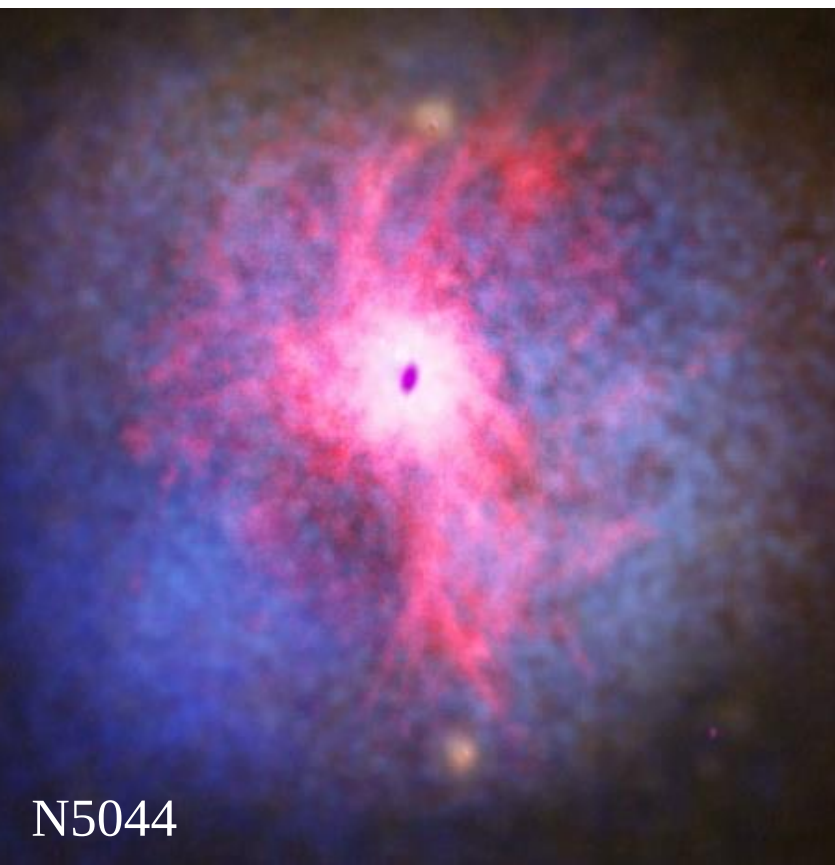




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Le gaz chaud intra-amas



N5044

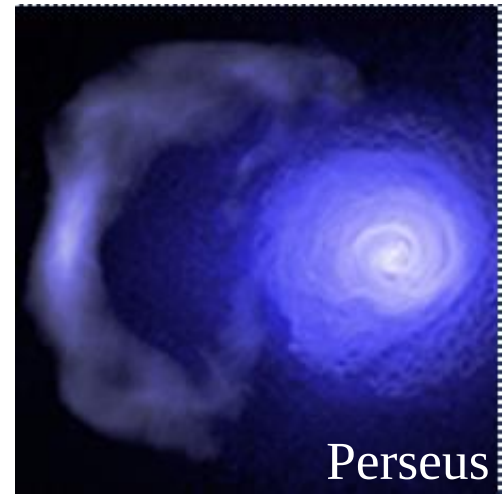
Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Un plasma très utile

Le gaz chaud contient une part significative des baryons (**dominante** pour les amas les plus riches)

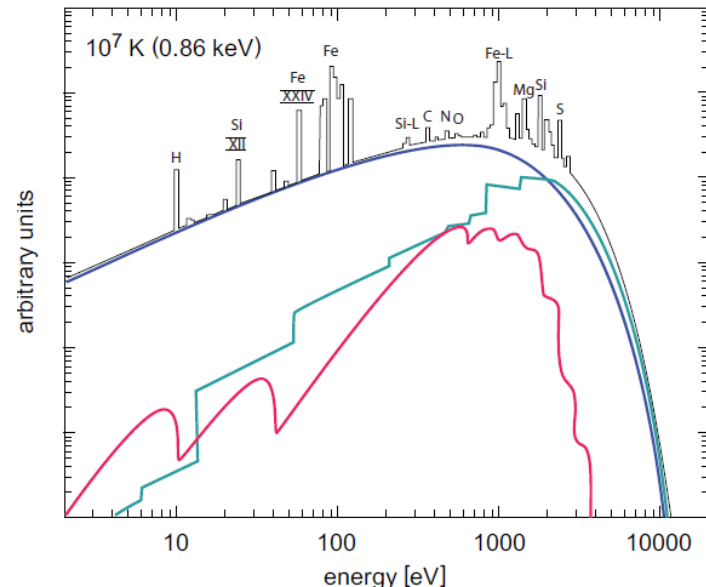


Structure thermique: **trace fossile** de la formation de l'amas
Énergie non-gravitationnelle, feedback des supernovae, AGN

Spectres de raies en rayons X: abondances
Traceur de la matière noire
(équilibre hydrostatique)

Plus de la moitié sont des systèmes **relaxés, à coeur froid**

Comment le gaz se refroidit, empêché par les phénomènes de feedback?



En quelques chiffres

Températures $T=1-10\text{keV}$ soit 10^7-10^8 K , $\rightarrow \lambda_D \sim 1\text{km}$ (plasma parfait)

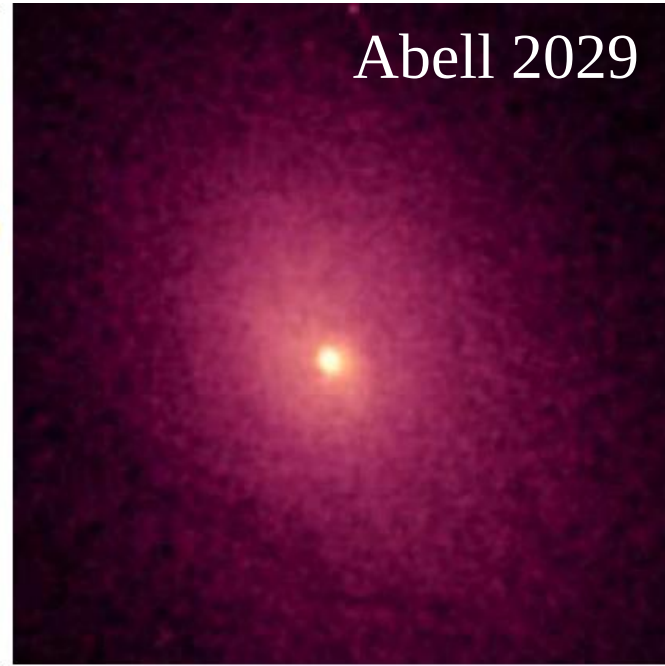
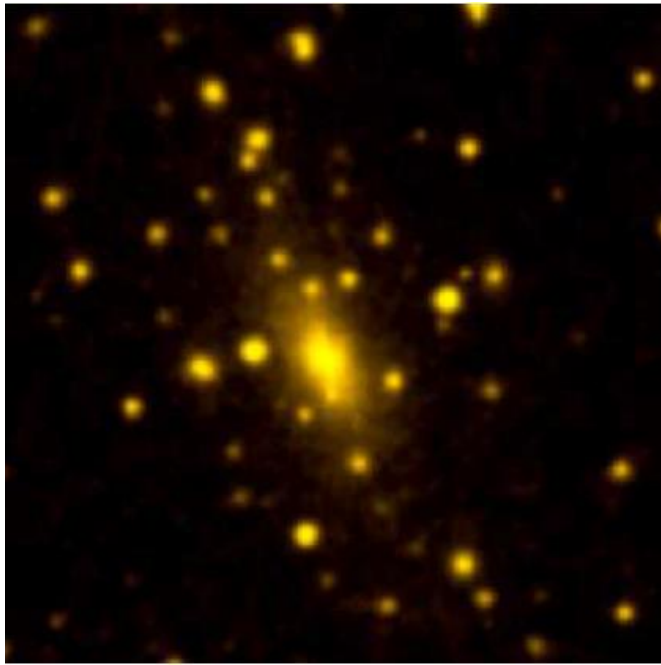
$n \sim 10^{-3} - 10^{-1}\text{cm}^{-3}$ $L_X \sim 10^{-2} - 10^{-4} L_{\text{opt}}$

Comparer à $n \sim 10^{-8}\text{cm}^{-3}$ dans l'Univers

$M_{\text{gas}} \sim 5-10 M_{\text{gal}}$ $B \sim 0.1 - 10\mu\text{G}$

Métallicité $Z \sim 0.3 Z_{\odot}$, enrichi par les supernovae

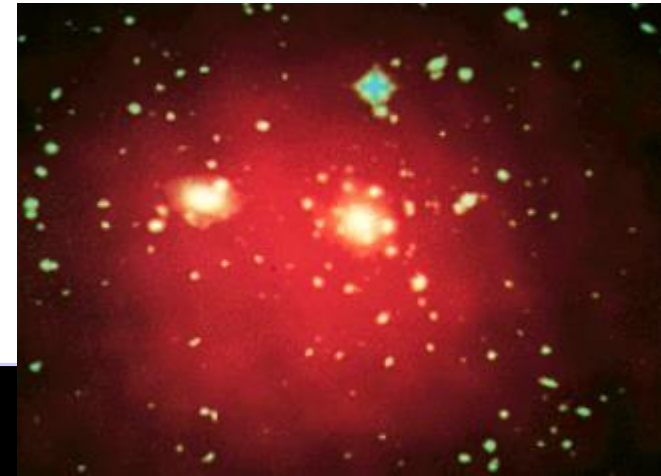
Enorme BCG au centre



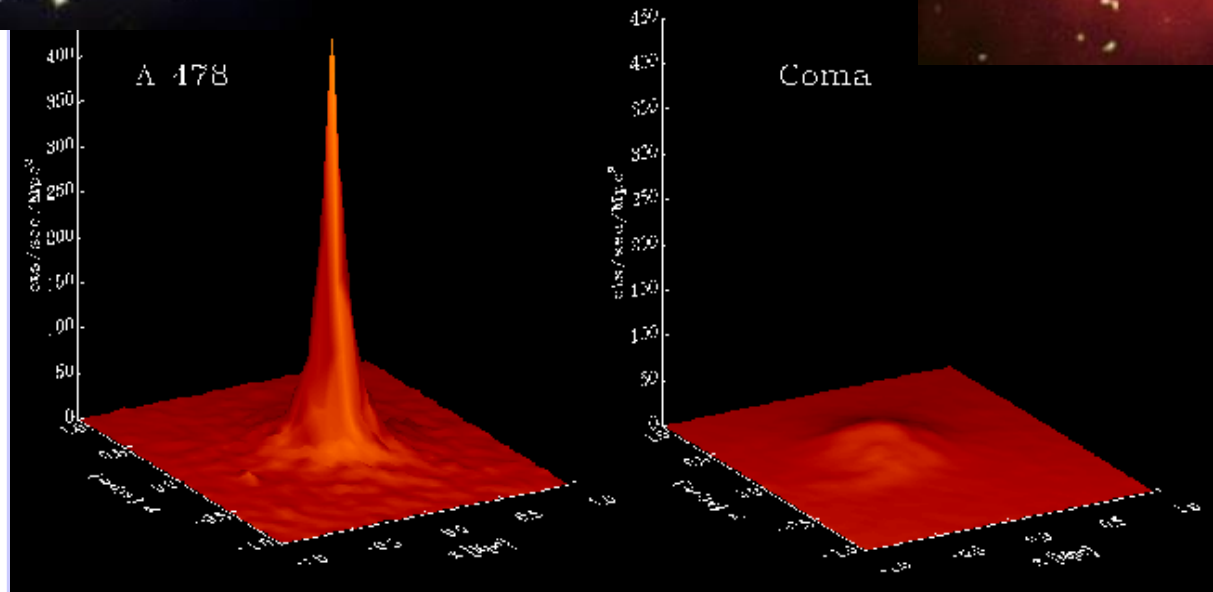
Cœur froid (relaxé) ou non

Deux catégories d'amas:

- (1) Relaxé, à l'équilibre, BCG centrale, le centre se refroidit (2/3)
- (2) Perturbé, fusion entre deux sous-amas, pas de centre (1/3)



Intensité
Rayons-X



Pourquoi (et où) le gaz se refroidit?

$$L_X \approx n_{\text{gas}}^2 T_g^{1/2} \text{ Volume}$$

$$E \approx n_{\text{gas}} K T_g \text{ Volume}$$

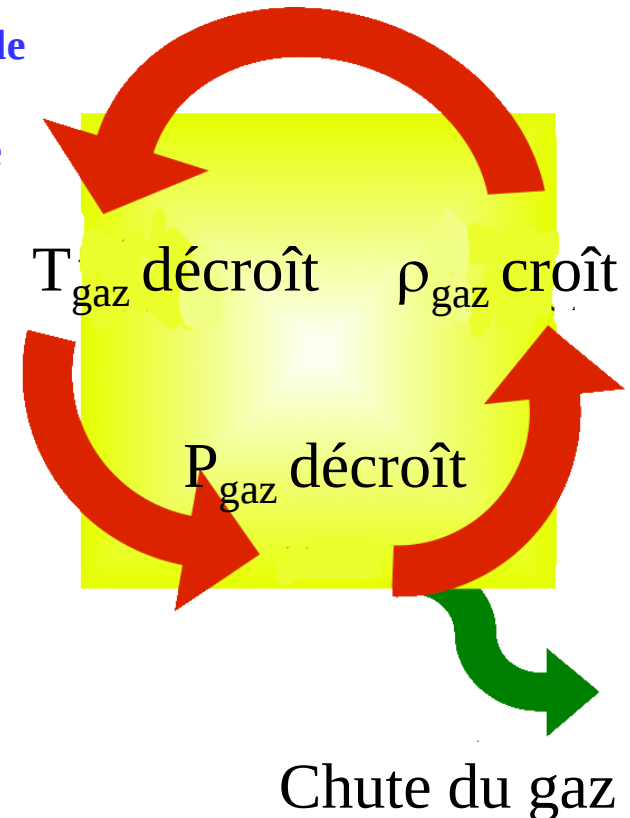


$$t_{\text{cool}} \approx E/L_X \approx T_g^{1/2} n^{-1}$$

Aux grands rayons, n_g faible $\rightarrow t_{\text{cool}} > t_{\text{Hubble}}$

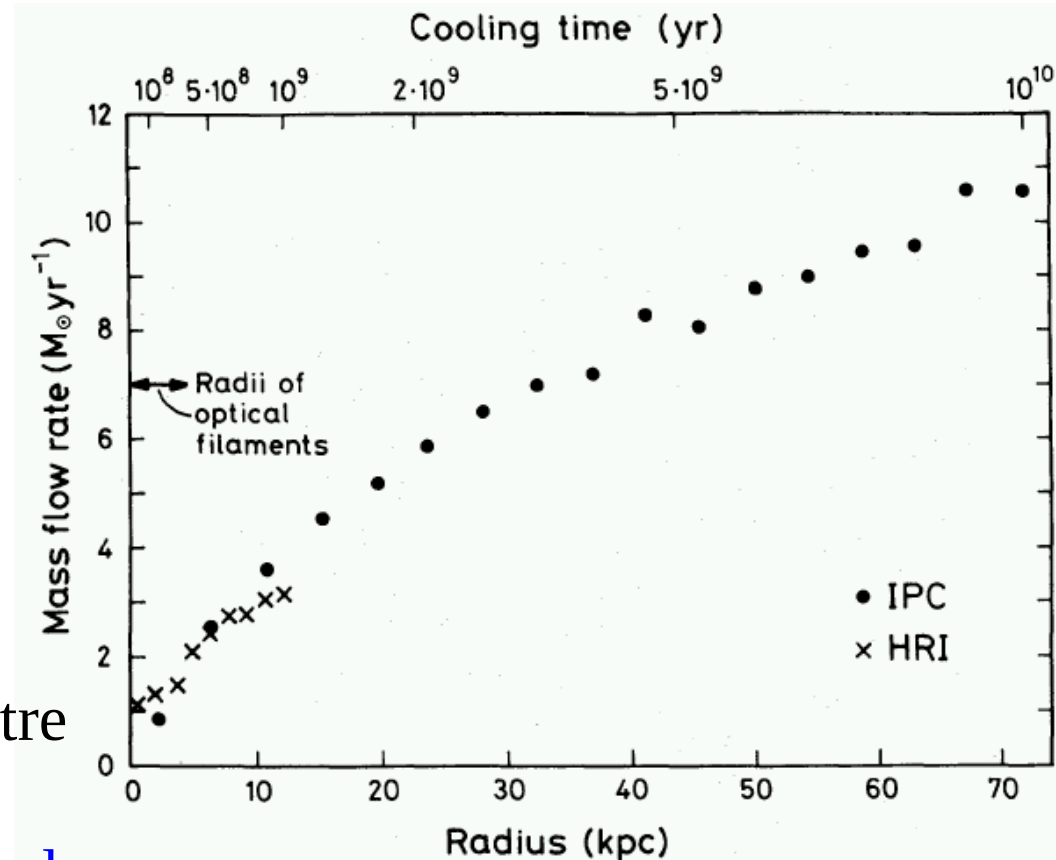
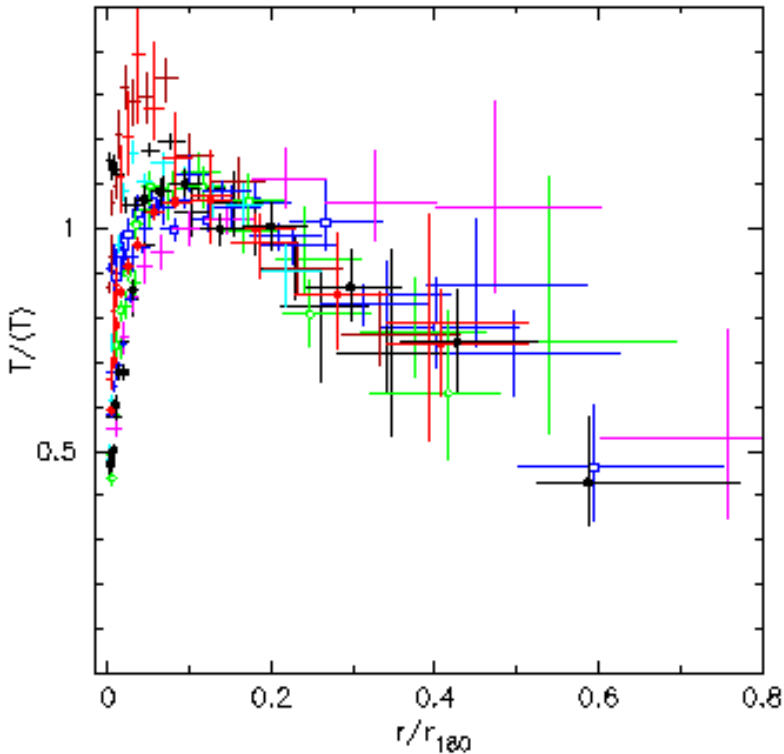
Au centre, n_g grand $\rightarrow t_{\text{cool}} \sim 10^8 \text{ans} < t_{\text{Hubble}}$

Si la température décroît, la pression décroît,
le gaz n'est plus supporté par la pression,
il tombe au centre. La densité croît, et
**le gaz se refroidit de plus en plus, et entre
dans une boucle sans fin**



Paradigme du « cooling flow », jusqu'en 2002

Stewart et al 1984



Taux de chute du gaz vers le centre
Jusqu'à $1000 M_{\odot} / \text{an}$!

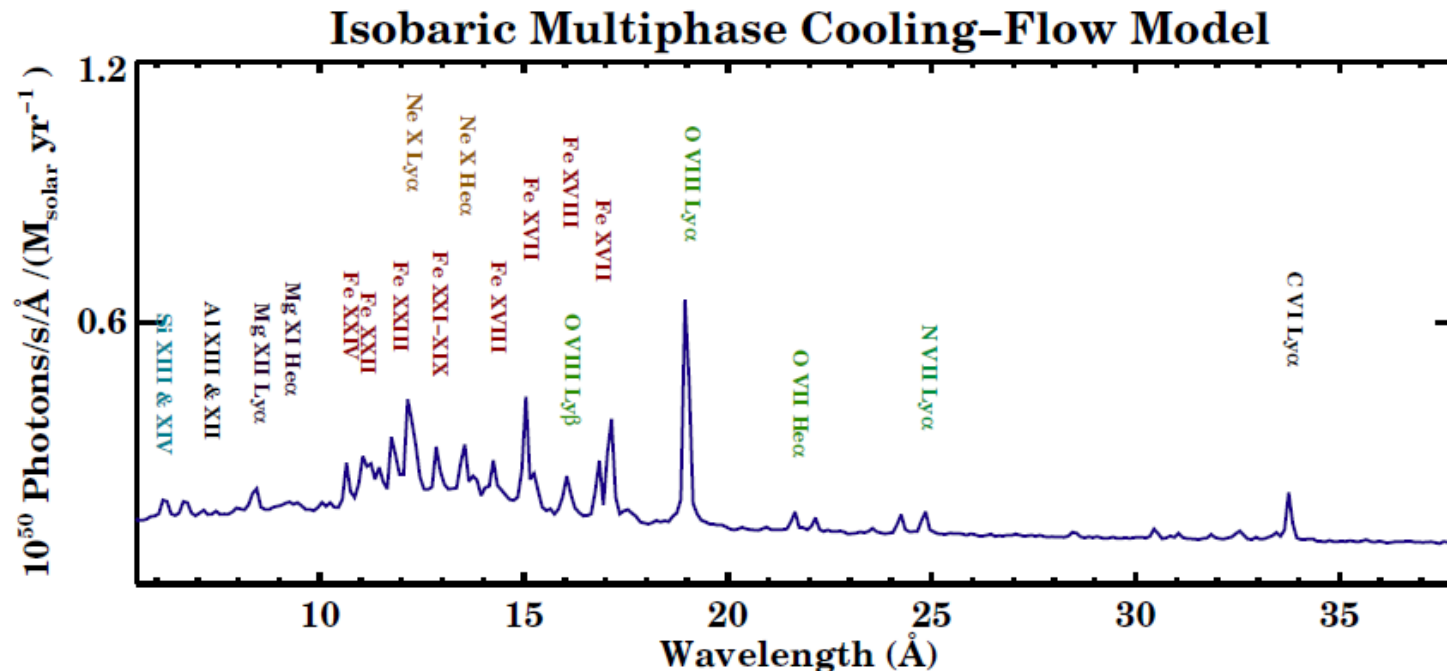
Absorption? Conduction de la chaleur

Des parties externes vers le centre?

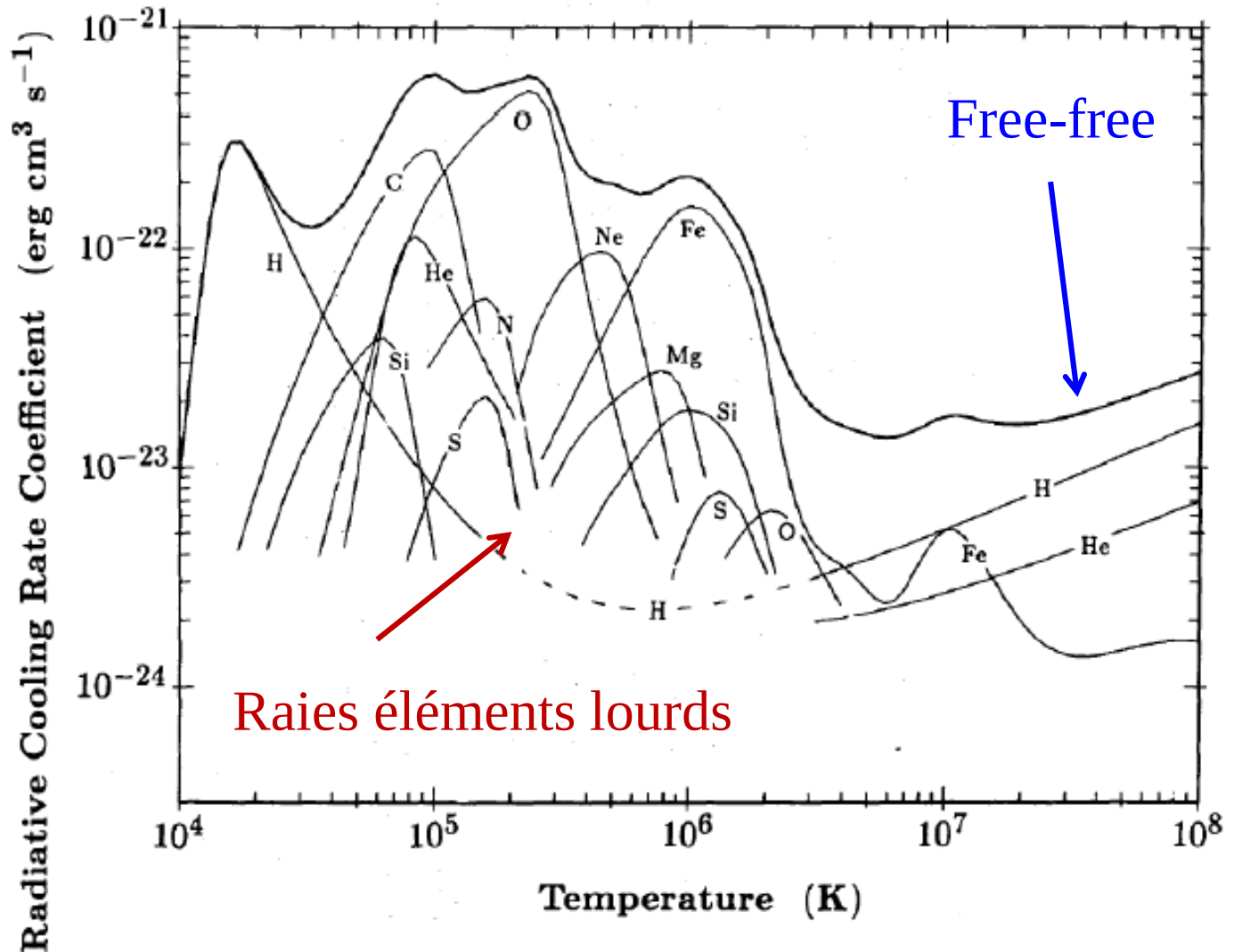
Champ magnétique bloquant? Anomalies d'abondances, etc...

