

VISION X



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

Les observations 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 sources X en astronomie

- Les étoiles binaires X
- Les pulsars (étoiles à neutrons)
- Les noyaux actifs de galaxies
- Les groupes et amas de galaxies

Les galaxies à noyau actif ou AGN (Active Galactic Nuclei)

- Définition : galaxies possédant en leur centre une région très brillante et très compacte
- Les AGN sont le siège de phénomènes énergétiques très intenses dans tous les domaines de longueur d'onde

Historique

- Première mention par Fath (1909) ?
- Slipher (1917), Hubble (1926), Seyfert (1943) : raies d'émission intenses dans le spectre de plusieurs galaxies, raies de l'hydrogène souvent plus larges que les autres
- Woltjer (1959) : noyaux non résolus 1-100 pc et largeur des raies larges implique masse centrale $10^{10} M_{\text{solaire}}$ si matière gravitationnellement liée

1 pc $\sim 3 \cdot 10^{18}$ m (parsec)

1 $M_{\text{solaire}} = 1 M_{\odot} \sim 2 \cdot 10^{30}$ kg (masse du Soleil)

Schmidt (1963) découvre le **quasar** 3C 273

- source radio (3C) d'aspect stellaire en optique
 - magnitude ~ 13 (observable avec un petit télescope)
 - raies de Balmer de H à décalage spectral 0.158
 - d'où magnitude absolue ~ -26.7 (donc le quasar est intrinsèquement environ 10 fois plus brillant que les galaxies les plus brillantes!)
-
- Les quasars sont les régions centrales de galaxies
 - Difficulté d'observer la galaxie sous-jacente
 - Les quasars émettent en rayons X et parfois en radio
 - Les quasars sont variables à des échelles de temps très courtes

Détermination des dimensions des régions émettrices

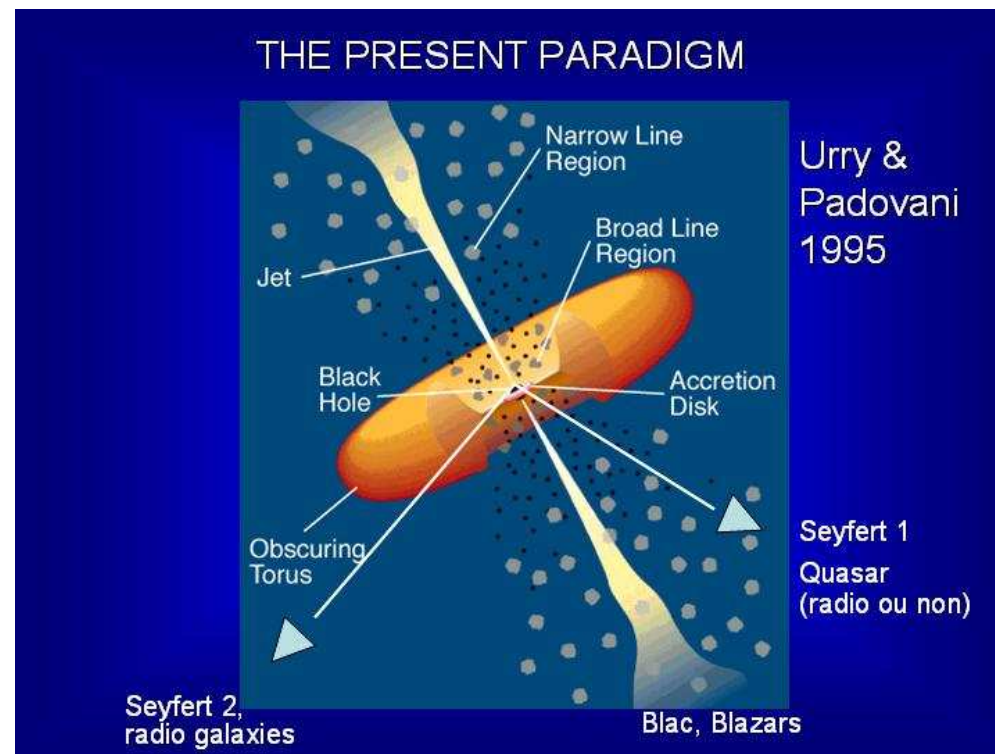
- Variations observées sur une durée Δt
dimension de la source $< c \cdot \Delta t$
(c =vitesse de la lumière)

dimension de la source X centrale = quelques jours
à quelques années lumière

- En rayons X, les AGN et quasars apparaissent comme des sources ponctuelles

Le modèle « classique »

Trou noir supermassif (10^6 - $10^9 M_0$) au centre



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

Mécanismes d'émission X des AGN

- Matière tombe sur trou noir central par l'intermédiaire du disque d'accrétion
- En tombant, elle perd de l'énergie sous forme de photons
- L'énergie de ces photons est accrue par diffusion Compton inverse sur les particules du halo chaud et peu dense entourant le disque d'accrétion, et les photons acquièrent de l'énergie et deviennent des photons X
- La réalité est beaucoup plus compliquée (prendre en compte géométrie et épaisseur du disque, température et densité du halo chaud, champs magnétiques...)

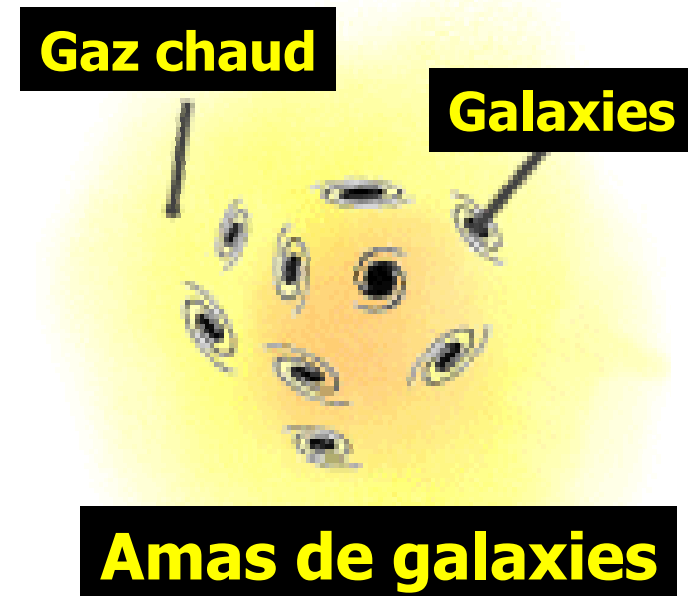
Les amas de galaxies



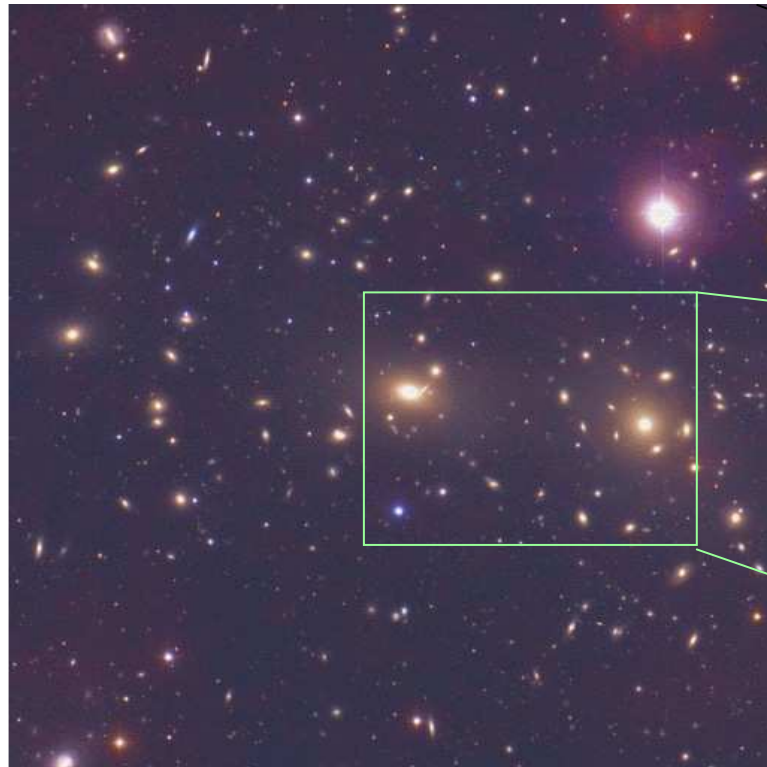
George
Abell

Les amas de galaxies
comprennent :

