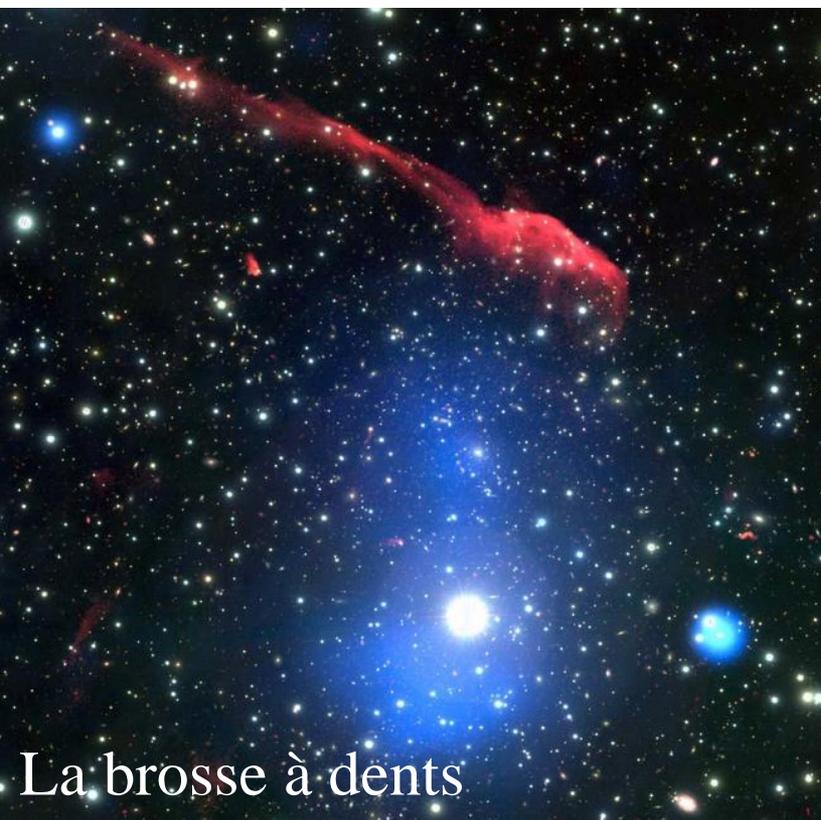




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Collisions d'amas, fusion de structures



La brosse à dents

Françoise Combes



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

Les grandes lignes

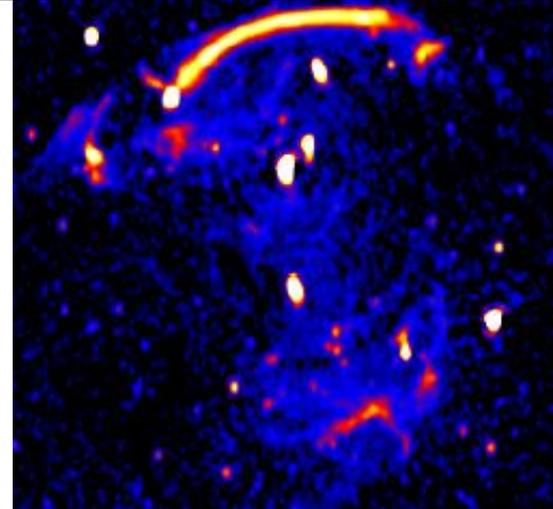
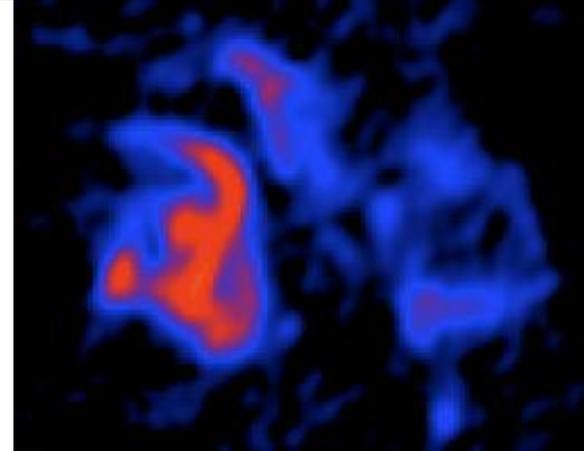
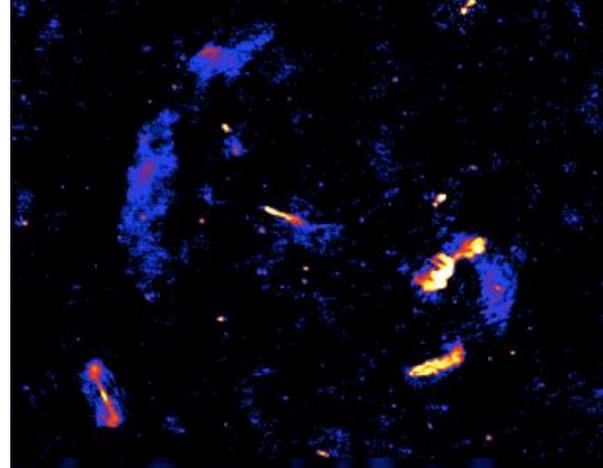
**Plasma non-thermique dans les amas:
Émission synchrotron**

