

*Spectro-imagerie X:  
cartographie de la  
température du milieu  
intergalactique dans les  
amas de galaxies.*

Hervé Bourdin,  
Università di Roma Tor Vergata

# *Spectro-imagerie X: cartographie de la température du milieu intergalactique dans les amas de galaxies.*

- *Contexte scientifique:*
  - Le milieu intergalactique (MIG-MIA)
- *Spectro-imagerie X avec ondelettes:*
  - Cartographie de la température du MIG
- *Application:*
  - Structuration de la température du MIG dans un échantillon d'amas sélectionné en brillance

# *Principaux collaborateurs..*

- *Pasquale Mazzotta*
  - Università di Roma Tor Vergata, Rome
- *Jean-Luc Sauvageot*
  - Service d'astrophysique, CEA, Saclay
- *Eric Slezak, Albert Bijaoui*
  - Observatoire de la Côte d'Azur, Nice

# *Contexte scientifique: le milieu intergalactique (MIG, MIA..)*

- *Le milieu intergalactique (MIG, MIA..)*
  - Plasma chaud, peu dense ( $n=10^{-3}\text{cm}^{-3}$ ), émetteur X
  - Composante baryonique majoritaire dans les grandes structures (10-20% de la masse totale)
- *La structuration de température du MIG révèle l'histoire de la formation des structures*
  - dynamique de formation (collisions ==> chocs, mélange)
  - thermalisation du MIG (conduction de la chaleur, turbulence ==> anisotropies de température)

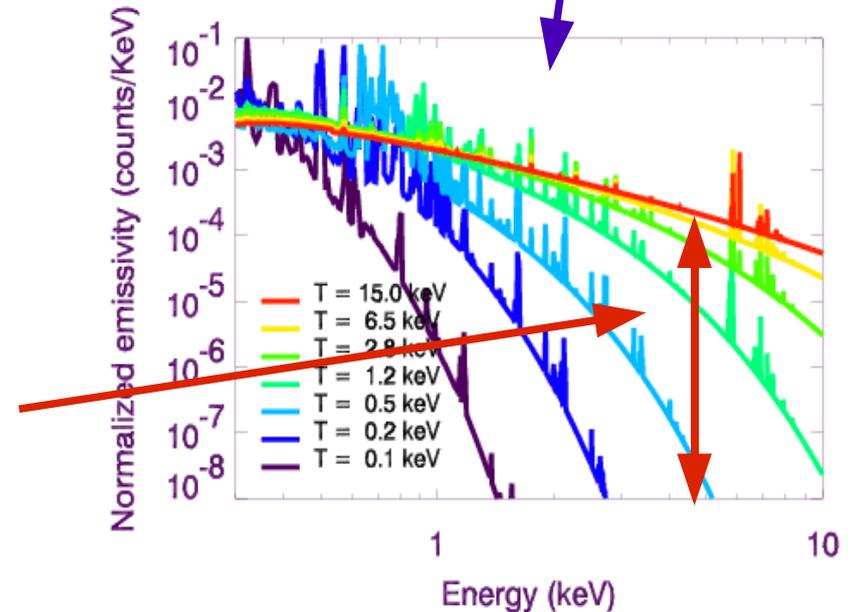
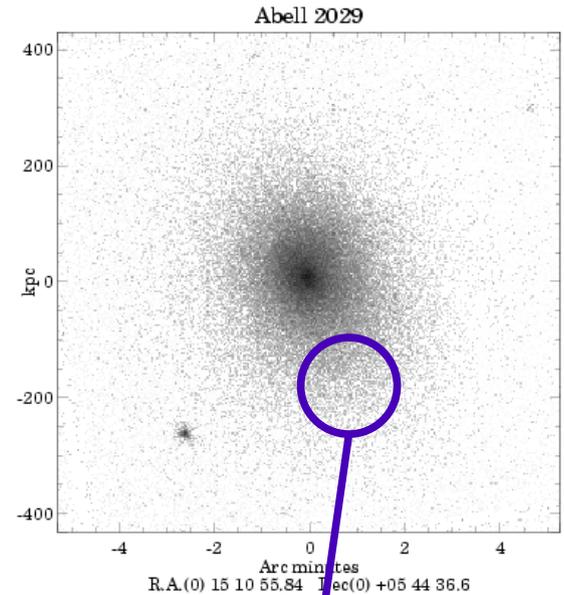
# Le signal

- *Rayonnement X du MIG*

- Rayonnement de freinage  $e^-$  ( $\propto n^2$ ) + raies d'émission

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

- Forte décroissance d'émissivité à hte. énergie  $\implies$  il faut beaucoup de photons pour mesurer la pente des spectres!!





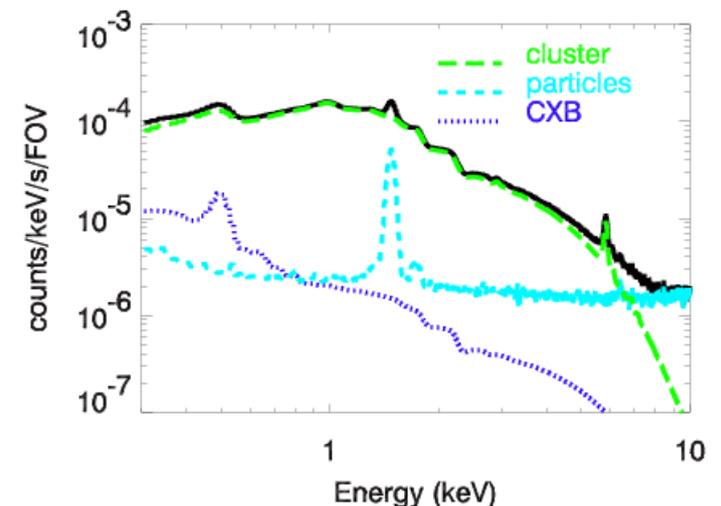
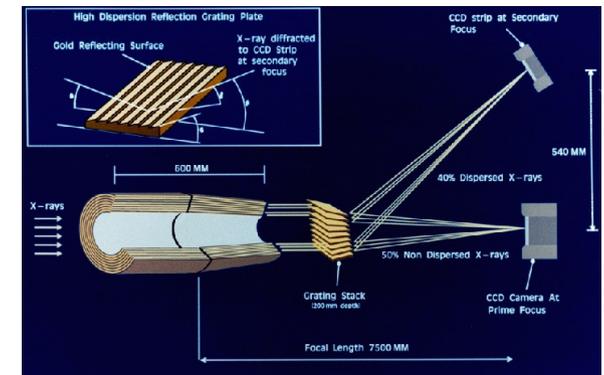
# Le satellite XMM-Newton et les caméras EPIC.