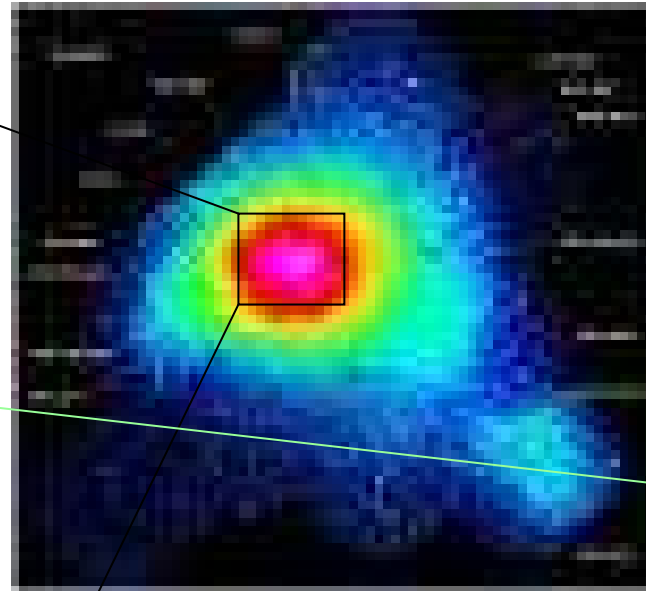
- des **galaxies** (quelques centaines à plusieurs milliers) visibles surtout en lumière visible
- du **gaz** très chaud émettant en rayons X
- de la **matière noire** (ou sombre)



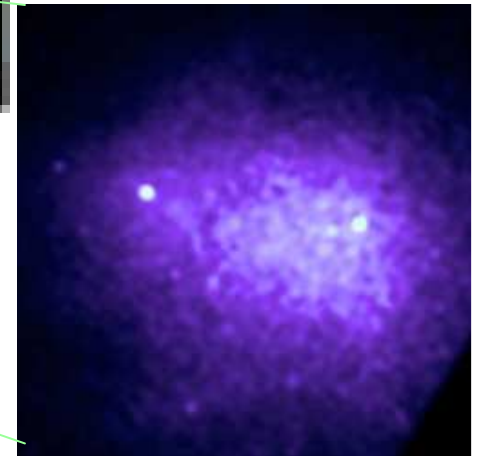
Un amas célèbre : Coma (la chevelure de Bérénice)



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 rayons X

- 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

Mécanisme principal d'émission X

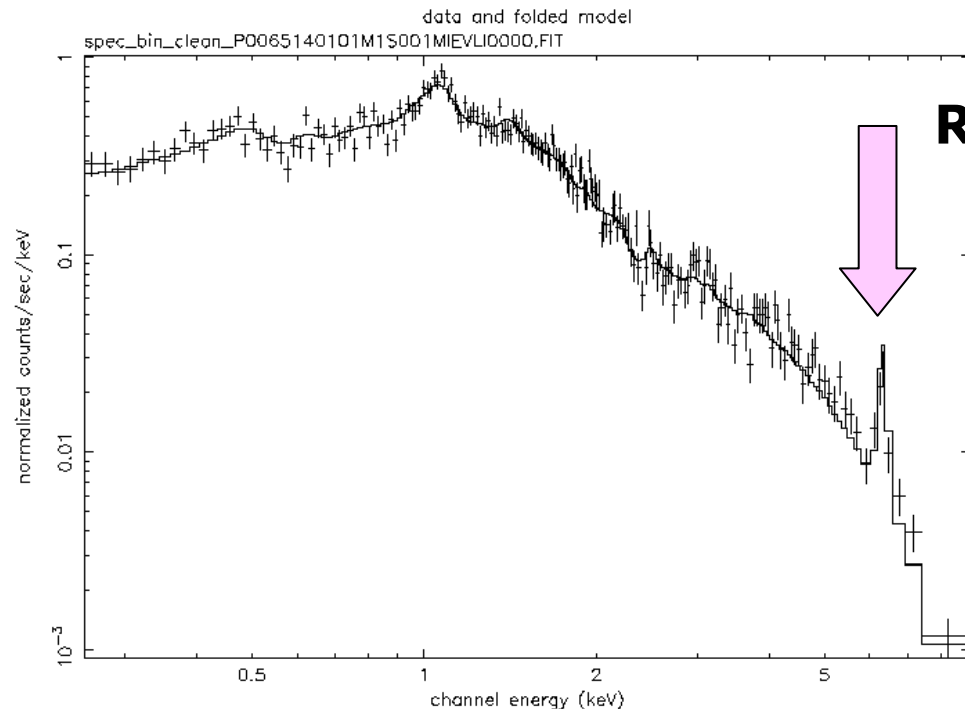
- Les électrons du gaz sont freinés lorsqu'ils passent près des protons et émettent des photons X par rayonnement de freinage (bremsstrahlung)
- Emissivité $\epsilon(n, T) \propto n^2 T^{-1/2} \exp(-\frac{h\nu}{kT})$

où T=température du gaz, n=densité électronique

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)



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 ($T n^{-2/3}$)

Quelques exemples d'images d'amas en rayons X

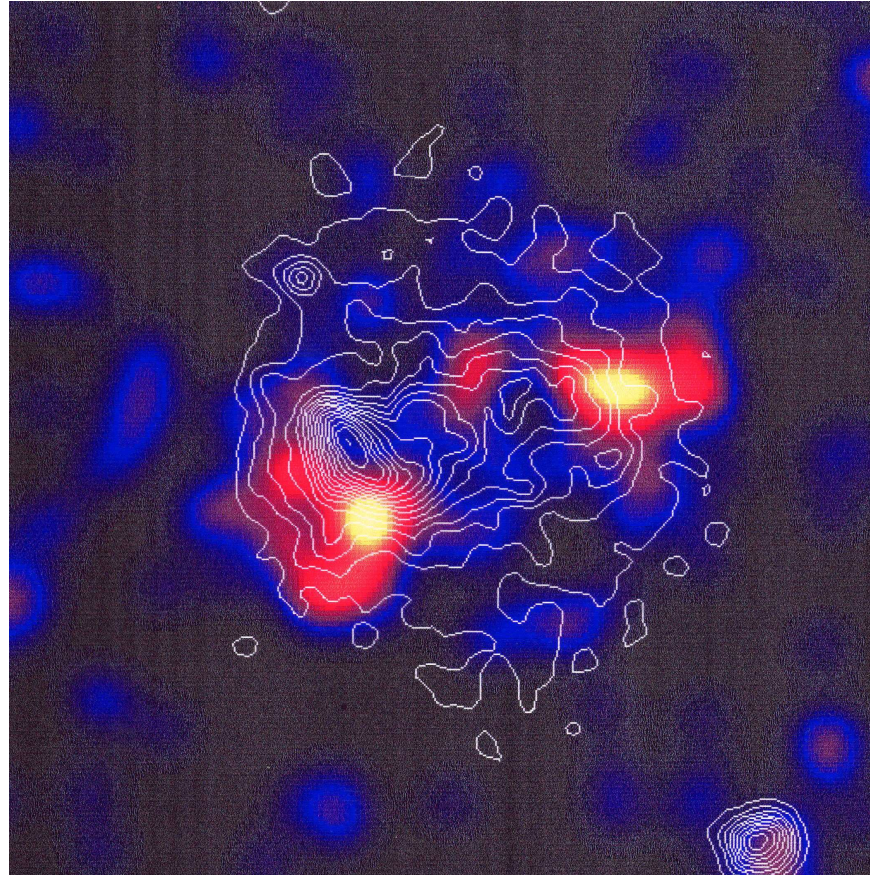


Abell 2142
($z=0.09$)