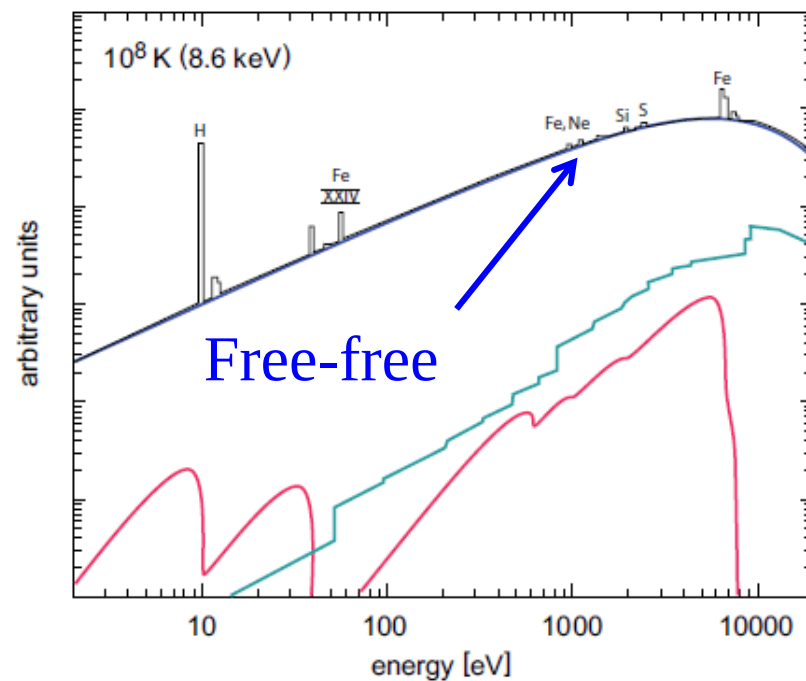
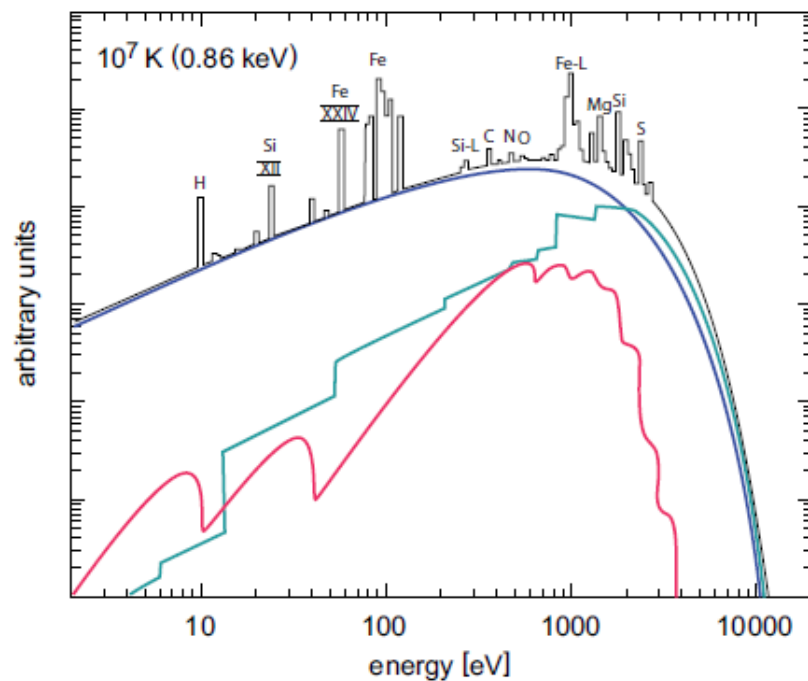
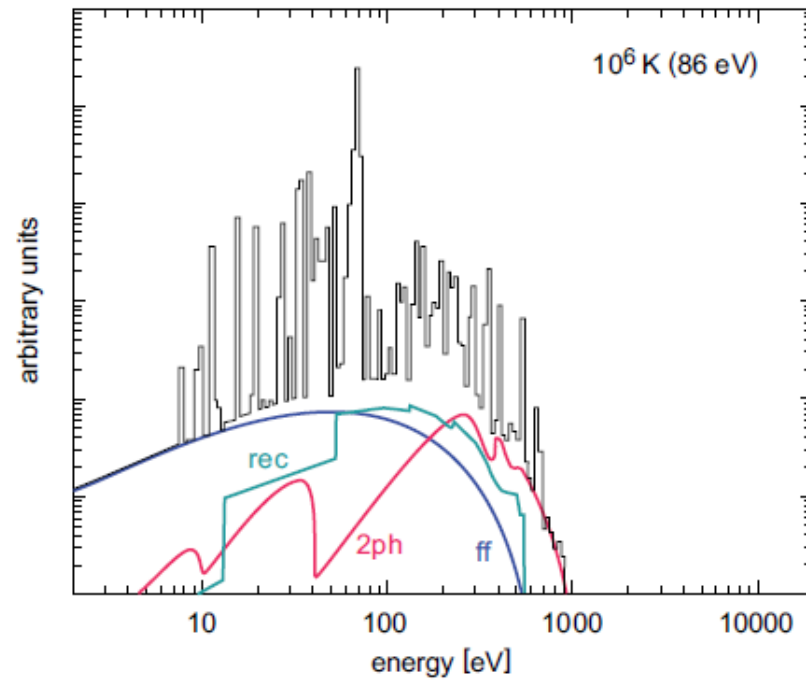
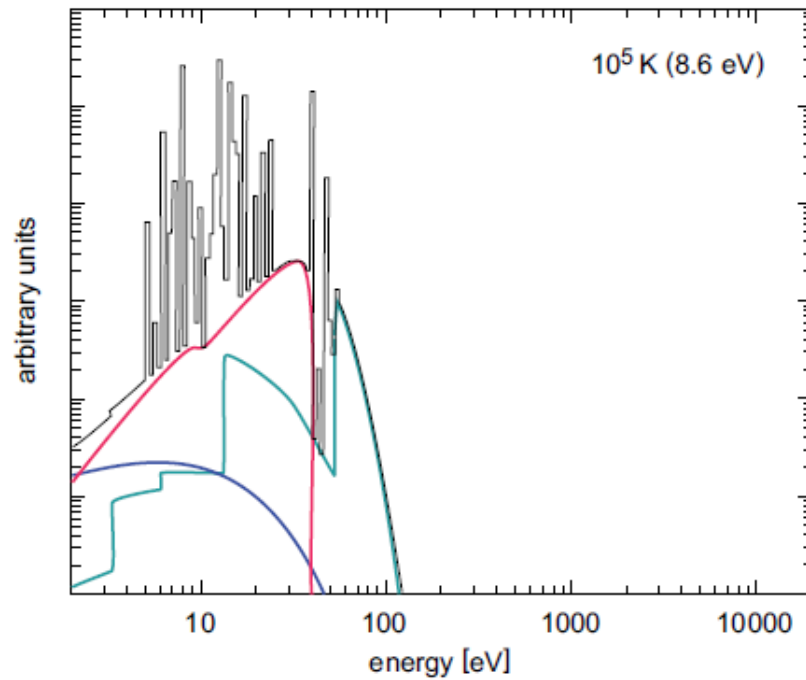
Le problème des Cooling Flows

- Où va le gaz qui se refroidit?
- La galaxie cD centrale dans les amas à coeur froid ont bien du gaz plus froid et forment des étoiles, mais les taux sont $\sim 1-10\%$ du **taux de refroidissement en X**
- Spectres de XMM-Newton et Chandra $\rightarrow$ les raies attendues du gaz en-dessous de $\sim 10^7$ K ne sont pas observées!

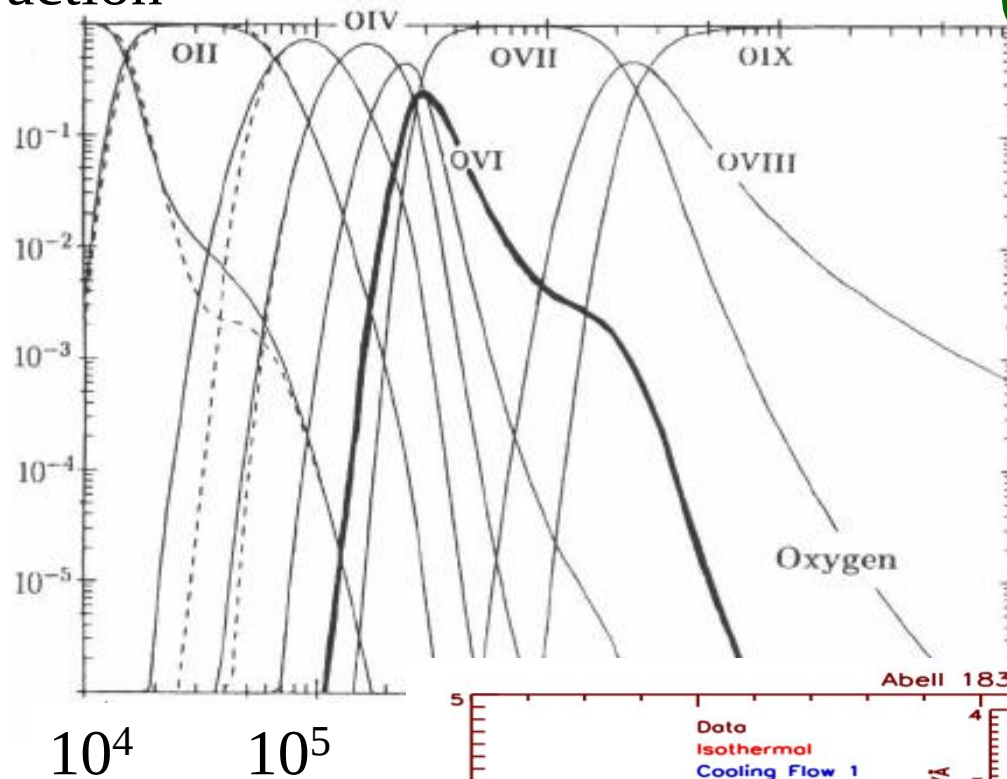


Les raies dominant aux faibles T





Fraction

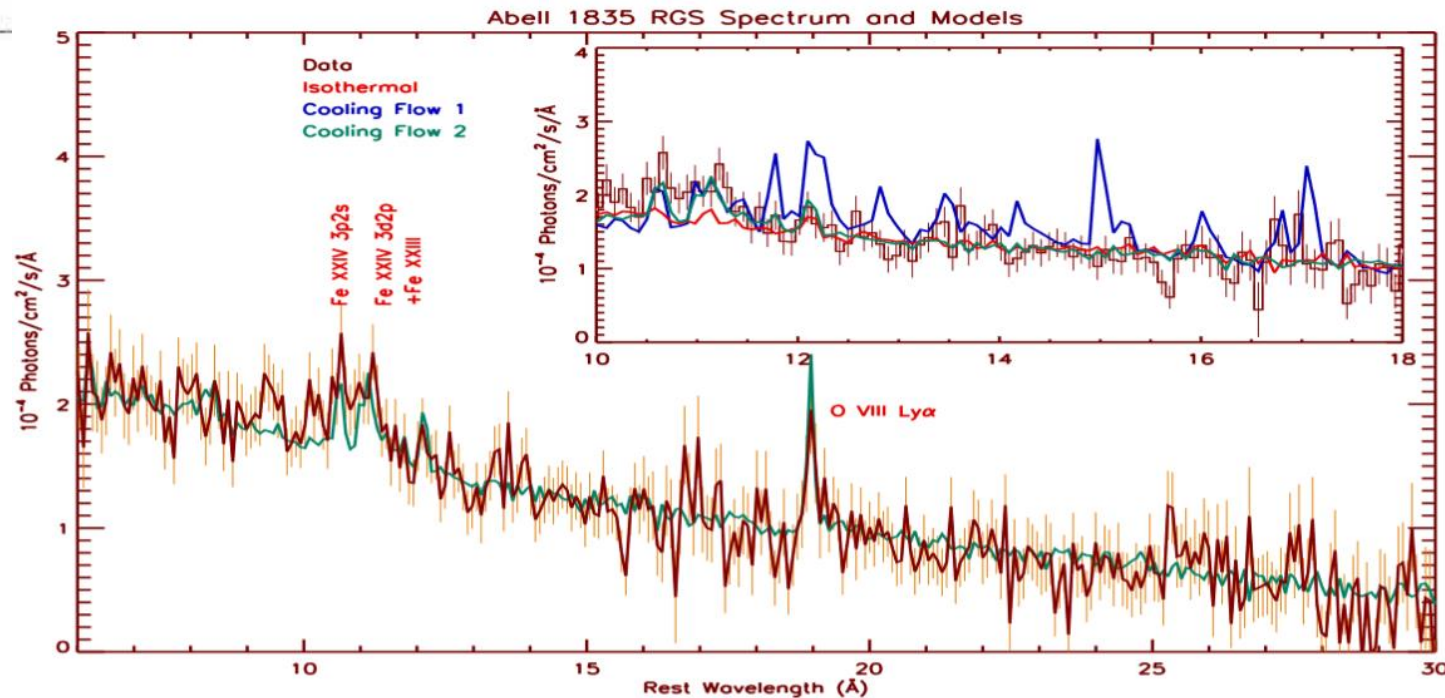


Chaque ion intervient
en fonction de T

OVIII
FeXXIV

Bohringer 2009

Les raies
attendues
ne sont pas
observées
Peterson +01

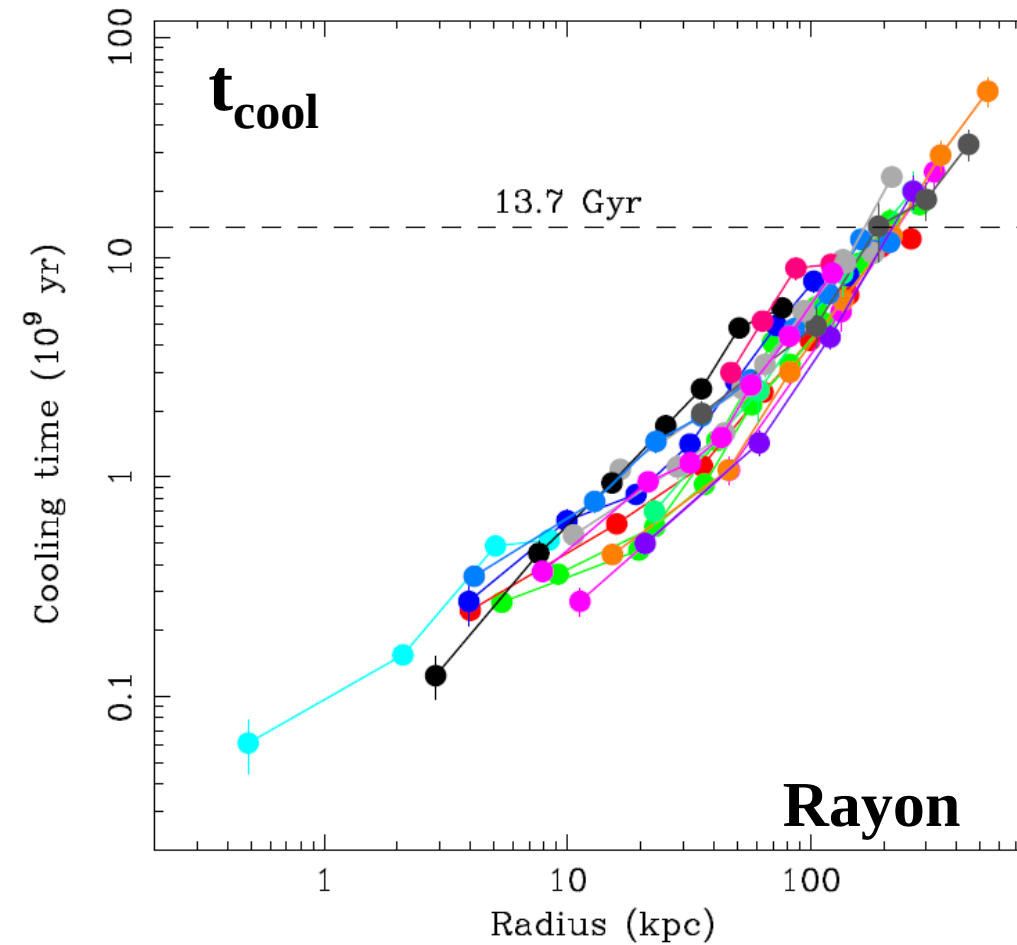
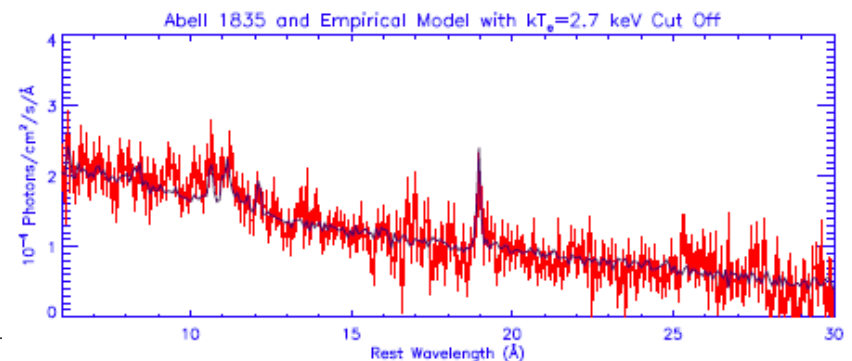
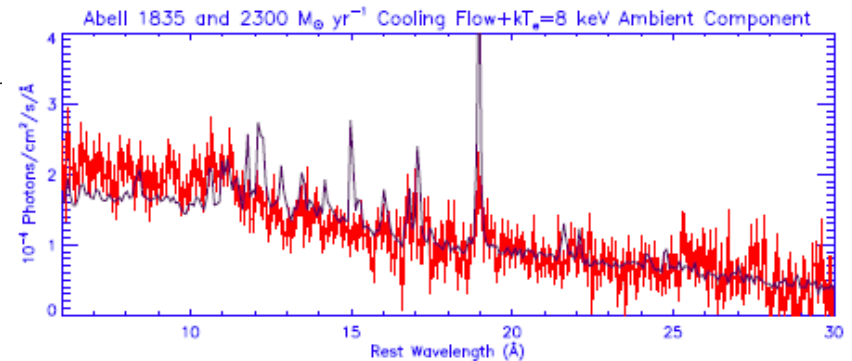
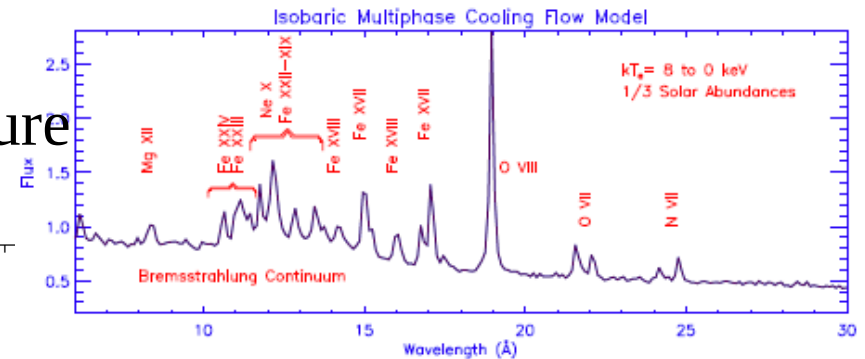


Le mystère du flot de refroidissement

Modèle de gaz homogène

--raies à haute température

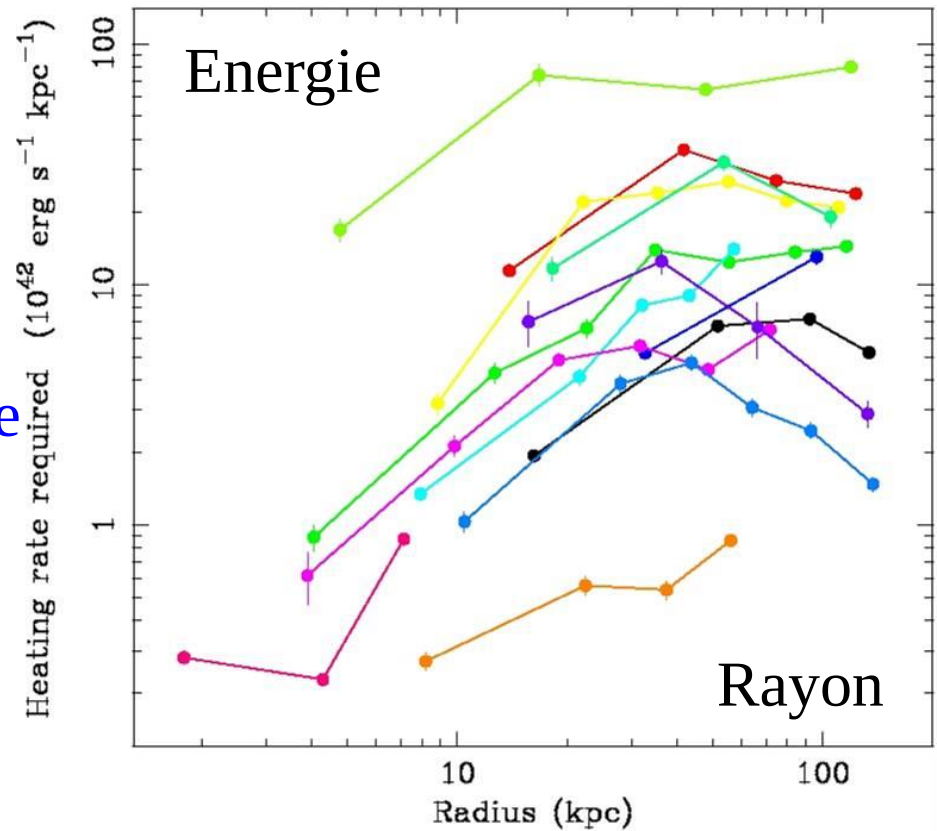
-- mais pas les raies à basse température



Energie requise pour arrêter le refroidissement

- XMM ne voit pas les raies du gaz $<10^6\text{K}$
- XMM montre que le déficit en photons $<1\text{keV}$ n'est pas dû à l'absorption interne
mais associé avec le plancher de température à $T_{\text{vir}}/3$

Chandra montre que le plasma des jets radio a déplacé le plasma thermique (existence de cavités)



Fin du paradigme (~2002)

Le gaz se refroidit jusqu'à **$\sim 1/2$ - $1/3$ de T externe** (~ 2 keV)

La quantité de gaz qui peut se refroidir bien plus bas n'est que de $\lesssim 10\%$ du flux de gaz qui se refroidit à haute T

→ Après correction de ce **facteur 10**, le gaz froid et la formation d'étoiles attendus correspondent aux obs

Maximum $1000 M_{\odot}/\text{an} \rightarrow 100 M_{\odot}/\text{an}!$

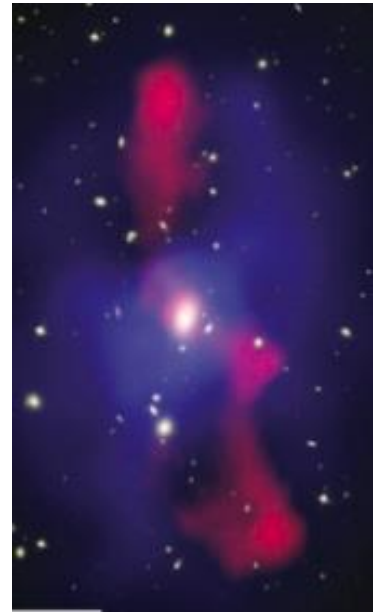
Source de chaleur pour réchauffer 90% du gaz:

La conduction, mais souvent supprimée par le champ B

Marche mieux pour le gaz le plus chaud $Q \propto T^{7/2}$

comment réchauffer le gaz plus froid? Supernovae?

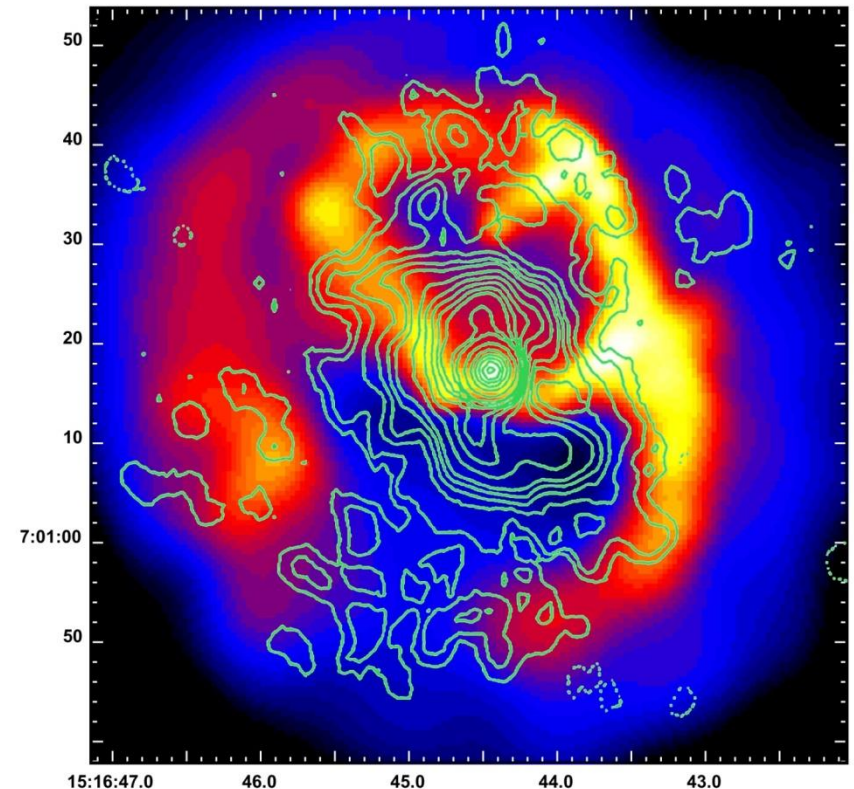
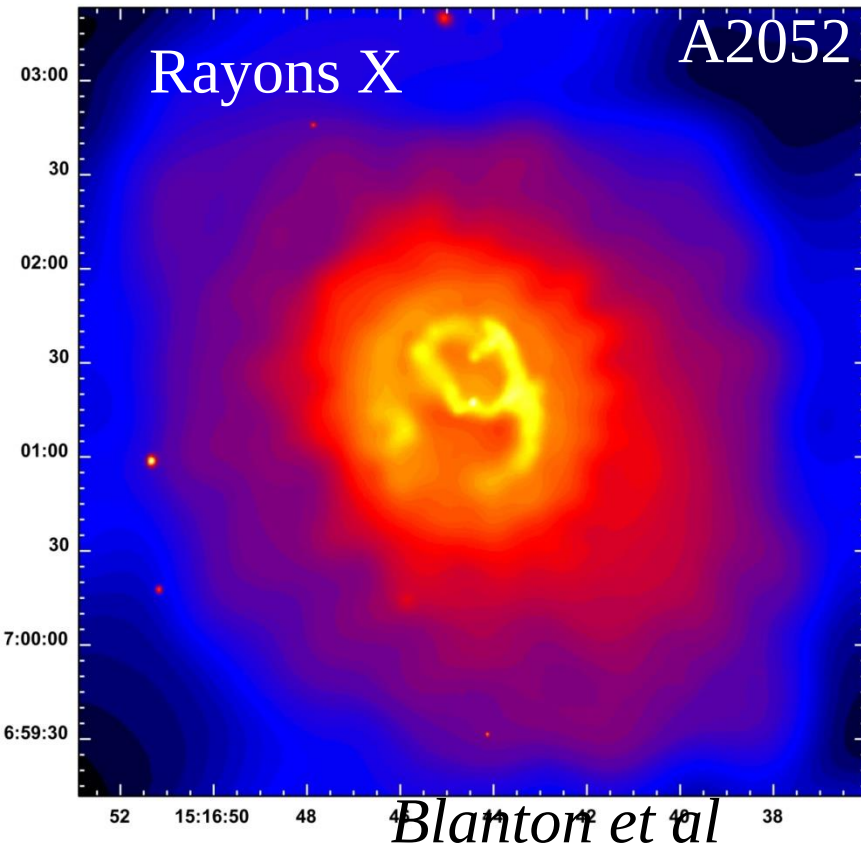
→ **AGN et sources radio**



Radio Sources dans les amas à coeur froid

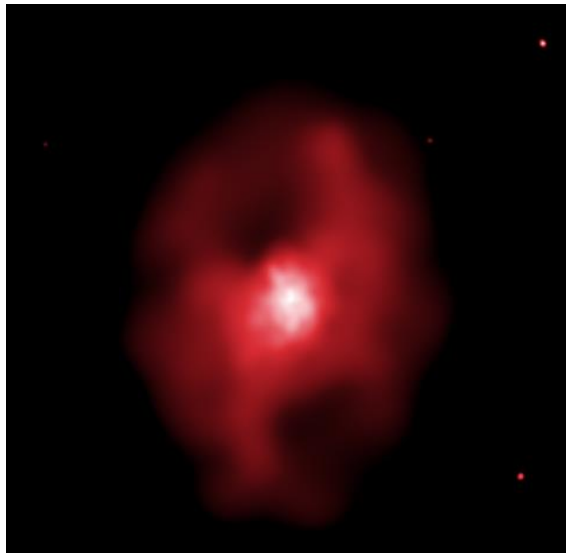
- $\gtrsim 70\%$ des amas à coeur froid contiennent des galaxies cD centrales avec radio sources, comparé à 20% pour les autres amas
- Est-ce que le réchauffement des radio sources est la solution?