- *XMM-Newton:*

- Haute sensibilité, résolution angulaire ( $\sim 6''$ ) et spectrale (60 eV @ 1keV)  
 ==> Optimal pour la spectro-imagerie

- *3 télescopes / 3 caméras*

- CCD à comptage de photons:  
 ==> évènements (k,l,e,t);
- Réponse variable spatialement et spectralement (cf. miroirs, CCDs);
- Signal: source + fond cosmique X + fond de particules générées par le rayonnement cosmique.



# Spectro-imagerie X avec ondelettes

(H. Bourdin (Univ. Roma),

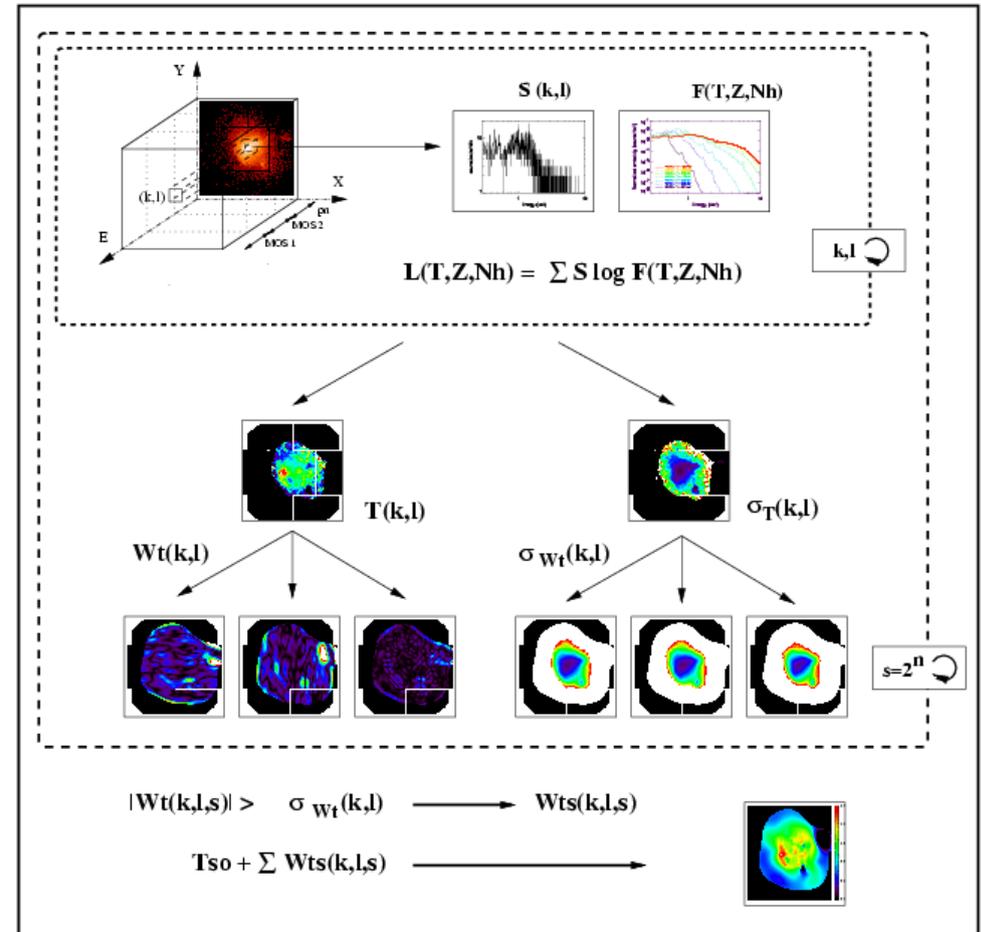
E. Slezak, A. Bijaoui (OCA), J.-L. Sauvageot (Sap-CEA))

- Analyse multi-échelle
- Spectroscopie multi-paramètres (T,Z,Nh), dans chaque élément de résolution (max. vraisemblance):  
 $\theta(k,l,j) \pm d\theta(k,l,j);$

- Filtrage passe-haut:  
 $W_{\theta}(k,l,j) \pm dW_{\theta}(k,l,j);$

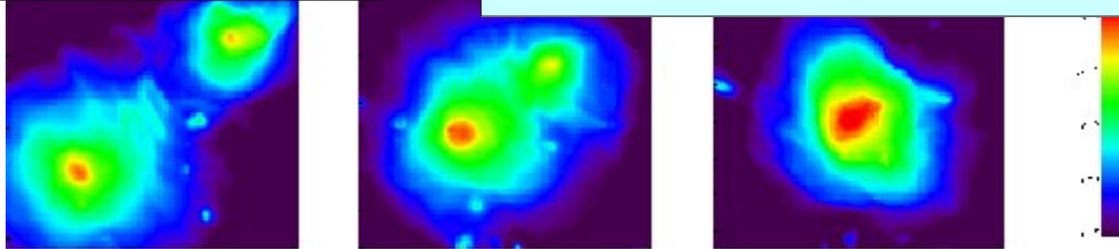
- Seuillage:  $|W_{\theta}(k,l,j)| > dW_{\theta}(k,l,j);$

- Reconstruction linéarisée des structures significatives (contrainte de regularisation).