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

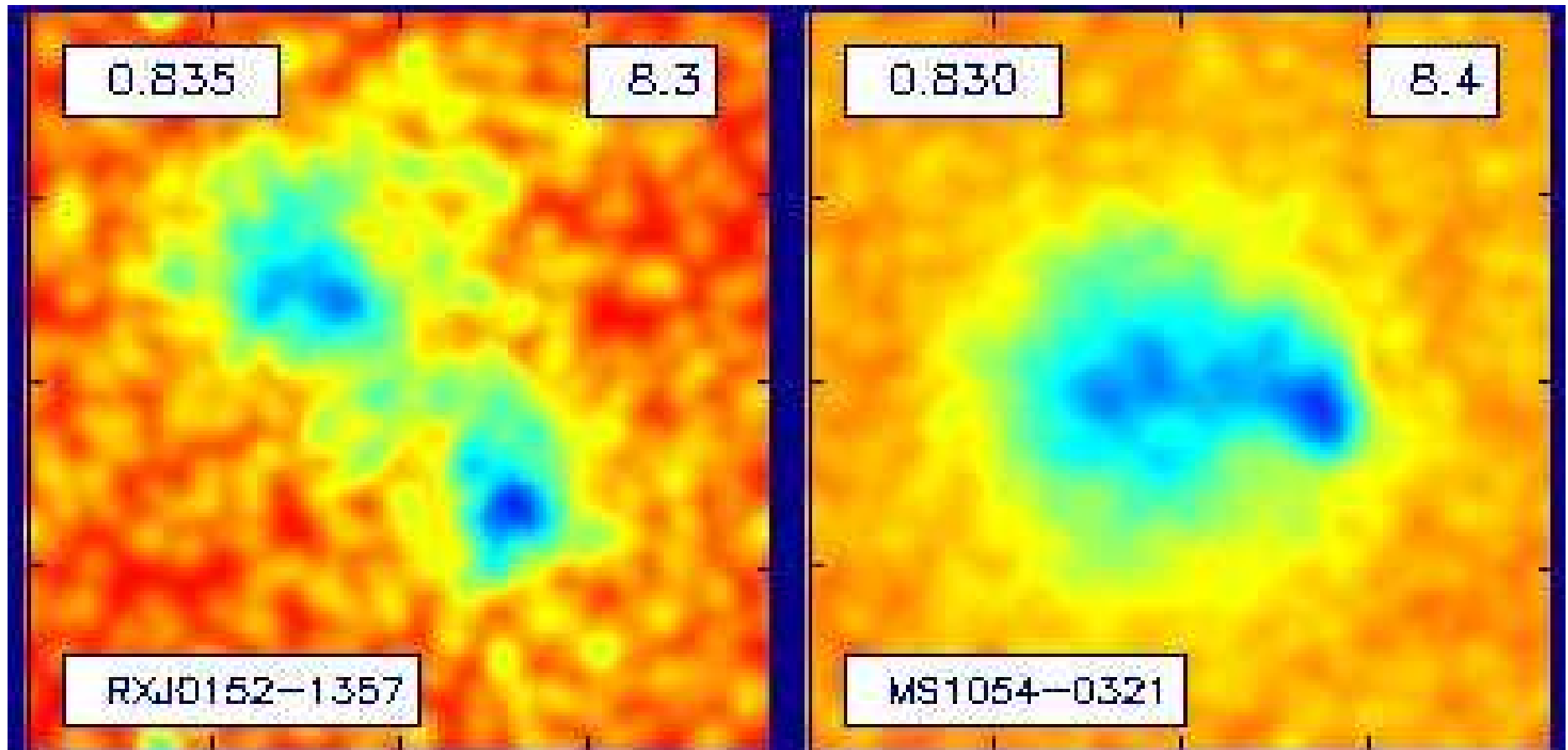
Abell 754 ($z=0.0535$)



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

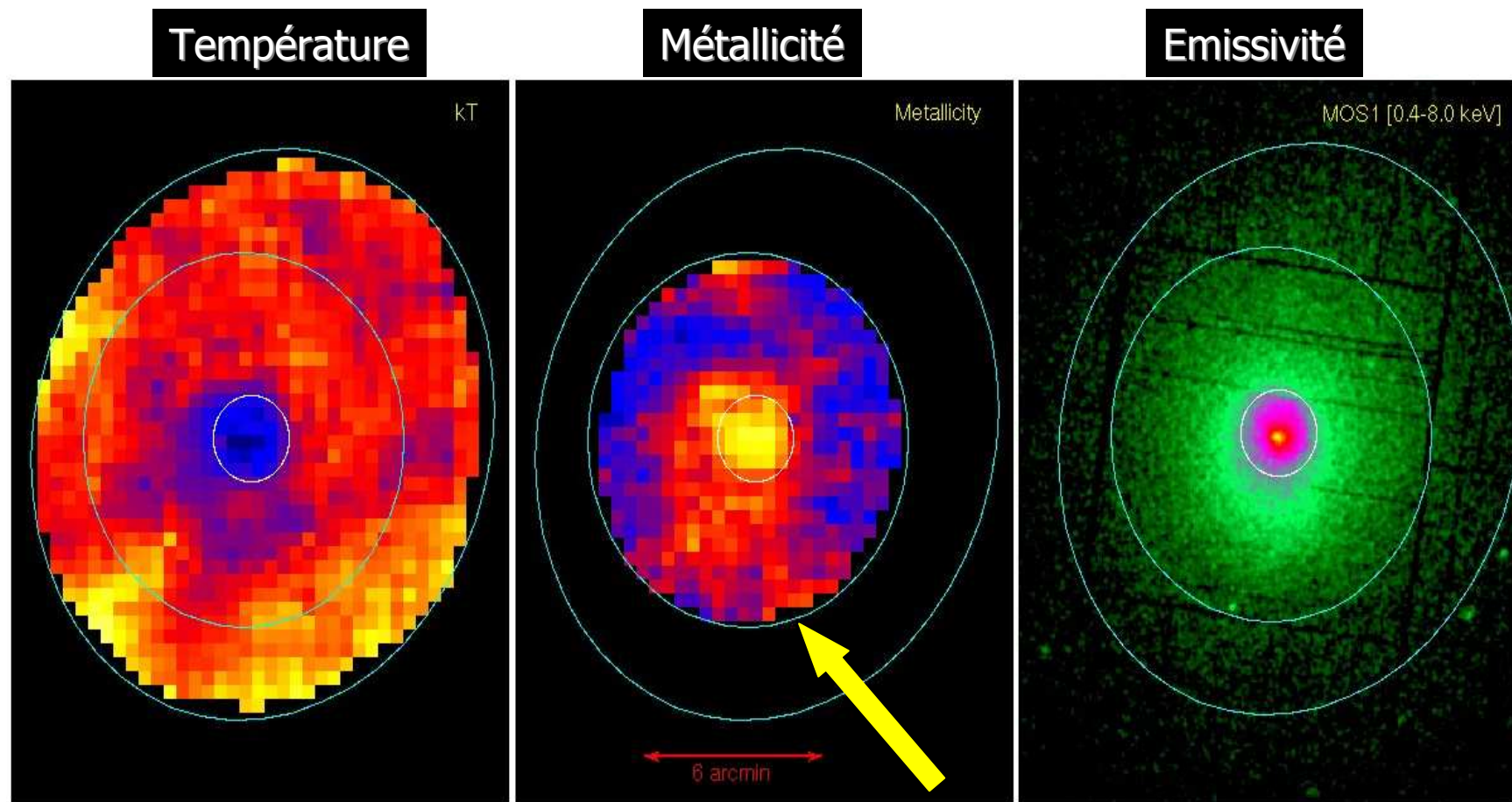


Que nous apprennent ces images ?