- **Radio halos**
- **Mini-halos**
- **Reliques radio**

Les chocs survenant dans les collisions,
ré-accélèrent des électrons
relativistes dormants

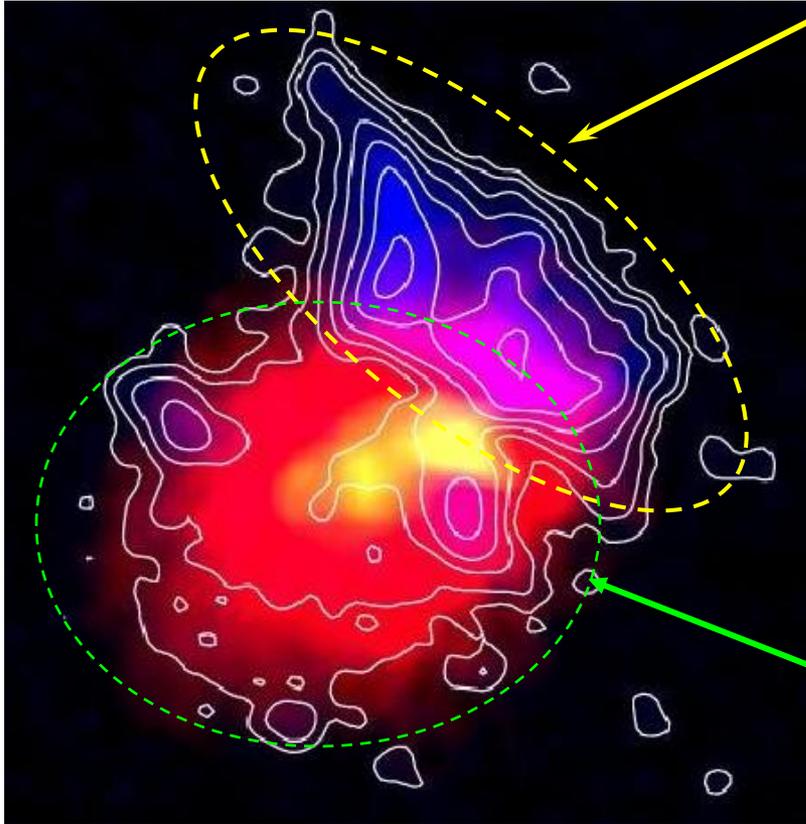
Chocs et fronts froids (conduction, instabilités?)

**Champ magnétique des amas
et des filaments**



Emission radio diffuse à l'échelle de l'amas

Abell 2256



Reliques Radio: au bord des amas, morphologie allongée, émission polarisée jusqu'à 30%

Origine: re-accélération des électrons relativistes par des chocs, ou compression adiabatique par choc d'un plasma radio fossile ?

Radio halos: Diffus, occupent le même espace que les rayons X
Emission non polarisée

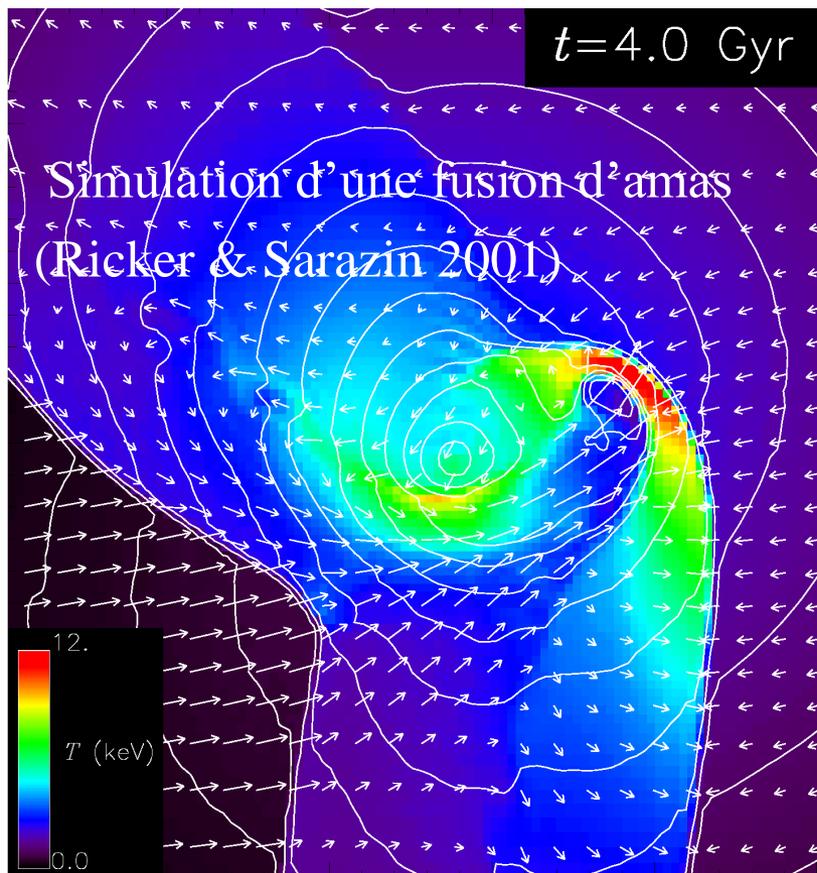
Origine: re-accélération des électrons relativistes par la turbulence dûe aux fusions d'amas