Brillance X

Simulation hydrodynamique (AMR)  
d'amas en interaction (Teyssier, 2002)

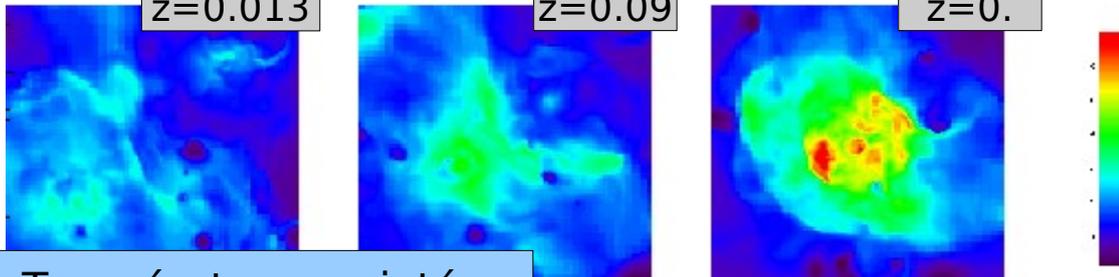


*Simulation  
d'amas en  
interaction*

$z=0.013$

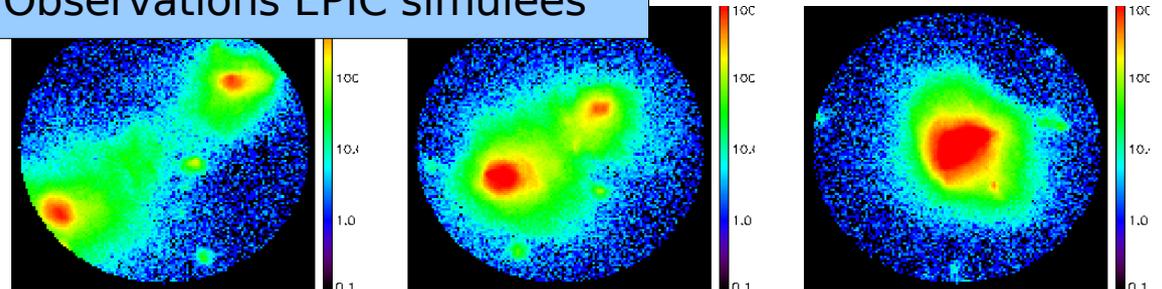
$z=0.09$

$z=0.$



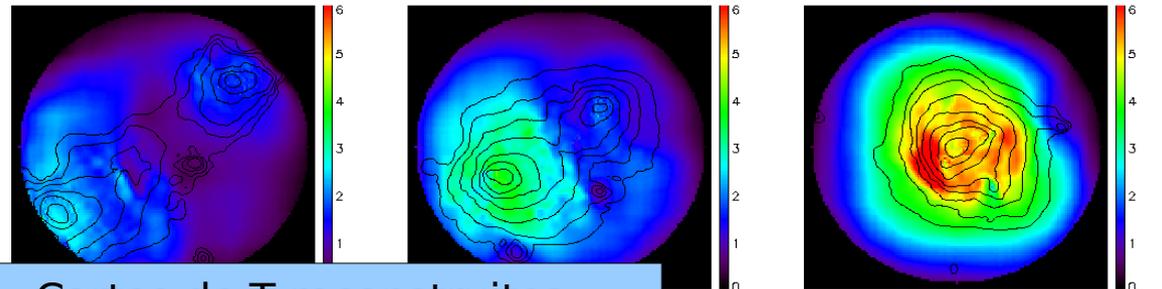
Température projetée

Observations EPIC simulées



- *Simulations  
d'observations EPIC-  
XMM ( $z=0.1$ , 60 ks):*

- *Ondelette de Haar*
- *Seuillage dur*



Cartes de T reconstruites

# Structuration de la température du MIG dans un échantillon d'amas sélectionnés en brillance

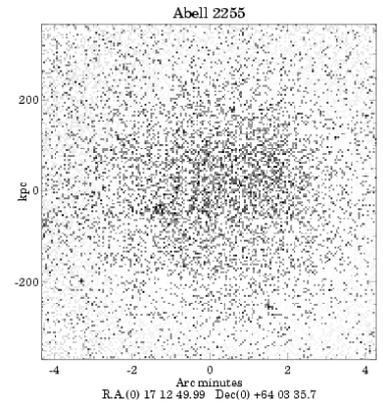
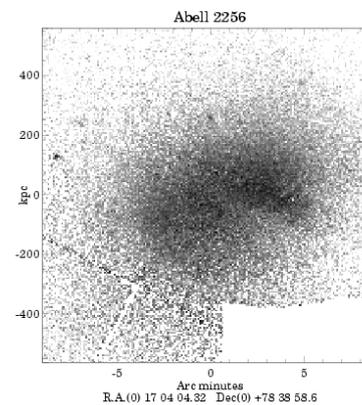
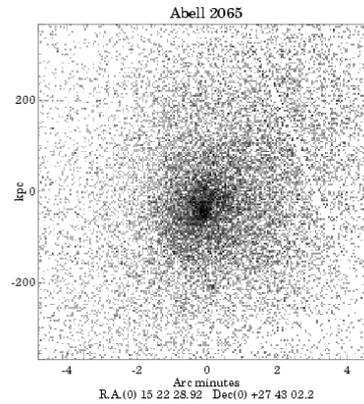
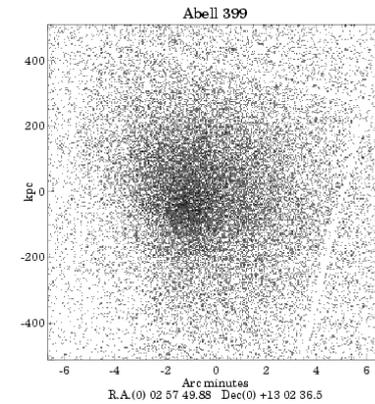
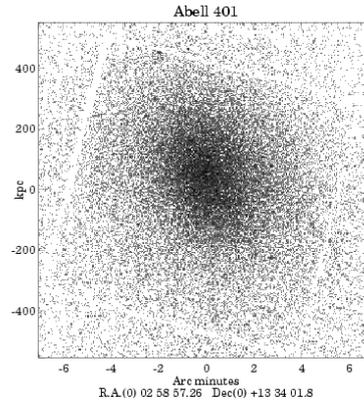
(H. Bourdin, P. Mazzotta (Univ. Roma "Tor Vergata"))