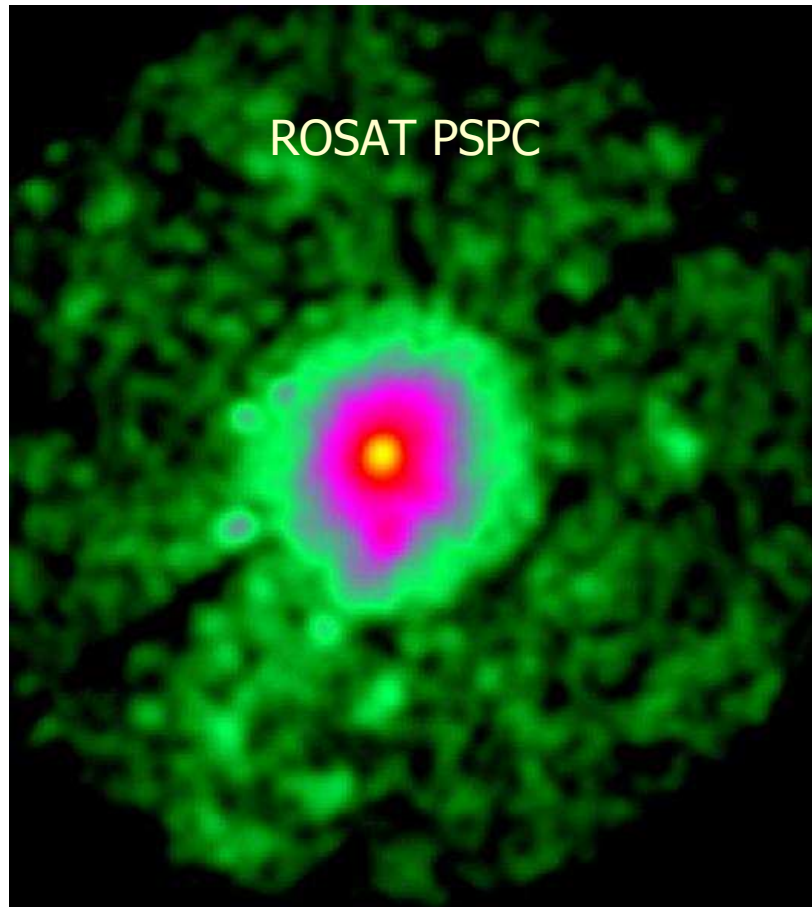
- Les amas ne sont pas souvent des structures lisses et homogènes (amas dits « relaxés »)
- Les fusions d'amas sont fréquentes
- Même quand l'émissivité en rayons X semble homogène, les cartes de température et de métallicité montrent que ce n'est pas le cas

Abell 496 : un amas qui semblait « relaxé »

Cartes obtenues à partir de données XMM-Newton



Abell 85 : un amas plus compliqué

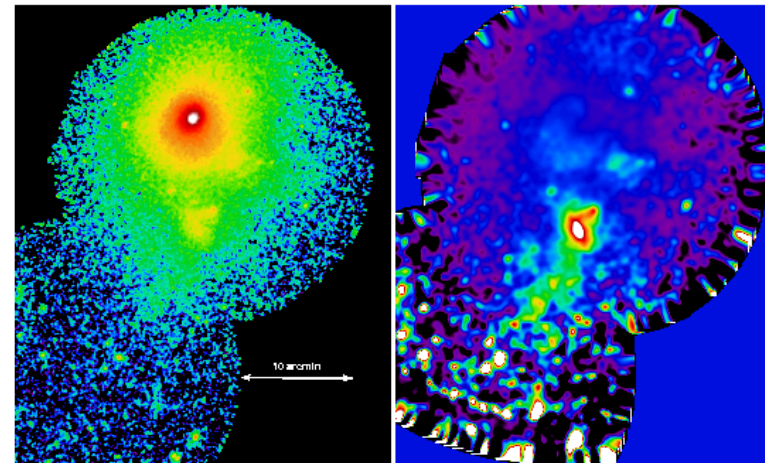


Durret, Forman, Gerbal, Jones & Vikhlinin
1998, A&A 335, 41

XMM-Newton

Image brute

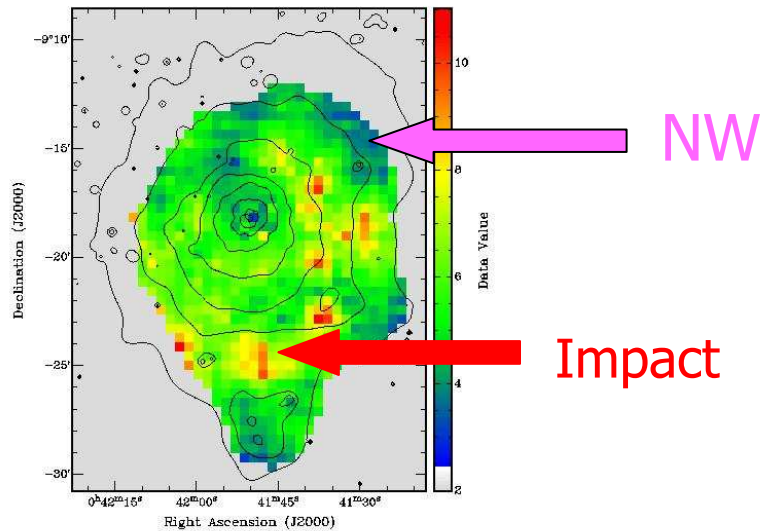
Image après soustraction
d'un modèle



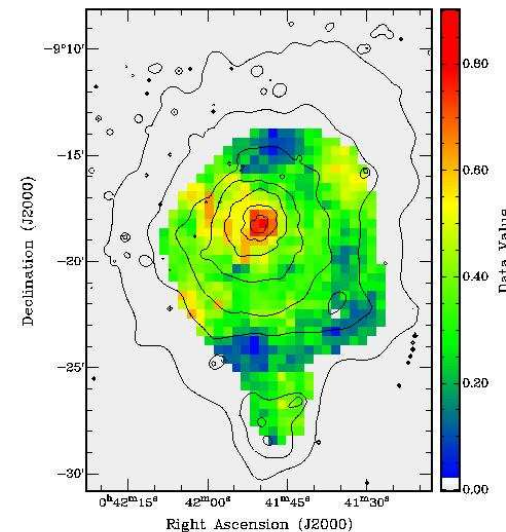
Durret, Lima Neto, Forman &
Churazov 2003, A&A 403, L29

Abell 85 : cartes de température et métallicité

Température



Métallicité



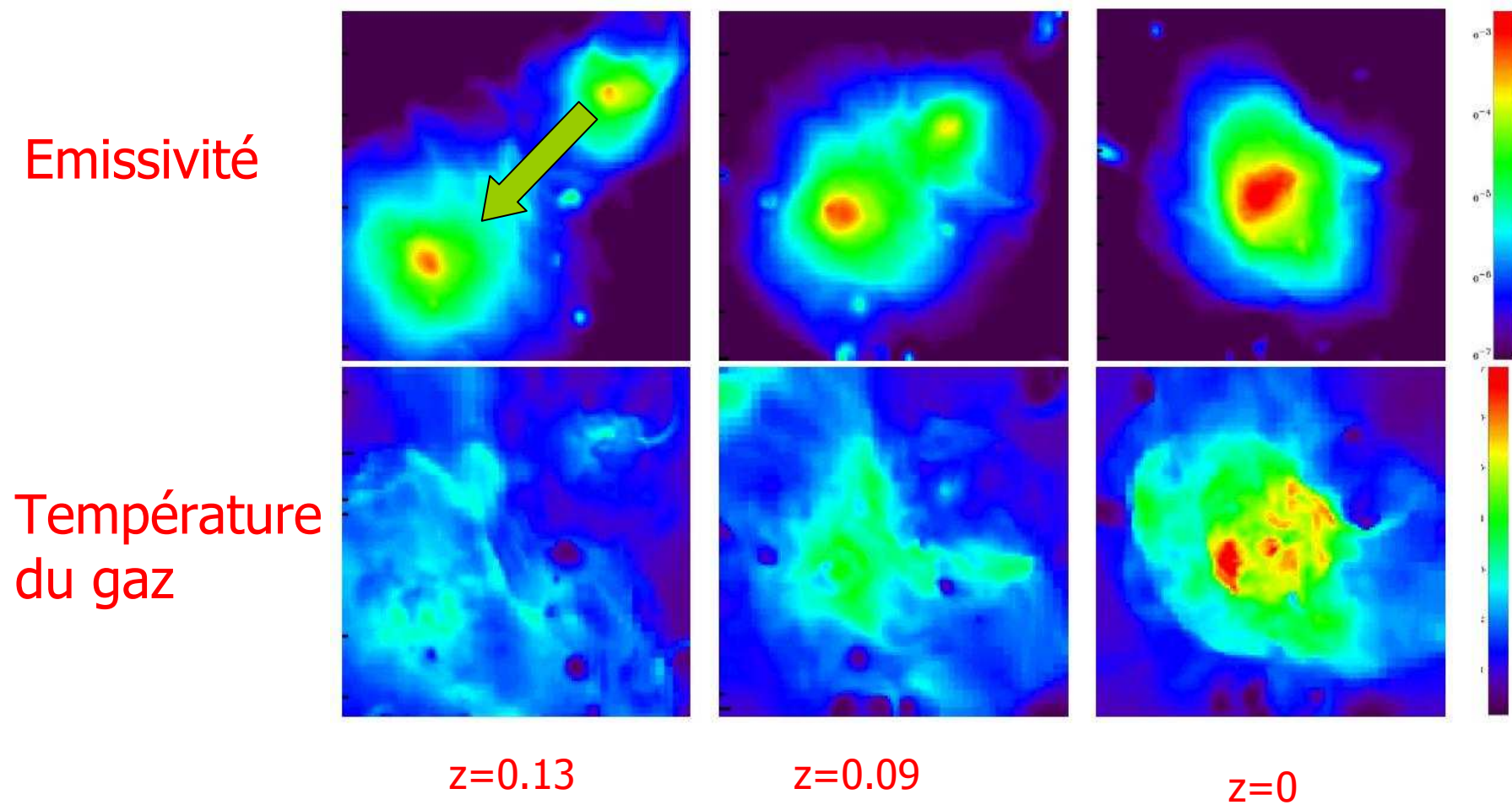
La région centrale est plus froide et plus riche en métaux

