation d'étoiles diminue

# Les amas sont aussi des lentilles gravitationnelles

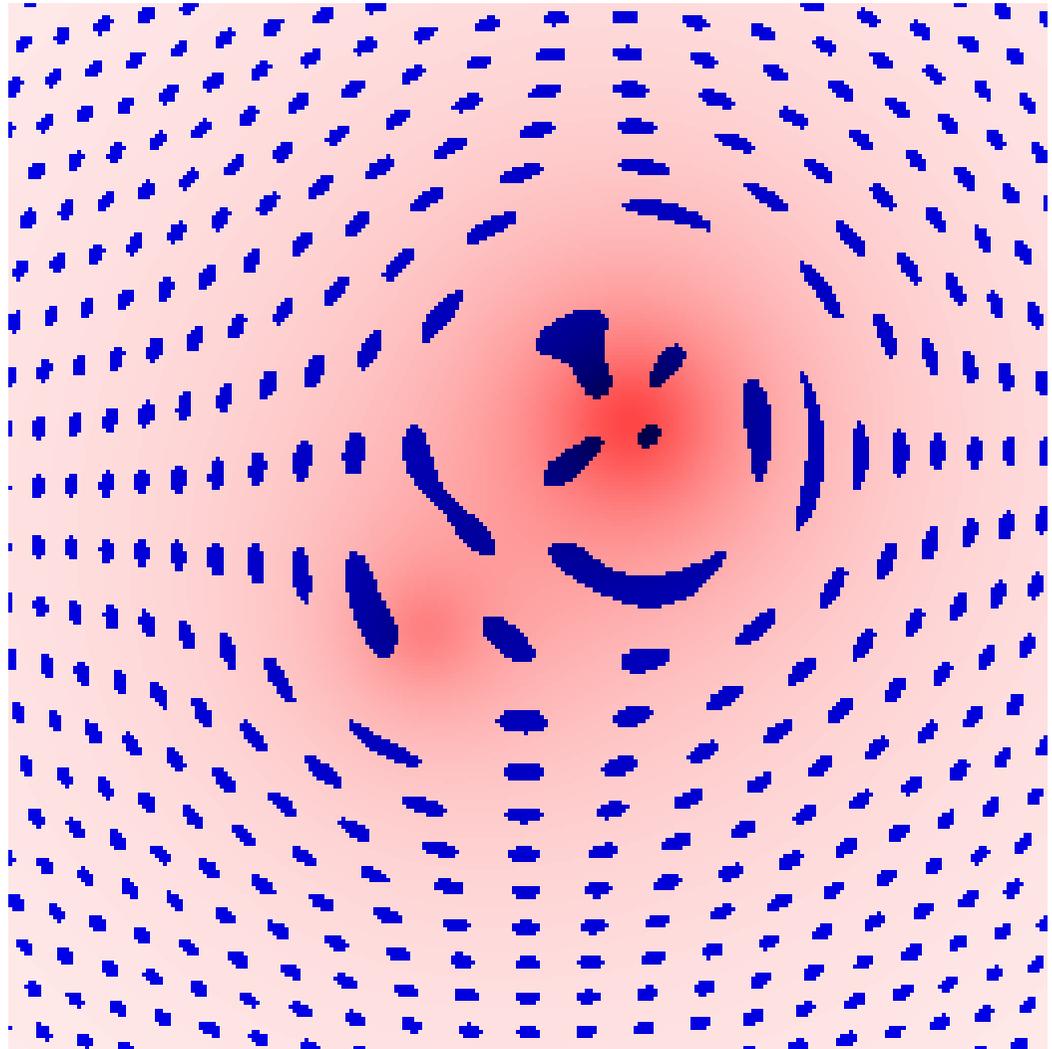
Observateur

Amas de Galaxies

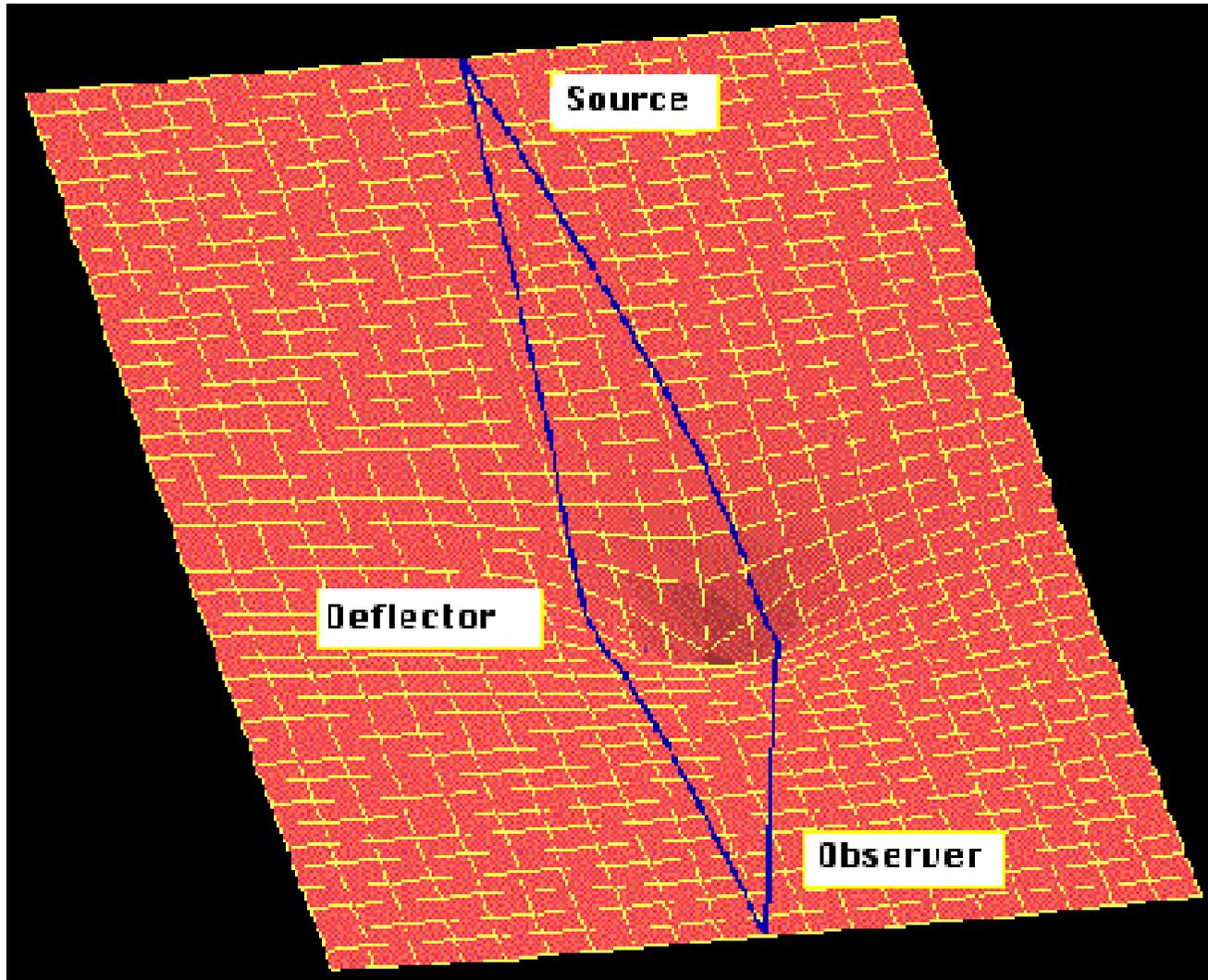
Galaxie Lointaine



- ❖ **Effet fort** au centre
- ❖ **Effet faible** à grande échelle



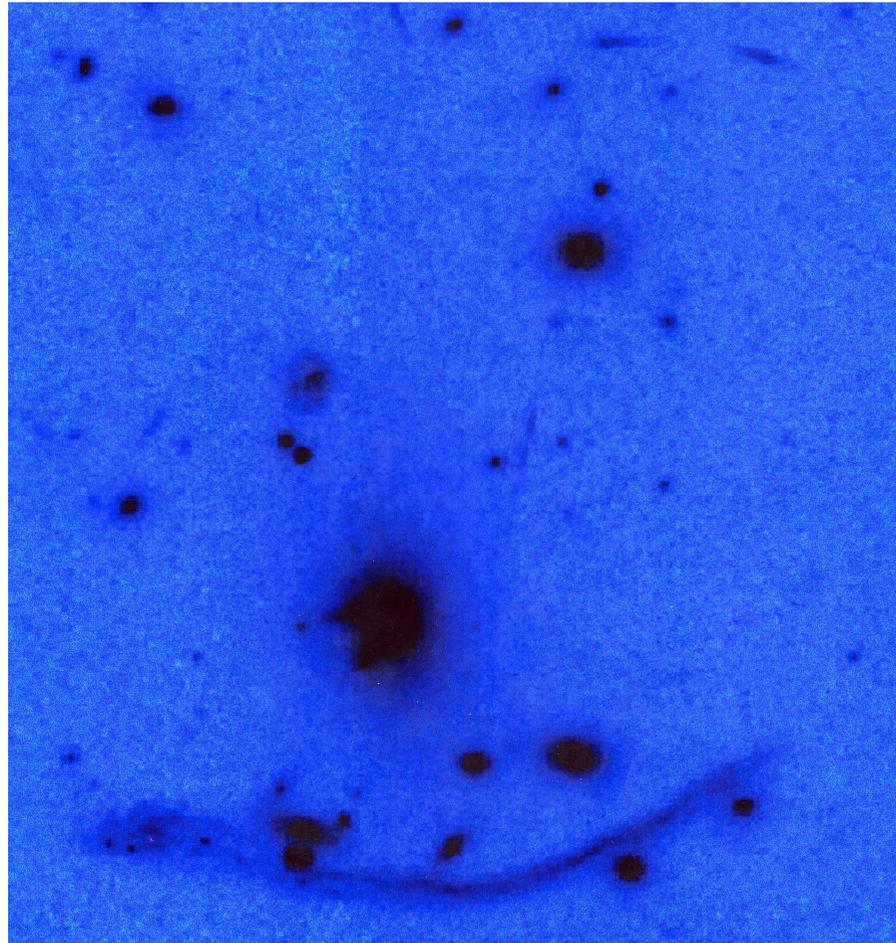
Ned Wright, UCLA



# DÉCOUVERTE DU PREMIER ARC GÉANT : ABELL 370

$$z_{\text{amas}} = 0.375$$

$$z_{\text{source}} = 0.725$$

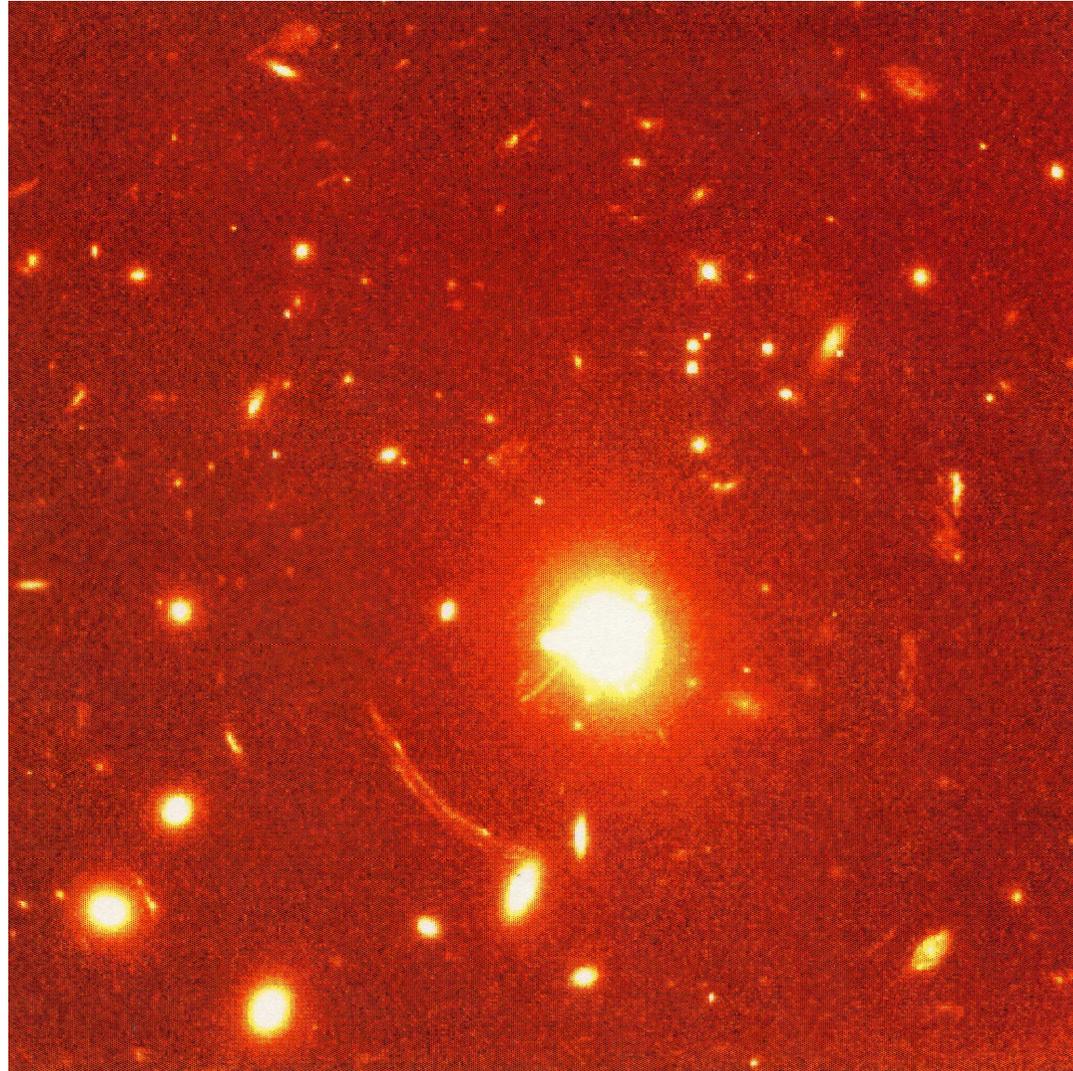


Soucail et al. (1987) A&A 172, L14

# MS 2137 - 23

$$z_{\text{amas}} = 0.33$$

$$z_{\text{source}} = 0.913$$



# ABELL 2218

$z = 0.1710$



HST 04/1995

W. Couch (UNSW), NASA

# RÉSUMÉ

- L'effet de lentille gravitationnelle FORT permet :
  - de déduire la distribution de masse dans l'amas-lentille ; la masse totale de l'amas ainsi déduite est en général en bon accord avec celle calculée à partir de l'émission de l'amas en rayons X
  - d'observer des galaxies très lointaines qu'on ne détecterait pas autrement