Burns

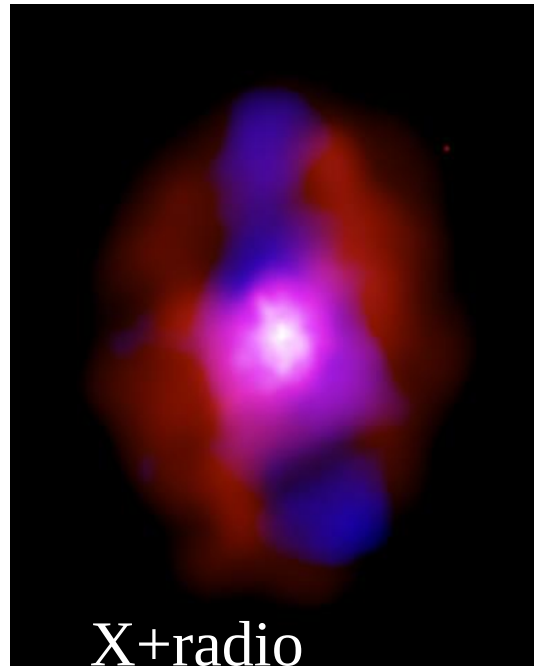


Morphologie des bulles Radio

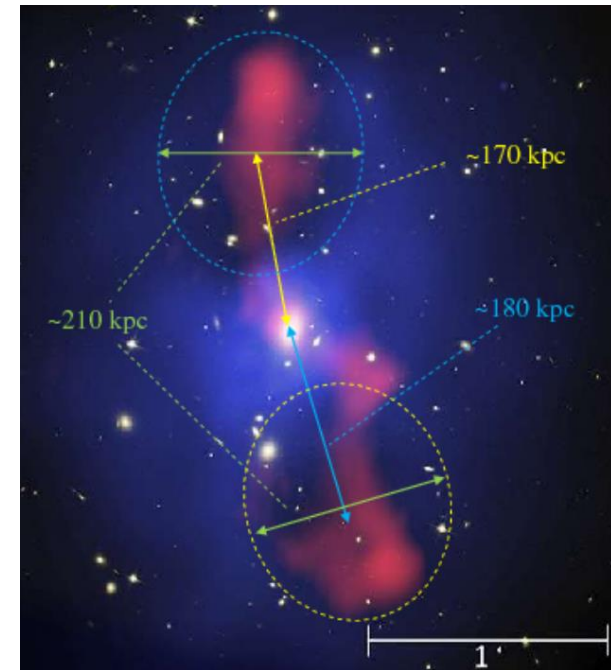
- Des cavités trouées dans l'émission X, entourées de coquilles
- Après déprojection, la brillance de surface sur les cavités est compatible avec l'émission de la paroi (→ cavités vides de X)
- Masse des coquilles comparable à la masse éjectée des trous
→ Le gaz X a été poussé hors des cavités par la radio source et comprimé dans les coquilles



MS0735.6+7421 rayons X



X+radio



MS0735.6+7421
(McNamara et al. 2009)

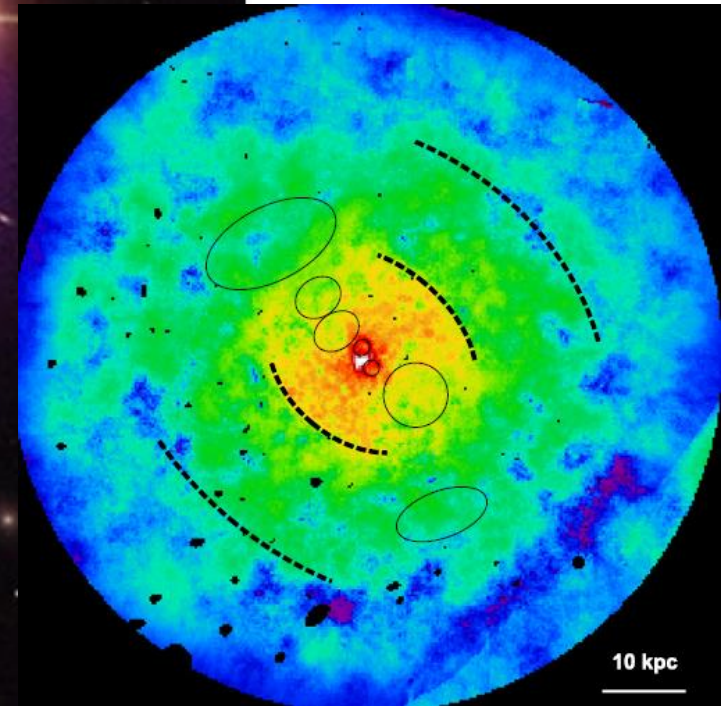
NGC 5813

Chandra (X)
6 cavités

N5813 centre de
groupe de galaxies

Chocs faibles
(saut de pression)
chauffent le gaz

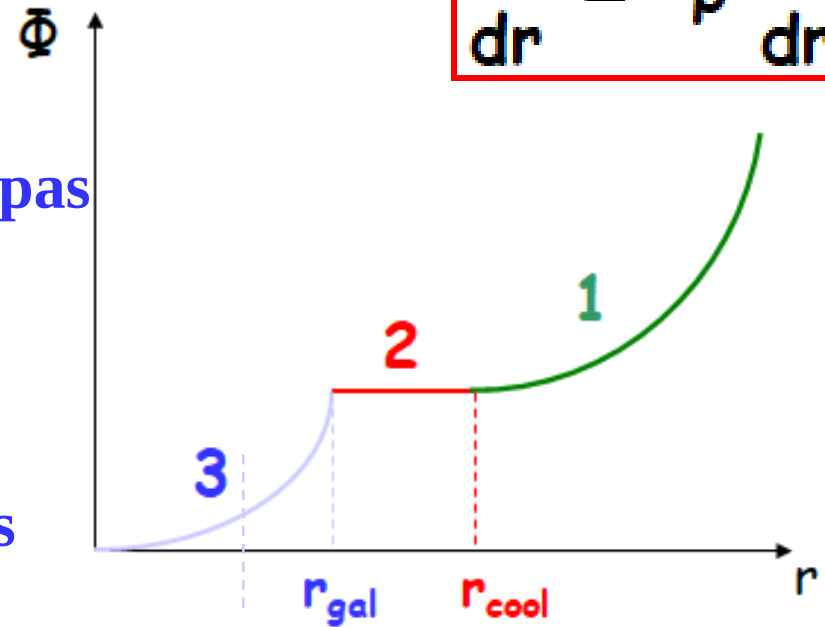
Randall et al 2015



$$\frac{dP}{dr} = -\rho \frac{d\Phi}{dr}$$

- **Région 1**
 - Equilibre hydrostatique
 - Le gaz chaud ne se refroidit pas

- **Région 2**
 - $\Delta\Phi/\Delta r$ est faible
 - Pertes radiatives compensées par énergie thermique + PV
 - $v_s \gg v_{\text{free fall}}$
 - Le gaz est en quasi-équilibre hydrostatique



$$\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{5}{2} \frac{P}{\rho} \right) = -n^2 \Lambda(T)$$

- **Région 3**
 - $\Delta\Phi/\Delta r$ fort
 - Energie gravitationnelle compense les pertes radiatives

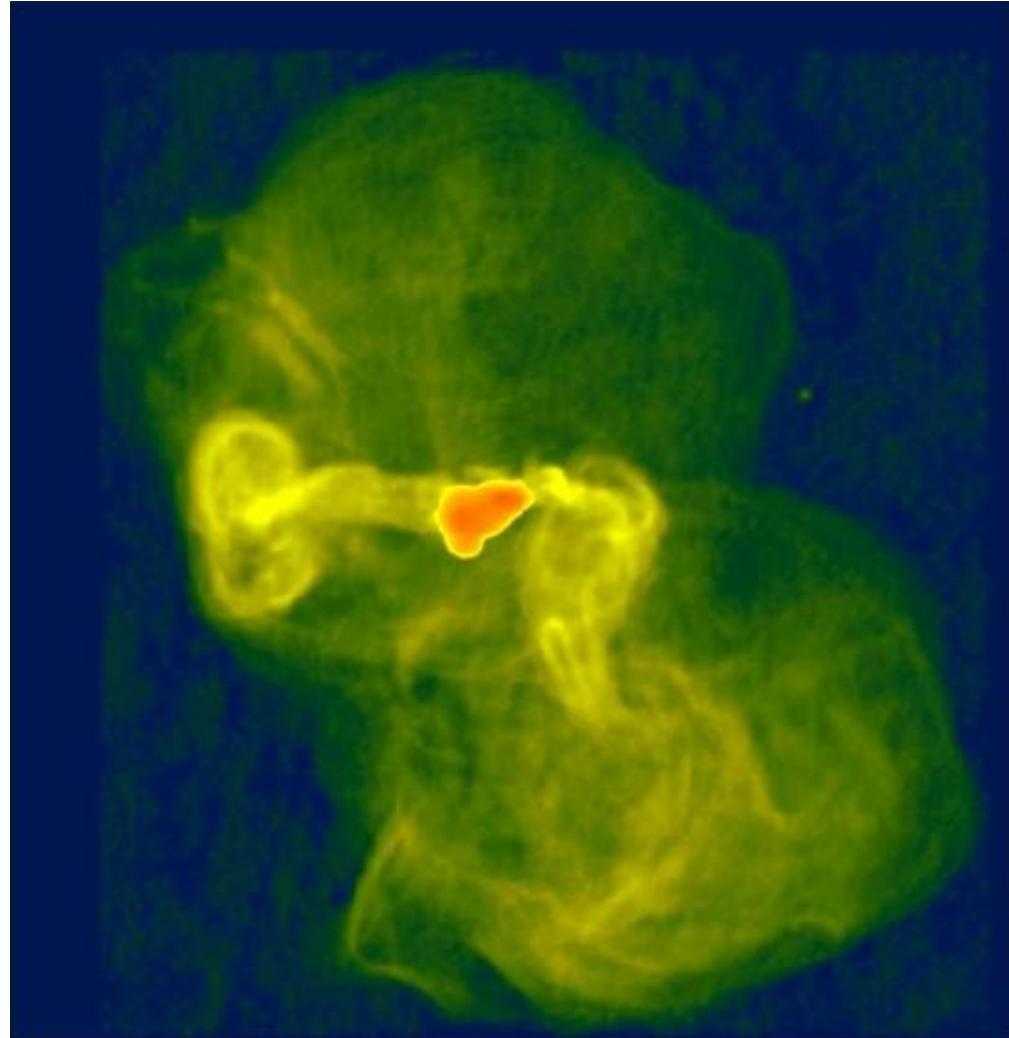
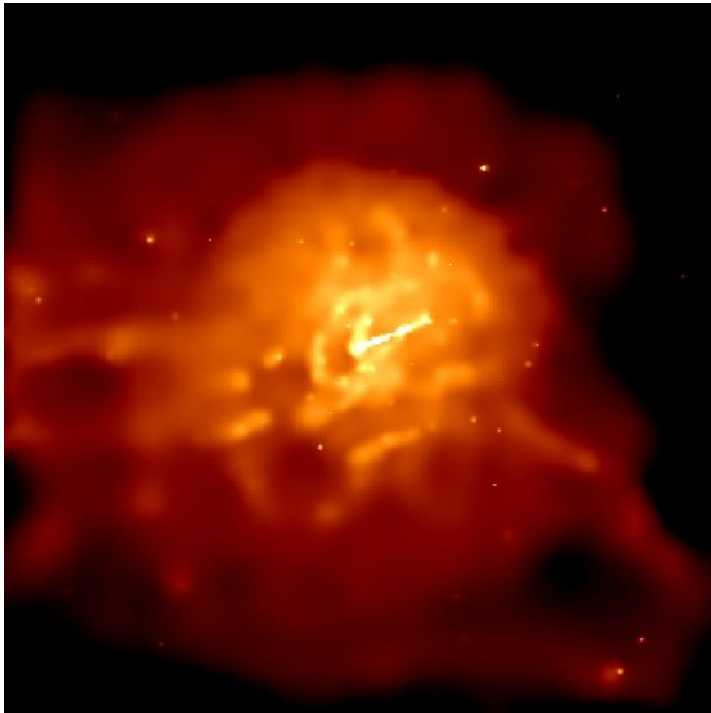
Enthalpie $H = U + PV = \frac{5}{2} \frac{P}{\rho}$

Gaz chaud entraîné dans M87

M87 en radio (VLA)

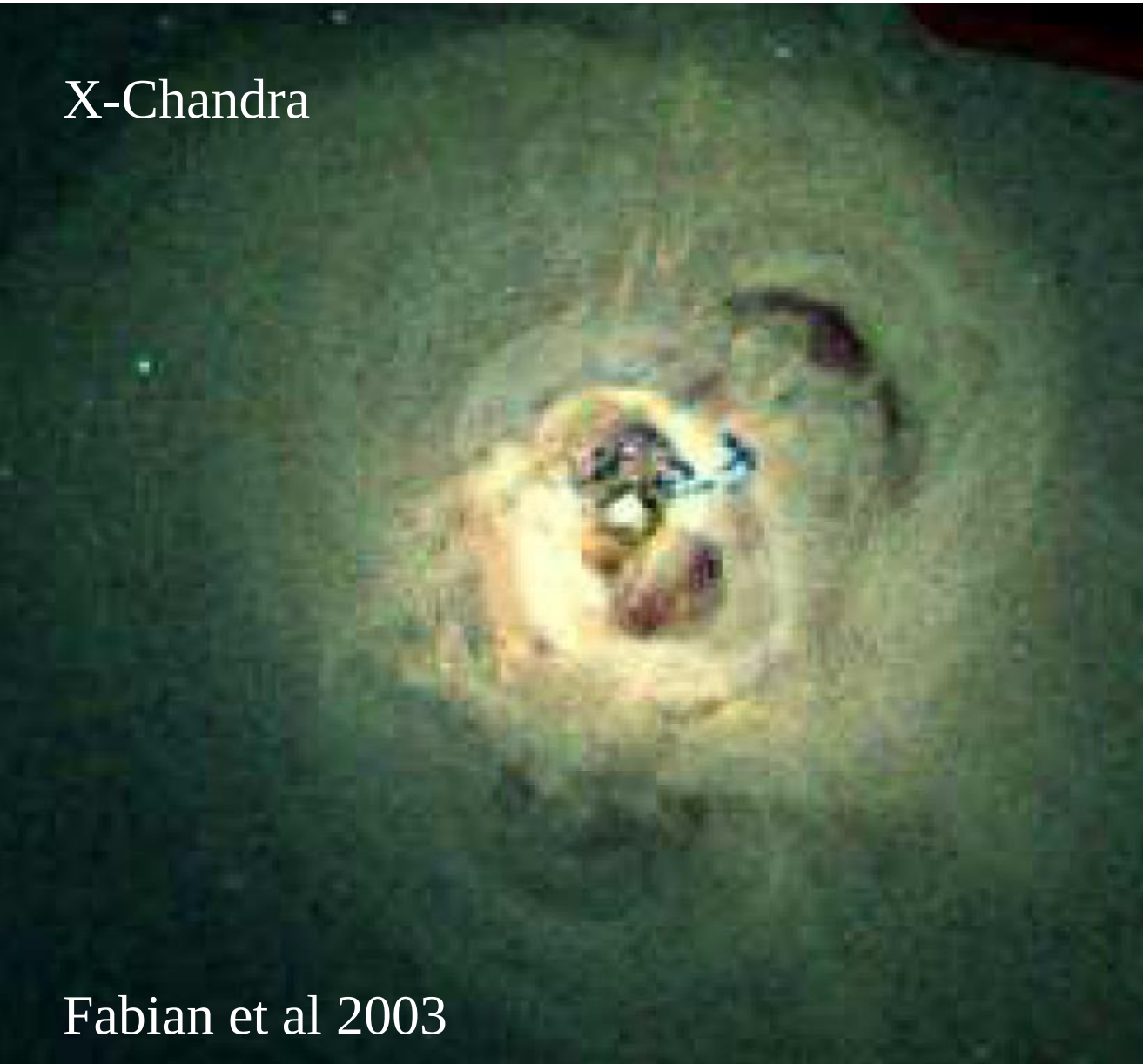
M87 en rayons X (Chandra)

Le gaz plus froid suit les jets
radio



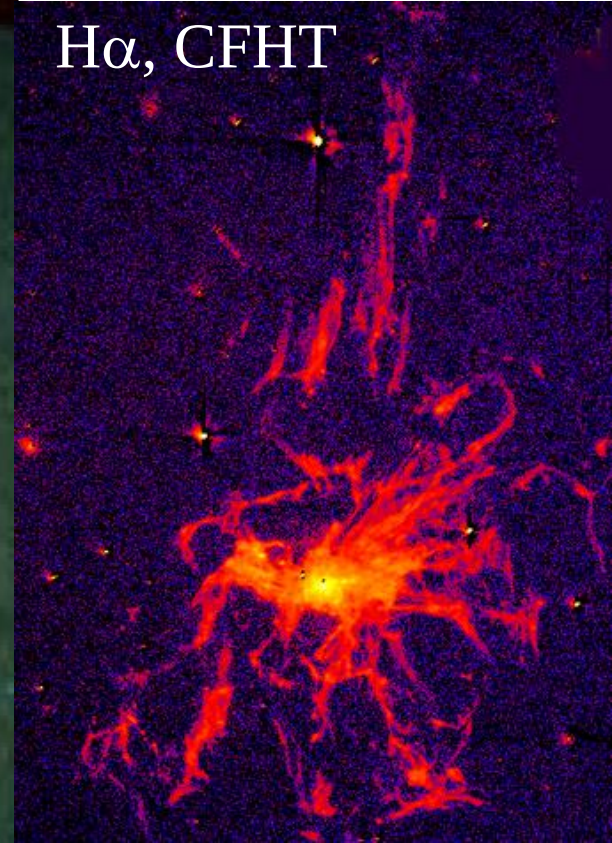
Amas de Persée: cavités + fronts froids

X-Chandra



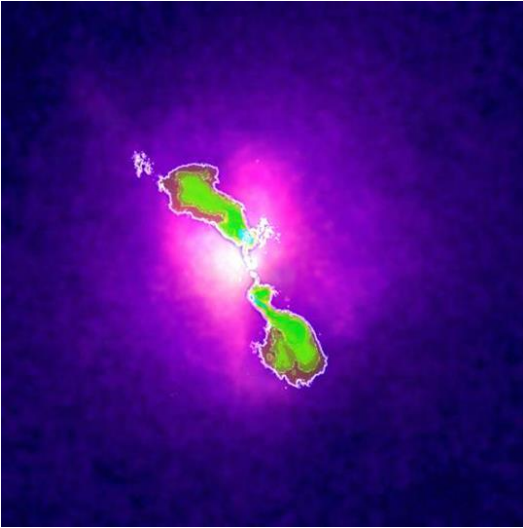
Fabian et al 2003

H α , CFHT



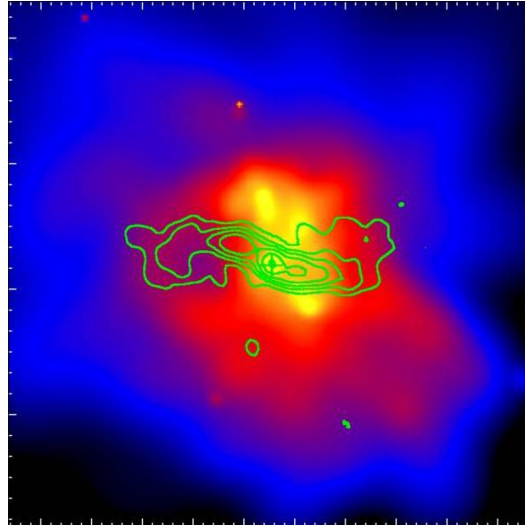
Autres bulles radio

Hydra A



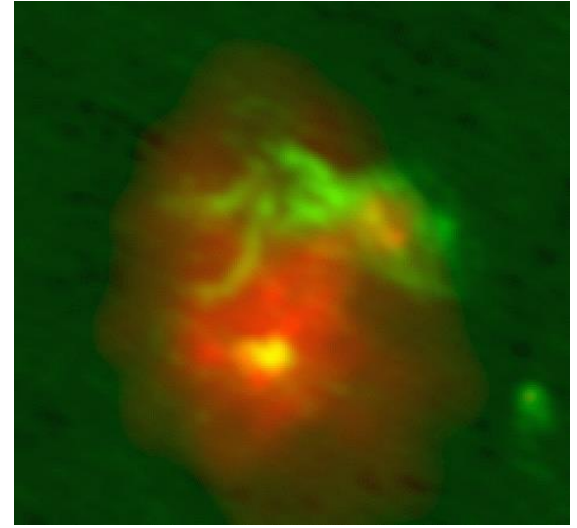
McNamara et al.

Abell 262



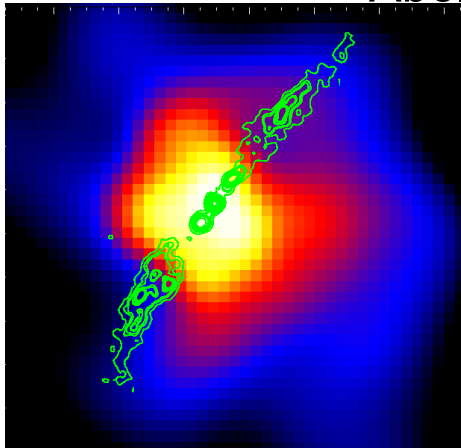
Blanton et al.

Abell 133

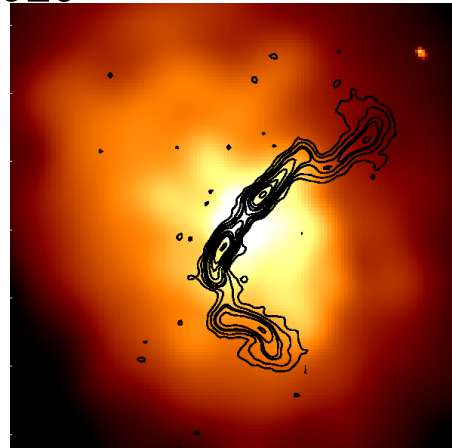


Fujita et al.

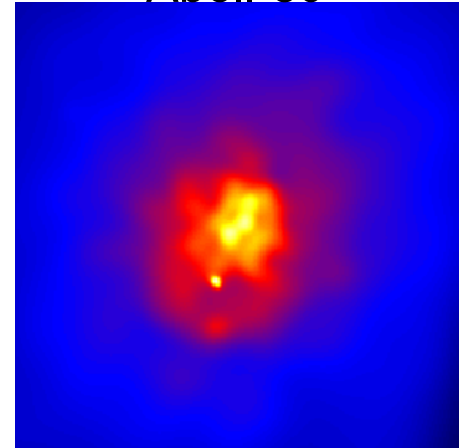
Abell 2029



Clarke et al.



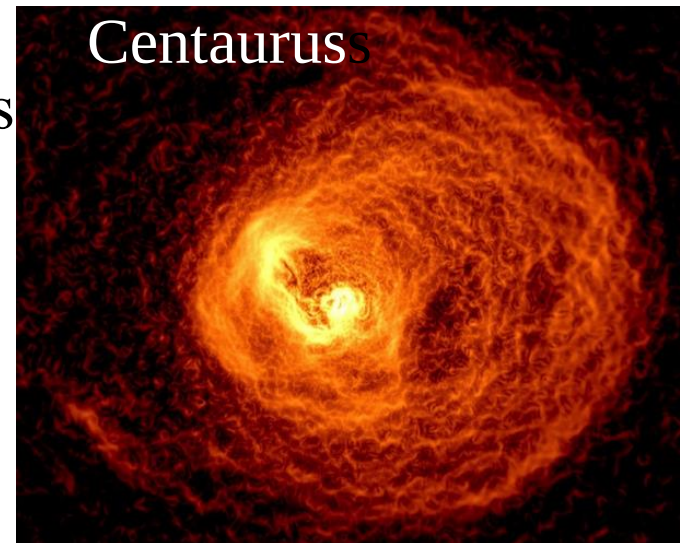
Abell 85



Kempner et al.

Températures & Pressions

- Le gaz dans les coquilles est plus froid
- Pression dans les coquilles $\approx$ comme dehors
Pas de chocs (pas de saut de pression)
Expansion des bulles $\lesssim$ vitesse du son
→ Pression dans les bulles radio $\approx$
pression dans les coquilles X

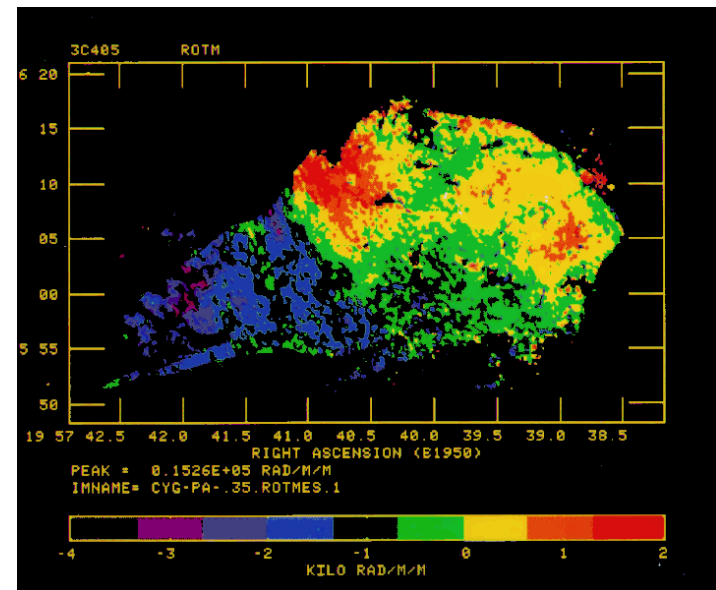
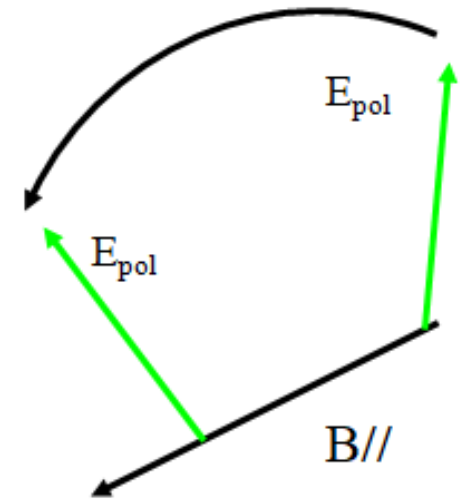


Pourtant la pression du gaz radio est ~ 10 fois plus faible que la pression des coquilles X!?

- Y-a-t-il d'autres sources de pression dans les bulles? Champ magnétique?
- Des électrons ou ions relativistes, rayons cosmiques, des chocs, un reste de gaz très chaud?

Limites grâce à la dépolarisation Faraday

- Bulles radio ont de grandes rotations Faraday (en λ^2), mais une forte polarisation
 - rotation Faraday $\propto n_e B_{\parallel} \lambda^2$
 - Gaz thermique externe $\rightarrow$ forte rotation Faraday et polarisation
 - Gaz thermique interne $\rightarrow$ dépolarisation Faraday
- Donne une limite supérieure sur n_e
- Pour une pression donnée, $\rightarrow$ limite inférieure sur T



$\rightarrow kT \gtrsim 20$ keV dans la plupart des amas si la pression vient du gaz thermique

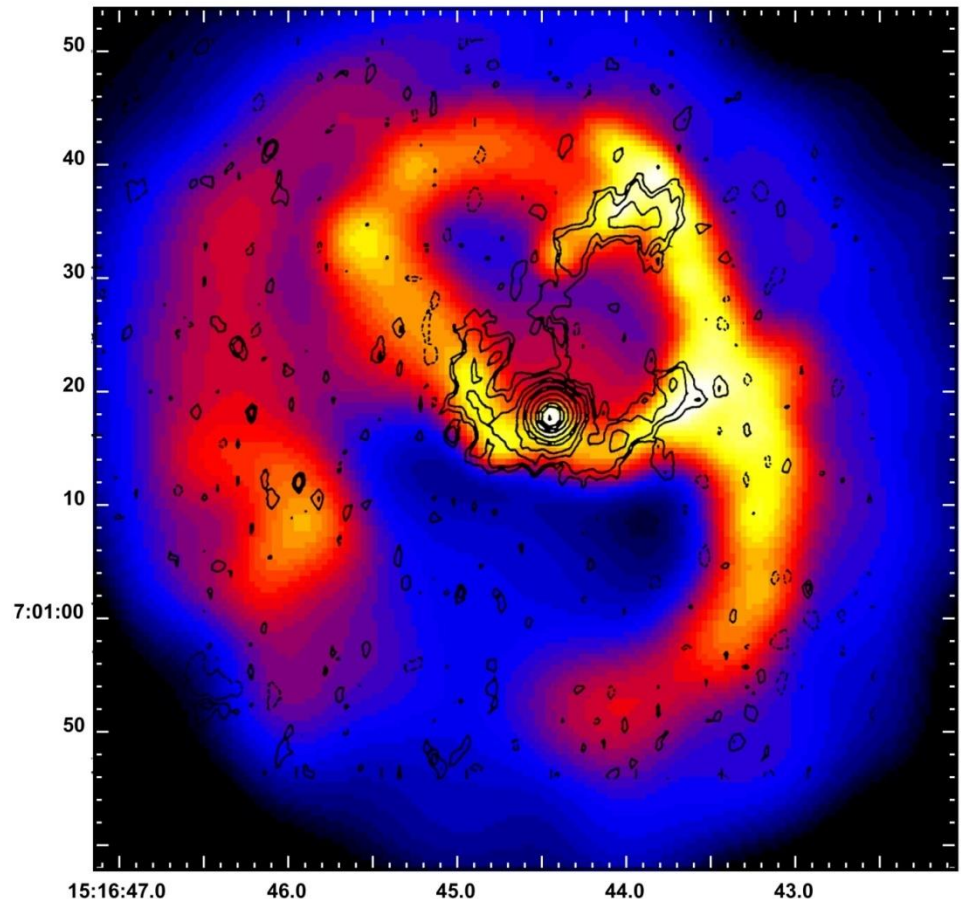
CygA = 3C405

Refroidissement: où va le gaz?

- Le refroidissement isobare dans les coquilles X, $t_{\text{cool}} \approx 3 \times 10^8 \text{ yr} \gg \text{age des sources radio}$
- Le gaz plus froid à 10^4 K est dans les coquilles
→ Evite les cavités

Plusieurs épisodes AGN

→ Plusieurs paires de cavité



H α + [N II] contours (Baum et al.)