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

NW : la zone NW est plus froide

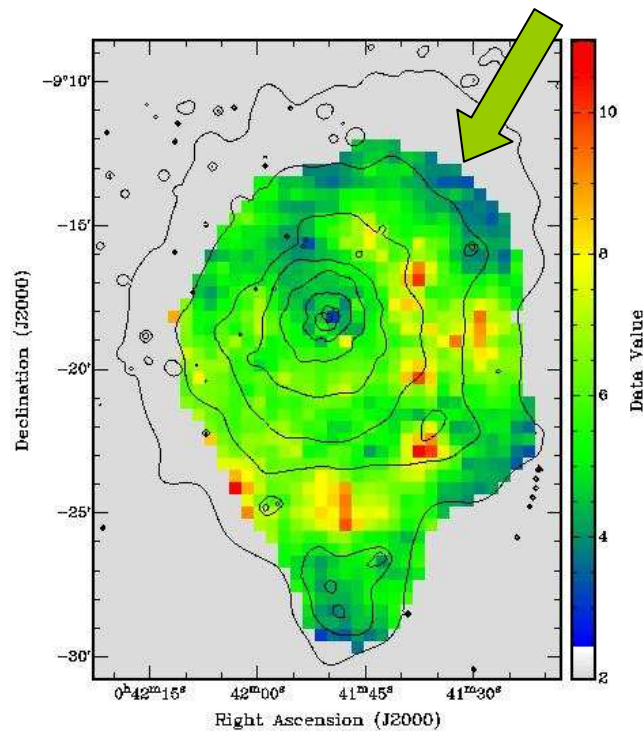
Un arc de régions plus chaudes est observé

Simulation numérique d'une fusion d'amas

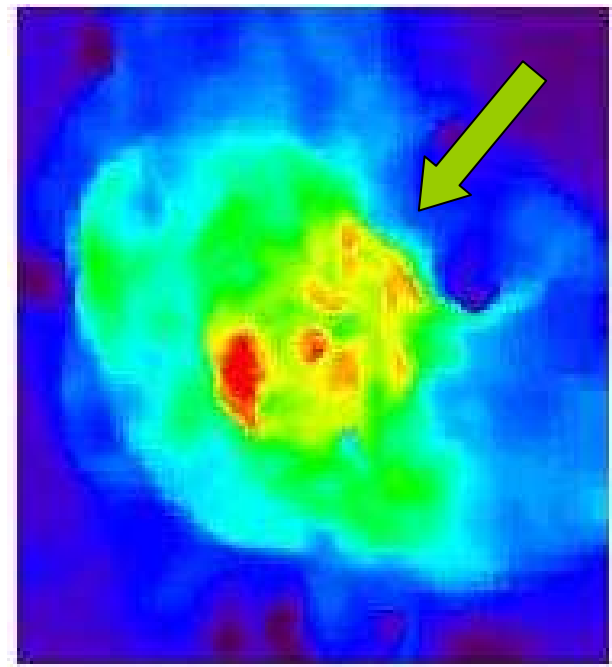


N'y a-t-il pas une furieuse ressemblance ?

Abell 85
Carte de température

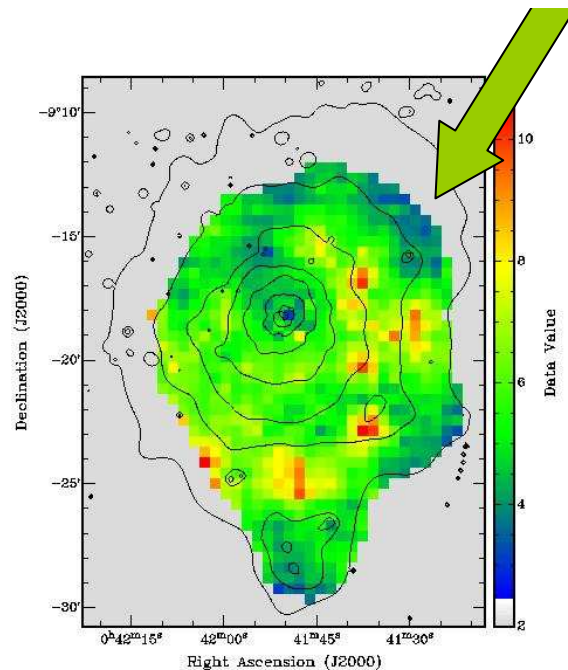


Température prédite par la
simulation numérique

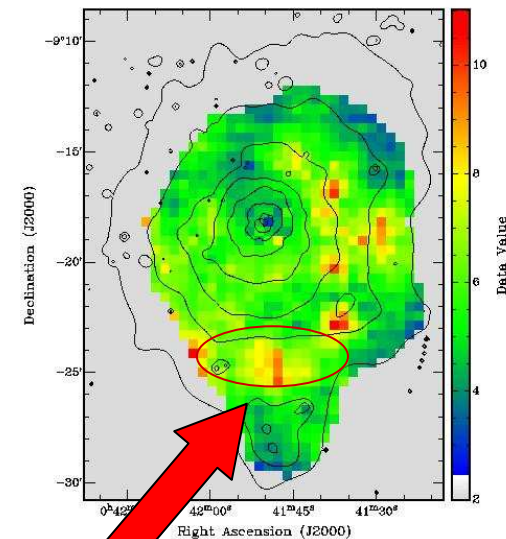


Un scénario pour Abell 85: cet amas a subi plusieurs fusions

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



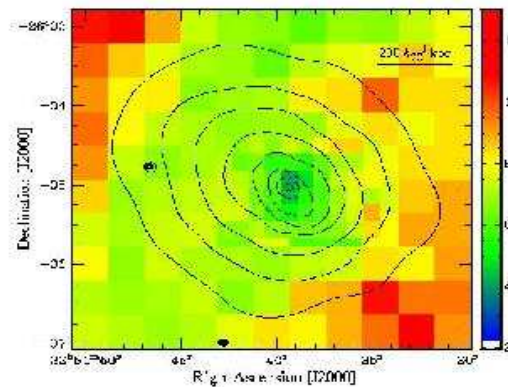
- Chute (encore en cours) de groupes venant du sud-est et arrivant sur la zone d'impact