- L'effet de lentille gravitationnelle FAIBLE permet, par l'analyse des déformations de très nombreuses galaxies, de déterminer le cisaillement (« shear ») dû à l'effet gravitationnel de l'amas, et de reconstituer la distribution de matière dans les amas

# Les amas de galaxies en rayons X

On observe le ciel en rayons X grâce à des satellites, car les rayons X sont absorbés par l'atmosphère terrestre et ne parviennent pas au sol



# La course aux données X

- Premier satellite : **Uhuru** (1968)
- Première détection d'un amas de galaxies: l'amas Coma, par le satellite **Ariel V**
- Familles de satellites : **Einstein** (fin années 1970), **ROSAT** (années 1990)
- Satellites japonais : **GINGA**, **ASCA**, privilégient la résolution en énergie
- Actuellement, trois grands satellites X sont en orbite : **XMM-Newton** (européen), **Chandra** (américain) et **Suzaku** (japonais)

# Complémentarité de ces satellites

- **XMM-Newton** : grande surface effective, donc sensible, résolution spatiale moyenne (5''), résolution en énergie moyenne pour EPIC (55 eV à 1 keV, 135 eV à 6.4 keV) et bonne pour RGS (4 eV à 1 keV)
- **Chandra** : bonne résolution spatiale (1''), sensibilité moyenne, résolution en énergie moyenne
- **Suzaku** : bonne résolution en énergie (6 eV), pas de résolution spatiale, sensibilité moyenne

1'' = 1 seconde d'arc = 1/3600 degré d'angle

- Les amas de galaxies en X apparaissent comme des sources diffuses et étendues
- L'émission X est due à du gaz très chaud (dix à cent millions de degrés) et très peu dense
- Ce gaz est fortement ionisé (FeXXV, FeXXVI)
- L'élément majoritaire dans l'univers étant H (hydrogène), ce plasma est essentiellement composé de protons et d'électrons
- Luminosité X  $\sim 10^{37}$  W
- Les électrons du gaz sont freinés lorsqu'ils passent près des protons et émettent des photons X par rayonnement de freinage (bremsstrahlung)
- Emissivité  $\epsilon(n, T) \propto n^2 T^{-1/2} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)$