radio galaxies de fond
soustraites

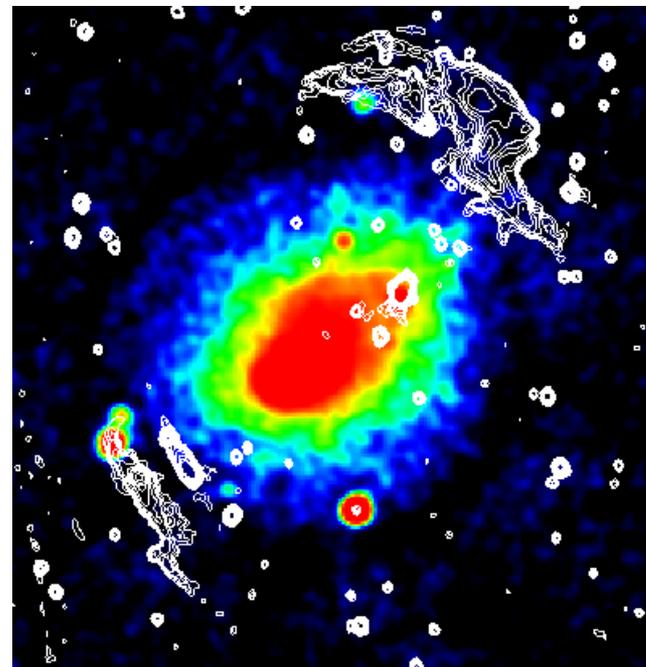
Clarke & Ensslin 2006

Fusion d'amas de galaxies

- Les amas s'assemblent par fusion successive
- Dans ces rencontres, les chocs chauffent le gas intra-amas
- Et accélèrent les particules relativistes dormantes