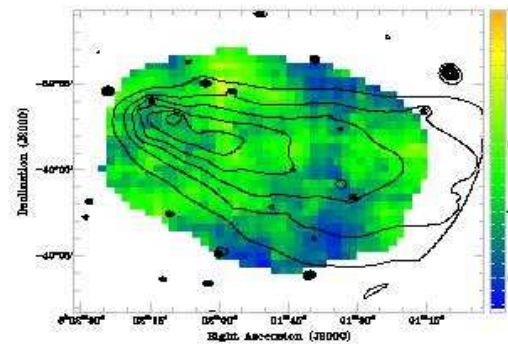
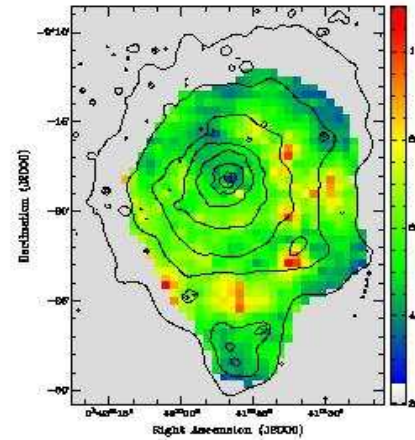
Chute de groupes

Cartes de température en rayons X pour quelques amas

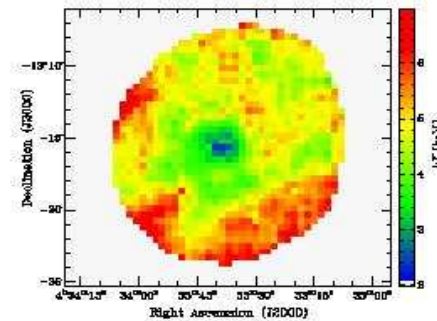
Abell 2667



Abell 85



Abell 3376



Abell 496

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**

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

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_{dyn}

- Masse totale en fonction du rayon:

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

où m_p = masse du proton

$\mu = 0.61$ poids moléculaire moyen

P_{nt} = pression supplémentaire (magnétique, rayons cosmiques, turbulence...) qui peut être nulle ou négligeable

- Masse totale (ou masse dynamique) M_{dyn} s'obtient par intégration sur r

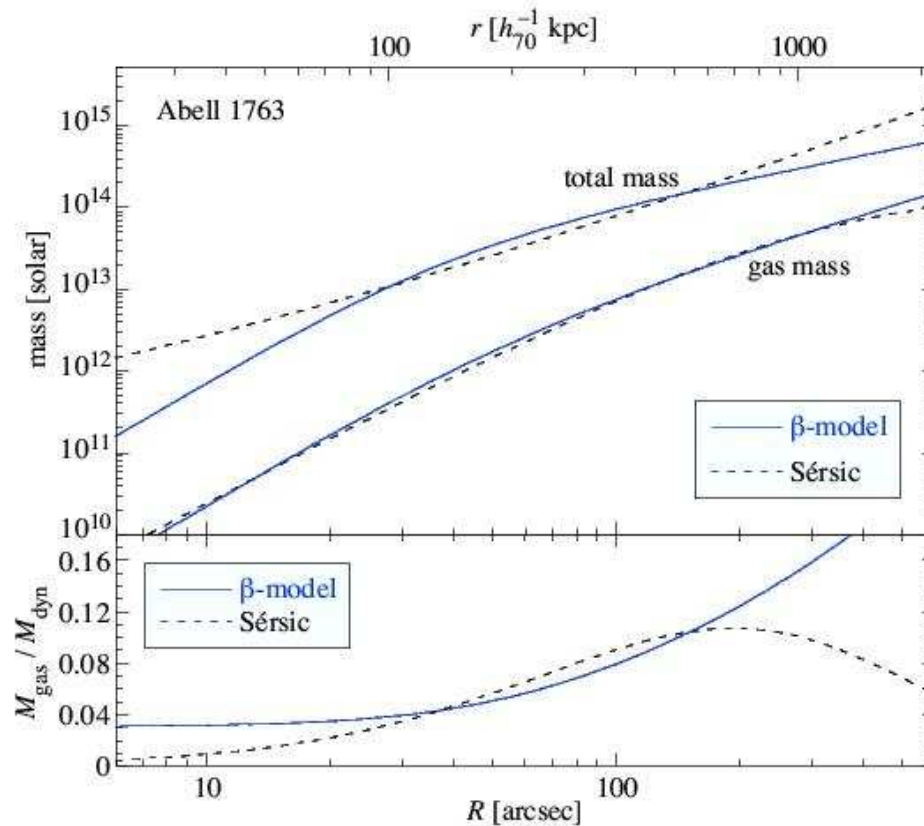
La masse de gaz est seulement environ 15-20% de la masse totale



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 !

Profils de masse et fractions de gaz



$M_{\text{dyn}}(r)$

$M_{\text{gaz}}(r)$

$$f_{\text{gaz}}(r) = M_{\text{gaz}}(r) / M_{\text{dyn}}(r)$$

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

Comment se passe la fusion de deux amas ?

Exemple de l'amas du boulet

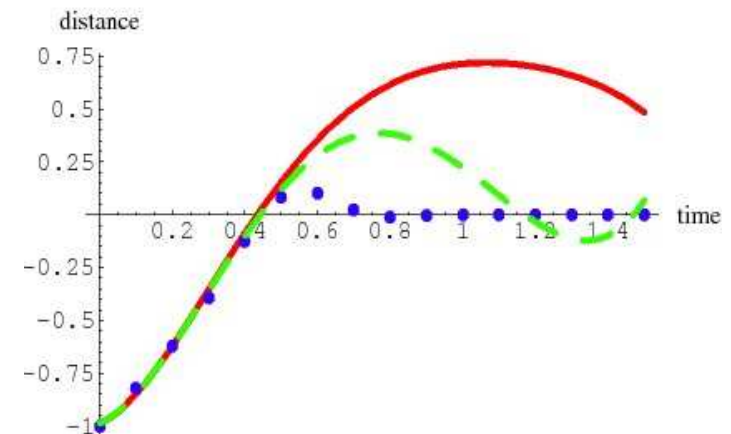
Amas du boulet :

- L'émission X montre qu'un petit amas en a traversé un plus grand
- Des forces de freinage (viscosité) ont ralenti le gaz du petit amas alors que la matière noire a poursuivi son chemin
- Modèle avec vitesse $\sim$ Mach 2 explique propriétés observées
- Echelle de temps $\sim 10^9$ ans

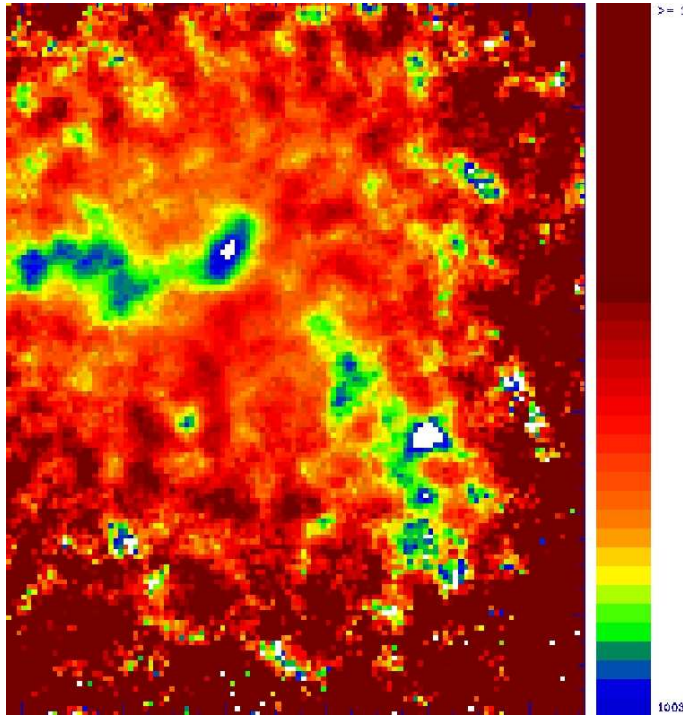
Clowe et al. 2006, ApJ 648, L109
Prokhorov & Durret 2007, A&A 474, 375