où T=température du gaz, n=densité électronique

# Quelques exemples d'images d'amas en rayons X

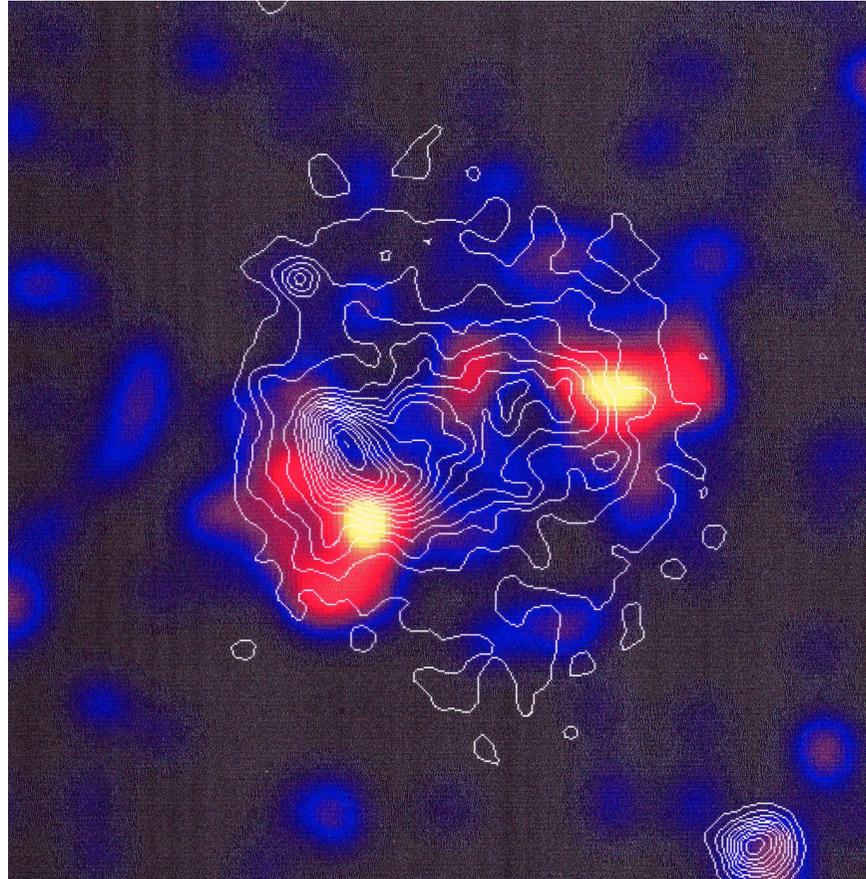


Abell 2142  
( $z=0.09$ )



L'amas du Centaure  
( $z=0.011$ )

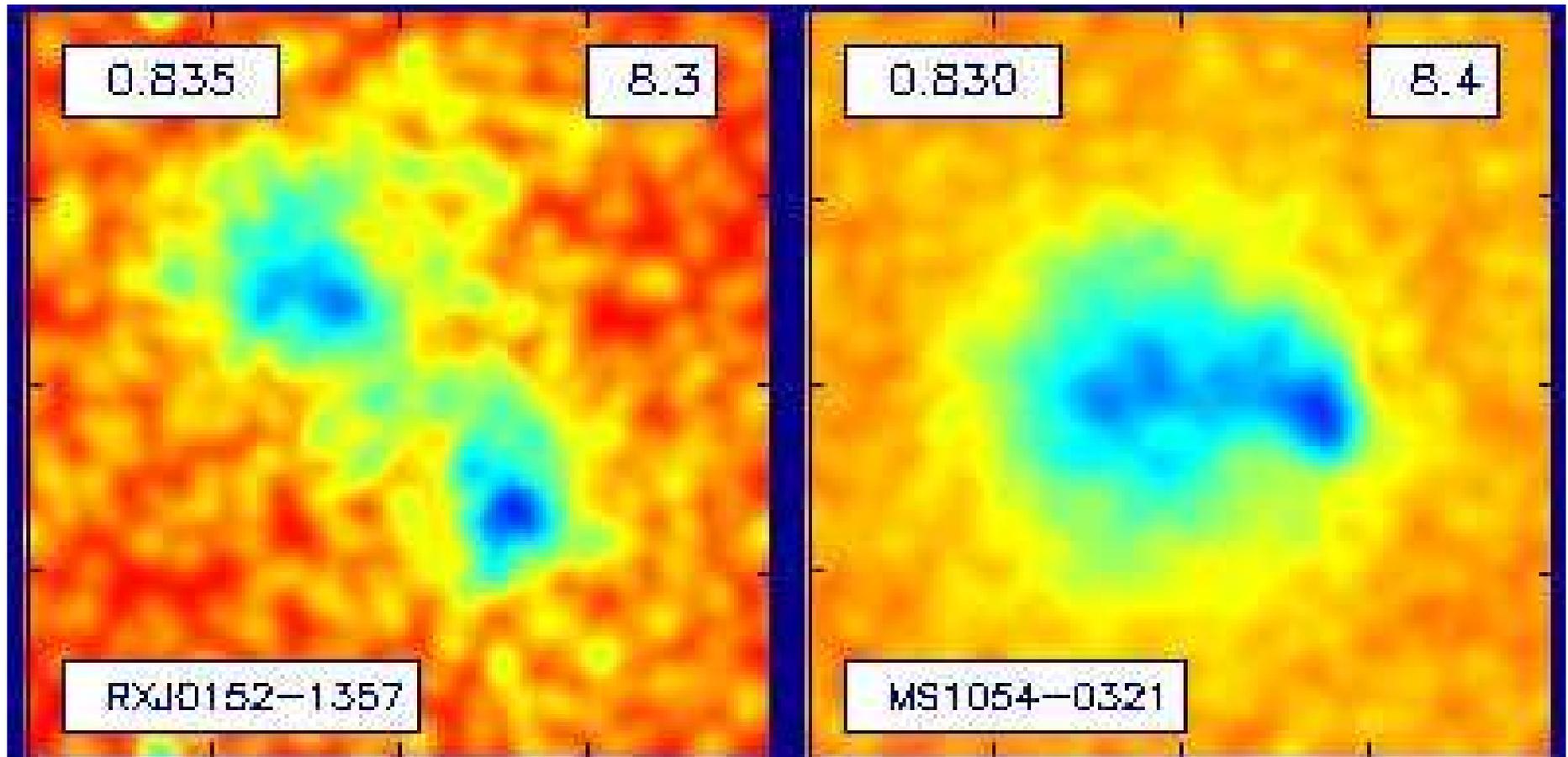
# Abell 754 ( $z=0.0535$ )



En couleurs : carte de densité en lumière visible  
En blanc : isocontours en rayons X (Rosat PSPC)