Les coquilles X mesurent l'énergie radio

La déposition d'énergie dans les coquilles X par les lobes radio (*Churazov et al.*):

$$\frac{1}{(\gamma - 1)} PV + PdV = \frac{\gamma}{(\gamma - 1)} PV$$

↙
Energie interne de la
bulle

↑
Travail pour l'expansion
de la bulle

- $E \approx 10^{59}$ ergs dans Abell 2052
- $\sim$ Energie thermique du cooling flow central,
« énergie thermique totale du gaz de l'amas
- Répétition des sources radio $\sim 10^8$ an (dérivé
du temps de montée des cavités par la
poussée d'Archimède)

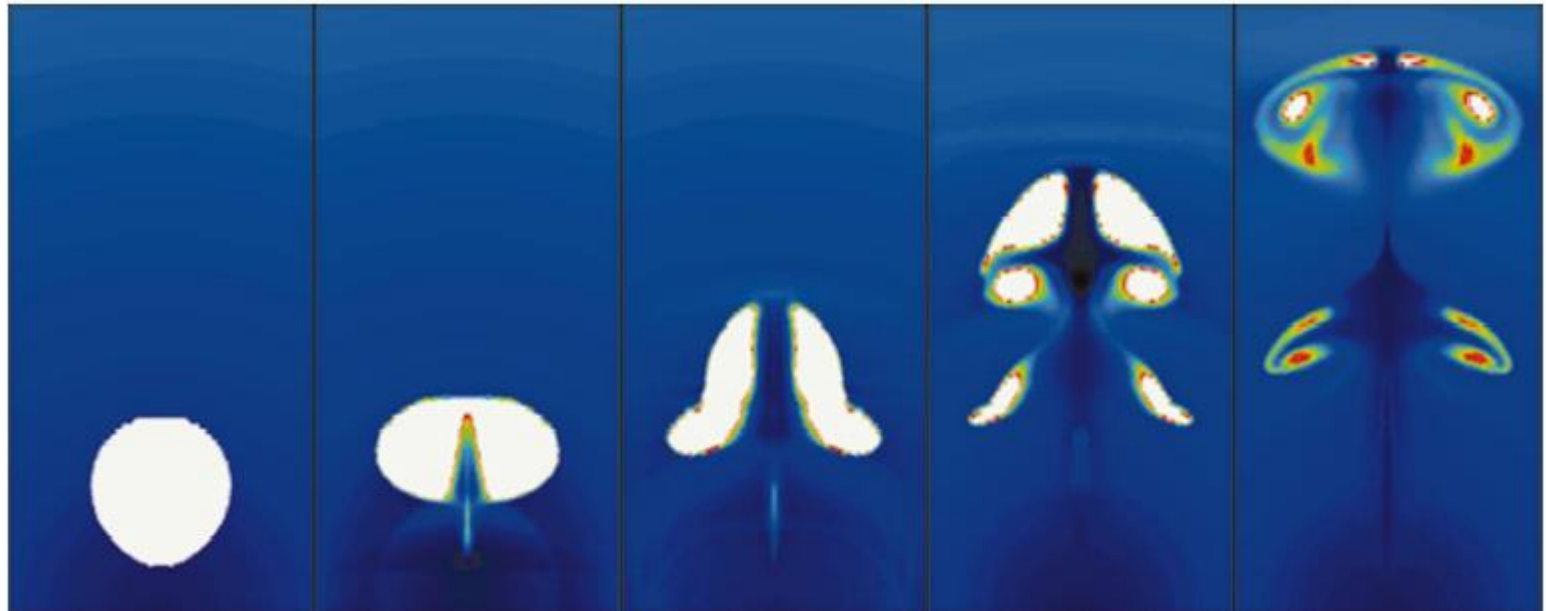


Les radio sources compensent le cooling

Sont comparables

- Energie totale dans les bulles radio, intégrée sur tous les épisodes de sources radio se répétant dans le temps
- Taux de refroidissement par le rayonnement X

$$L_{\text{cool}} = 5/2 (kT/\mu m) dM/dt$$



Churazov et al 2001

Tsunamis et ondes sonores

Peut aussi résoudre une partie du problème du réchauffement

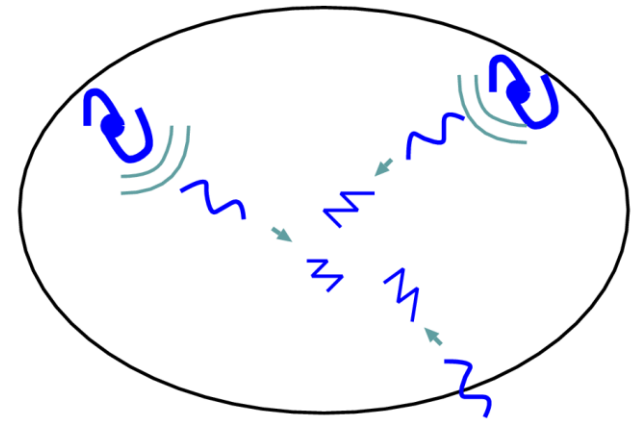
- Mécanisme

Fusion d'amas, mouvement des galaxies

→ Turbulence → Ondes sonores

→ Effet non-linéaire → Chocs faibles

→ Réchauffe le centre de l'amas



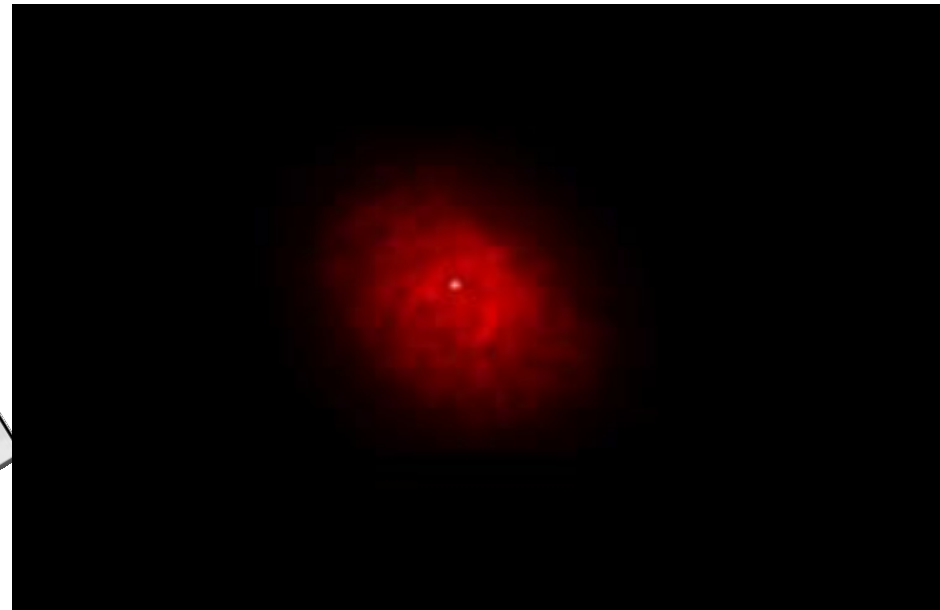
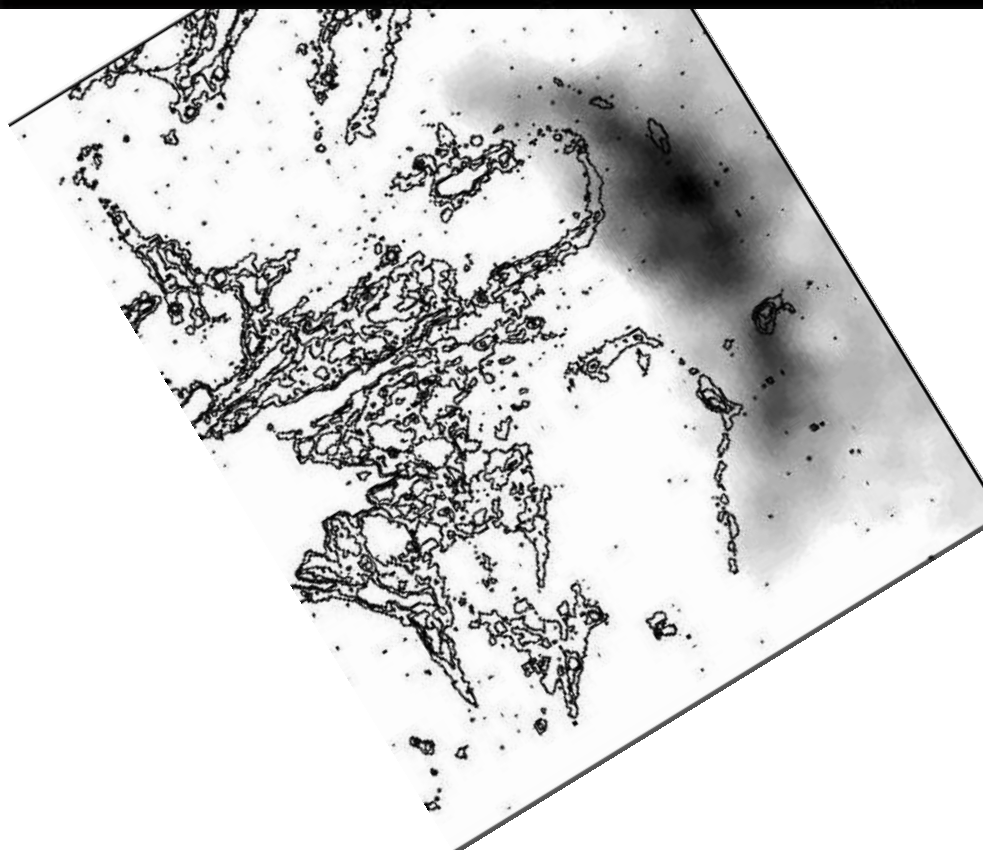
- Analyse analytique, Simulations numériques

Le mécanisme pourrait effectivement marcher dans les amas

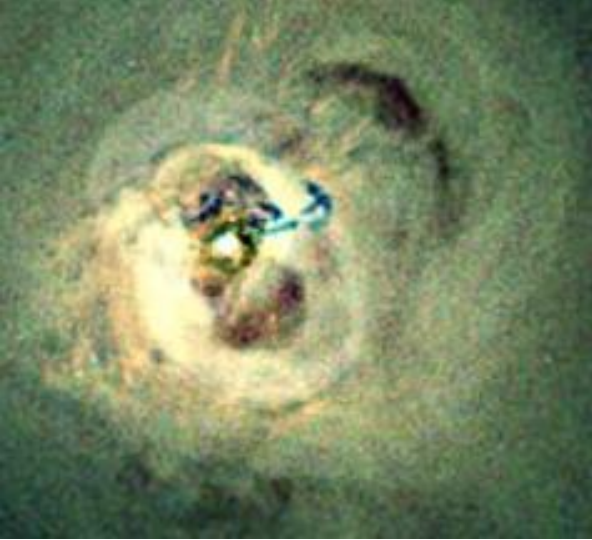


Amas de Persée

Ondes sonores qui
se propagent
→ chauffage

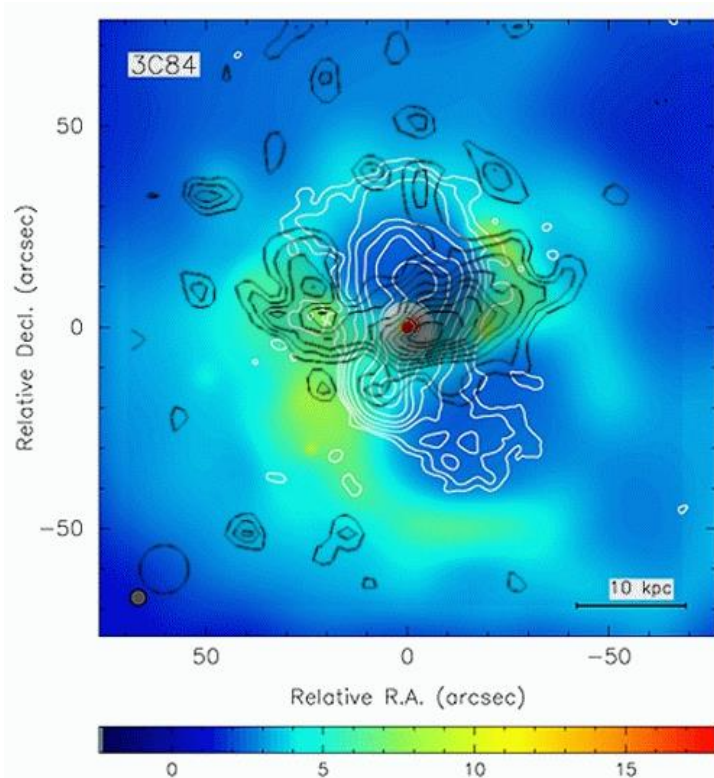


Perseus, gaz moléculaire froid



Gaz H α associé
(rose)

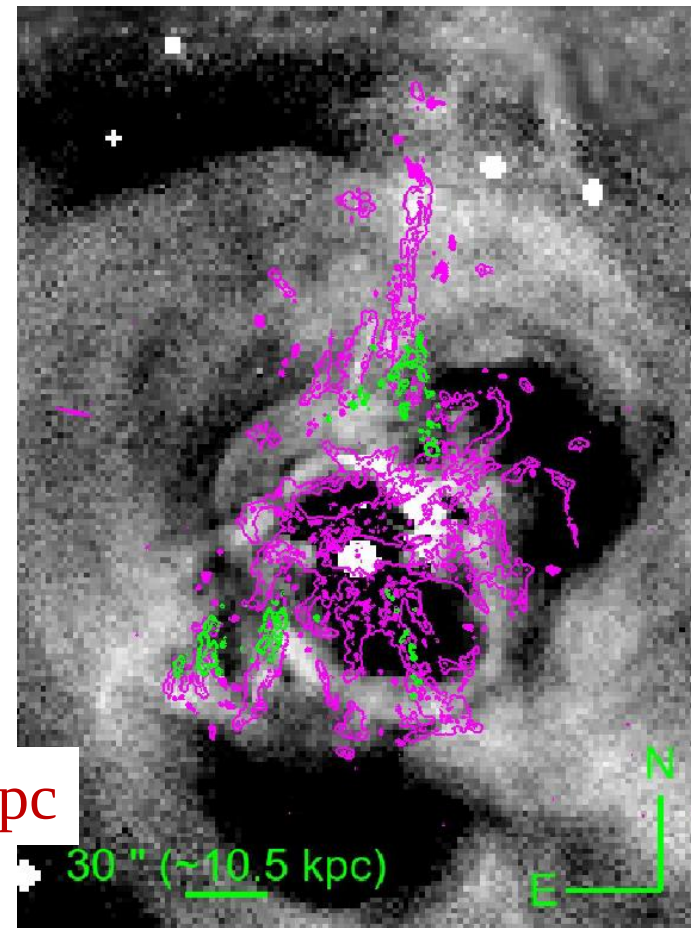
Formation d'étoiles (vert)
Canning et al 2014



Gaz Moléculaire
Salomé
et al 2006

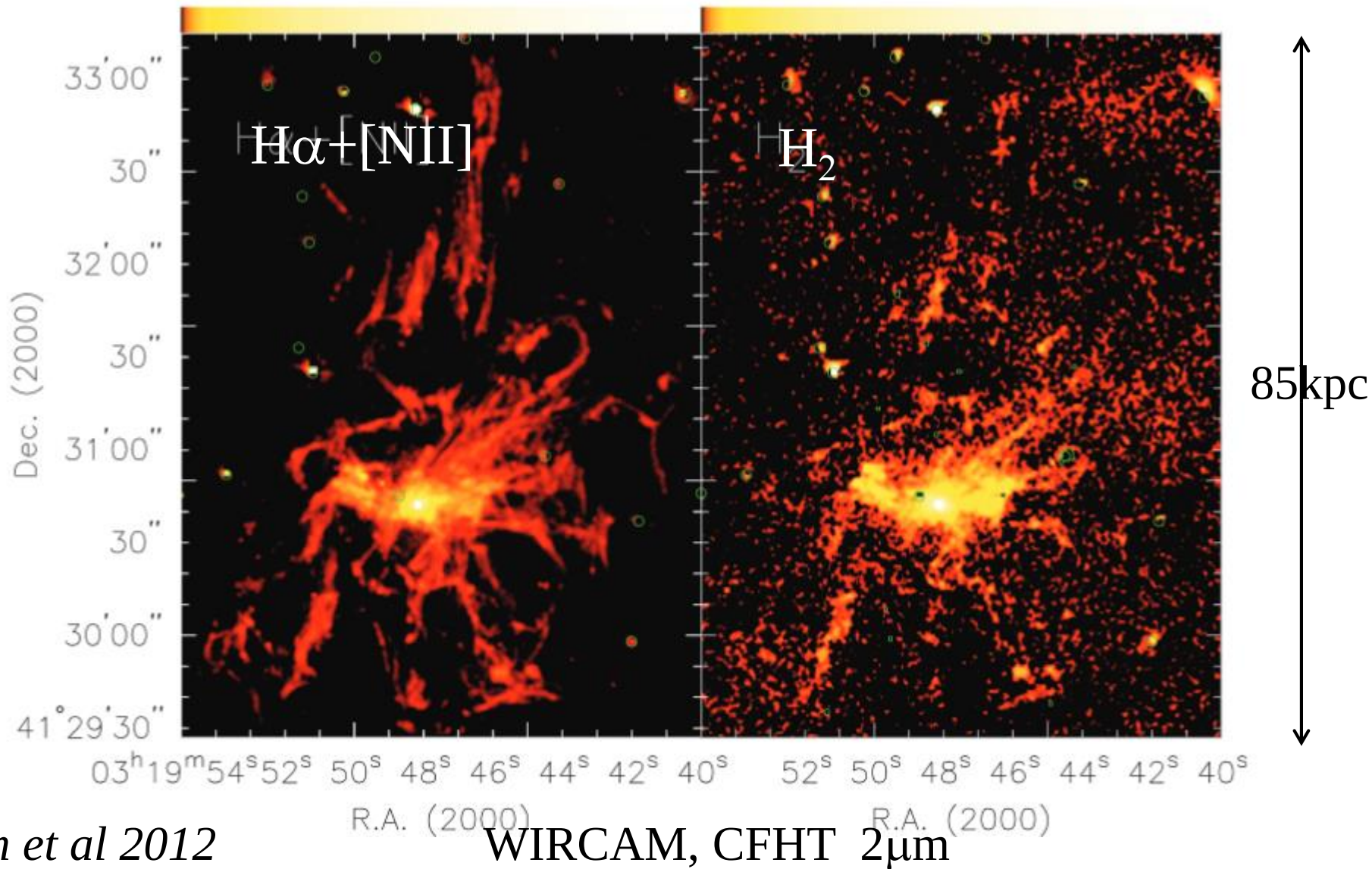
$M(\text{H}_2) \sim 10^{10} M_{\odot}$

115kpc



H₂ dans les filaments

Transition 1-0 S(1) , dans le NIR



Persée: spectroscopie avec Herschel

PACS [OI]63 μ m & 145 μ m, [OIII]88 μ m
[CII]158 μ m, [NII]122 μ m

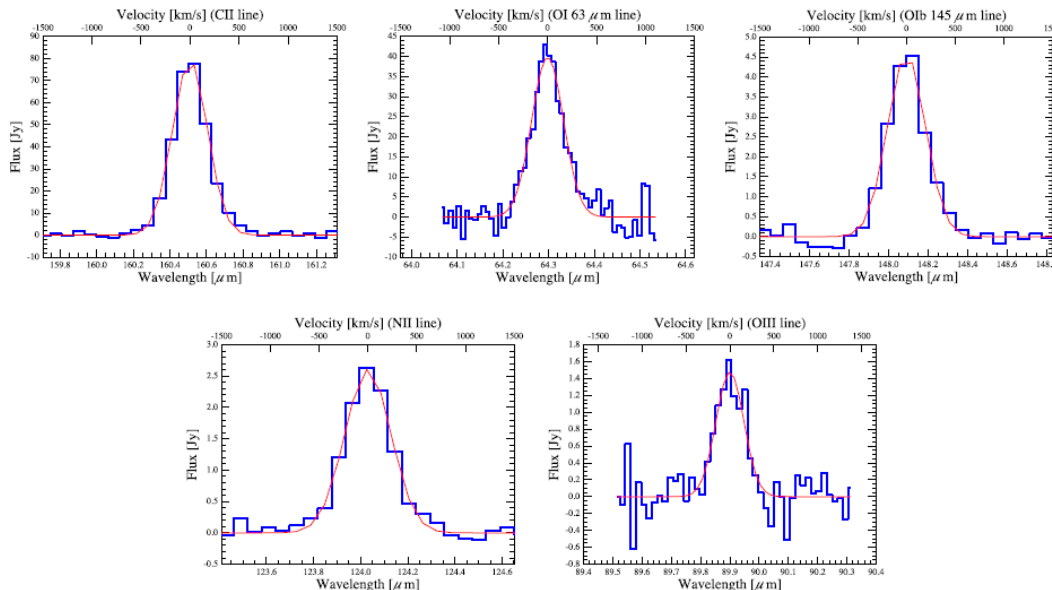
Toutes raies étendues jusqu'à 25kpc
Cospatiales avec CO et filaments H α

$$M_{H_2} = 2-5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$$

Refroidissement X
20-50 $M_{\odot}/\text{yr}$ au centre

= SFR dans le centre,
SFR $\sim 40 M_{\odot}/\text{yr}$

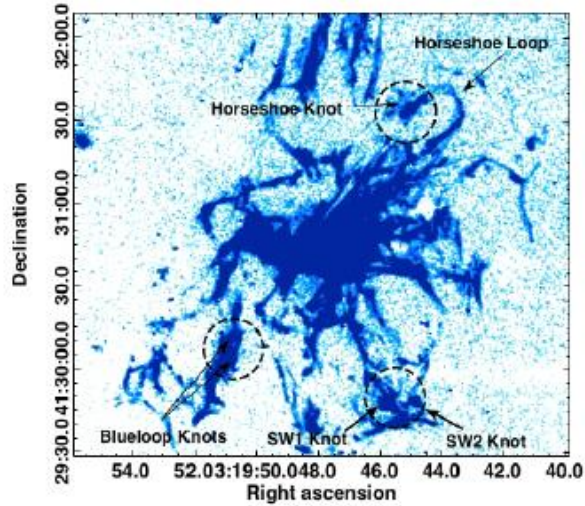
Excitation: typique PDR
Formation d'étoiles
Gaz dense dans les filaments



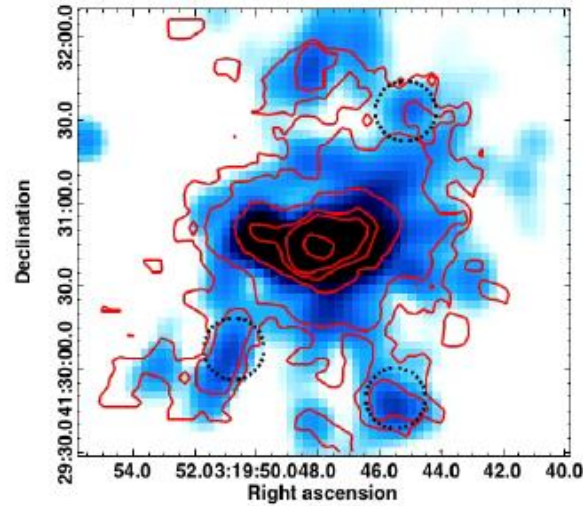
Mittal et al 2012

Amas de Persée: [CII] et H α

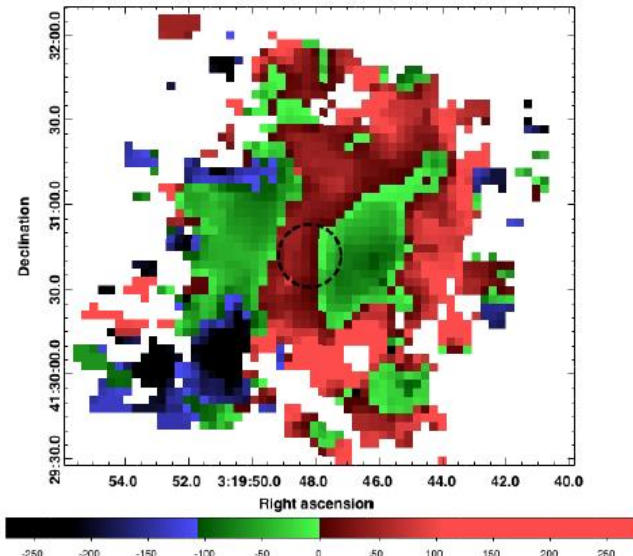
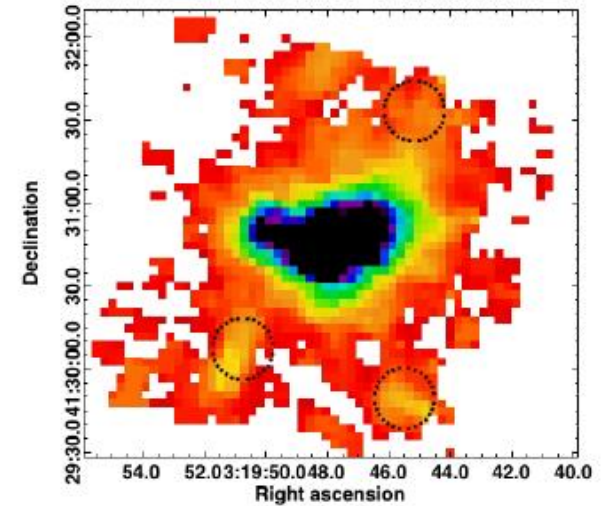
H α



C[II] contours sur H α



CII (11'')



[CII] cinématique : pas de rotation,
Comparable au CO

Gaz froid des filaments

Mouvements de chute vers le centre et de remontée coexistent

Le gaz moléculaire provenant des précédents épisodes remonte par le feedback de l'AGN: jets radio

Les bulles créent des inhomogénéités et encore plus de refroidissement

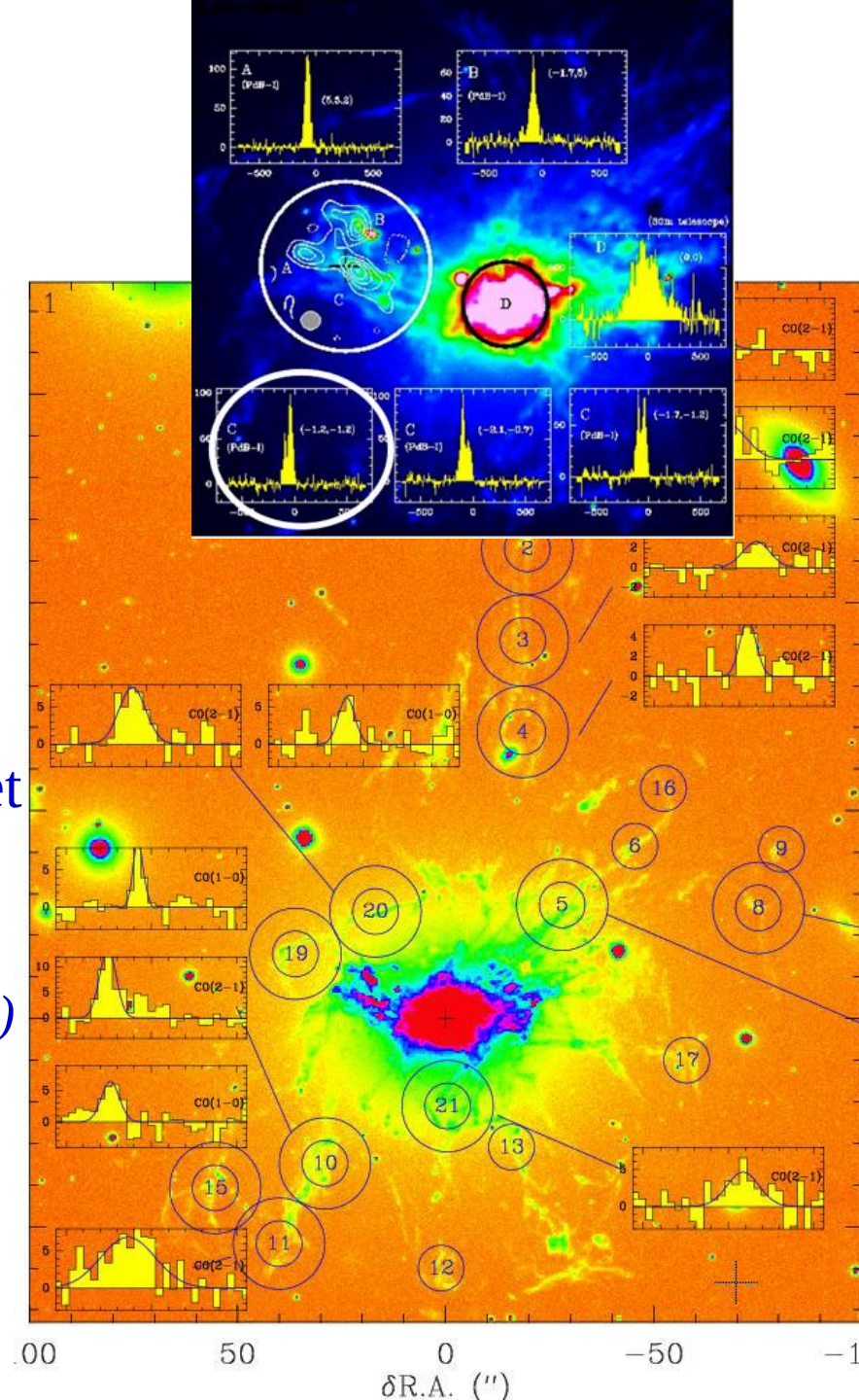
A $R \sim 20 \text{ kpc}$, $t_{\text{cool}}/t_{\text{ff}} \sim 10$

→ instabilité thermique (*McCourt et al 12*)

Le gaz en tombant alimente l'AGN

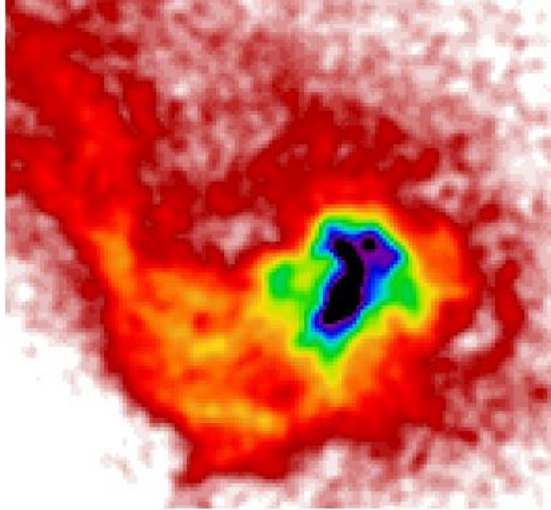
Vitesse plus faible que la chute libre

Salome et al 2008, 2011

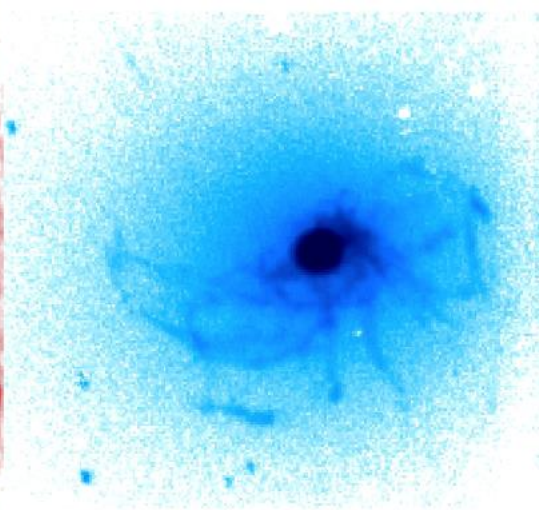


N4696: BCG de Centaurus

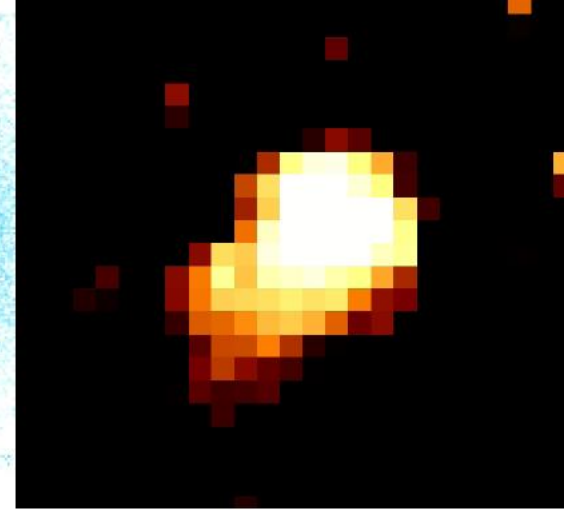
Chandra X-ray



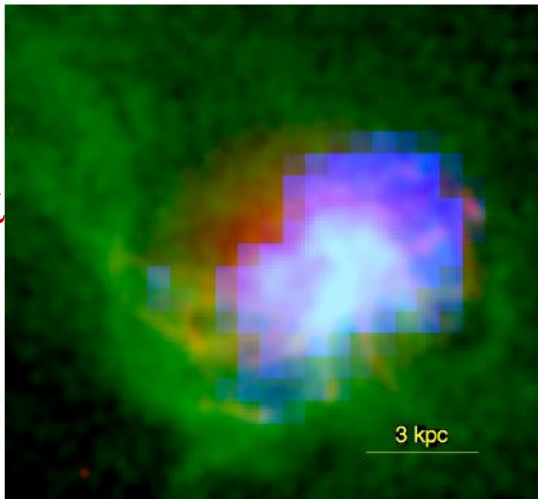
Gemini $H\alpha$



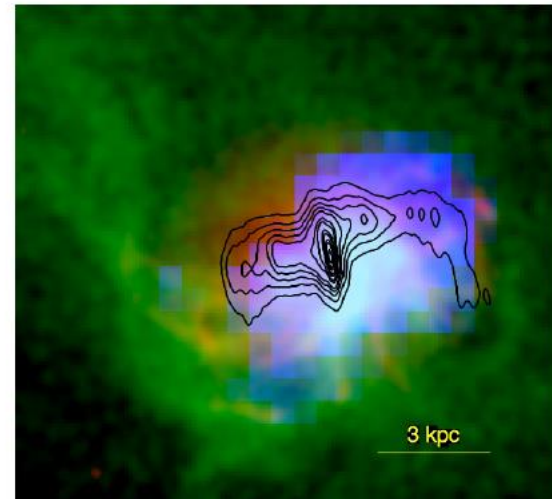
Herschel [CII]