Galaxy cluster	Galactic hydrogen density column ( $10^{20}\text{cm}^{-2}$ )	Redshift	X-ray brightness ( $10^{44}\text{erg.s}^{-1}$ )	Gas mean temperature (keV)
A399	10.9	0.07	6.4	5.8
A401	10.5	0.07	9.94	7.8
A478	15.1	0.09	13.19	6.8
A1795	1.2	0.06	11.27	5.1
A2029	3.14	0.08	15.29	7.8
A2065	2.95	0.07	4.94	8.4
A2256	4.1	0.06	7.11	7.5
A2255	2.59	0.08	4.94	7.3

- *Sélection en brillance:*

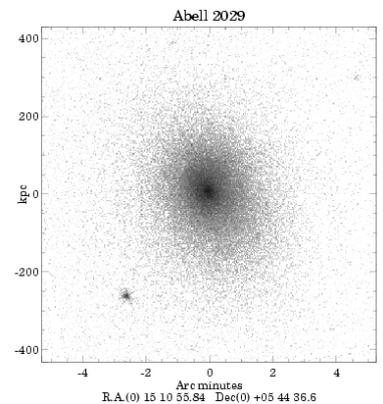
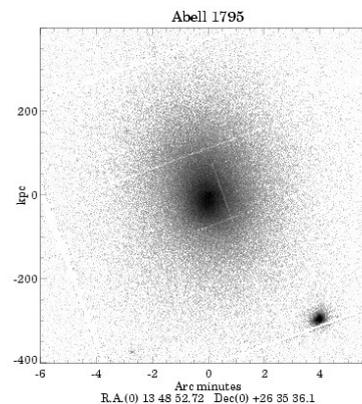
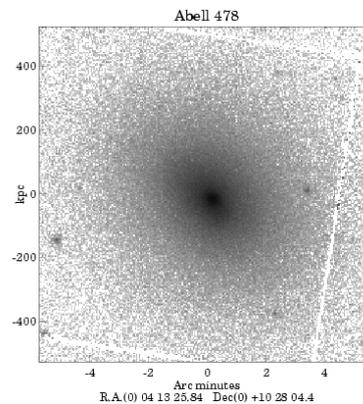
- Sondage ROSAT BCS (310 amas / hémisphère Nord);
- Adaptation au champ de vue EPIC:  
 $d\theta = [5, 10'] \implies dz = [.045, .096];$

# L'échantillon: diversité morphologique..

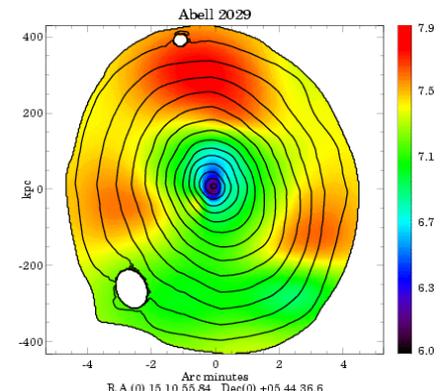
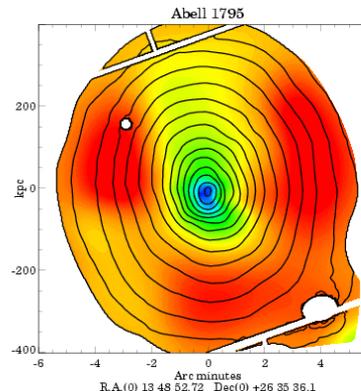
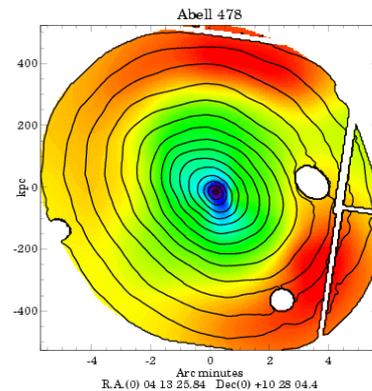
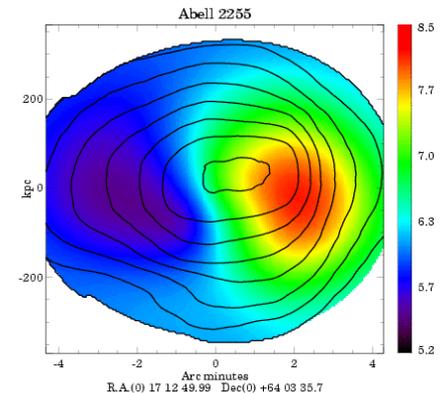
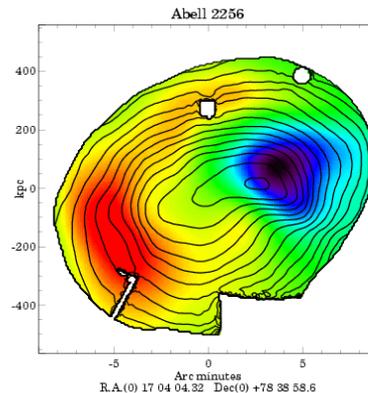
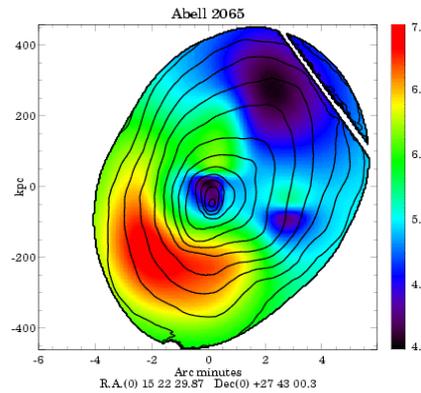
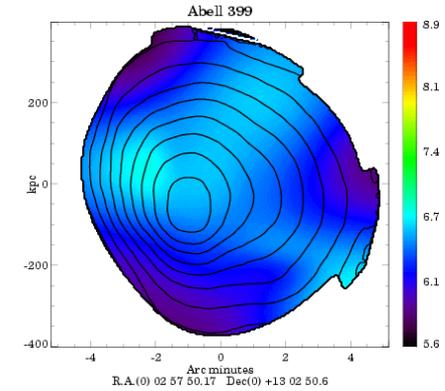
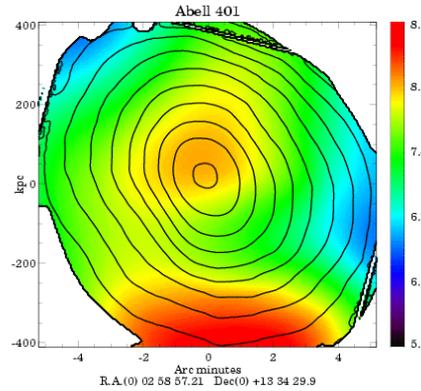