Zabludoff & Zaritsky (1995) ApJ 447, L21

# Deux amas en fusion plus lointains



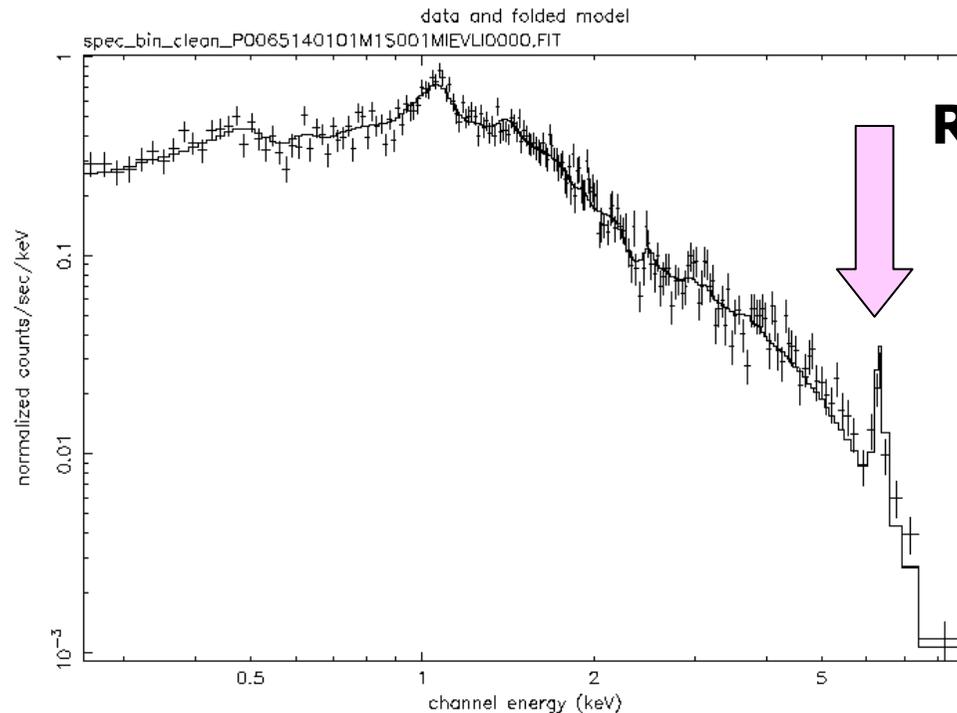
# Que nous apprennent ces images ?

- Les amas ne sont pas souvent des structures lisses et homogènes (amas dits « relaxés »)
- Les fusions d'amas sont fréquentes
- Même quand l'émissivité en rayons X semble homogène, les cartes de température et de métallicité montrent que ce n'est pas le cas

# Les spectres en rayons X

Gaz très chaud :  $T =$  quelques millions de degrés

Gaz très peu dense :  $n =$  environ  $10^8$  particules par mètre cube  
(l'atmosphère terrestre au niveau de la mer en contient environ  $10^{25}$  par mètre cube)