Bleu: CII
Rouge: $H\alpha$
Vert: X



Noir:
Contours
VLA
1.4GHz



1' =
12kpc

Mittal et al 2011

Mécanismes d'excitation

Dans le gaz multiphase, baigné dans le milieu chaud X, l'excitation des molécules pourrait être due aux collisions avec les particules énergétiques (électrons, protons)

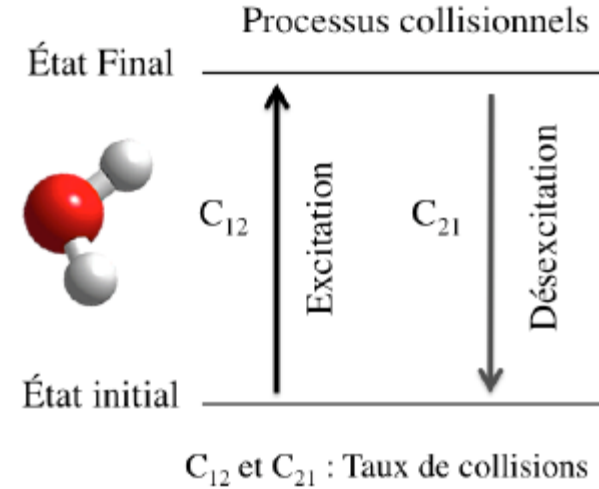
→ excitation **par les rayons cosmiques** (*Ferland et al 2009*)

Gaz plus chaud que la poussière? $T_g > T_d$

Les chocs aussi, certainement à l'origine de l'émission des raies H_2 vibrationnellement excitées (*cf Donahue et al 2000*)

Emission H_2 100x trop forte pour venir du refroidissement

Il existe **des raies H_2 de pure rotation** dans bcp d'amas à cœur froid



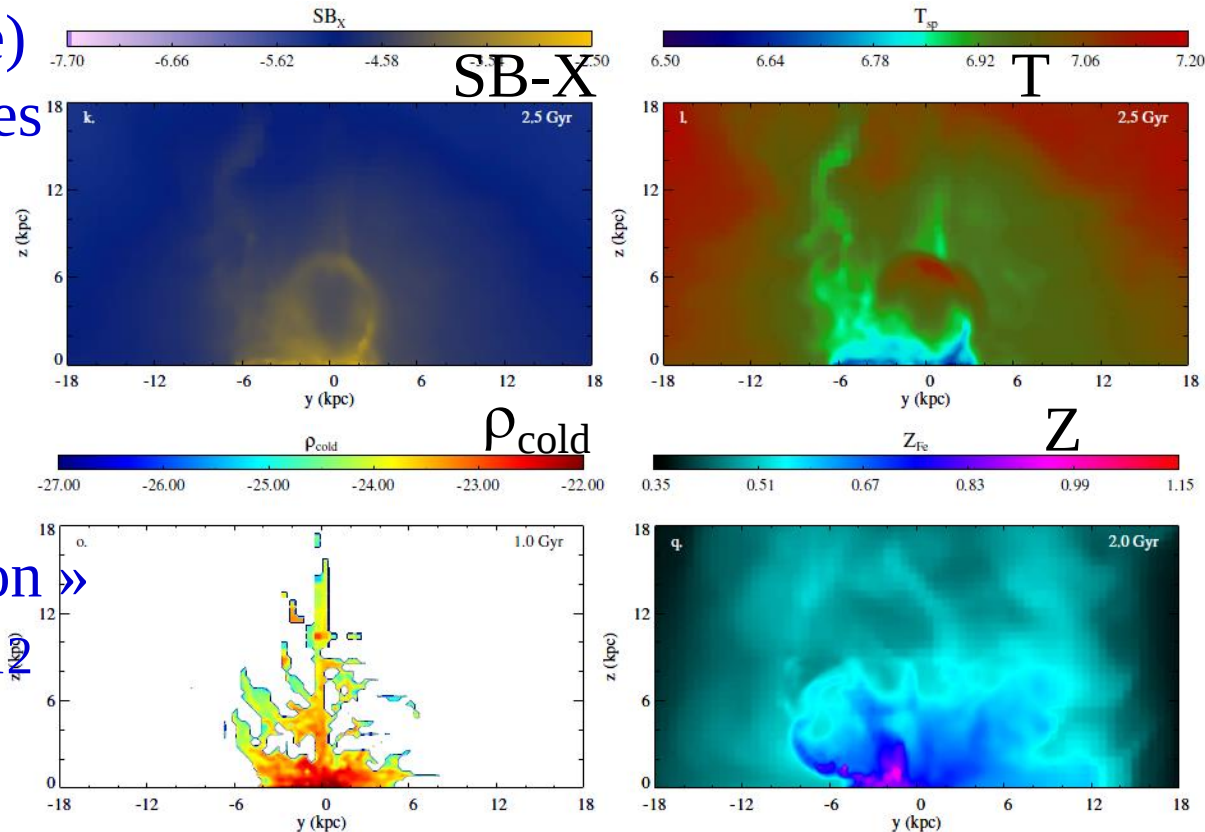
Flux ou reflux du gaz froid?

Les deux: chute vers l'AGN qu'il alimente, remontée par le feedback
Nécessité de mélanger efficacement le gaz, diffuse les abondances, CO, ...
Mélange de gaz froid et chaud: T décroît (sans radiation) $\rightarrow$ précipite

Conditions du refroidissement, où?

$t_{\text{cool}}/t_{\text{ff}} \sim 10\text{-}30$ (uniforme)
Mais instabilités thermiques
(*McCourt et al 2012*) et
aussi inhomogénéités
dus aux cavités,
AGN feedback, etc..

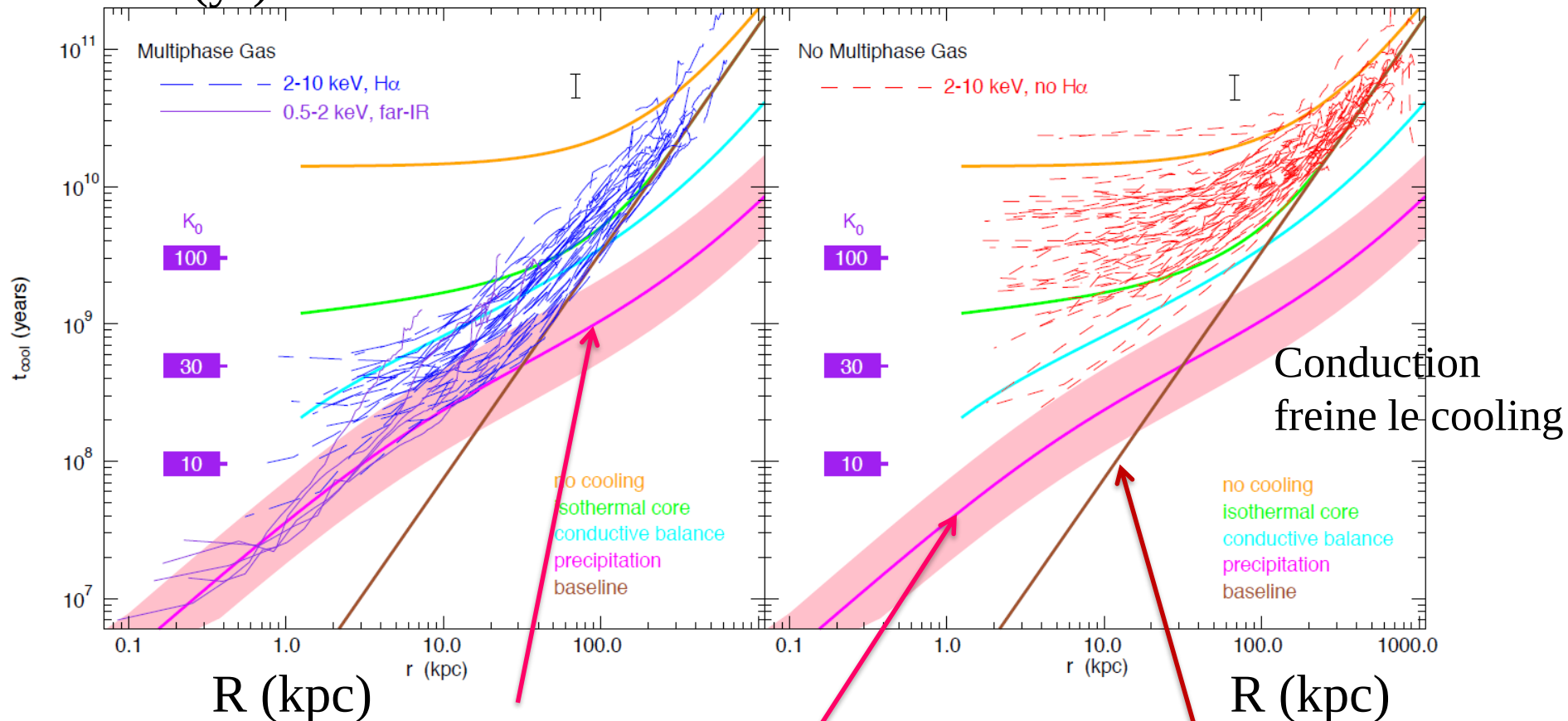
**$\rightarrow$ »Chaotic Cold Accretion«
(CCA) Gaspari et al 2011, 2012
Voit et al 2015, Lau et al 2017**



Processus de refroidissement

t_{cool} (yr)

ACCEPT sample



Seuil de précipitation à $t_{cool}/t_{ff} \approx 10$

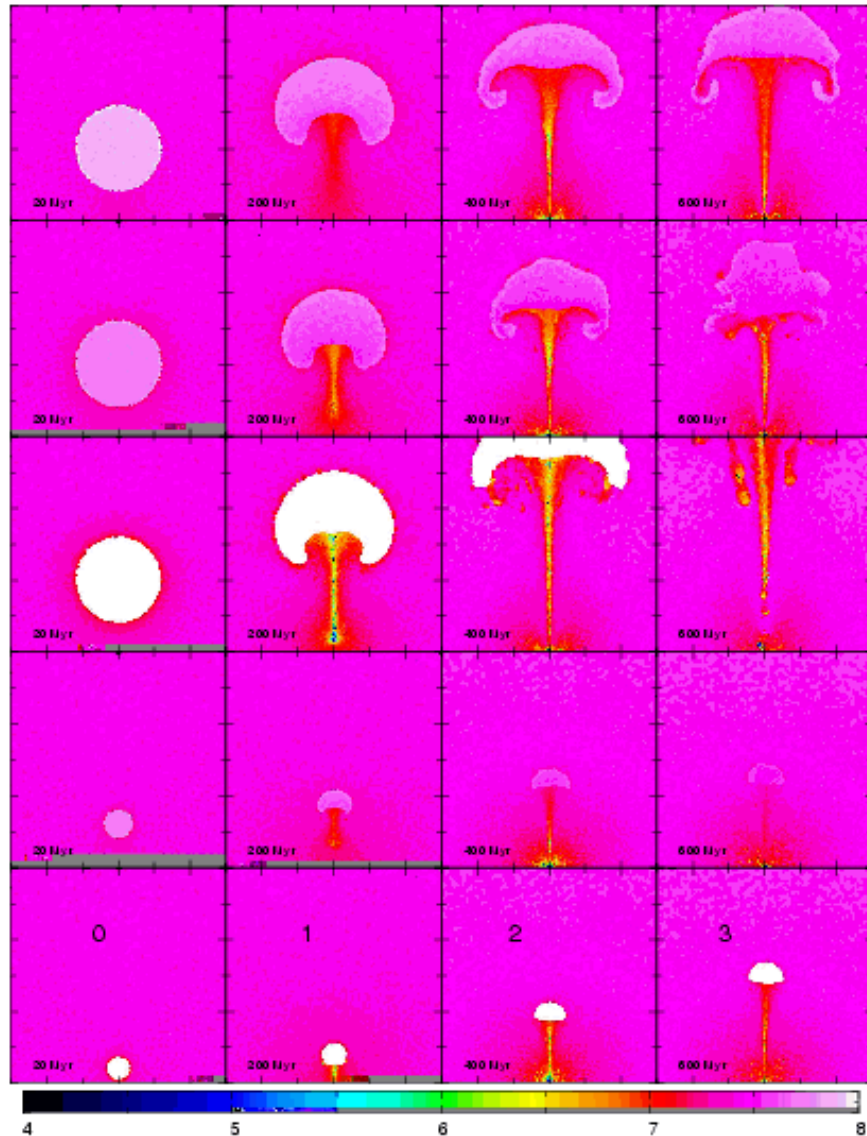
base cosmologique

Index de l'Entropie K_0 in keV cm² ($=kT n_e^{-2/3}$)

➔ Gaz multiphase refroidit sur 1-20kpc

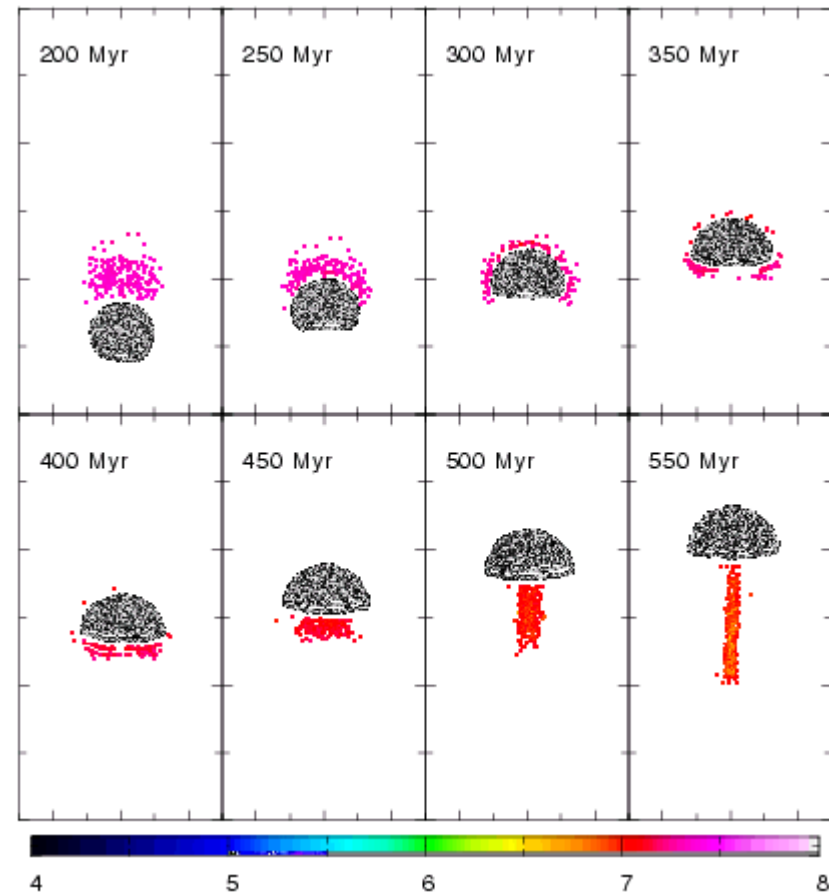
Voit et al 2015

Simulations Numériques (*Revaz, Combes, Salome 2008*)



Log Temperature (150kpc)

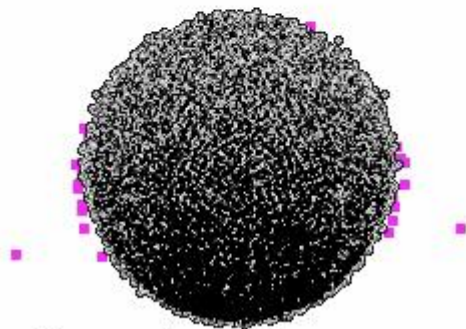
Model 5



Log densité (25x50kpc)

Processus de formation des filaments

Time = 0 Myr



Revaz et al. 07



Time = 0 Myr



Revaz et al.

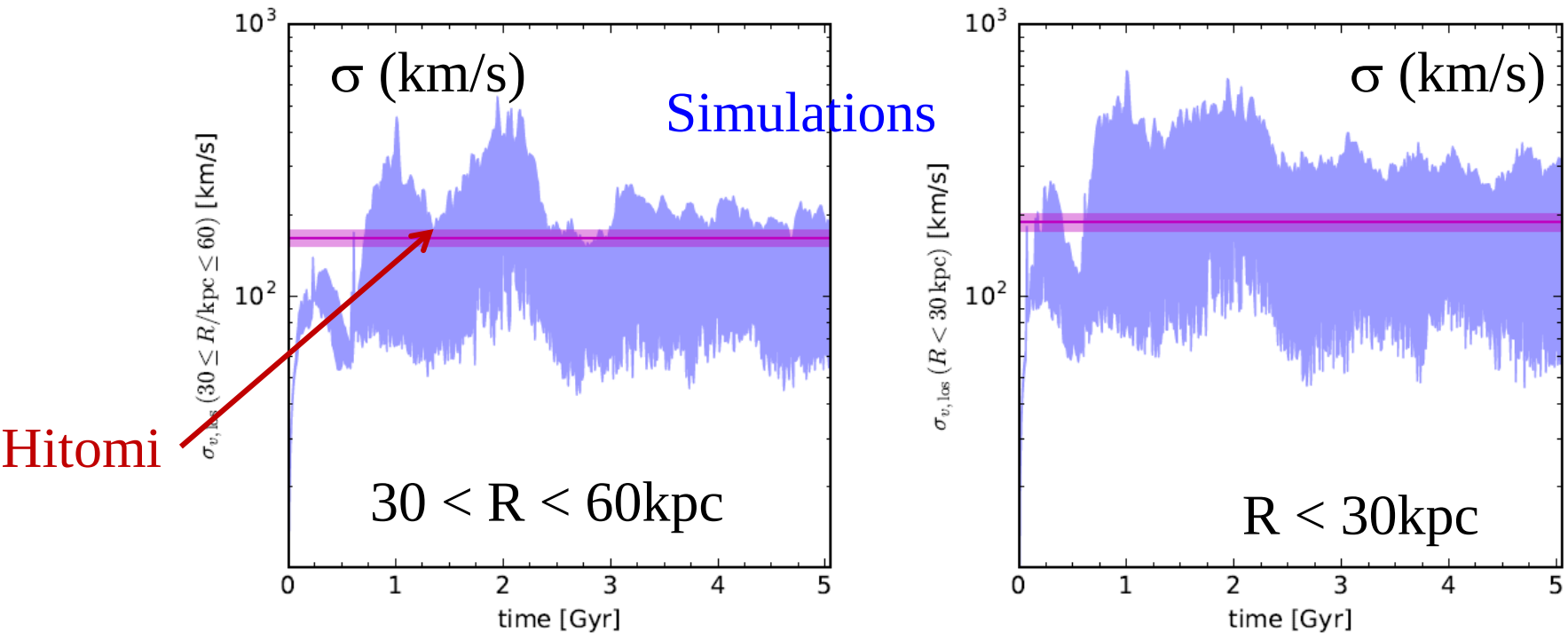
Dynamique du gaz

Hitomi dans Perseus mesure $\sigma_{\text{gas}} \sim 160 \text{ km/s}$, à 30-60 kpc (plasma)

→ AGN feedback assez tranquille, malgré les cavités, etc..

→ Le refroidissement **est possible avec un faible feedback**, CCA

Pas de fusions entre amas (relaxé depuis 4 Gyr)