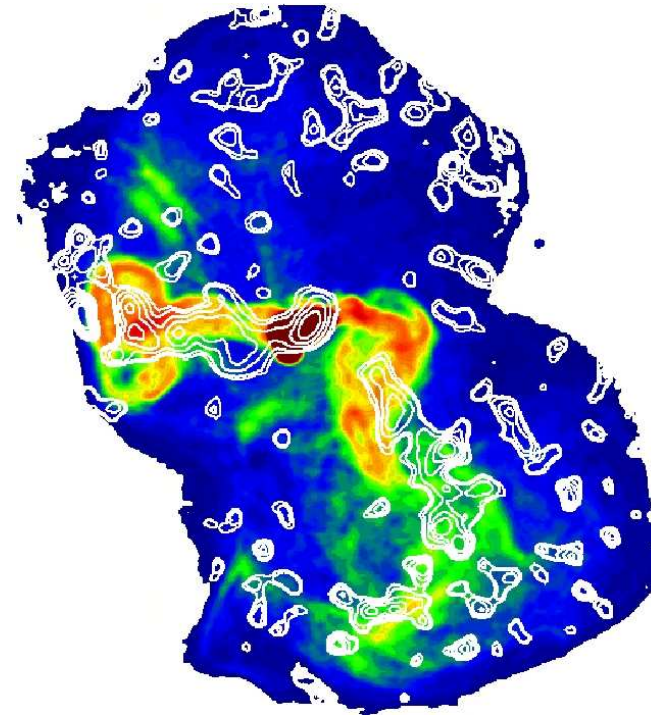
En rose : émission X observée
En bleu : distribution de
matière noire calculée



Bulles en X et en radio



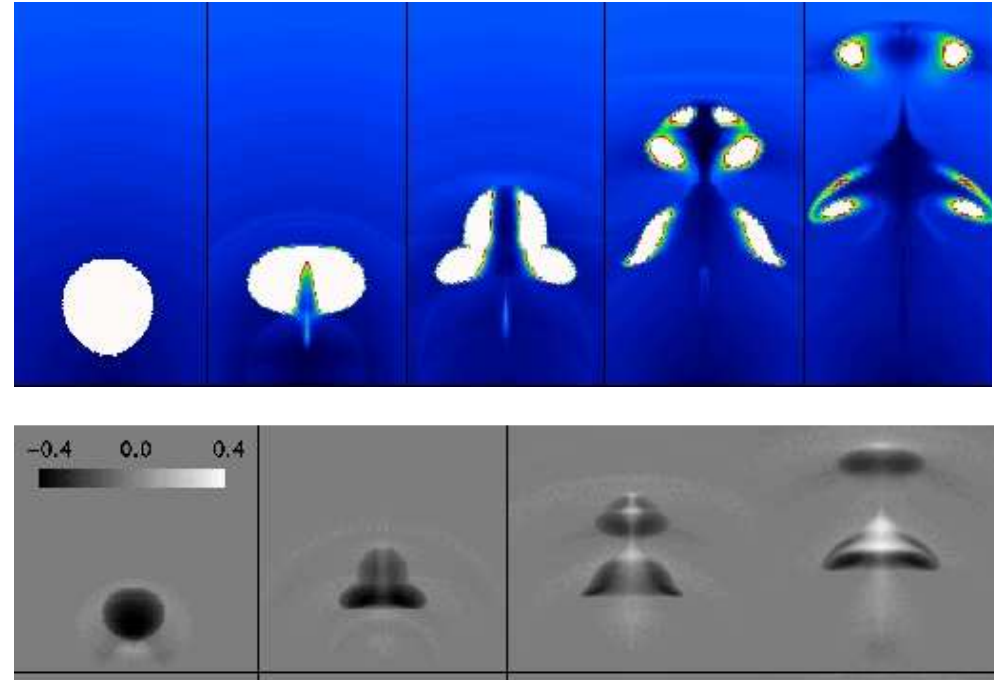
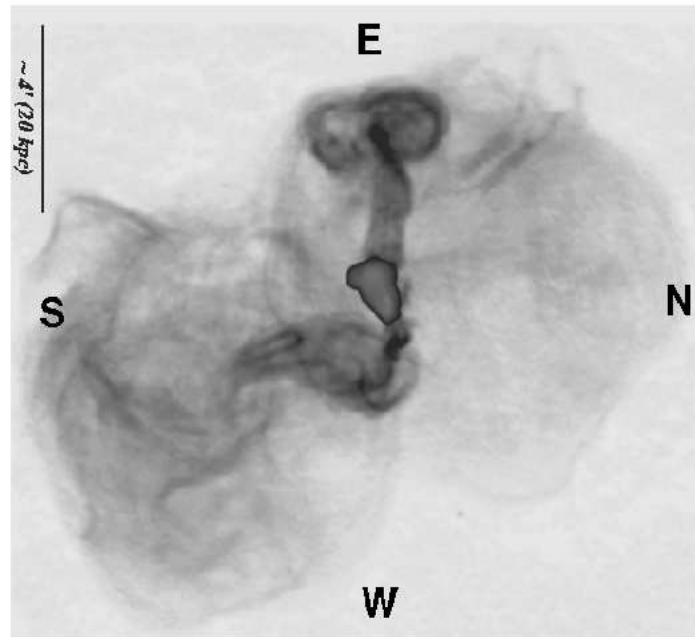
Carte en rayons X



Carte radio et contours en rayons X

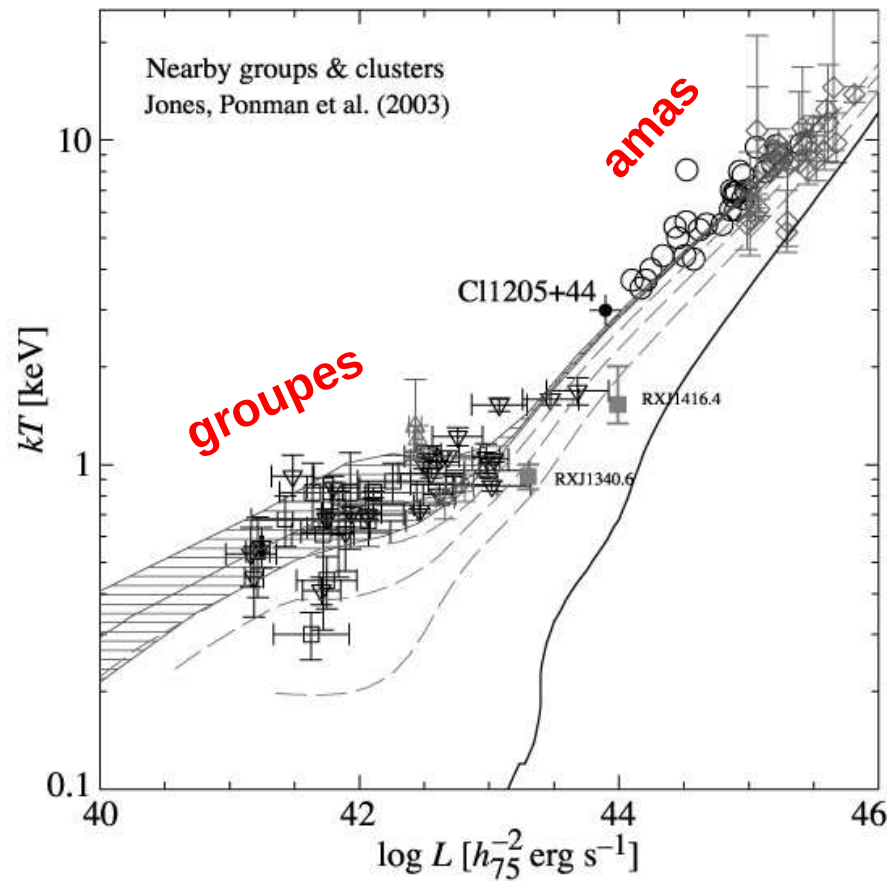
- Carte radio à 90 cm montre des “champignons” (Owen et al.)
- Image XMM-Newton présente structures similaires (Belsole et al.)
- Carte de température montre que “pieds” sont plus froids
- Ce gaz “froid” est fortement corrélé à l’émission radio

Modèle (Churazov et al.)