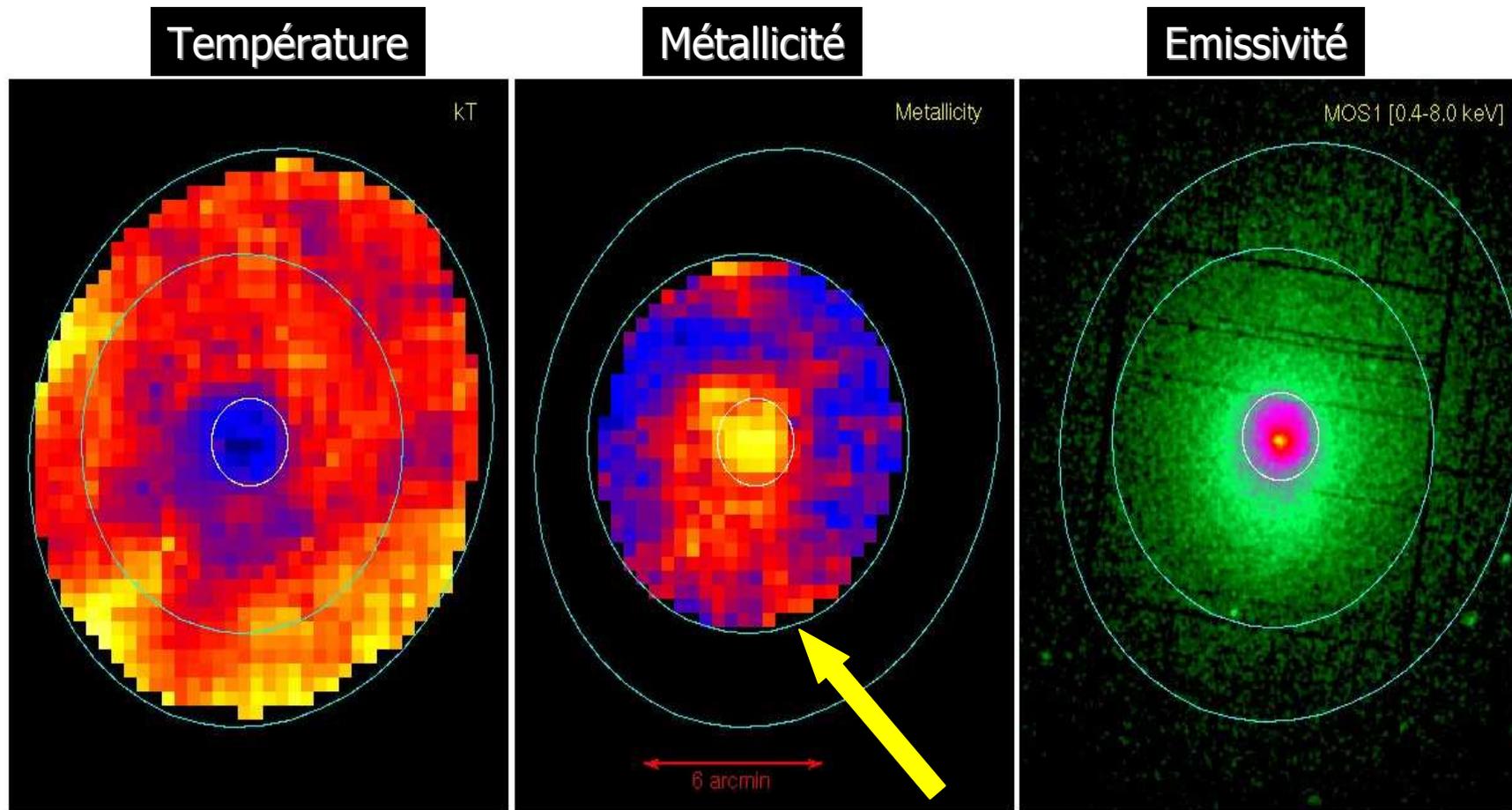
**Raie du fer**

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

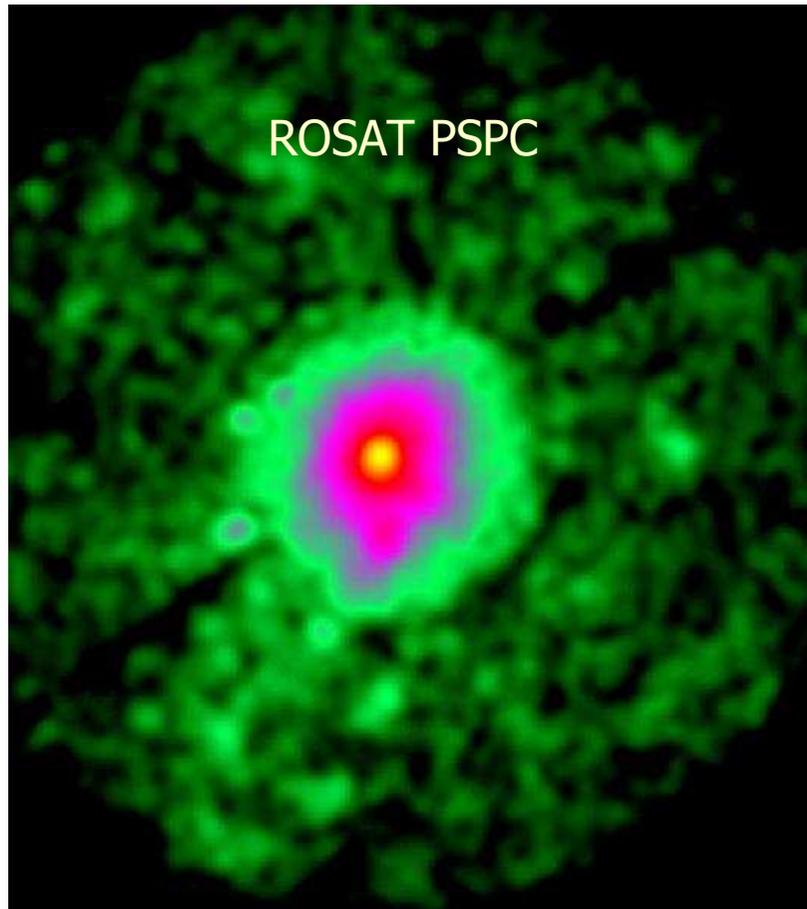
- Les spectres en rayons X nous permettent d'estimer :
  - la température  $T$  et la densité  $n$  du gaz
  - la « métallicité » ou abondance des éléments « lourds » qui ont été fabriqués dans les étoiles et rejetés dans le milieu intergalactique, en particulier le fer
- Les spectres X obtenus pour plusieurs régions de l'amas
  - donnent la variation spatiale de ces quantités (par exemple en fonction de la distance au centre de l'amas)
  - permettent de tracer des cartes :  $T$ , métallicité, pression ( $p=nT$ ), pseudo-entropie ( $T n^{-2/3}$ )