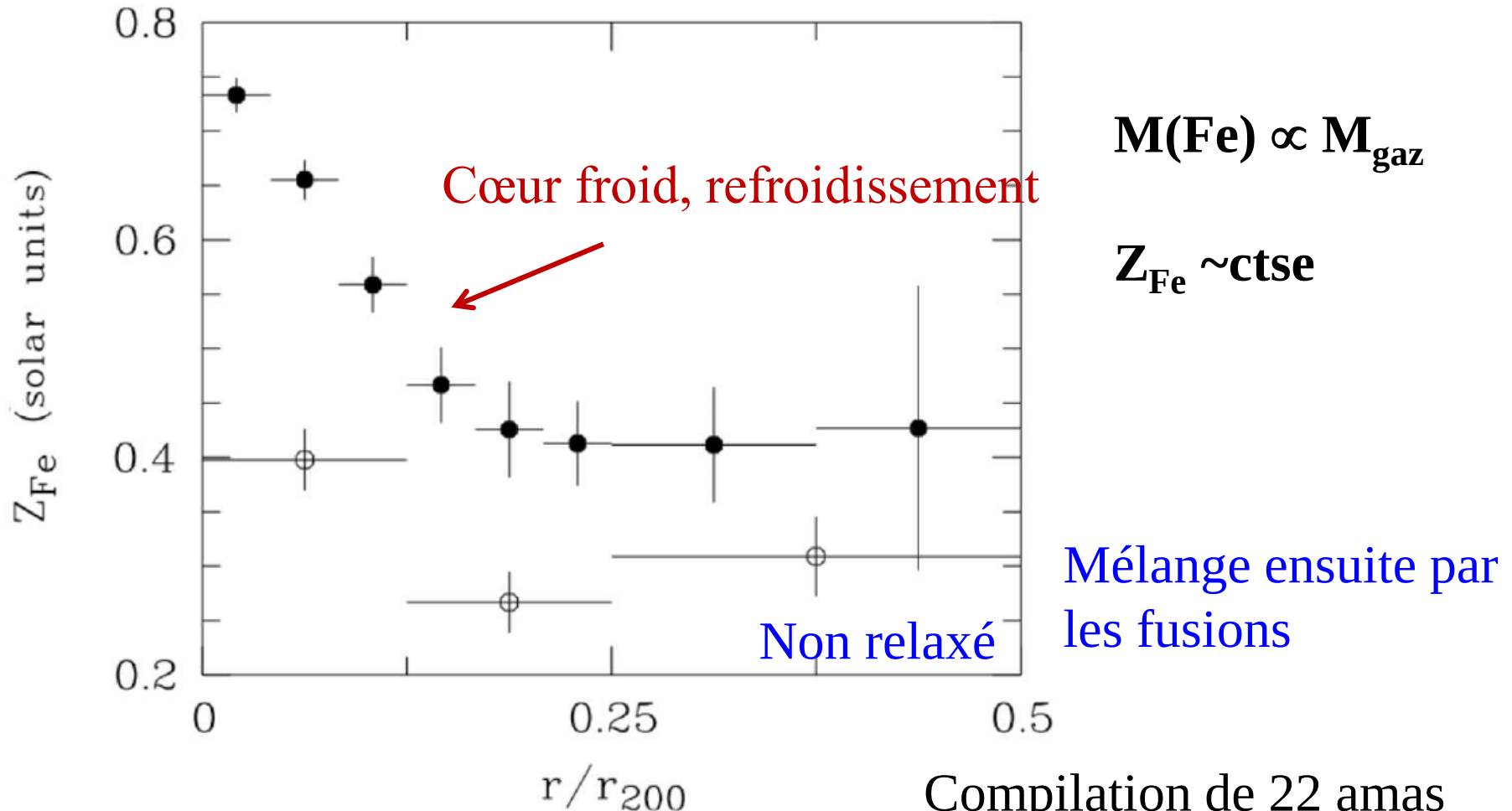


Fe XXV-Fe XXVI LOS velocity

Lau et al 2017

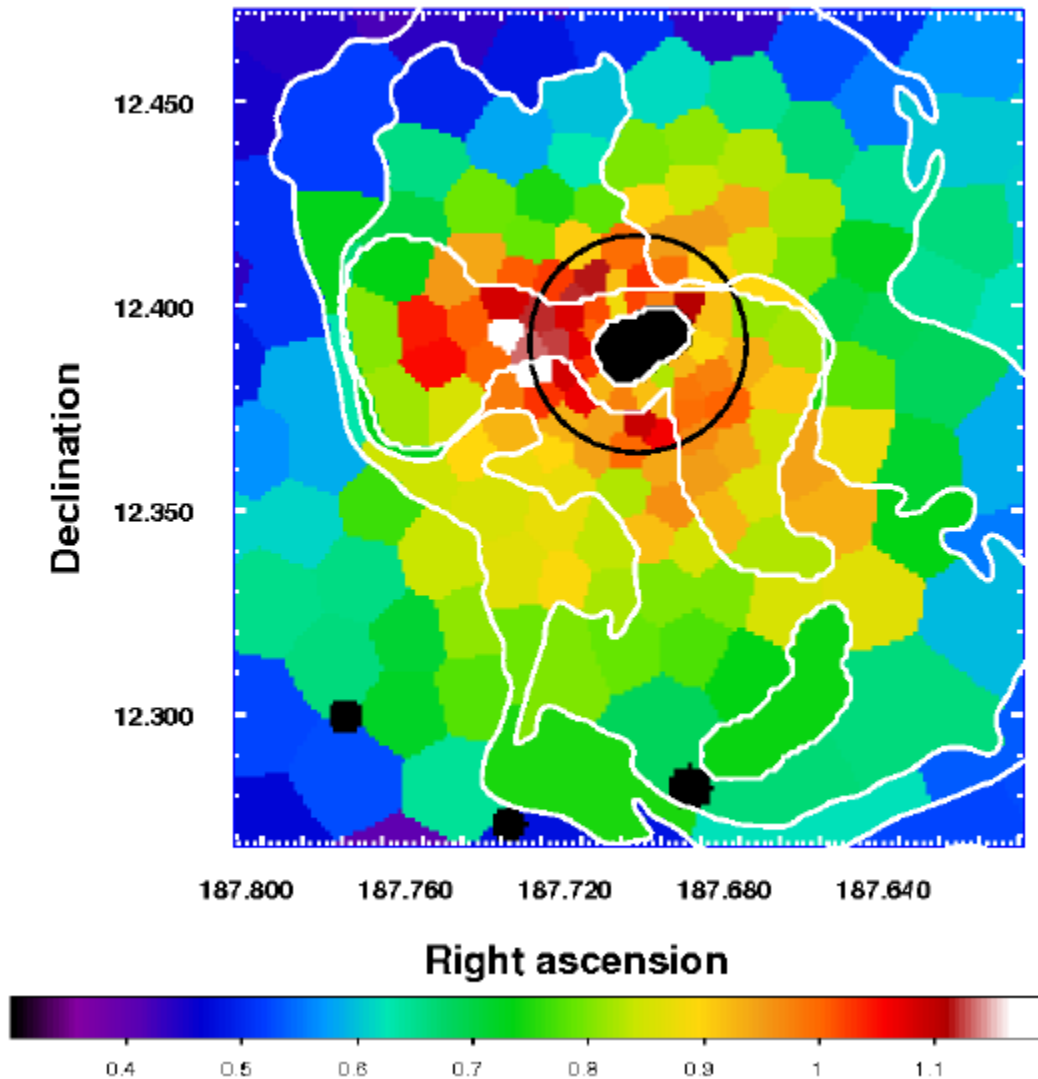
Production de métaux

Rejets des supernovae – Brassage et mélange par les bulles radio

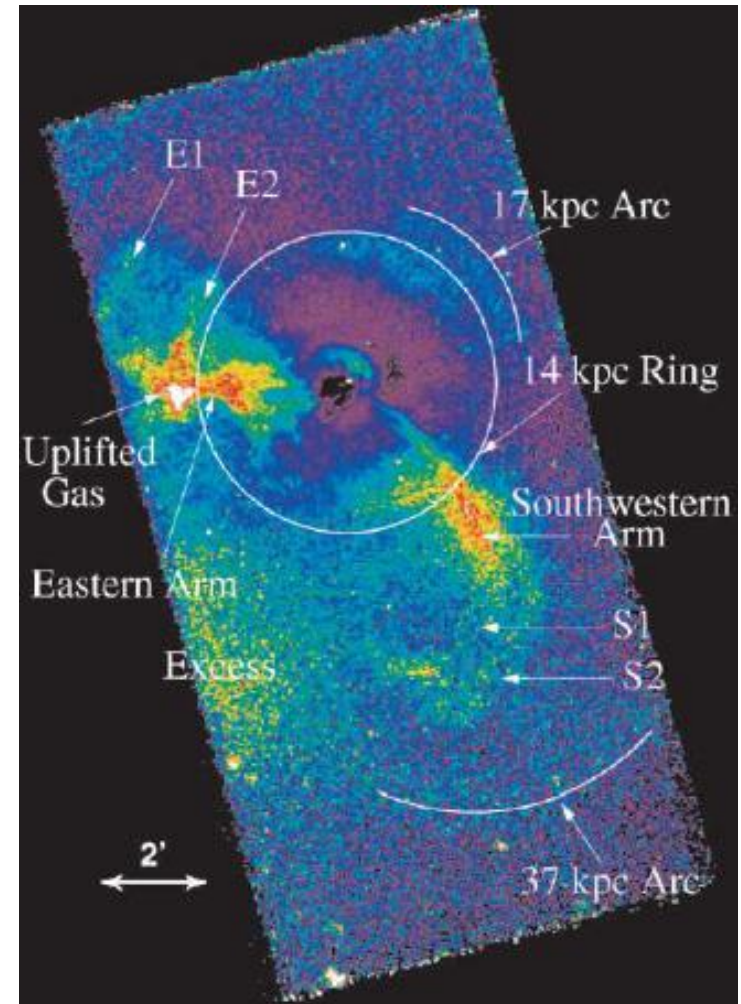


Compilation de 22 amas
De Grandi et al 2004

Carte des abondances dans M87

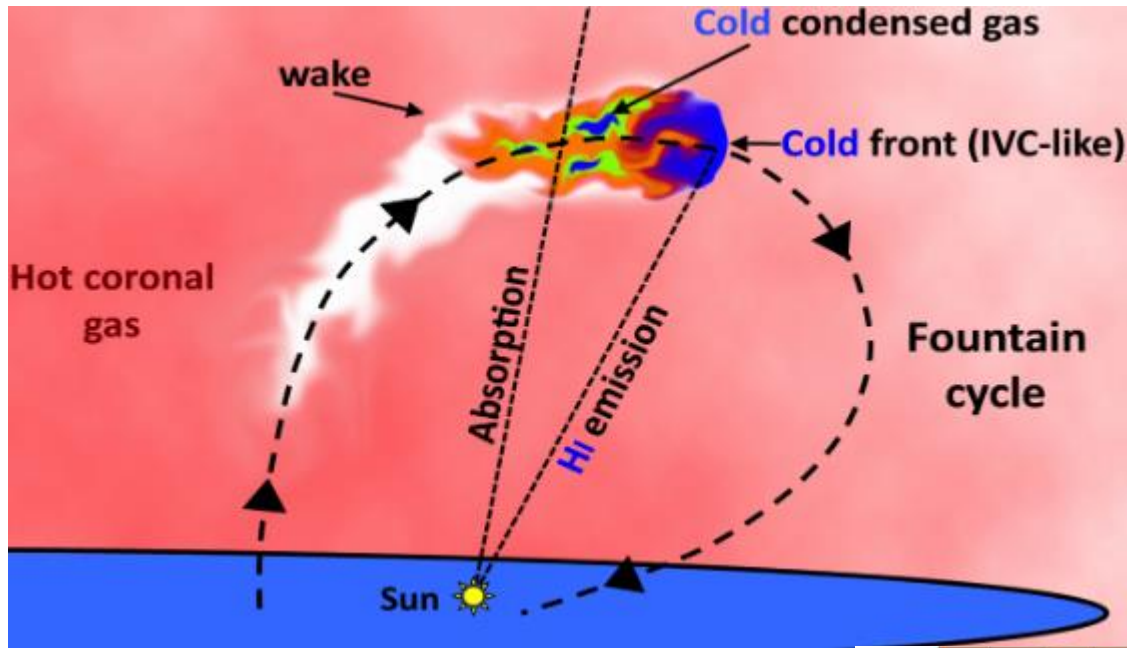


Simionescu et al 2008



Forman et al 2005

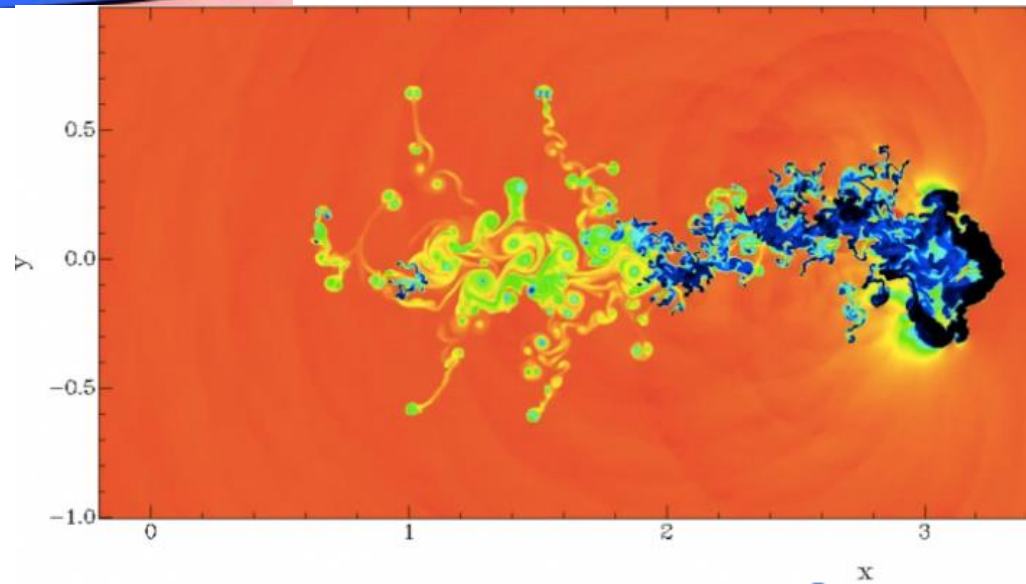
Engendrer l'accrétion de gaz froid



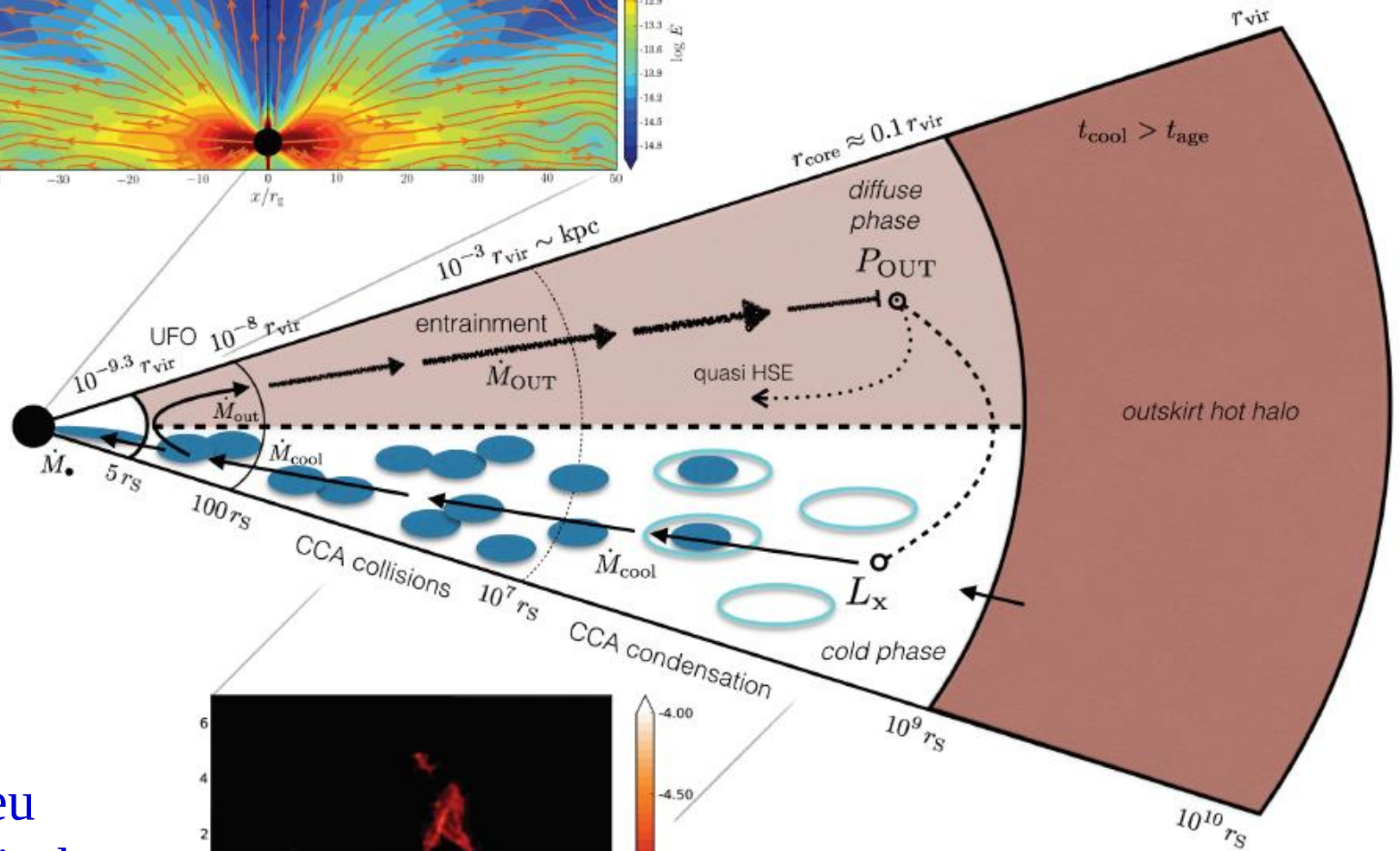
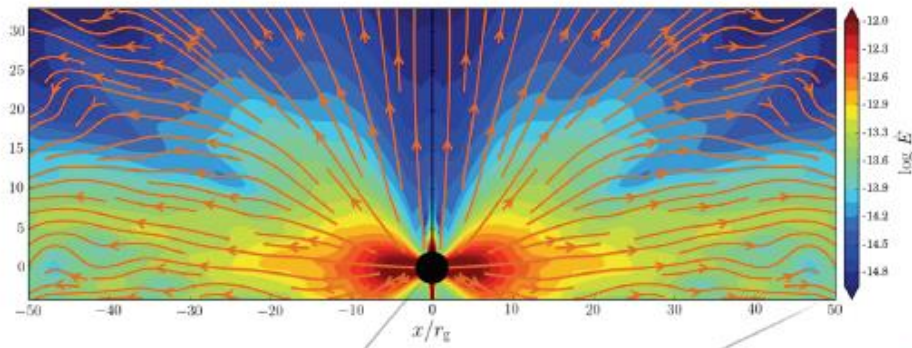
Fraternali & Binney 2008
Marinacci et al 2011

Dans la Voie lactée
ou NGC891
L'effet fontaine, aide la
couronne à refroidir

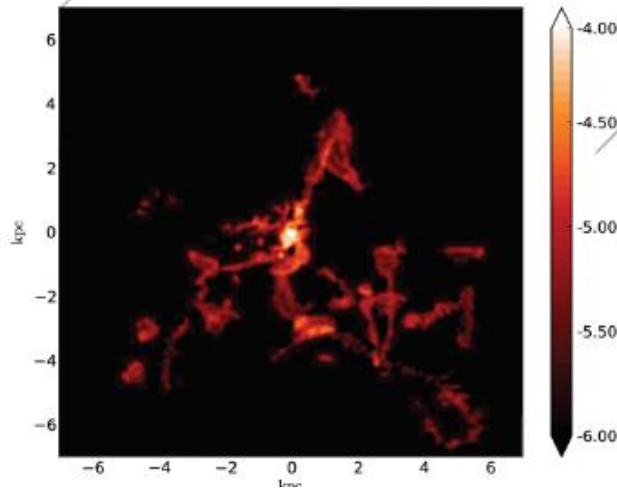
Marasco et al 2013, 2017



Le Gaz revient!



Milieu
Multi-phase
Dans les
amas

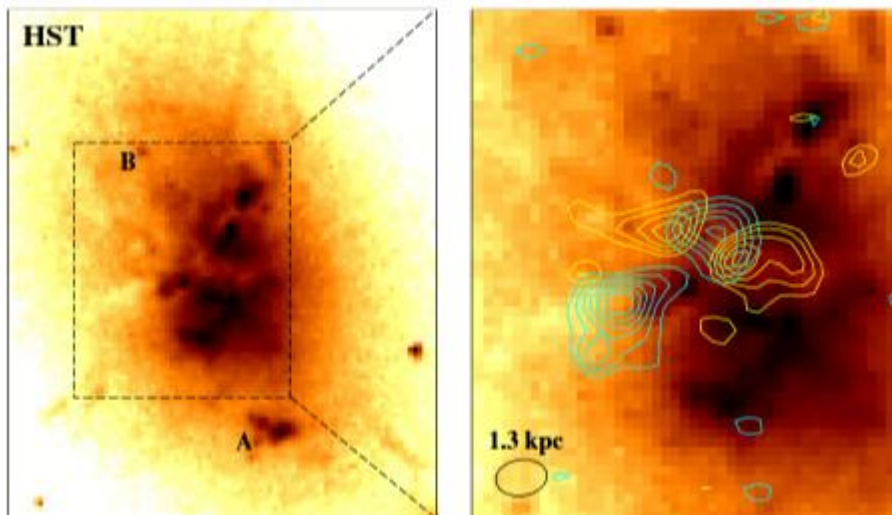


Chaotic Cold Accretion (CCA)

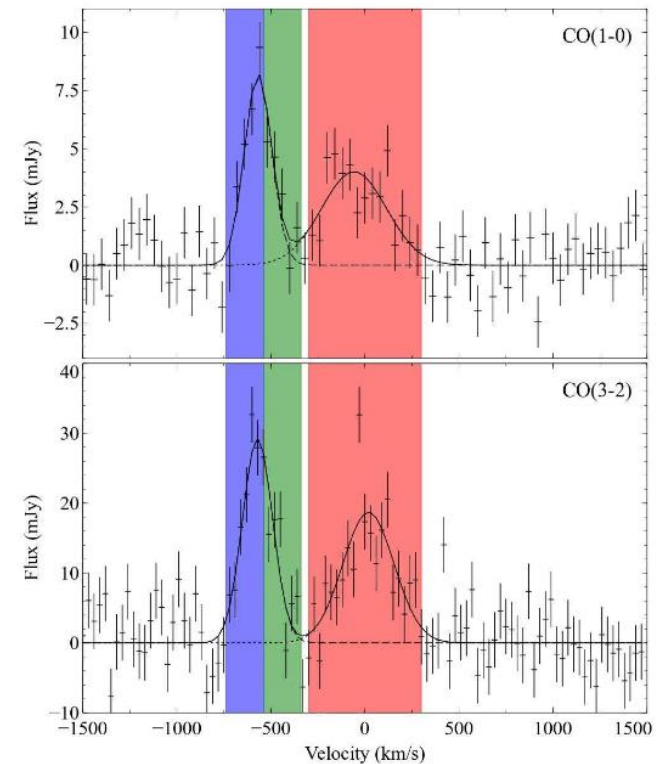
Gaspari & Sadowski 2017

ALMA: gaz froid dans les amas relaxés

Masse H_2 de $1.1 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ avec $-250 \rightarrow 250 \text{ km/s}$ autour de V_{sys}
Et un HVS à -570 km/s (un flot éjecté devant la BCG?)



A1664 BCG: CO(3-2) dans la composante
 systemic et HVS

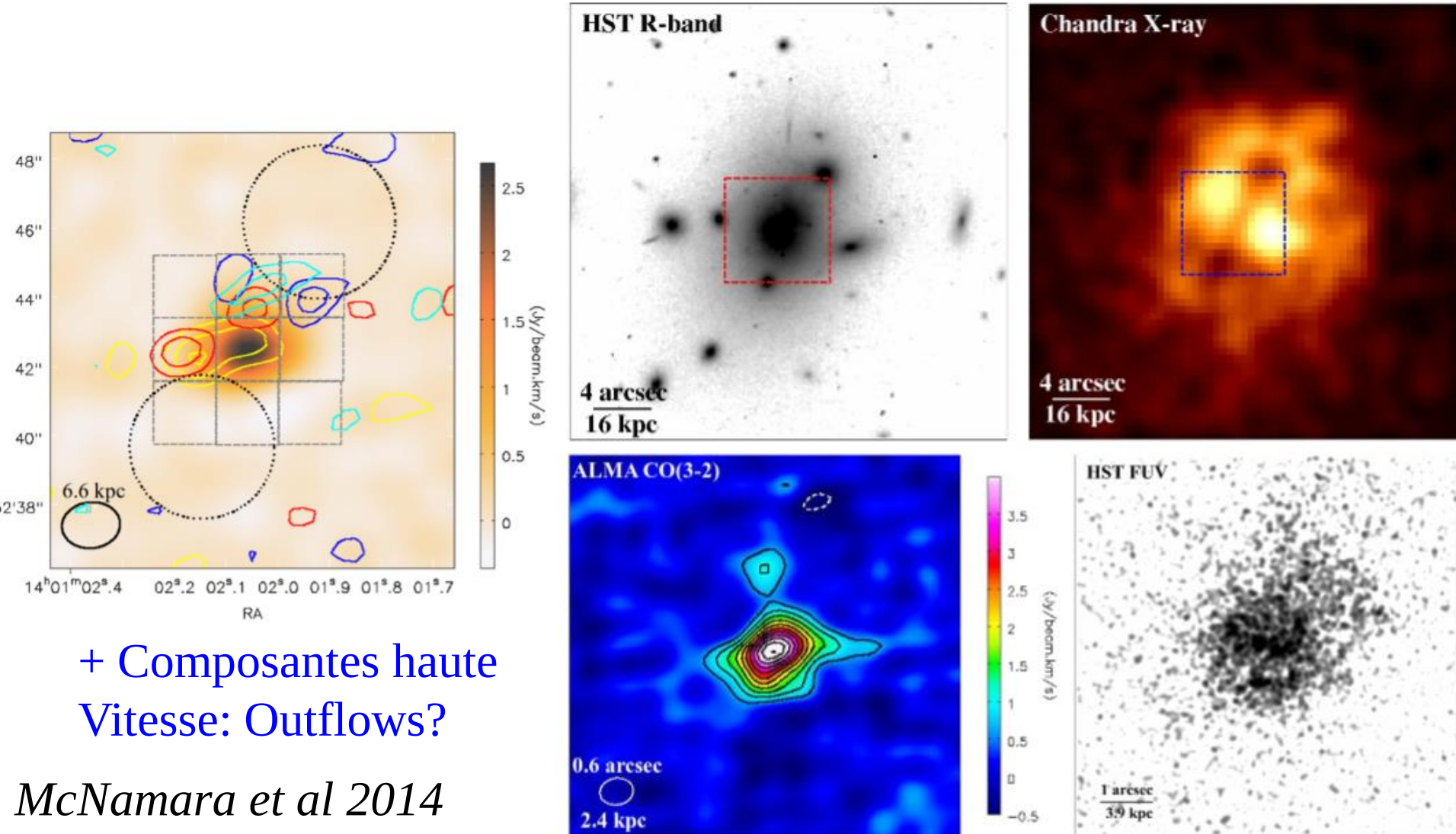


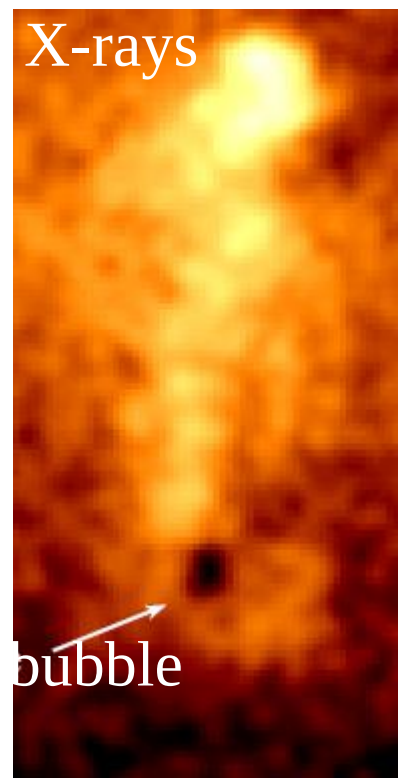
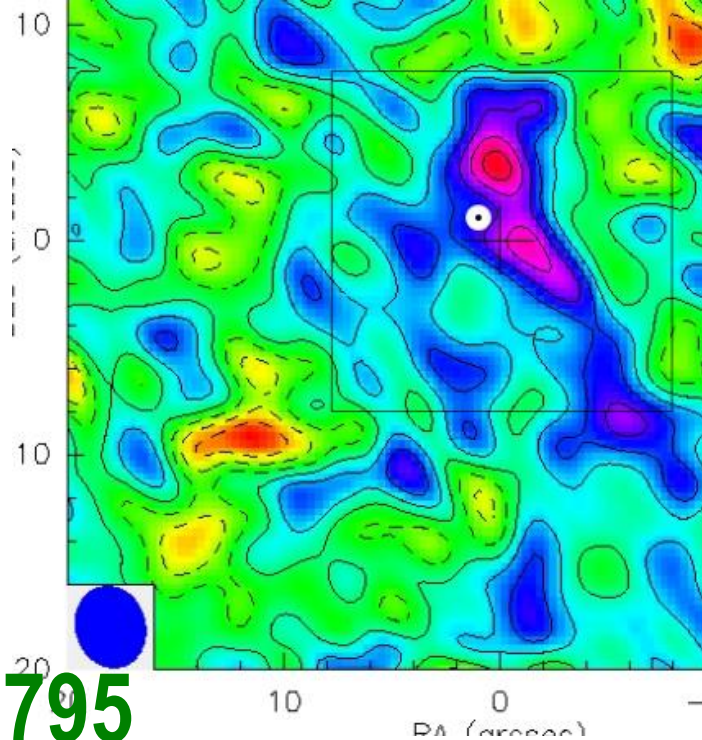
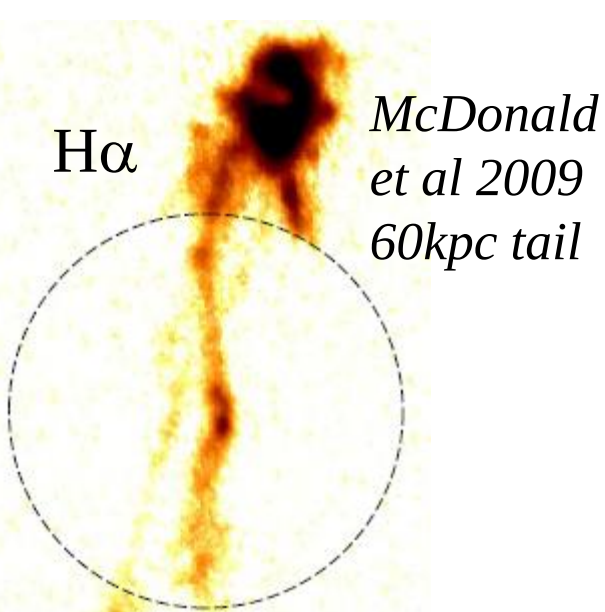
Russell et al 2014

ALMA: gaz moléculaire dans A1835

$M_{H_2} = 5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ dans 10kpc de la BCG Abell 1835

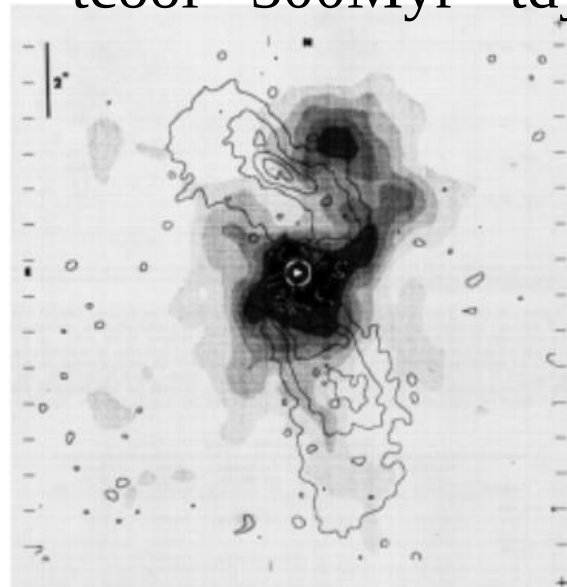
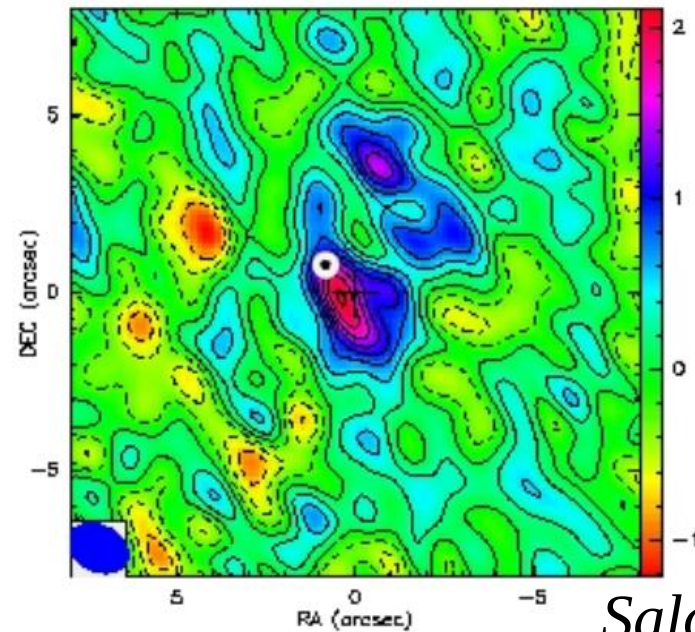
Profil étroit (130km/s): disque vu de face?



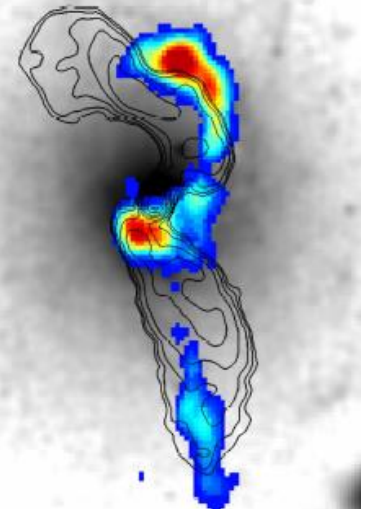


Sillage dans A1795

$t_{\text{cool}} = 300 \text{ Myr} = t_{\text{dyn}}$



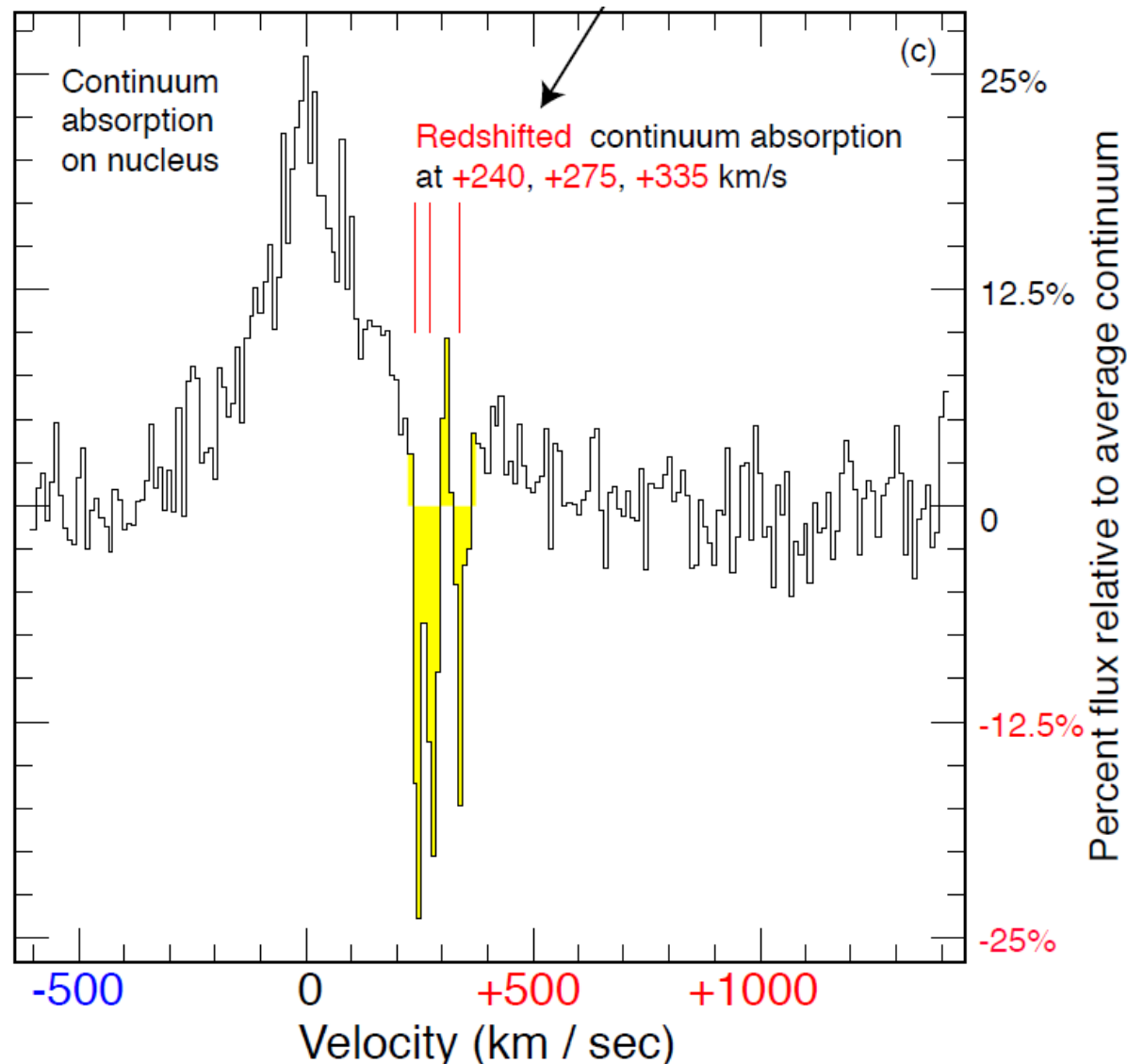
Flux ou reflux?