- Noyau actif gonfle une bulle de plasma qui “monte” et entraîne du gaz (boîtes de 20×40 and $40 \times 40 \text{ kpc}$)
- Gaz monte, s’étend et se refroidit comme le champignon d’une bombe atomique
- **$1\text{-}10 M_{\text{sol}} \text{ soulevée si bulles partent tous les } 10^7 \text{ ans}$**

Lois d'échelle



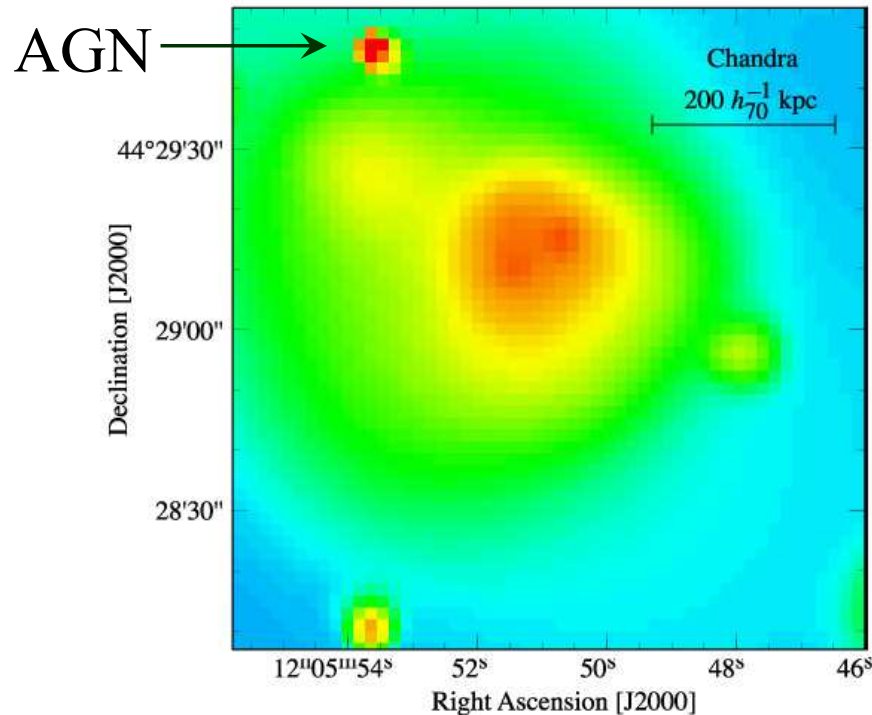
- La relation L_X - T_X et d'autres corrélations montrent une homogénéité dans les propriétés des amas
- Les groupes ne suivent pas exactement les mêmes relations

Les groupes de galaxies

Mêmes propriétés que les amas mais gaz moins chaud, luminosité moins grande



Trevor Ponman



Le groupe lointain

Cl 1205+4429

($z=0.59$)

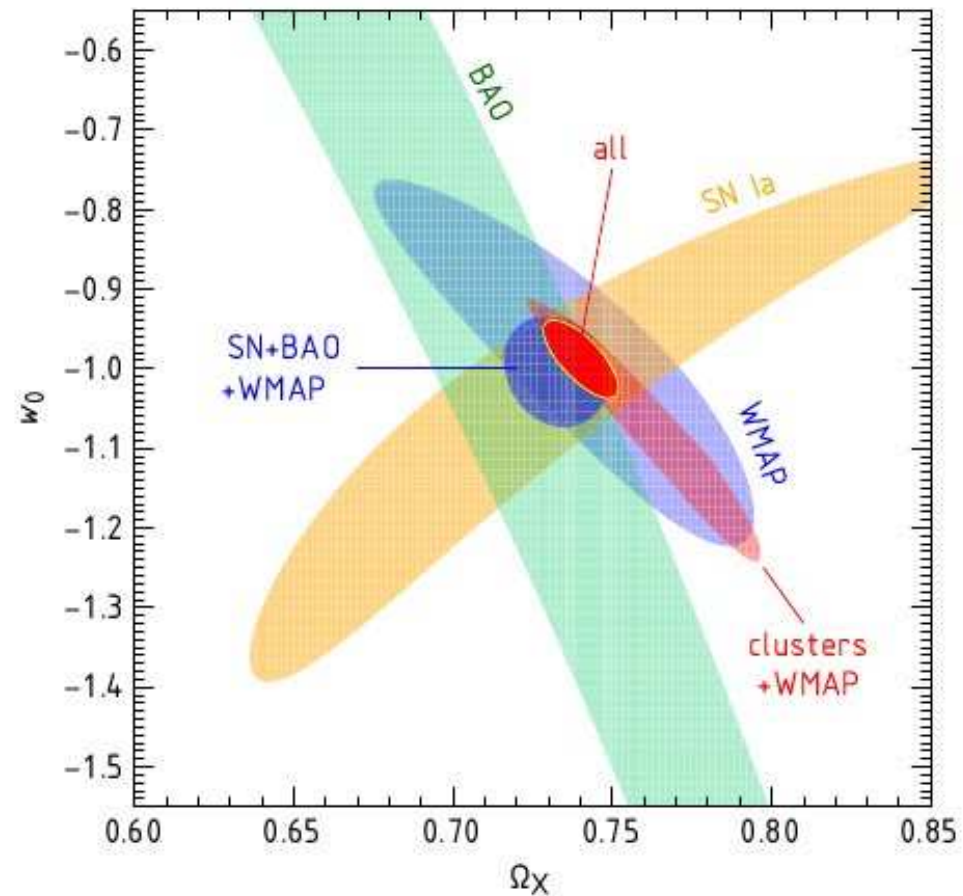
Ulmer et al. 2005, ApJ 624, 124

Quelques conclusions

- 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
- Les amas les plus froids semblent les moins perturbés
- 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
- La comparaison des cartes obtenues pour le gaz avec les simulations numériques est très importante

Conclusions (suite)

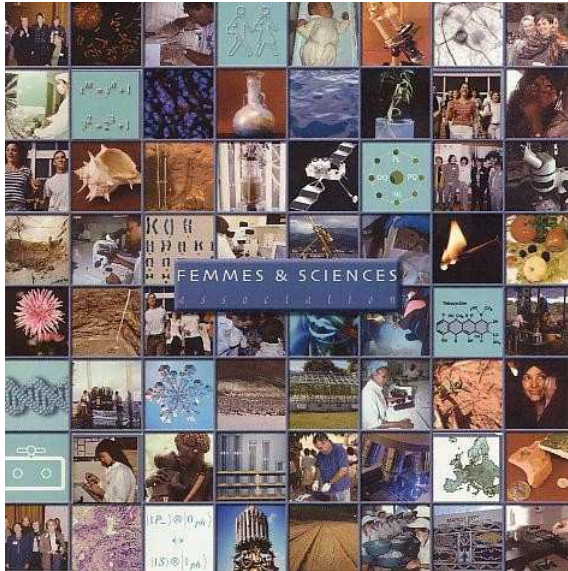
- Les amas jouent un rôle important en cosmologie pour déterminer les paramètres cosmologiques
- On observe maintenant des amas de plus en plus lointains (décalage spectral >1)
- On en connaît plusieurs à $z > 1$ où l'on approche du z de formation des amas



Association Femmes & Sciences

www.femmesetsciences.fr

femmes.sciences@orange.fr



- Promouvoir l'image des sciences chez les femmes et l'image des femmes dans les sciences
- Renforcer la position des femmes exerçant des carrières scientifiques et techniques dans les secteurs publics et privés
- Inciter les jeunes et en particulier les filles à s'engager dans les carrières scientifiques et techniques

Colloque 2009 samedi 10 octobre à Paris :

« Carrières des femmes dans la recherche publique et en entreprise : quelles solutions pour les valoriser ? » (soutien Institut Emilie du Châtelet)

Partenariat avec la Mission pour la place des femmes du CNRS