# Abell 496 : un amas qui semblait « relaxé »

Cartes obtenues à partir de données XMM-Newton



# Abell 85 : un amas plus compliqué

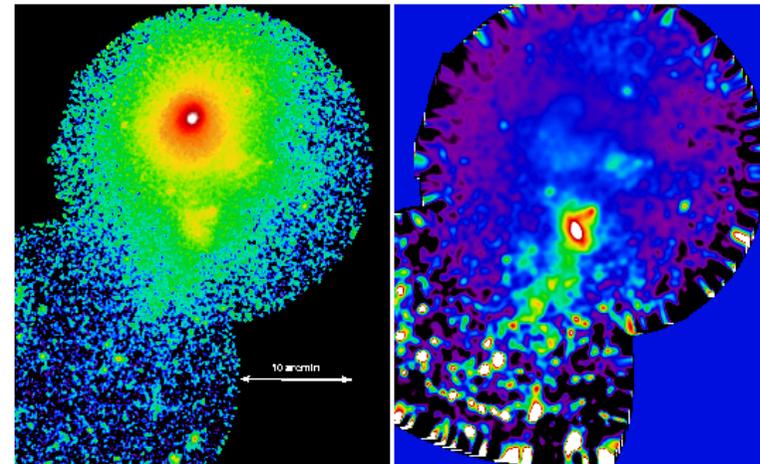


Durret, Forman, Gerbal, Jones & Vikhlinin  
1998, A&A 335, 41

## XMM-Newton

Image brute

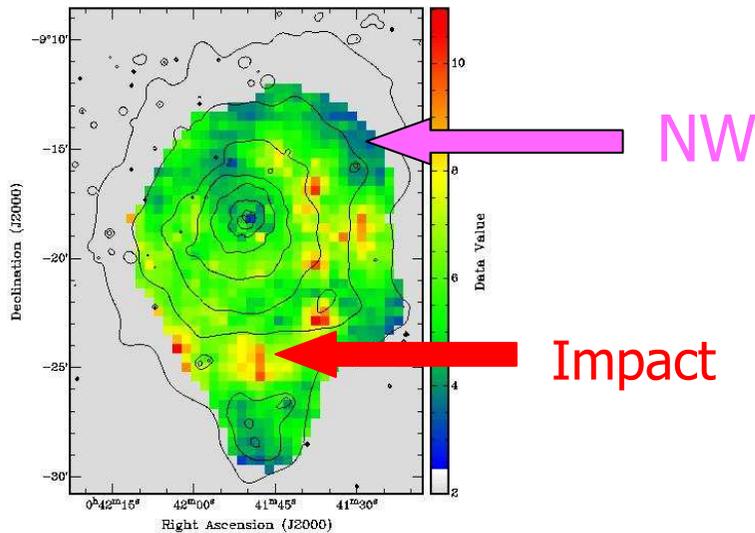
Image après soustraction  
d'un modèle



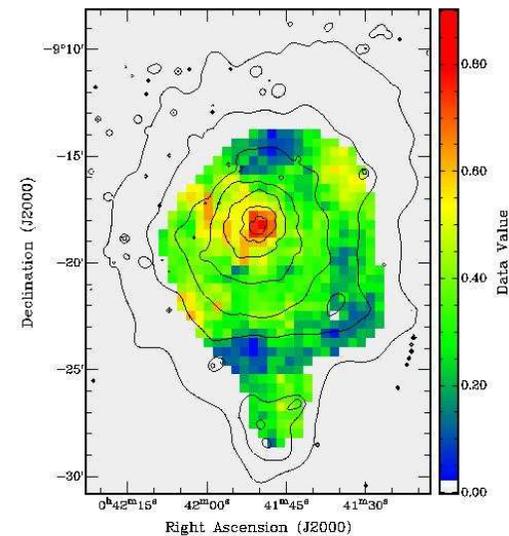
Durret, Lima Neto, Forman &  
Churazov 2003, A&A 403, L29

# Abell 85 : cartes de température et métallicité

Température



Métallicité



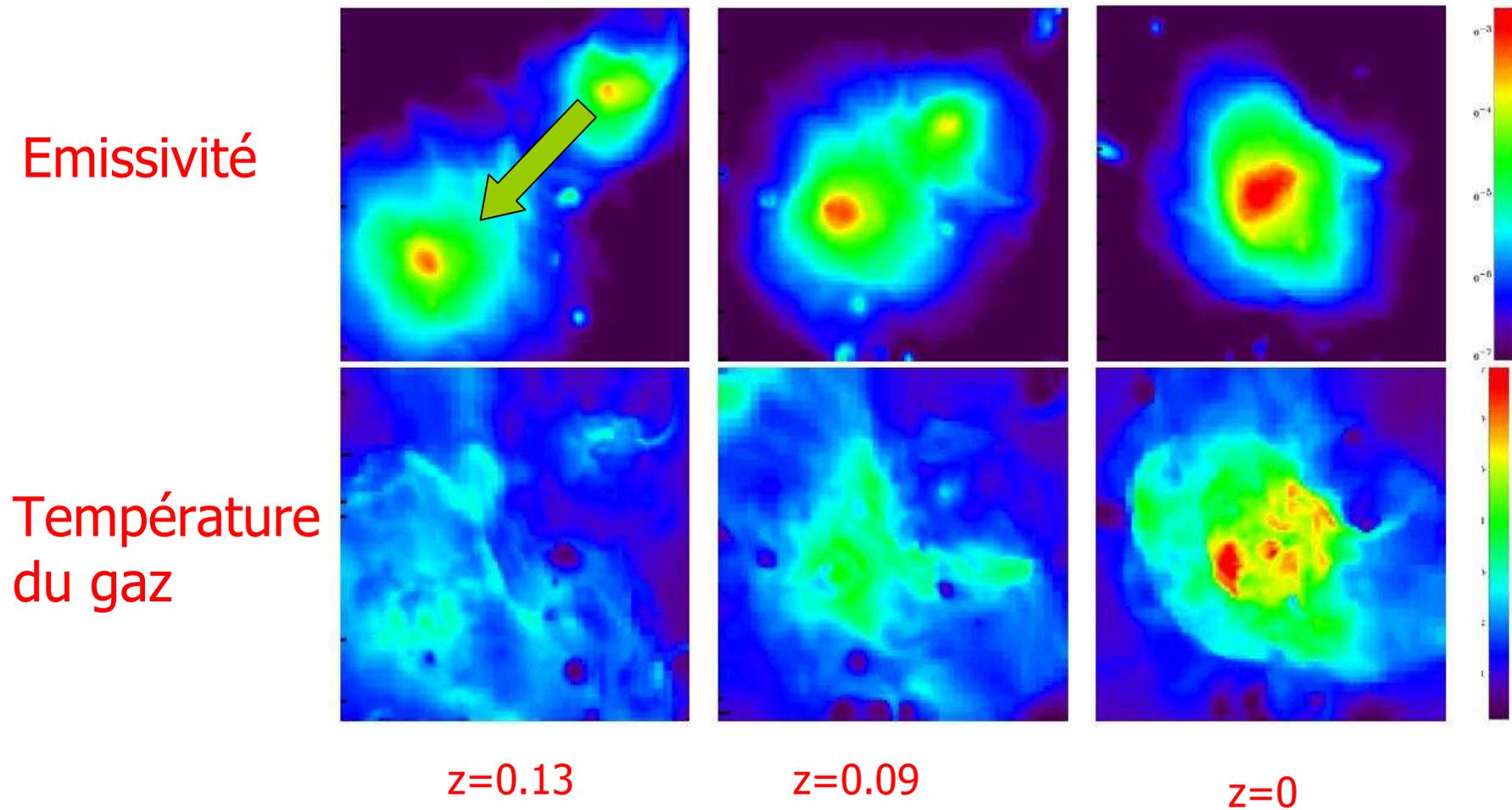
La région centrale est plus froide et plus riche en métaux