- Données EPIC-MOS
- Morphologie X:

- 5 amas irréguliers
- 3 amas relaxés



# .. et structuration thermique



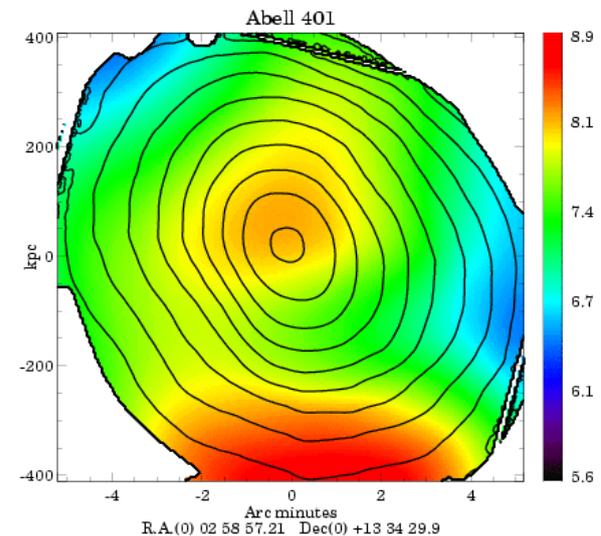
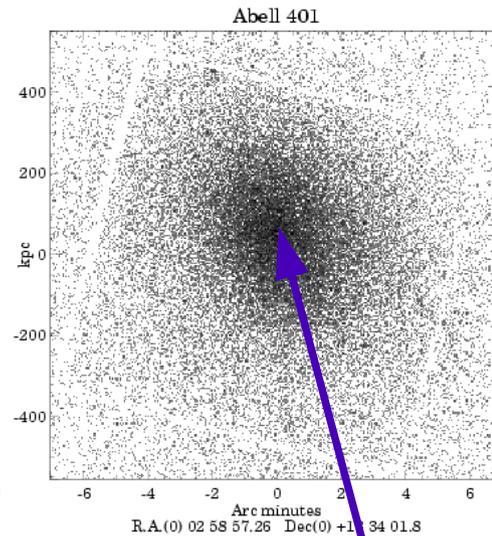
- ondelette B2-spline
- seuillage de Donoho

# Un système binaire: A401 – A399

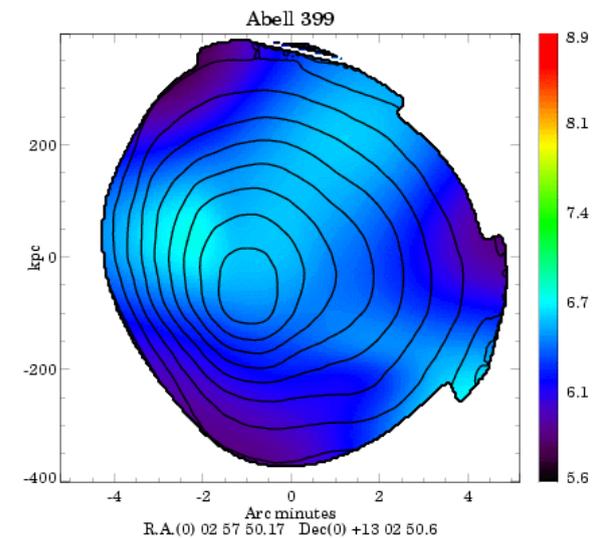
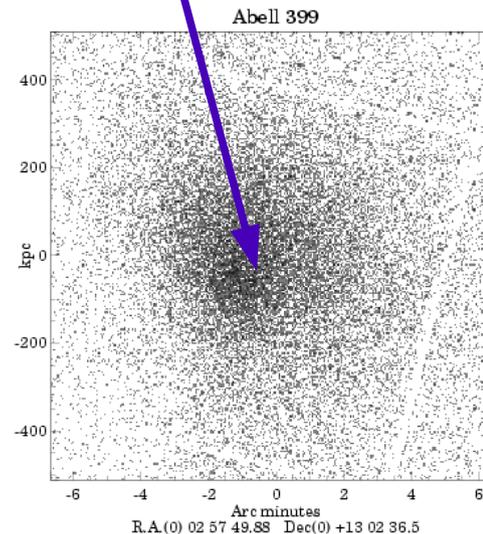
- *Alignement morphologique*
- *Excès de  $T$  et  $n$  dans le filament (Sakeliou & Ponman, 04) => légère interaction*

- *Cartes  $T$ :*

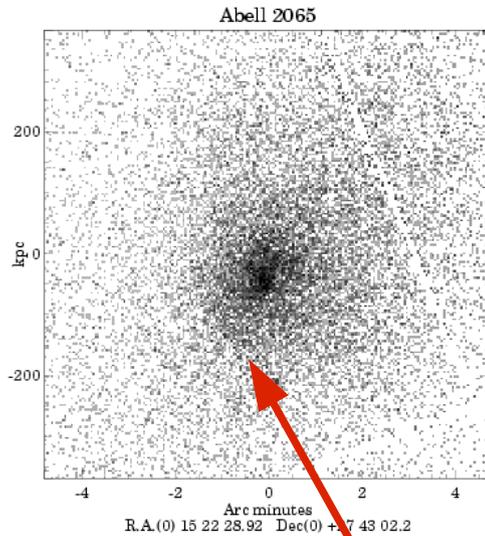
- *températures moyennes distinctes*
- *structuration irrégulière*
- *excès confirmé dans le filament*



36' (3 Mpc)