Salome & Combes 2004

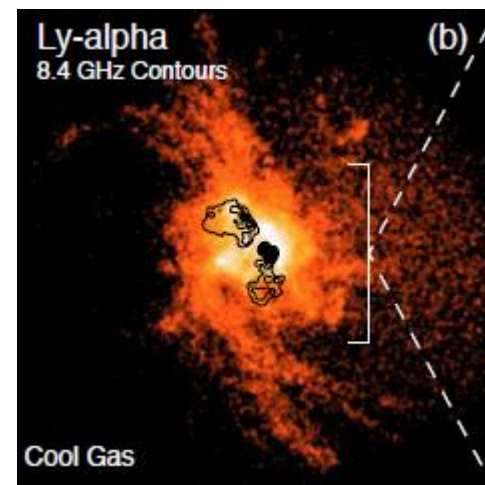
Russel et al 2017

ALMA: gaz froid dans les amas relaxés



Abell 2597 ALMA
CO(2-1) absorption
Devant l'émission
Synchrotron de l'AGN

Seulement vers le rouge
Des nuages denses qui
alimentent l'AGN



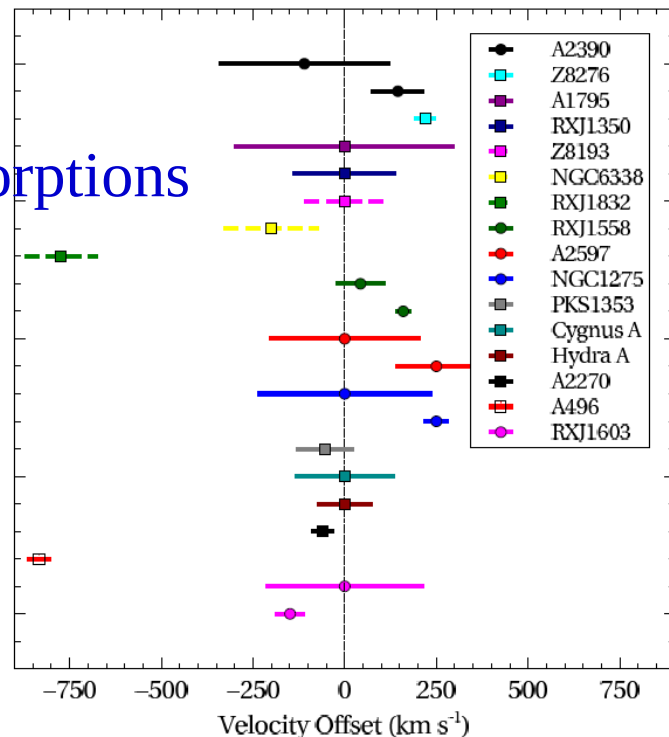
Tremblay et al 2016

Absorptions CO et HI

10^{21} - 10^{23} cm $^{-2}$ gaz froid (< 40K)
présent jusqu'à 30kpc de la BCG

CO: uniquement vers le rouge
HI: parfois vers le bleu

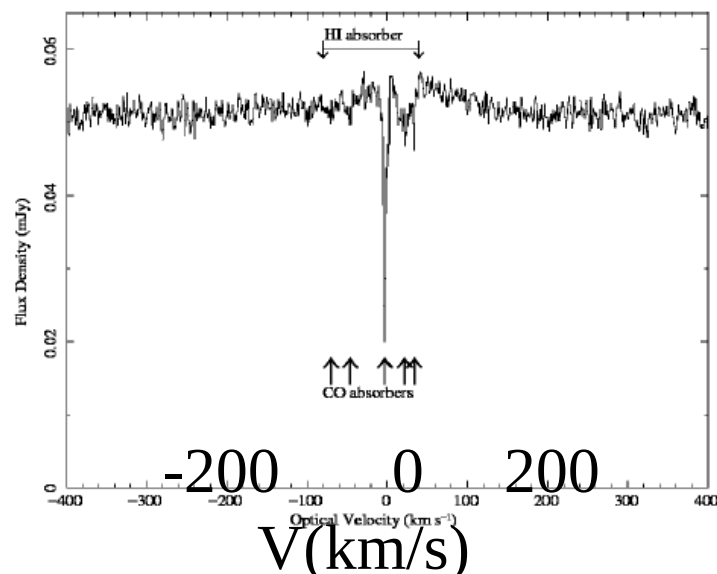
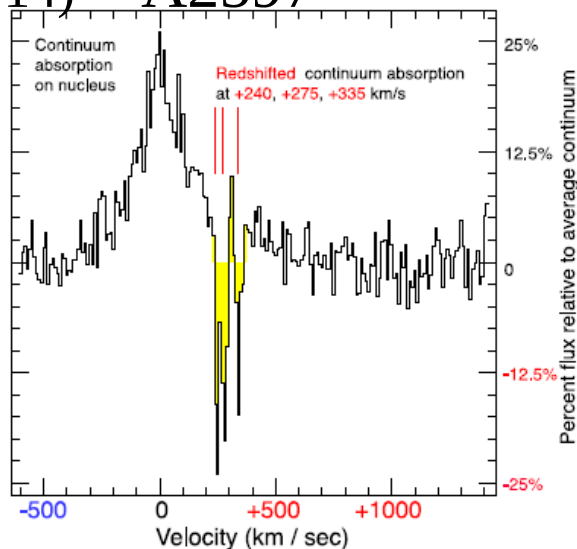
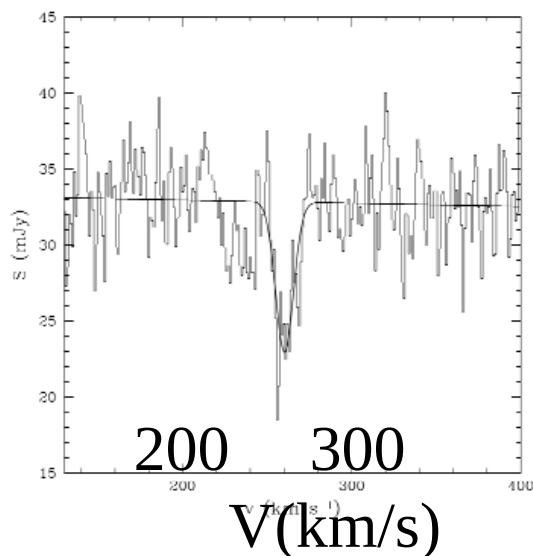
HI
absorptions



N5044 (David et al 2014)

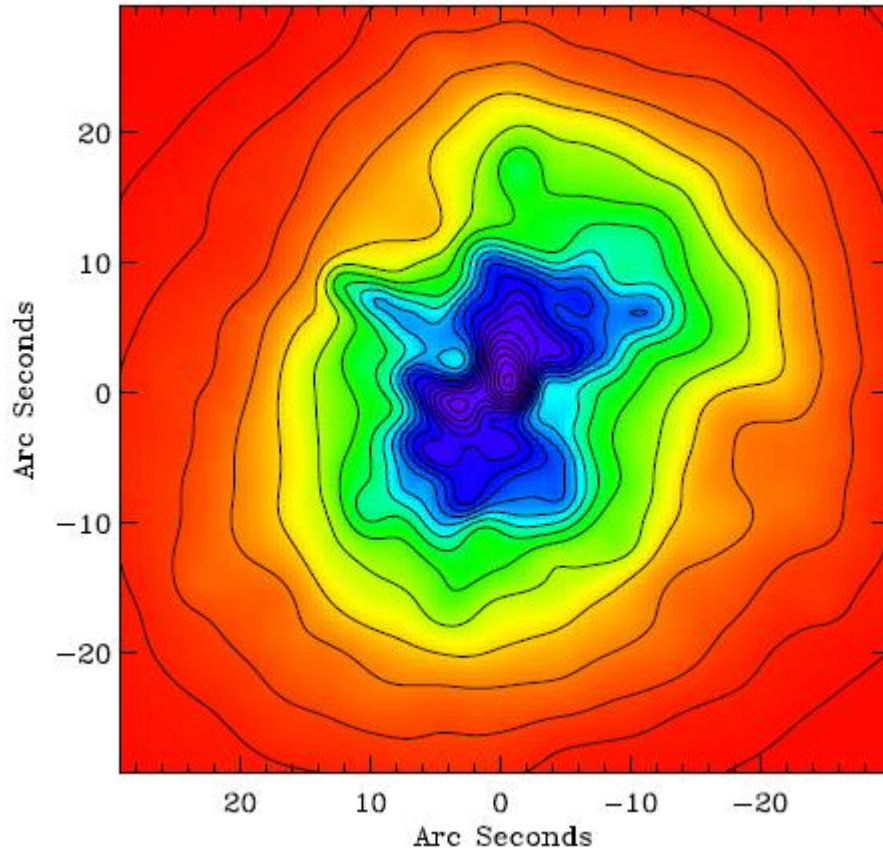
A2597

Hydra A (Edge et al)

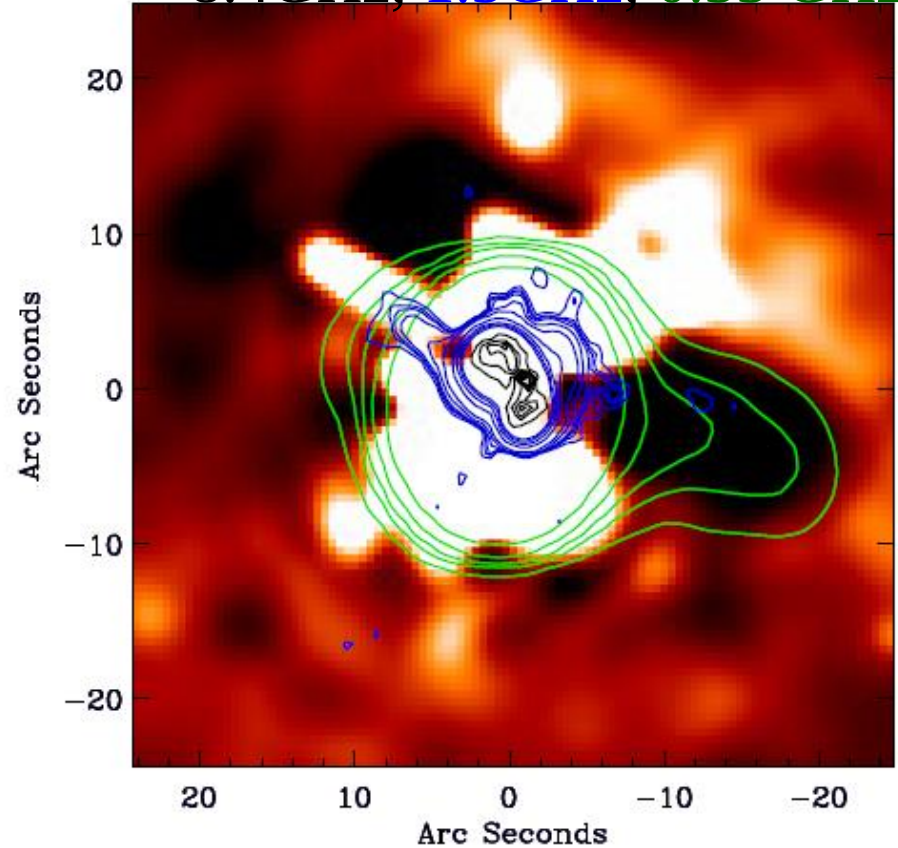


Cavités dans Abell 2597 (z=0.08)

0.5-7keV Chandra



8.4GHz, 1.3GHz, 0.33 GHz



Le filament froid est entraîné avec le jet

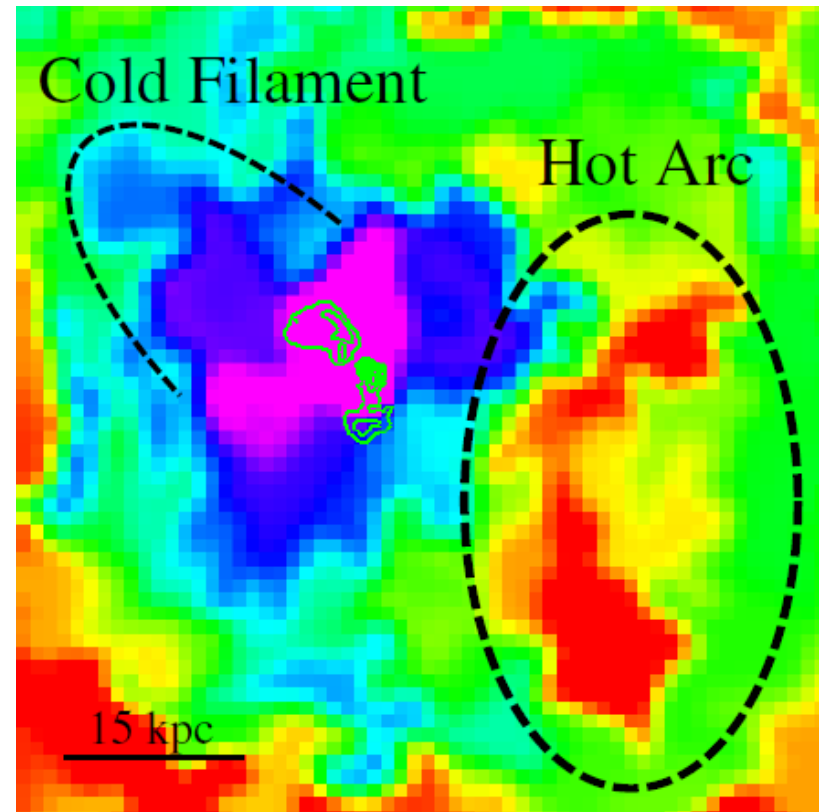
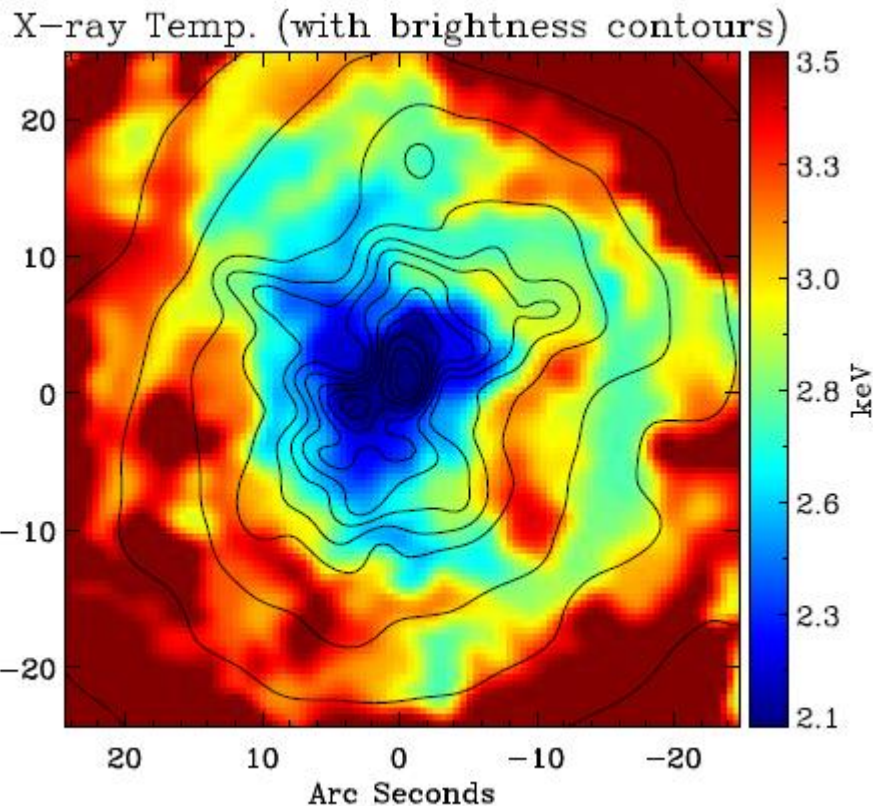
→ Entraînement du gaz multiphase (10^3 - 10^7 K) par la radio source

Tremblay et al 2012

A2597: arc chaud, filament froid

Filament de $10'' = 15\text{kpc}$, Arc de $\sim 20'' = 30\text{kpc}$

L'arc chaud pourrait être un choc, dû au gaz qui tombe pour remplir la cavité

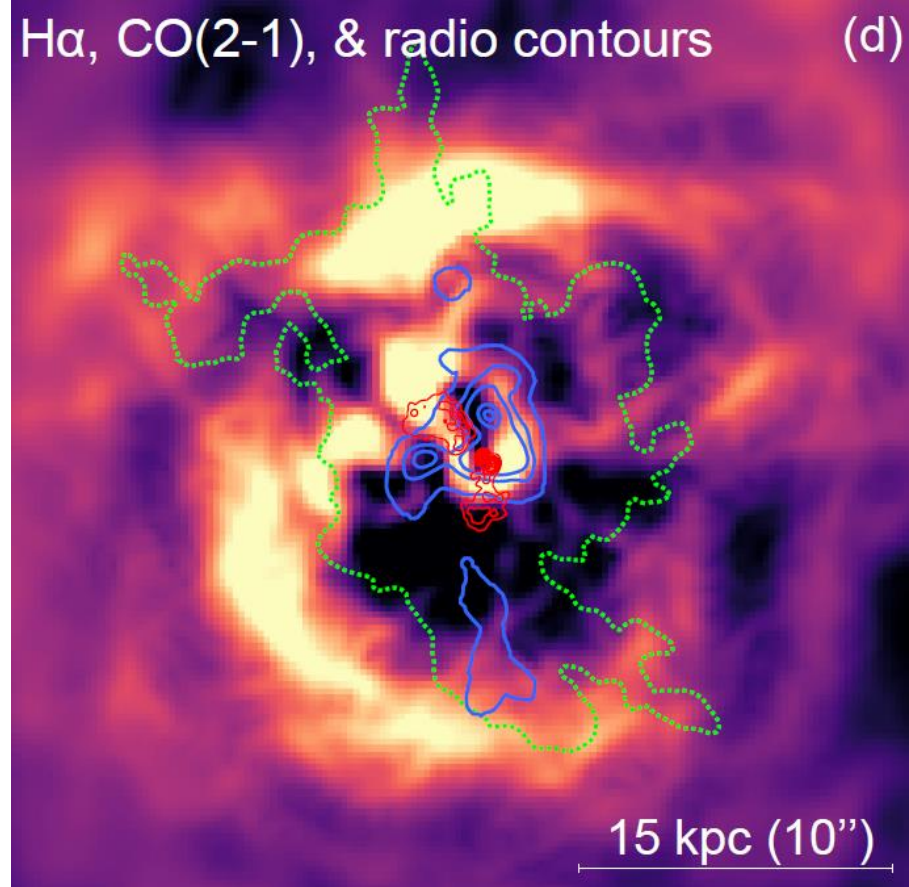
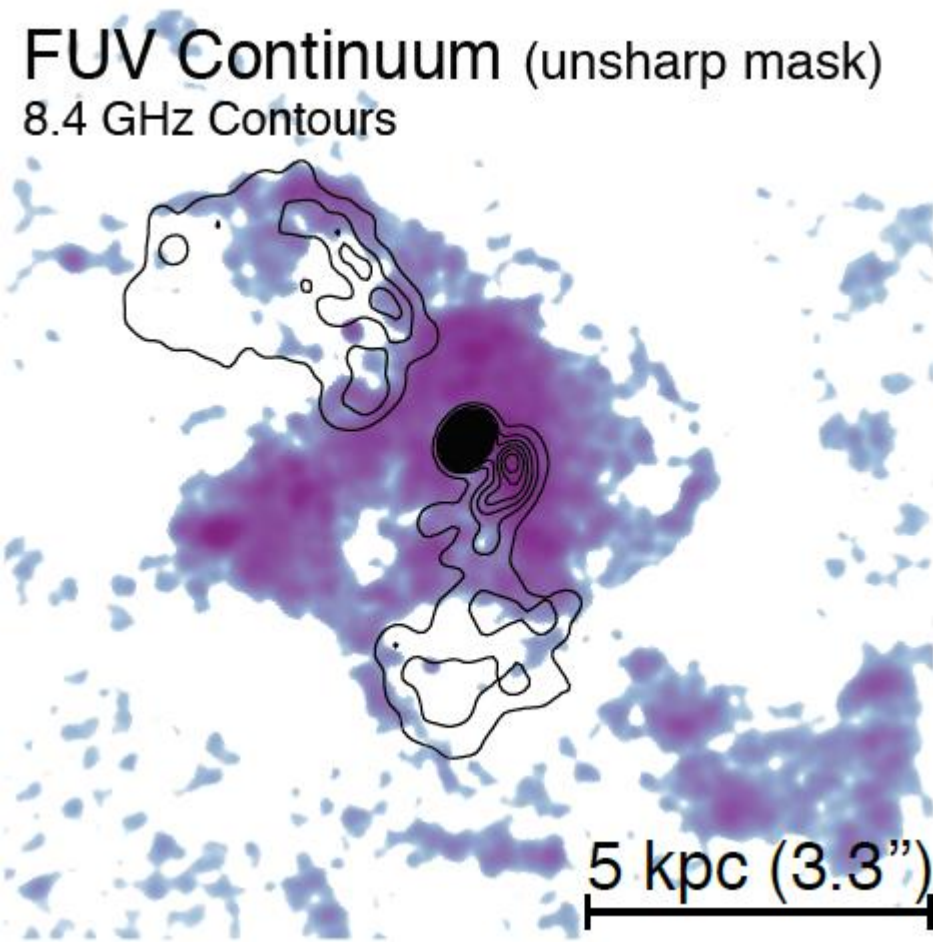


Tremblay et al 2012

Abell 2597

$M(H_2) = 3 \cdot 10^9 M_\odot$
dans 30kpc

Tremblay et al 2018



Flux et reflux, + déviation du jet
par les nuages moléculaires

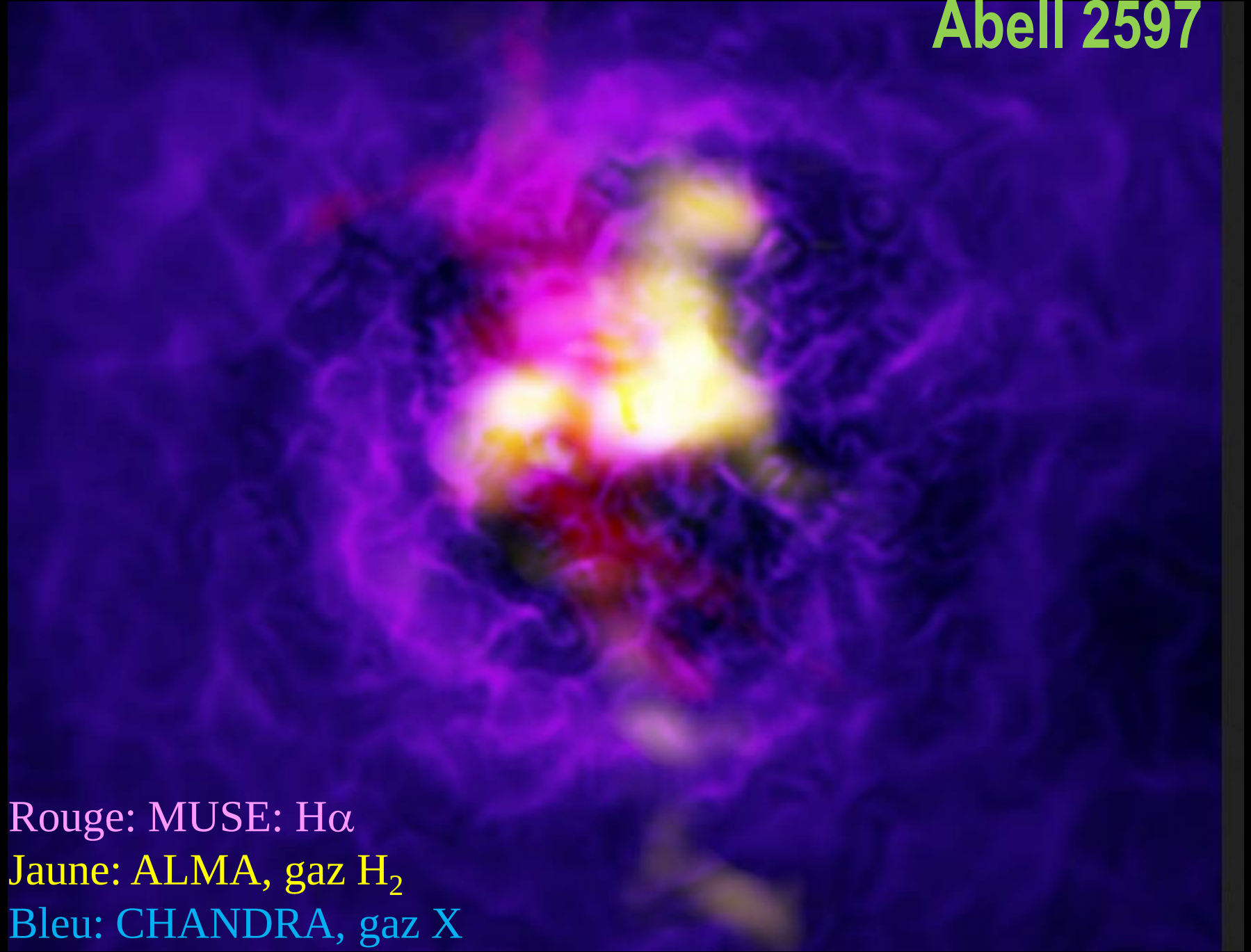
Pas de chute libre

$$\rho_{ICM} V_T^2 A = M_{cl} GM/R^2 = M_{cl} V^2/R$$

$$\rho_{ICM} R \sim N_{H_2} = 10^{22} \text{ cm}^2$$

$$\rho_{ICM} \sim 0.1-0.2 \text{ cm}^{-3} \quad R \sim 15-30 \text{ kpc}$$

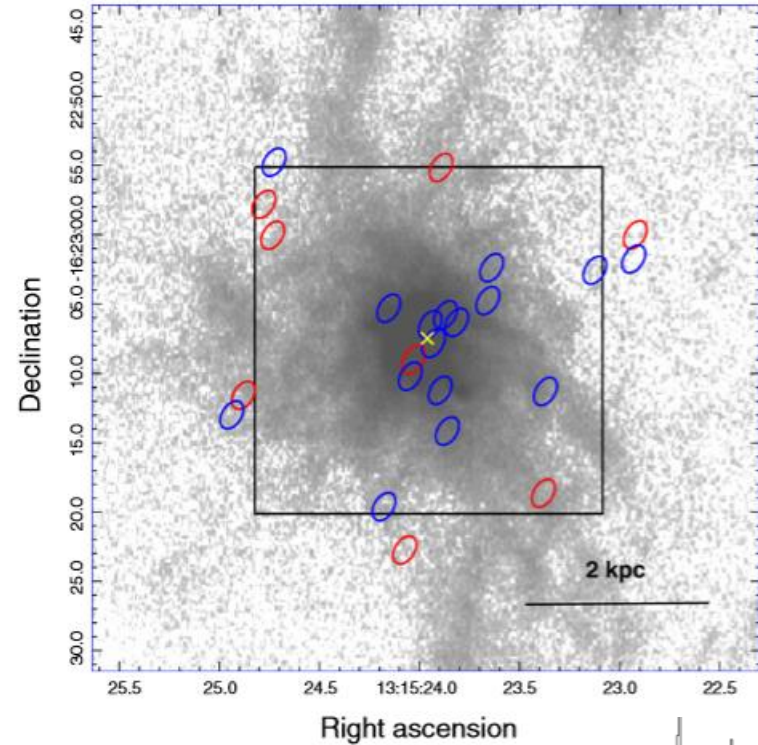
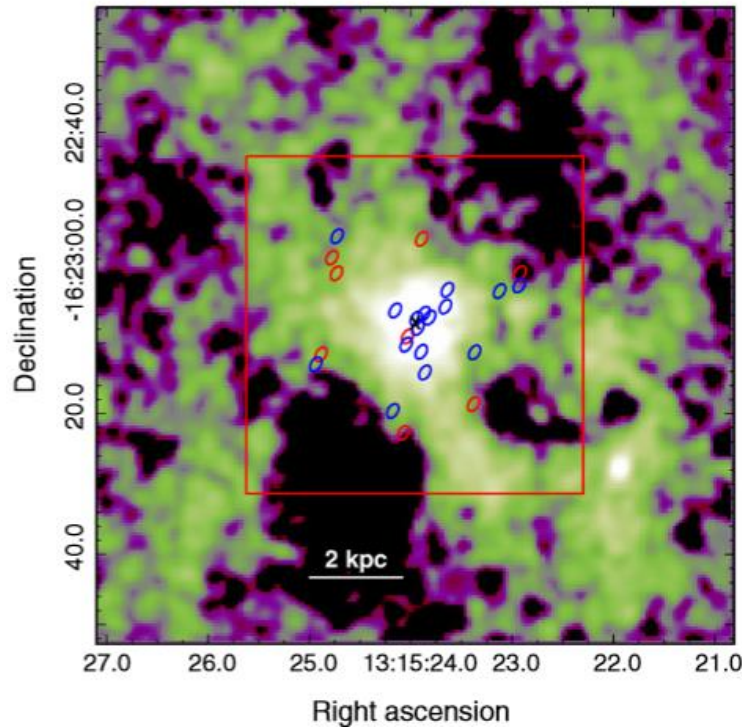
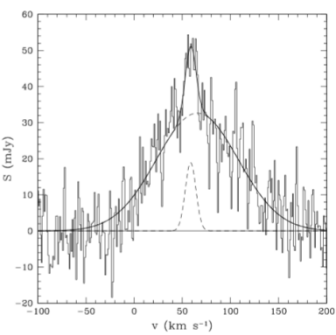
Abell 2597



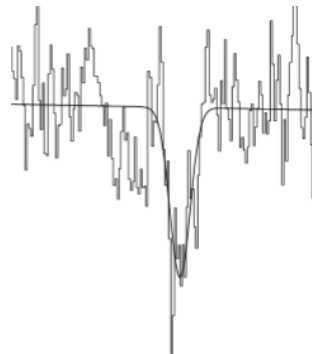
Rouge: MUSE: H α
Jaune: ALMA, gaz H $_2$
Bleu: CHANDRA, gaz X