La région d'impact est plus chaude et moins riche en métaux

NW : la zone NW est plus froide

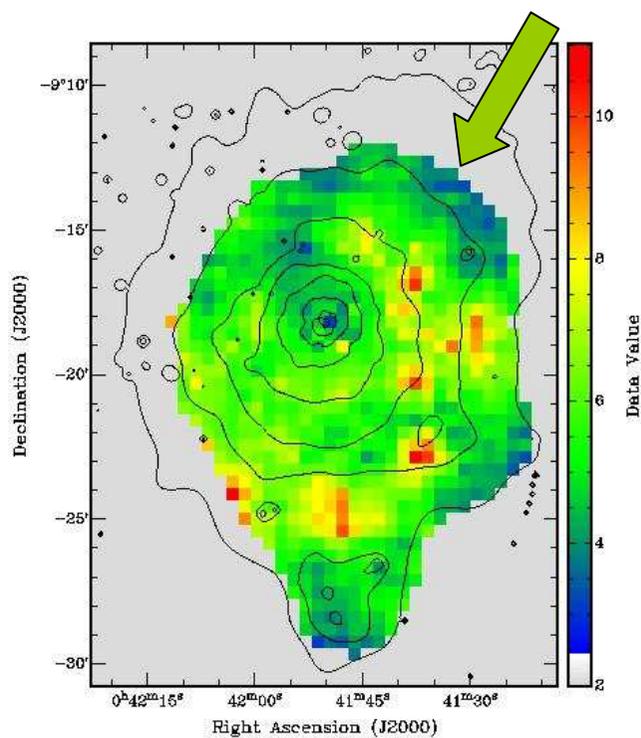
Un arc de régions plus chaudes est observé

# Simulation numérique d'une fusion d'amas

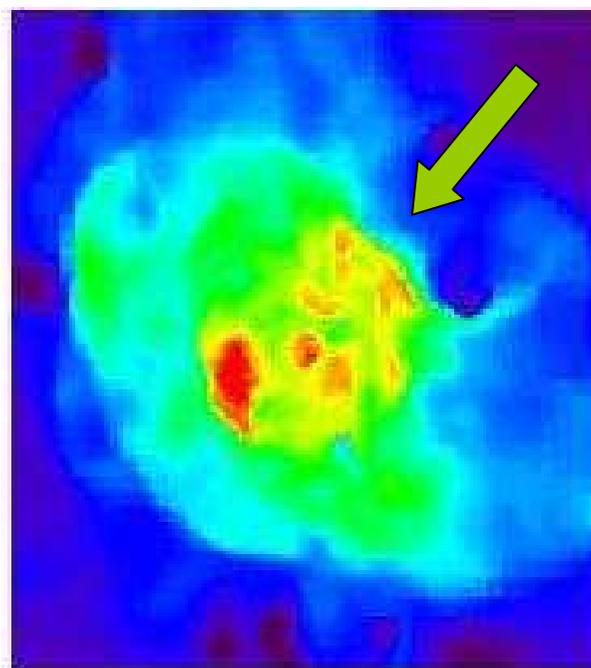


# N'y a-t-il pas une furieuse ressemblance ?

Abell 85  
Carte de température

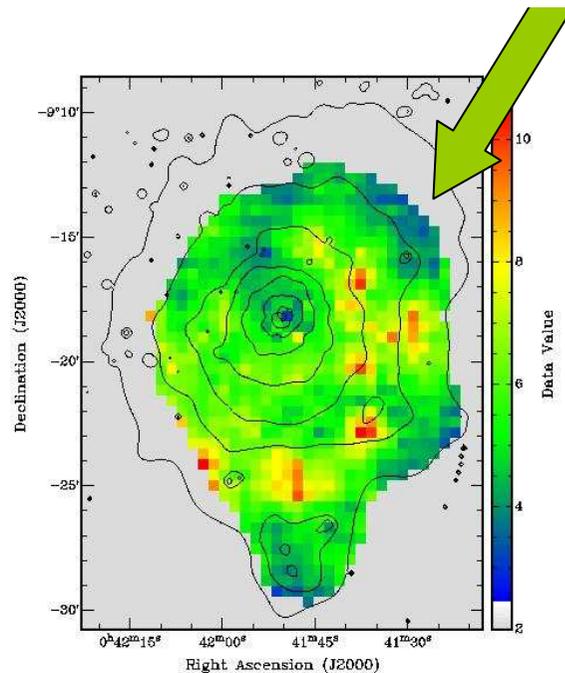


Température prédite par la  
simulation numérique

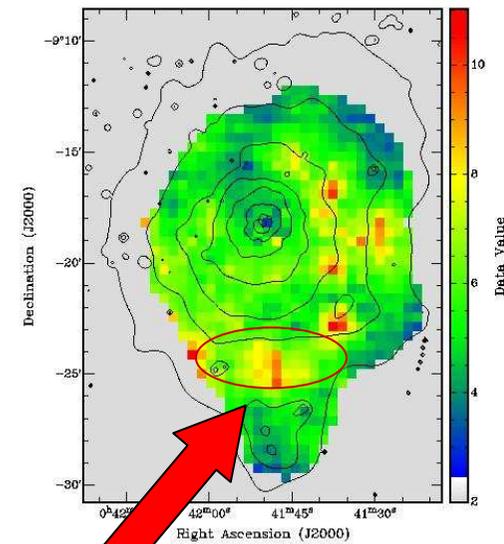


# Un scénario pour Abell 85 : cet amas a subi plusieurs fusions

- 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

# Les estimations de masses dans les amas

A partir de la densité  $n_g(r)$  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

Hypothèse : **symétrie sphérique**

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

La masse de gaz est seulement environ 15-20% de la masse totale

 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 !

# 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 froid) contenu dans les galaxies peut aussi être comprimé, donc le taux de formation d'étoiles dans les galaxies augmente
- Mais le gaz peut aussi être arraché des galaxies, et alors le taux de formation d'étoiles diminue

# Quelques conclusions (lumière visible)

- Il faut d'abord savoir quelles galaxies font vraiment partie de l'amas étudié
- Les propriétés des galaxies sont modifiées par leur appartenance à un amas (type, formation d'étoiles)

# Quelques conclusions (rayons X)

- Les cartes de température du gaz X montrent que les amas ne sont pas « relaxés » mais ont subi et subissent encore des fusions
- Ces cartes nous renseignent sur l'histoire de formation des amas
- La comparaison de ces cartes avec les simulations numériques est très importante
- Les masses d'amas déduites des X sont en accord avec celles déduites par la méthode des lentilles gravitationnelles sauf dans les amas dynamiquement perturbés