# A2065 – A2256: structuration thermique bimodale avec des indices d'accrétion



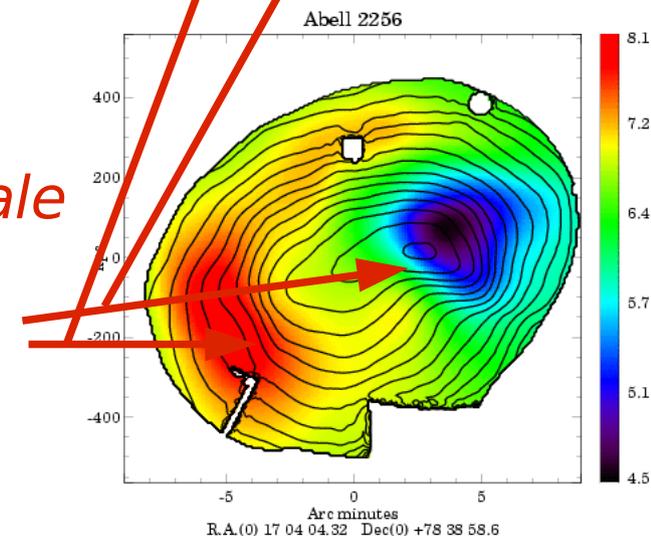
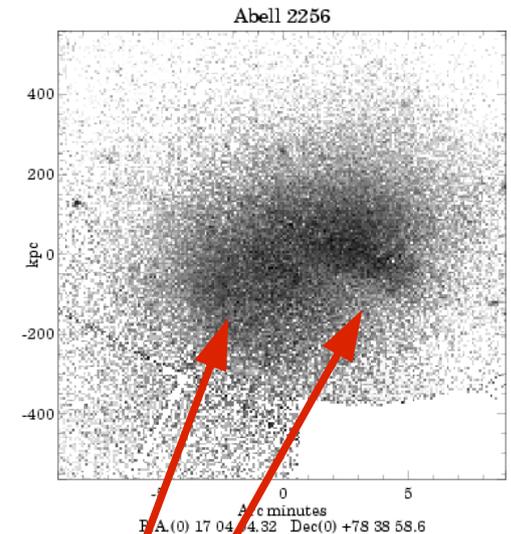
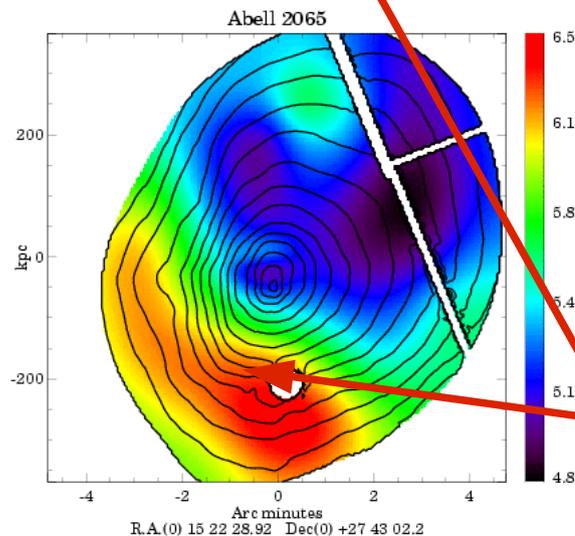
- ROSAT – Chandra obs:  
(Markevitch 99, Sun 02)

– Morphologie  
asymétrique

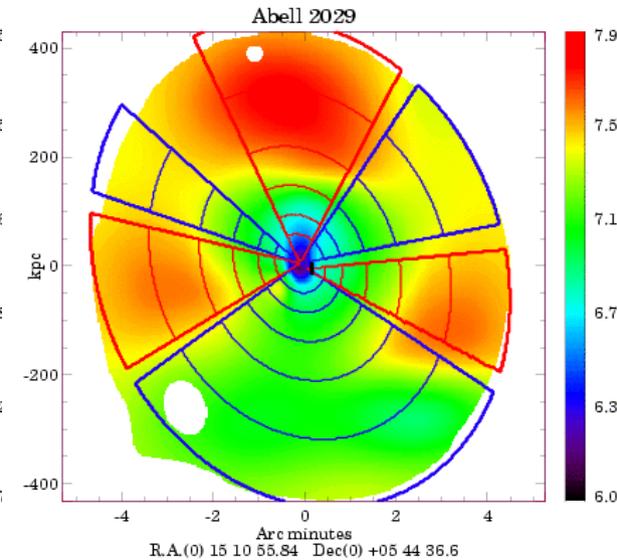
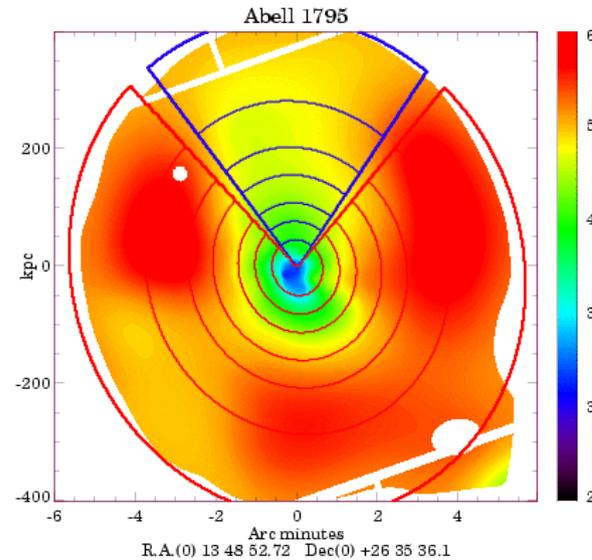
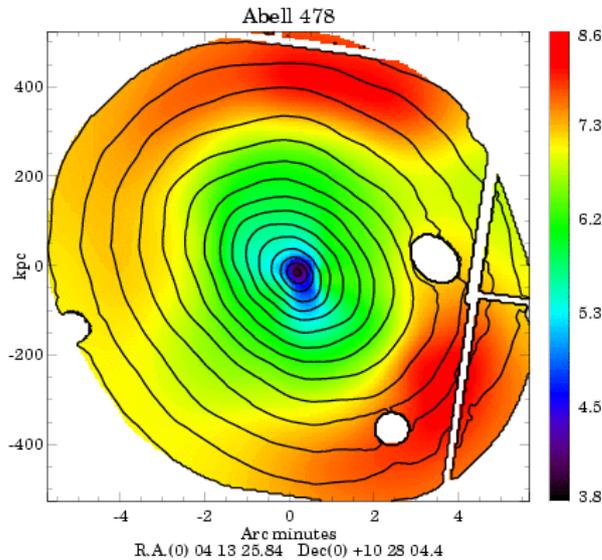
- Structuration  
centrale complexe
- Anisotropies de  
température