ALMA, gaz froid dans les groupes X

CO: nuages moléculaires (décalages bleus et rouges), sur
L'image Chandra de N5044 image HST

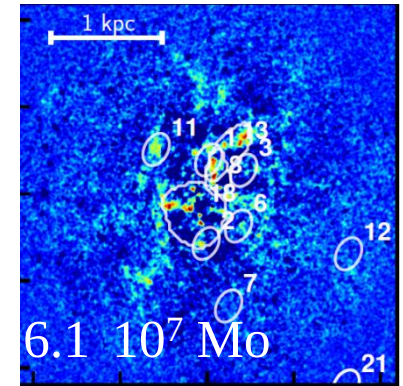
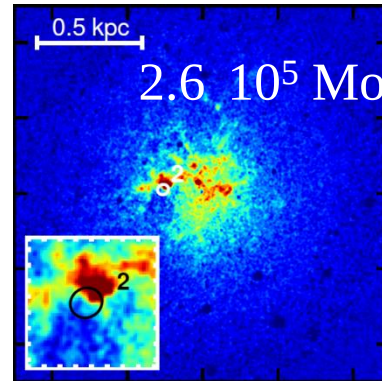
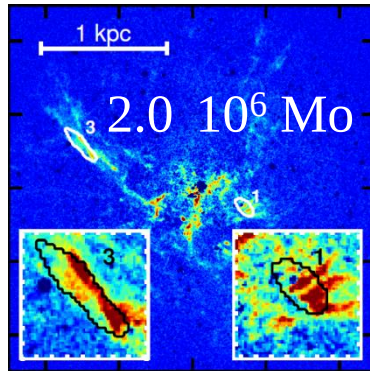
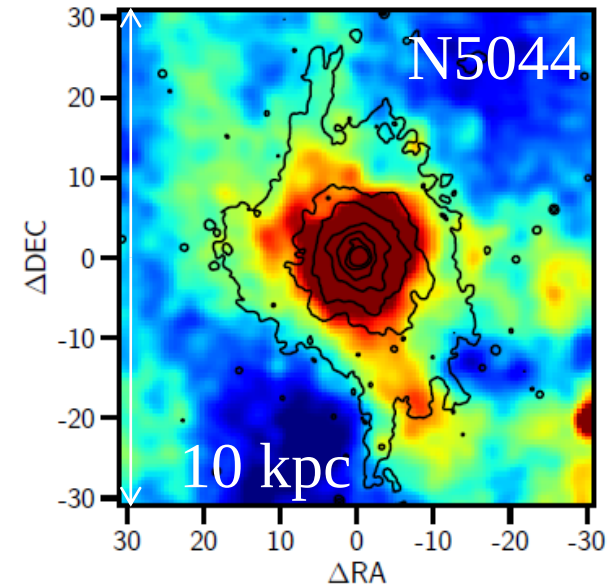
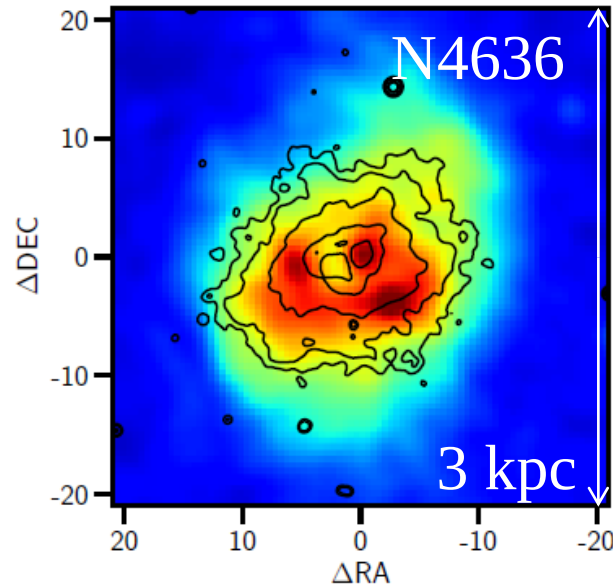
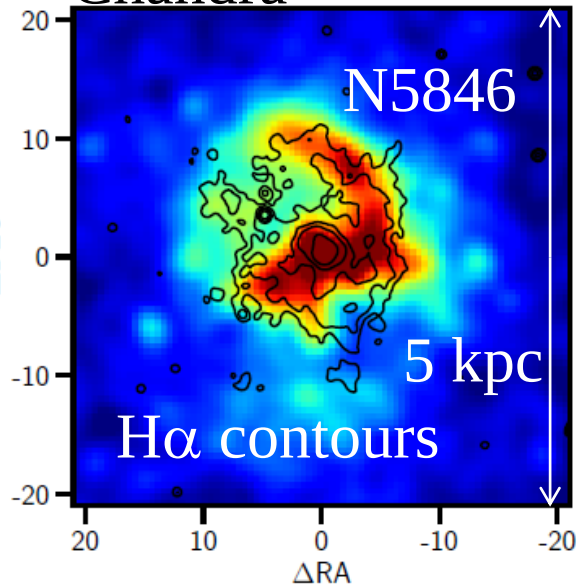


Masses des clumps, ou GMA, 3×10^5 à $10^7 M_{\odot}$, 10-50 km/s
Pas de disque en rotation, mais clumps aussi en absorption
David et al 2014



Rayons-X, H α et CO dans les groupes

Chandra



Origine du gaz froid: cooling à partir du milieu chaud (avec la poussière)

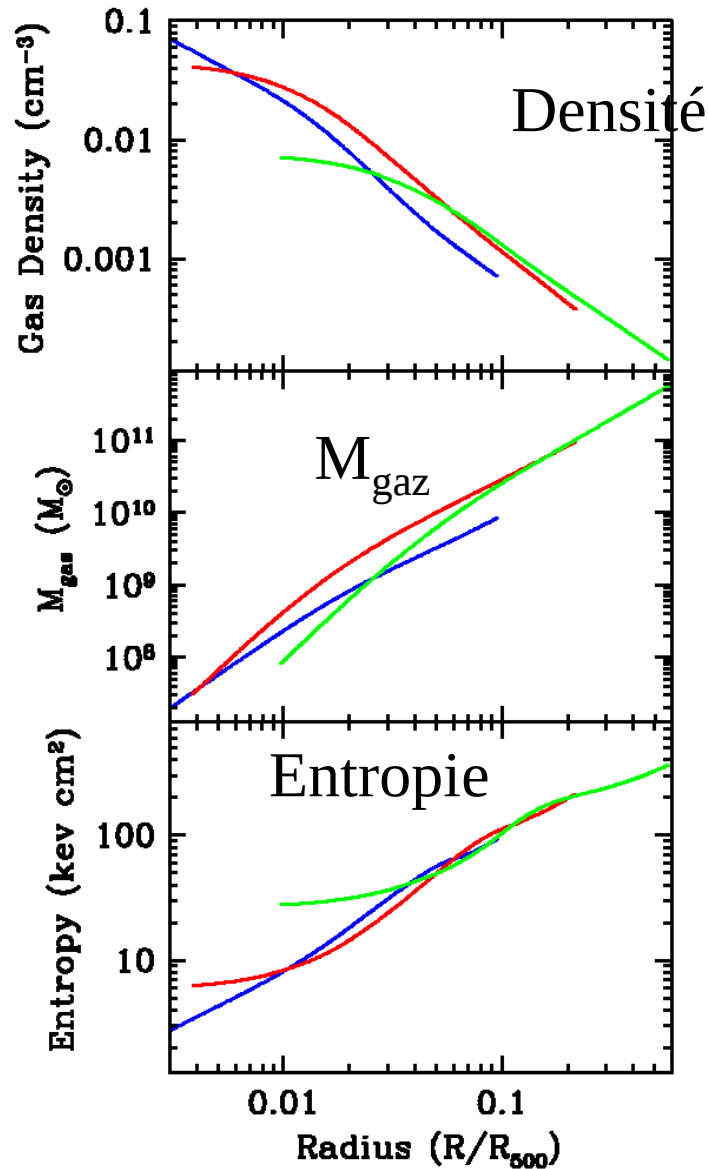
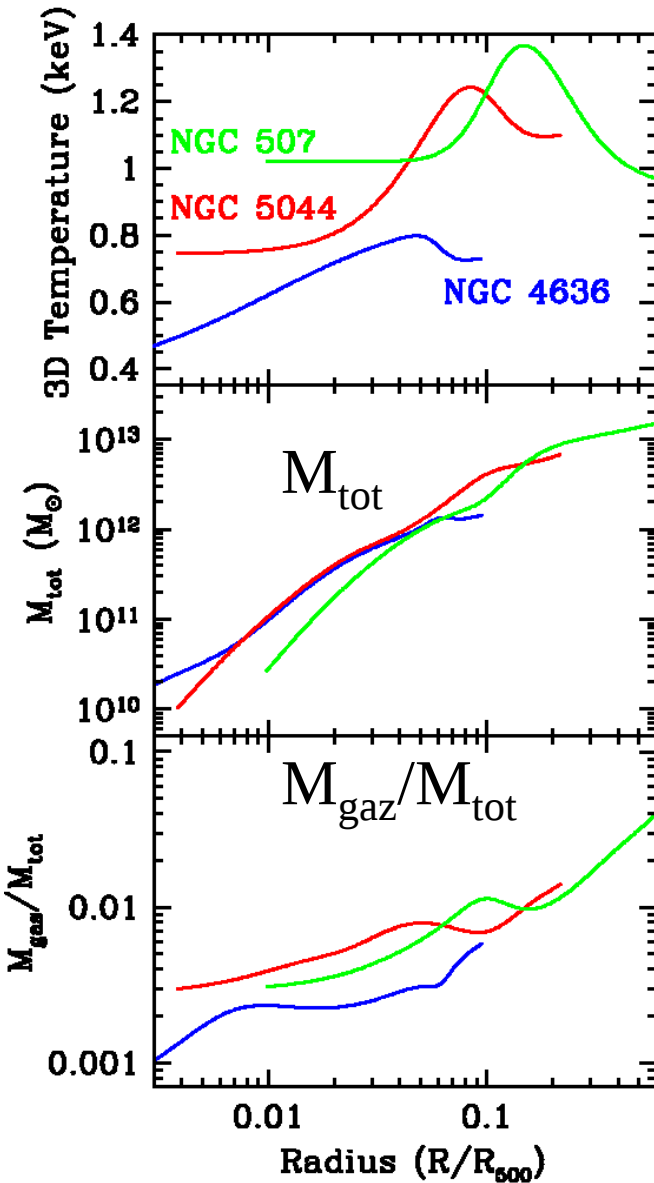
Viriel

$$\alpha = \frac{5\sigma^2 R}{GM} \quad (20-200) \text{ compatible avec CCA}$$

Temi et al 2017

Différences d'un groupe à l'autre

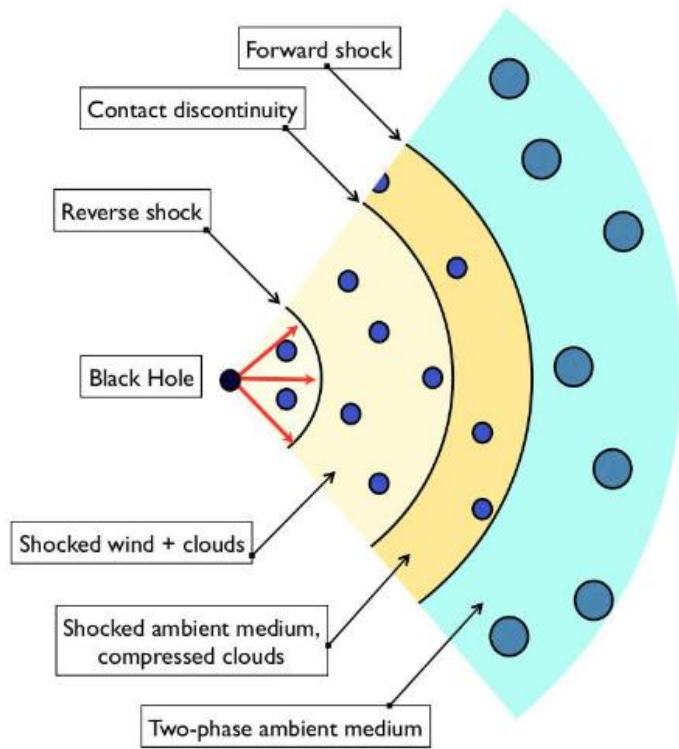
T



→ Différents
degrés
d'évolution

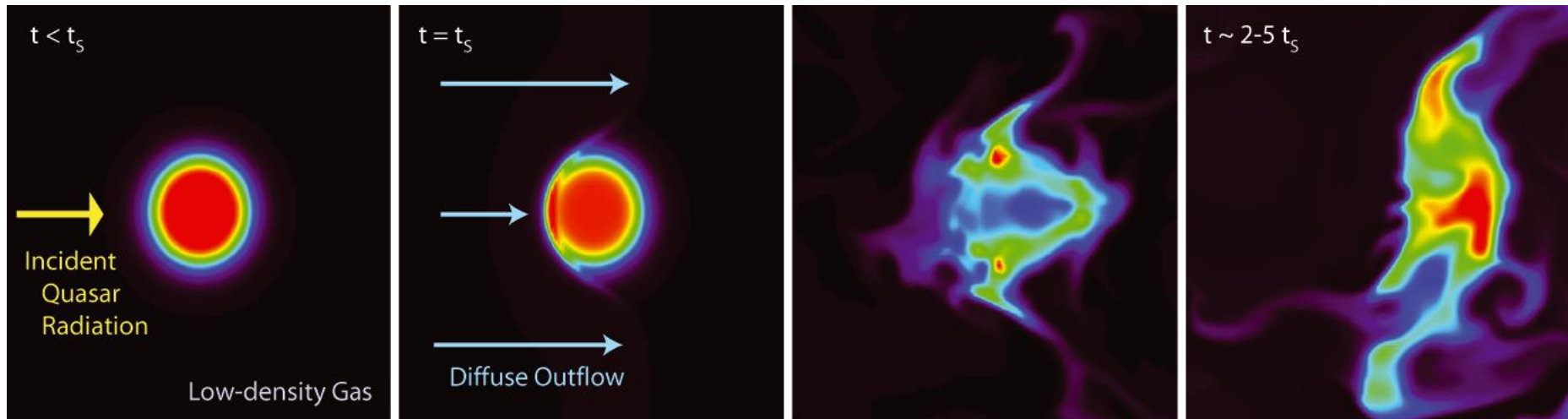
→ Différents
degrés
de concentration

Pourquoi tant de molécules?



Petits nuages denses, **surface ΔA** insuffisant. Un faible vent peut désintégrer les nuages, et ainsi accroître leur surface

Instabilités Kelvin-Helmholtz → N_H décroît, ΔA croît
→ + Re-formation des molécules en aval



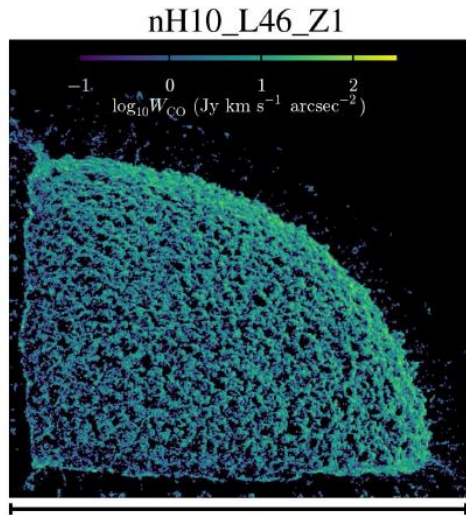
Formation des molécules

Simulations numériques: les nuages détruits ne se re-condensent pas?

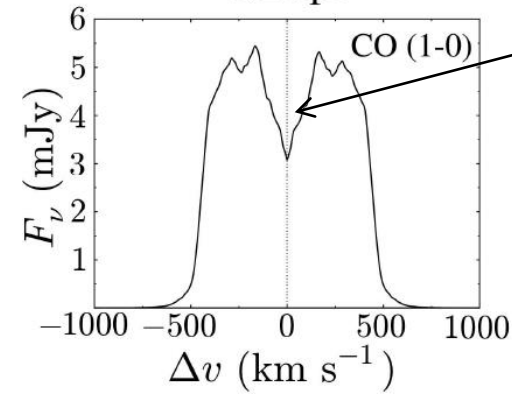
Pas assez de surface pour être entraînés (*Ferrara & Scannapieco 2016*)

Destruction de la poussière par pulvérisation

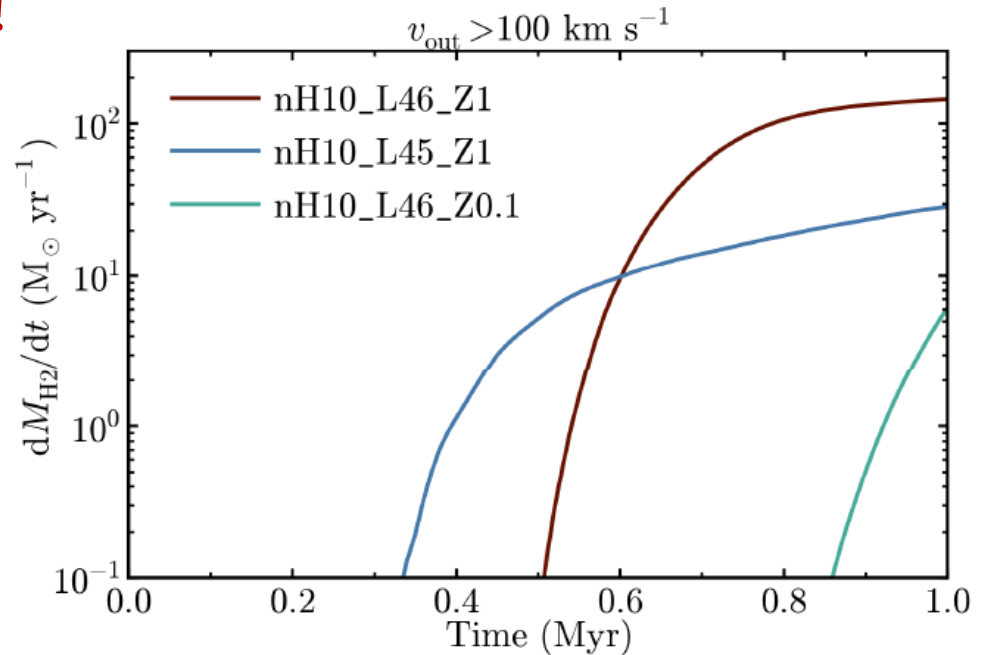
Autre simulation, avec la chimie formant H_2 , la poussière



$$\alpha_{CO} = 0.15 !$$



Flux de H_2 de 140 $M_{\odot}$ /yr



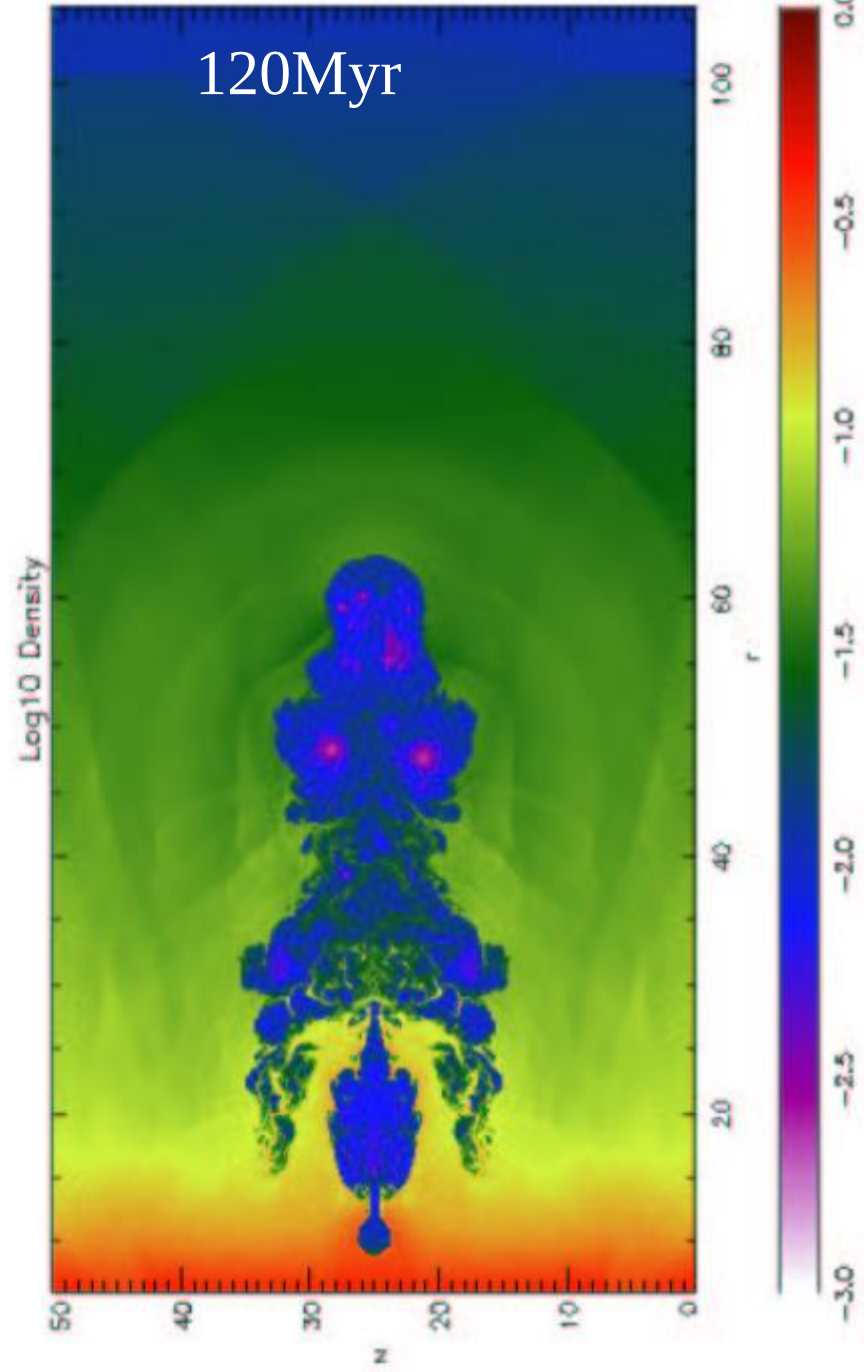
Richings & Faucher-Giguère 2017

Brueggen & Kaiser 2002
60Myr

Gaz injecté avec Tx2



120Myr

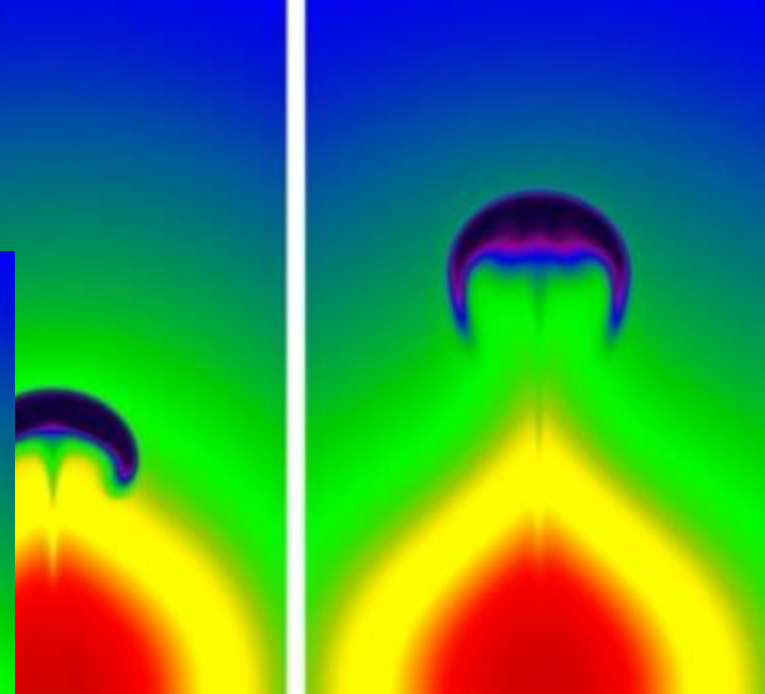
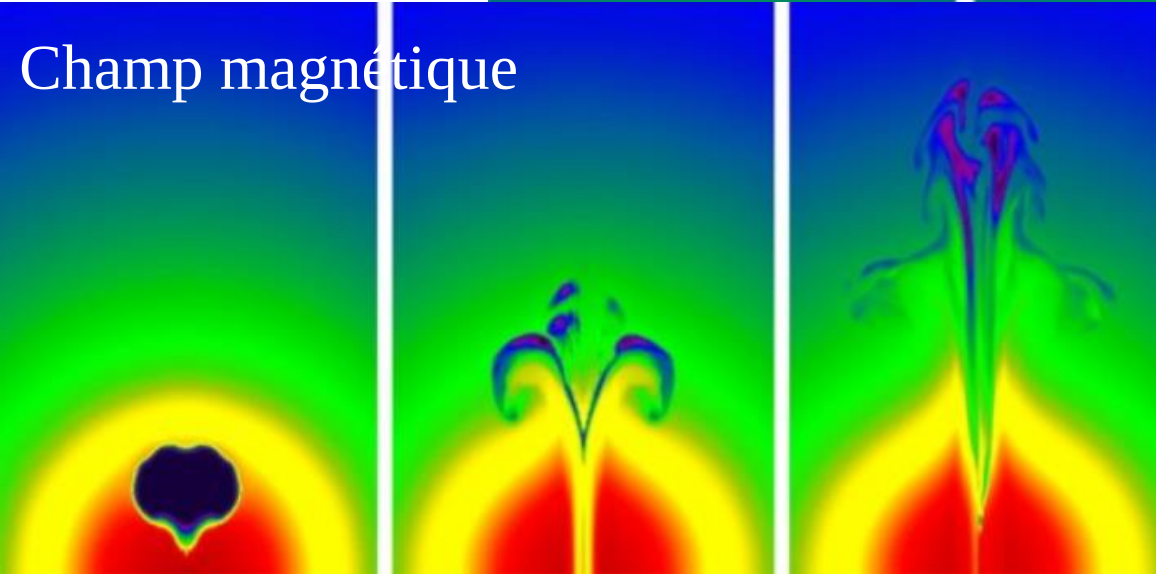


FRI



3D-MHD
Champ B vertical
+ viscosité

Champ magnétique

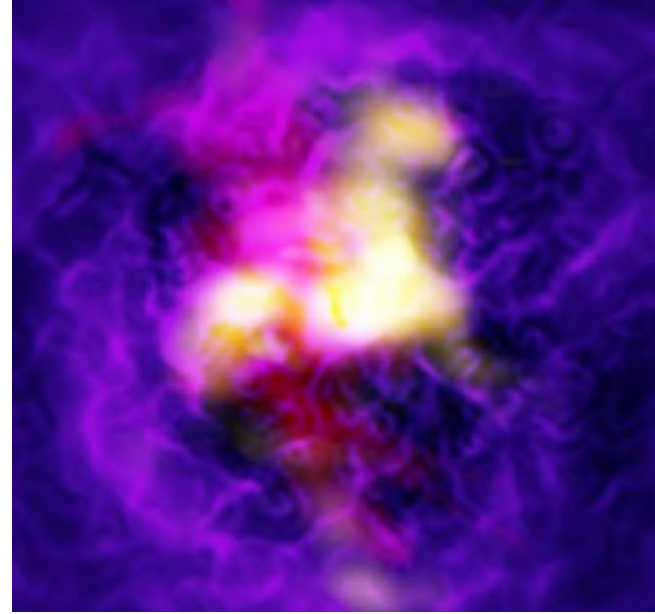


Dong & Stone 09
B supprime les
Instabilités //
Mais pas dans la
direction $\perp$

Churazov 2001



Vision actuelle des amas: multi-phase



- Le gaz est très inhomogène
Les différentes phases (T, ρ) sont en équilibre de pression et se déplacent ensemble (champ B)
- Le mélange entre phase froide et chaude, permet de produire du gaz tiède, sans même passer par l'émission de raies
- La déposition de gaz froid a lieu partout, dans une région de $\sim 50\text{kpc}$
- Les origines des inhomogénéités sont: AGN, ou fusion d'amas
- **Destin du gaz froid** qui se découple:
 - tombe au centre
 - ou bien reste sur place, forme des étoiles

Résumé

“Cooling flows” modérés par les AGN

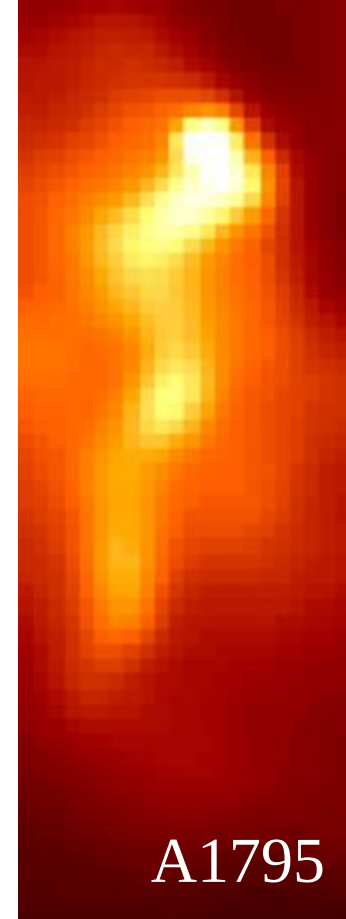
Résoud le problème des années 1990s

AGN dans un “radio mode” ont une haute efficacité mécanique

AGN chauffent de façon **épisodique** via les jets radio

Profil de génération de chaleur régulé par le profil de densité du gaz via rayon de disruption du jet

Gaz multi-phase, chaotique, mélange de gaz chaud et froid



A1795