Radio Relics



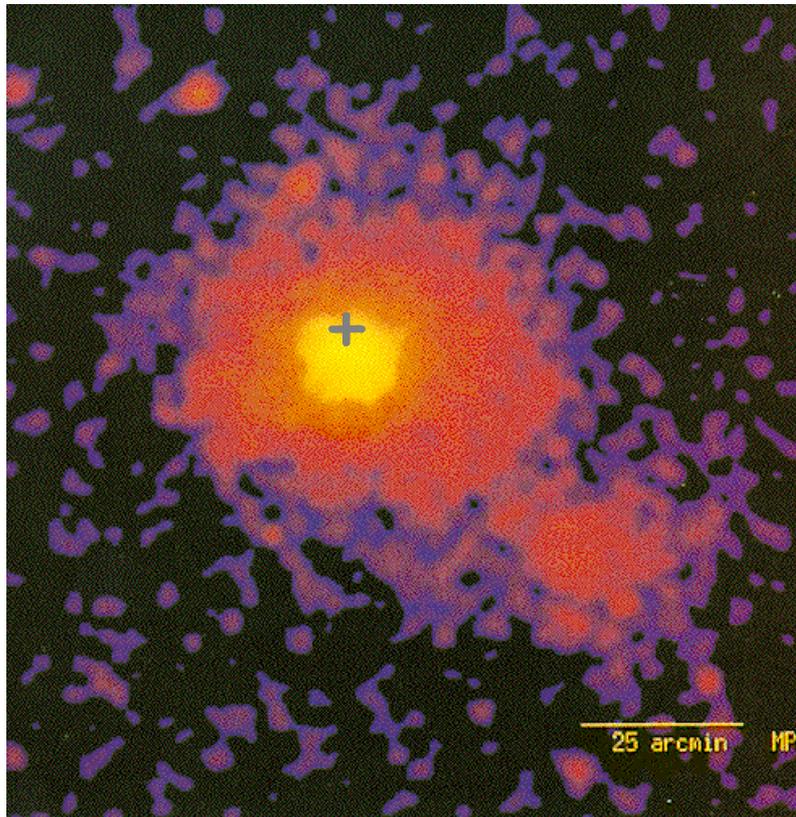
Abell 3667
Röttgering et al. 1997

L'Amas de Coma

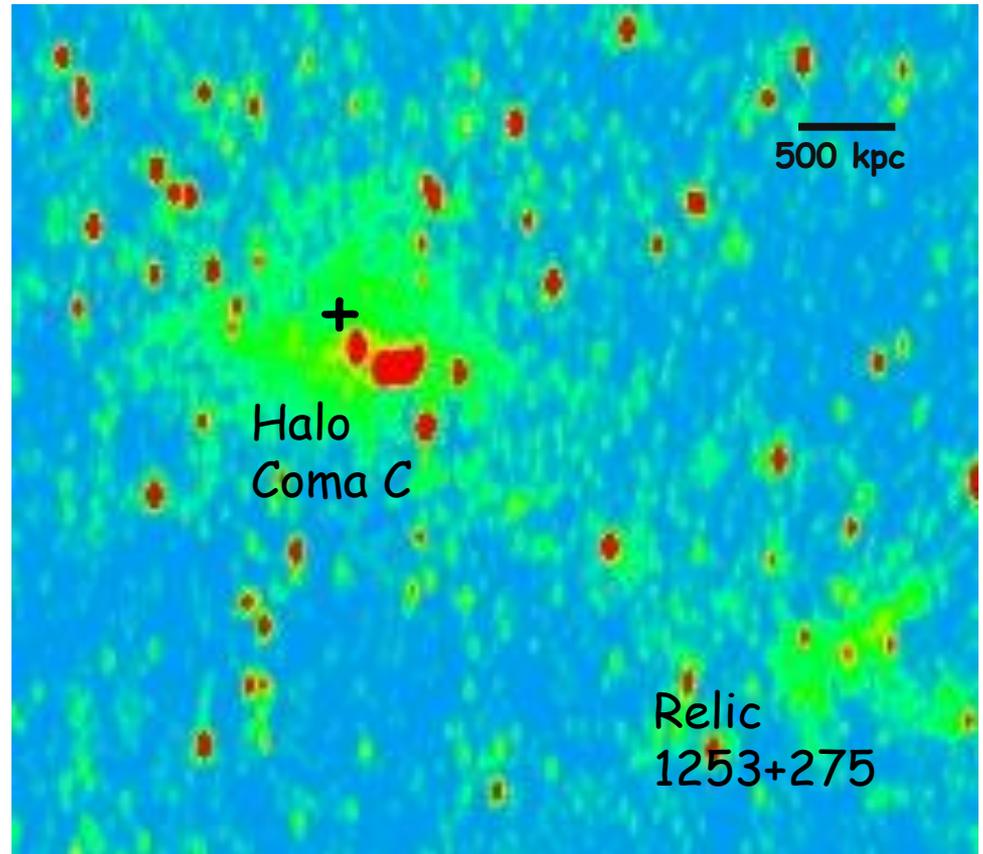
Premier amas où sont détectés un radio halo et des reliques

(*Large 1959, Willson 1970, Ballarati et al. 1981*)

10% des amas X, mais 35% des amas $L(X) > 10^{45}$ erg/s



X-ray: ROSAT (*White et al. 1993*)



RADIO: 90 cm (*Feretti et al. 1998*)

Abell 2744

2.1 Mpc radio halo

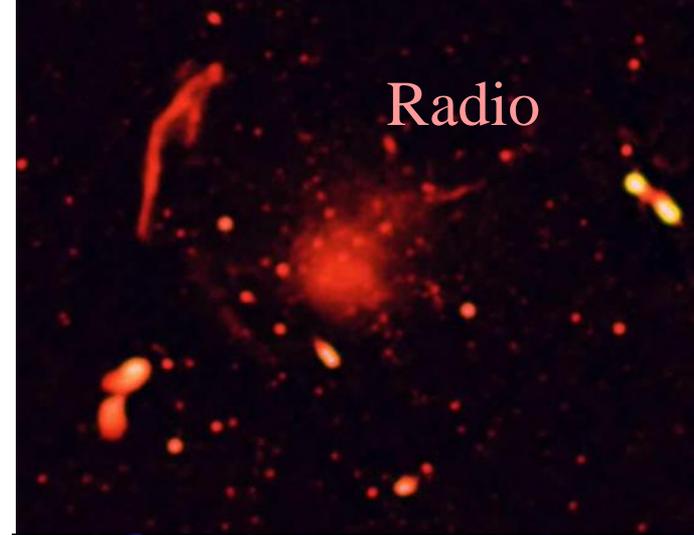
$$\alpha = 1.2 - 1.8 \quad S \propto \nu^{-\alpha}$$