• *Obs. EPIC-XMM:*

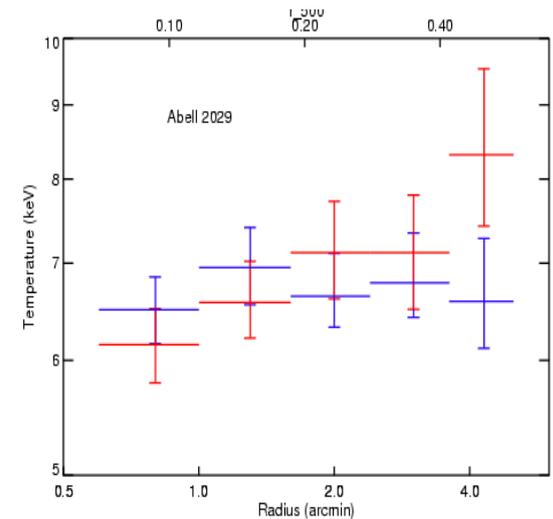
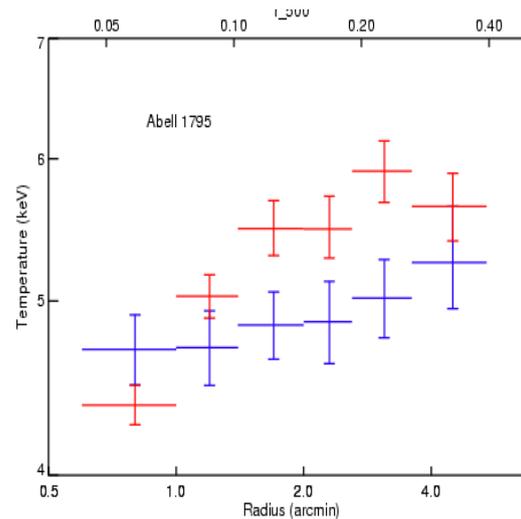
- *Structuration  
thermique bimodale*
- *Discontinuités de  
contact Lx-Tx  
==> fronts froids*



# A478, A1795, A2029: 3 systèmes relaxés avec des anisotropies de température



- $dT/T \approx 10\%$   
 $\implies$  Incertitudes sur les profils de  $T$  et masse dérivés à l'équilibre hydrostatique

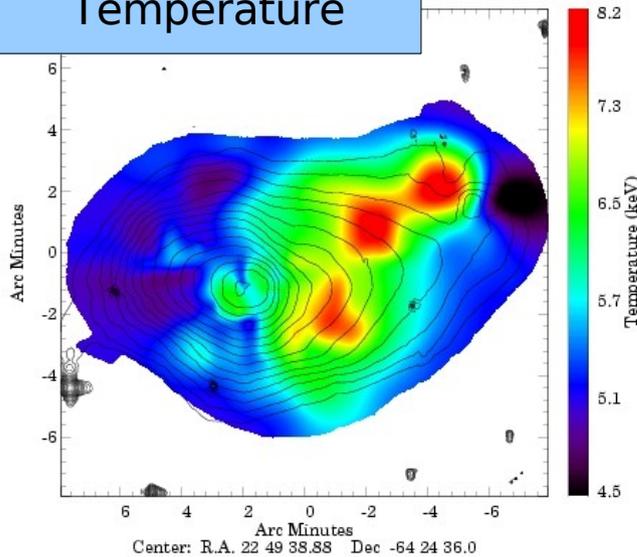


# *Résumé et perspectives*

- Mise en oeuvre d'un algorithme de spectro-imagerie X avec ondelettes (données EPIC-XMM);
- Performances en détection de structures testée sur simulations;
- Application à un échantillon d'amas sélectionné en brillance:
  - Amas en interaction: fortes irrégularités de T / structures spécifiques détectées (froids froids, ondes de chocs)
  - Amas relaxés: anisotropies de température ( $dT/T \sim 10\%$ )
    - révèle l'état de thermalisation du MIG soumis à l'accrétion continue de sous-structures
    - influe sur la précision des mesures de masse
- Perspectives:
  - Mesures d'amplitude des structures de T  
( $\Rightarrow$  amplitude des coefficients en ondelettes)
  - Cartographie d'autres observables spectroscopiques: métallicité du MIG  $\Rightarrow$  enrichissement / interaction galaxies-MIG

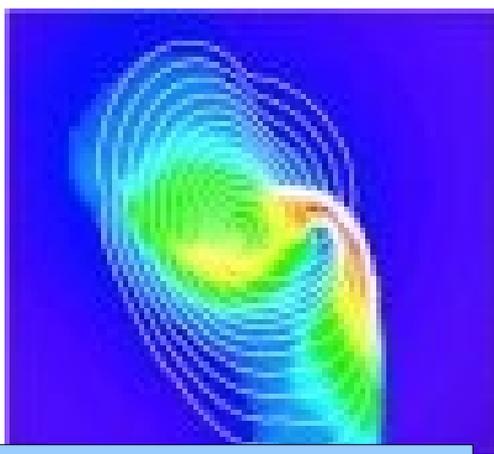
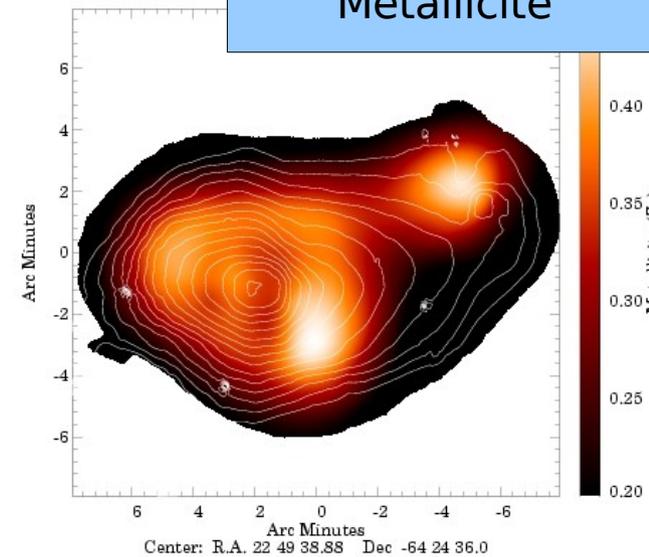
# A3921: structuration de température et métallicité du MIG