1.5 Mpc radio relic

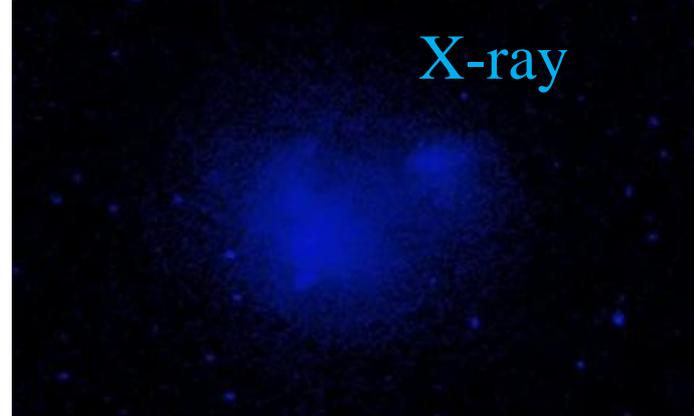
$$\text{Mach} = 2$$



Pearce et al 2017



Radio



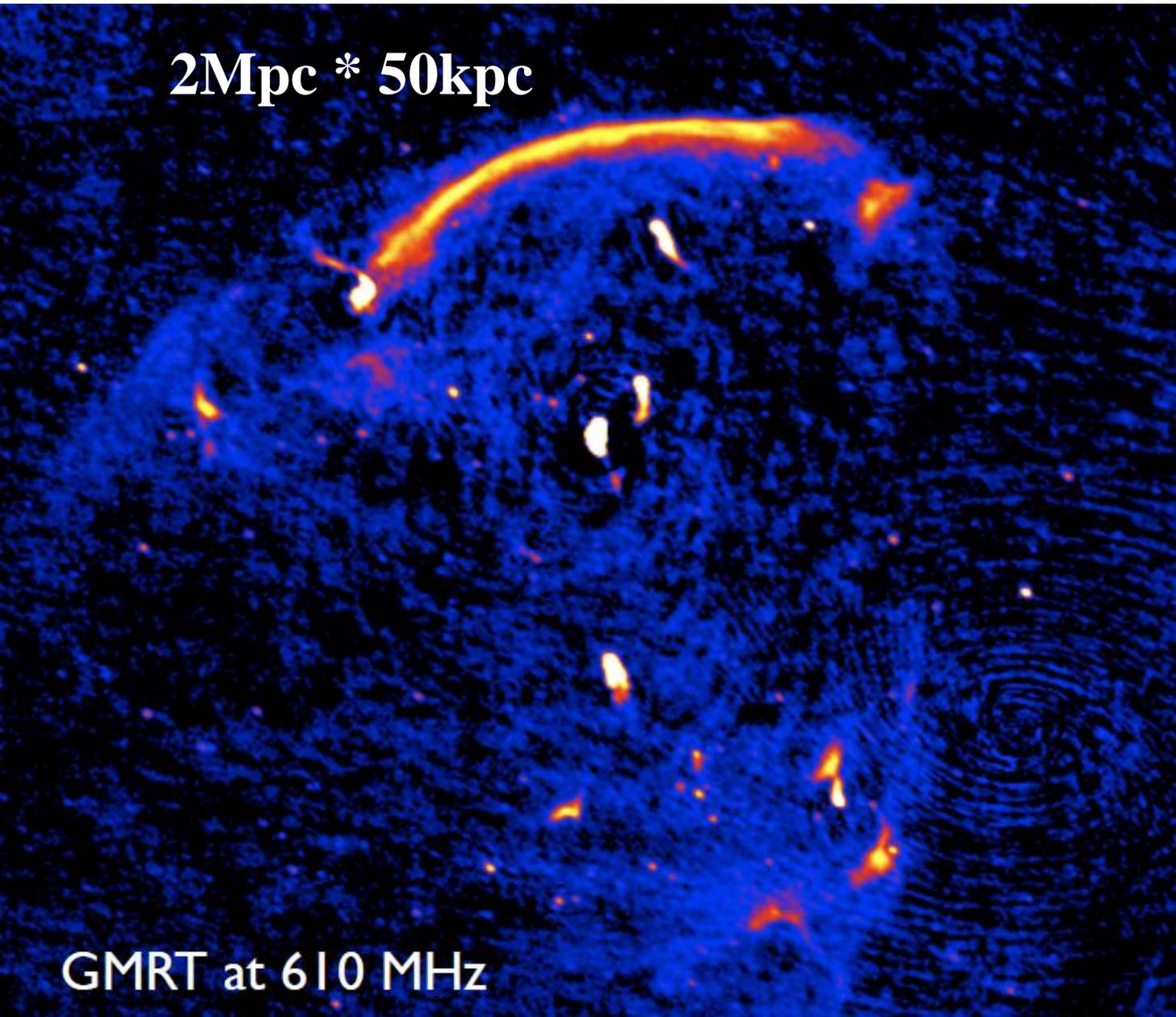
X-ray



Galaxies

Le saucisson

2Mpc * 50kpc



GMRT at 610 MHz

Un des plus
grands chocs

Radio relic

Mach~3

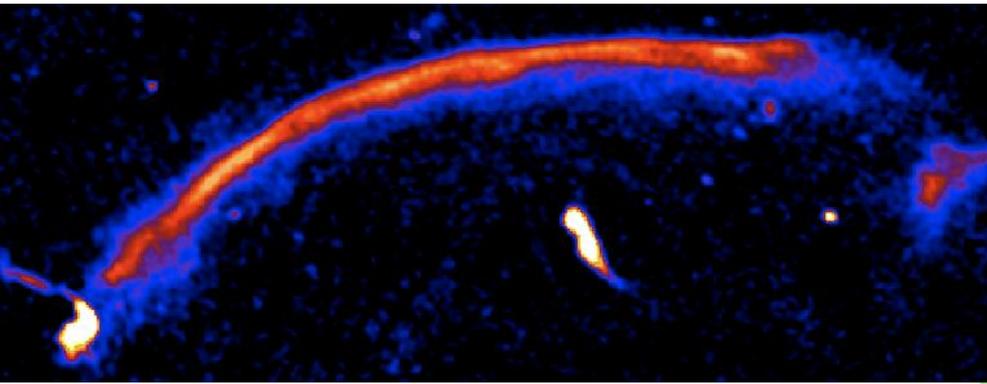
$B=5\mu\text{G}$

Collision <1Gyr

Rapport de
masse = 2

Van Weeren+10

Le saucisson

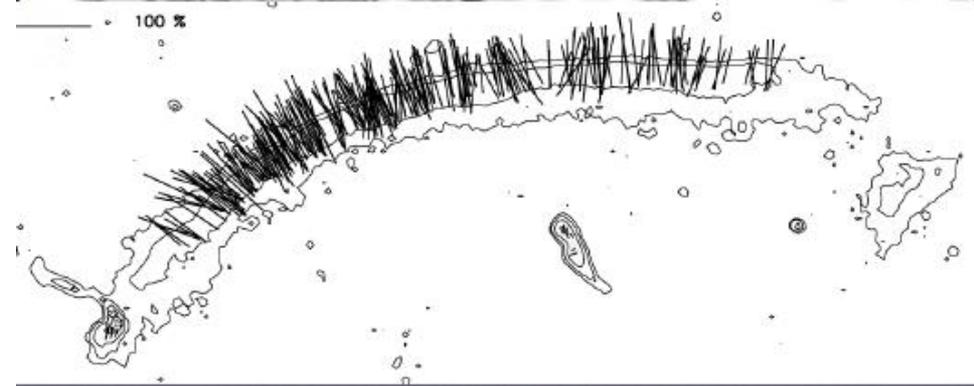
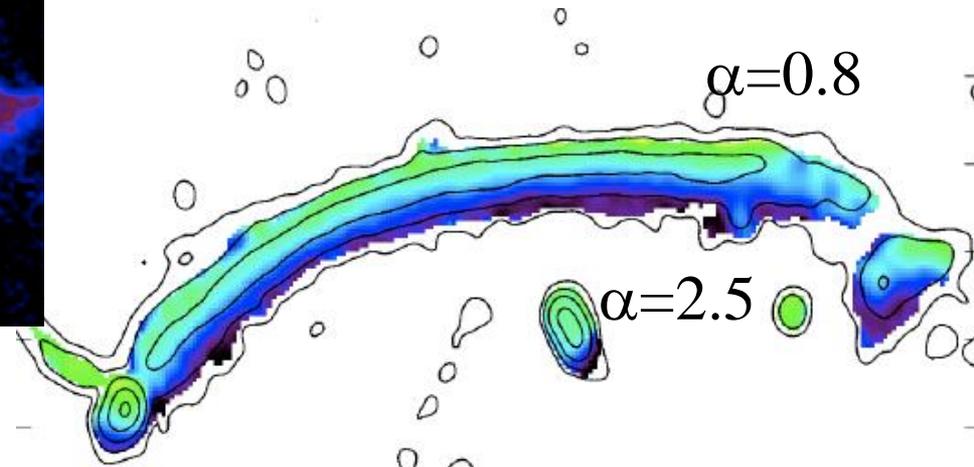


Collision il y a 0.7 Gyr
 $\alpha=0.8$ (pentu pour un choc)
Mach = 2.9, age 60Myr
(*Stroe et al 2014*)

Observé aussi a 16GHz,
Modèle d'accélération des e-?

Polarisation très forte, 50%
Champ E perpendiculaire
→ Champ B parallèle

Carte de l'index α



Rayonnement Synchrotron

Rayonnement émis par une particule chargée spiralant dans un champ magnétique

D'abord étudié par Schott (1912), puis après 1945 rayonnement des électrons en accélérateurs: cyclotrons, synchrotrons

$$\mathbf{F} = e \mathbf{v} \times \mathbf{B} = m d\mathbf{v}/dt$$

Pour des énergies non-relativistes: rayonnement **cyclotron**, $P \propto B^2$

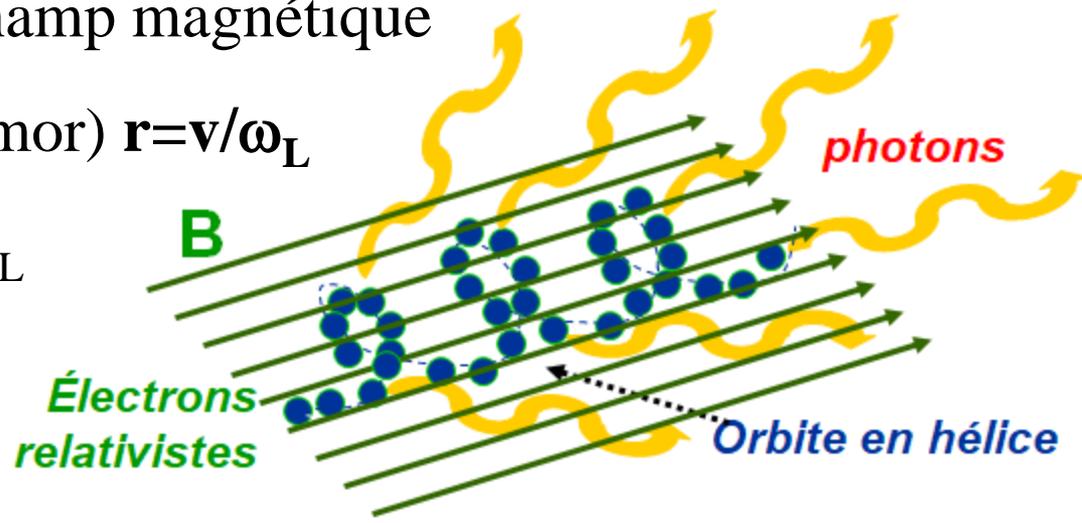
fréquence de giration dans le champ magnétique

$$\omega_L = eB/m = 2.8 B_{1G} \text{ MHz (Larmor)} \quad \mathbf{r} = \mathbf{v}/\omega_L$$

Fréquence du rayonnement = ω_L

$$E = \gamma mc^2 \rightarrow \omega = eB/\gamma m$$

Pour $\gamma=10^4$, $\nu \sim 10^3$ Hz !

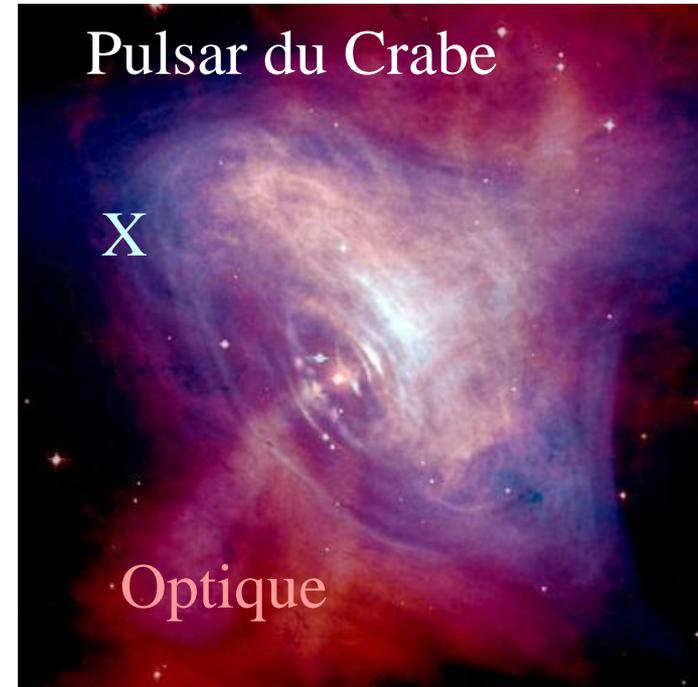


Accélérateurs astrophysiques

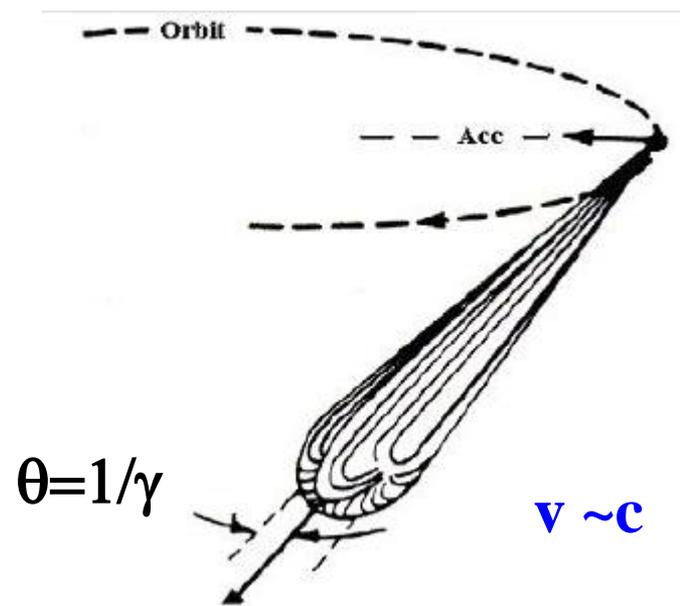
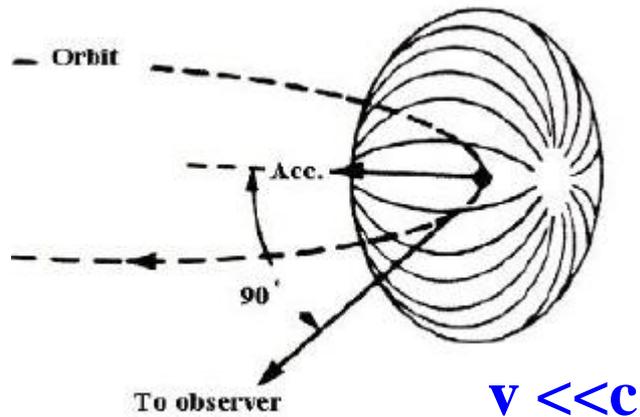