Température

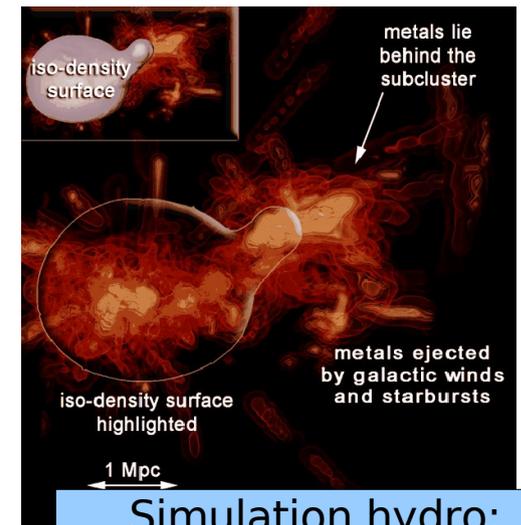


- Système double ( $M2/M1=1/3$ ) en interaction:
  - Barre de compression // axe d'interaction  
==> post-collision?
  - Défaut de métaux dans la zone d'interaction  
==> pré-collision?  
(Kapferer et col., 06)

Métallicité

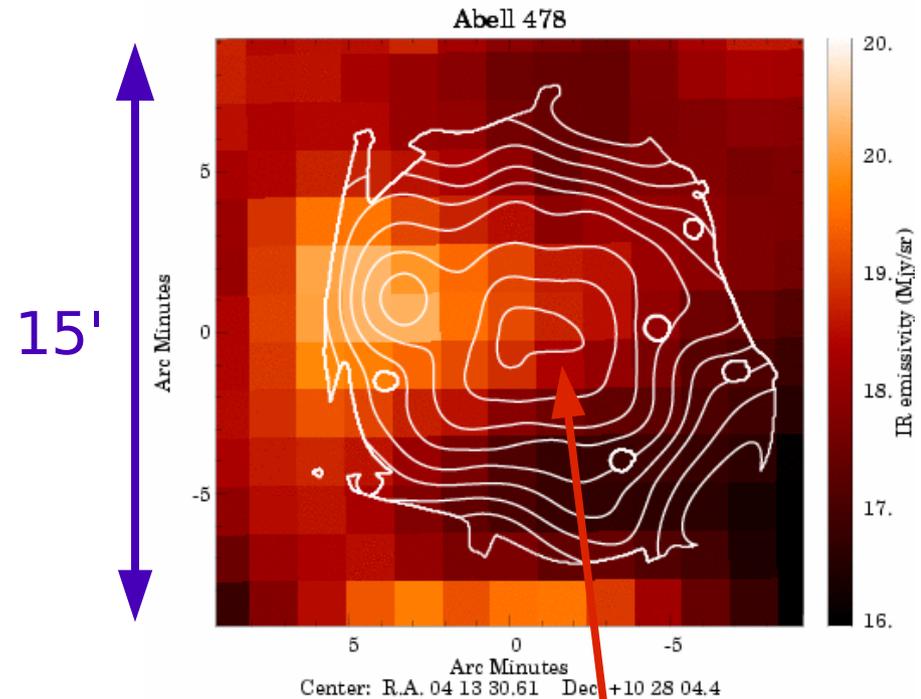
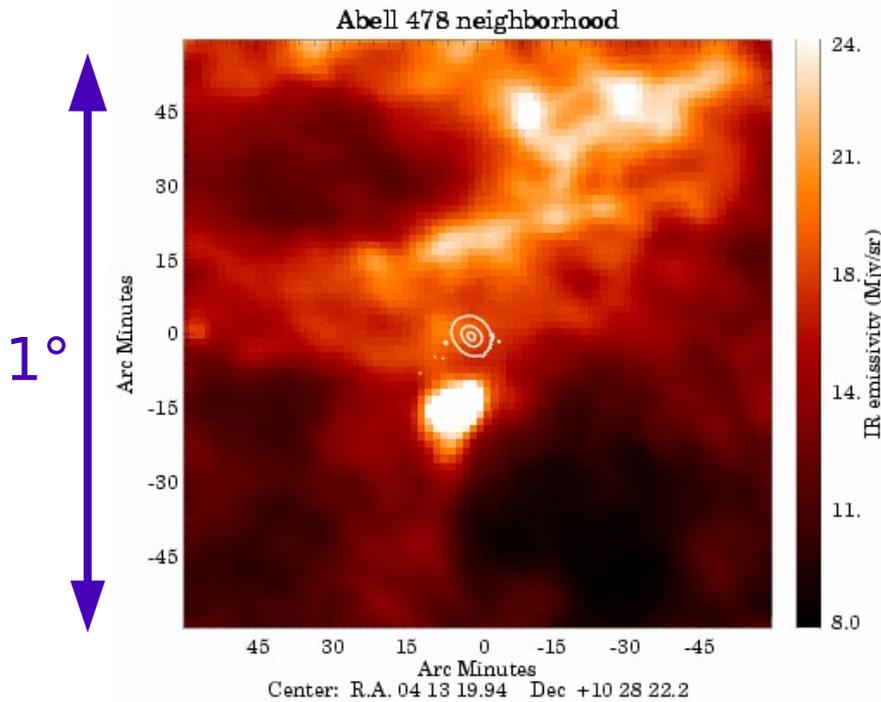


Simulation hydro:  
Ricker & Sarazin, 01



Simulation hydro:  
Kapferer et col., 06

# A478: a filamentary dust galactic foreground



- IRAS/IRIS map (100  $\mu\text{m}$ ):  
 $\langle \text{dIR} \rangle / \text{IR} \sim 100\%$  within a  $1^\circ$  field
- spatial correlation IR-Nh??
  - IR/Nh consistent with  $\tau_{\text{IR}}/\text{Nh}$  correlation (galactic dust at 17.5K, Boulanger (1996)),
  - but  $\tau_{\text{IR}}/\text{Nh}$  correlation scatters in high Nh regime (cf. molecular gas?).

X-ray estimated Nh