LHC
27km

Radio source Cygnus A 60 000 km (2npc)



Effet de beaming



Effet relativiste: beaming sur $\Delta\theta \sim 1/\gamma$

Fréquence de giration $\omega_B = \omega_L/\gamma$

L'observateur ne voit le rayonnement que pendant $\Delta t \ll \ll T = 2\pi/\omega_B$

→ le spectre inclut alors des harmoniques de ω_B .

Maximum à la fréquence caractéristique :

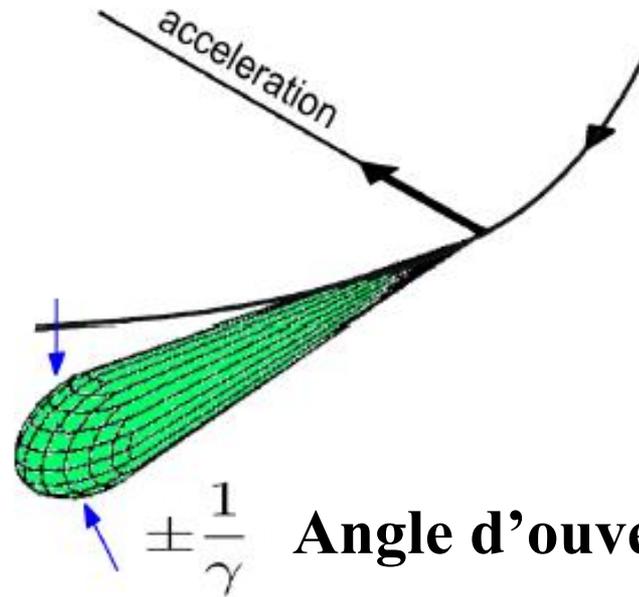
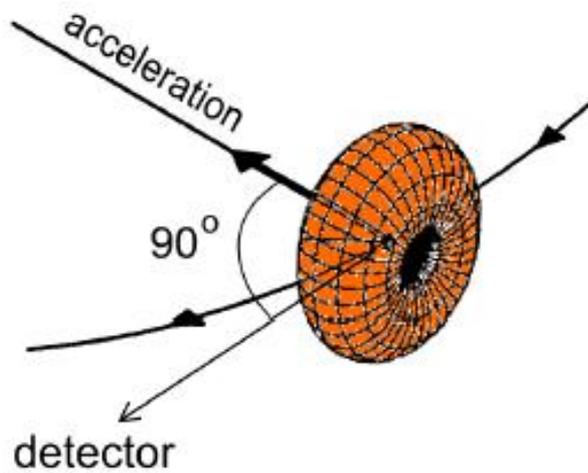
$$\omega_c \sim 1/\Delta t \sim \gamma^2 eB_{\perp} / m$$

Passage cyclotron-synchrotron

Transformation de Lorentz

Référentiel de l'électron →

Référentiel du labo

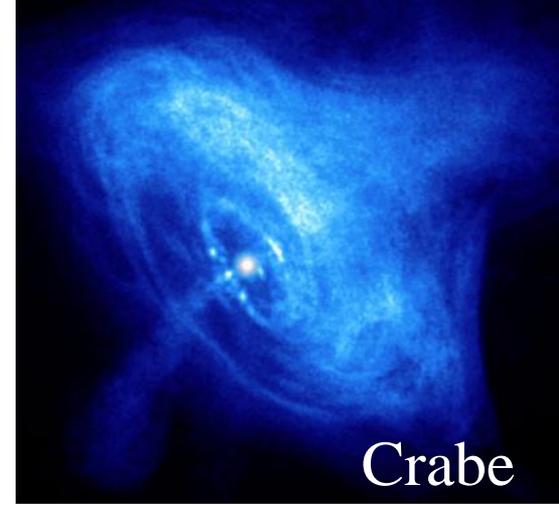


Angle d'ouverture $\theta=1/\gamma$

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{m_0 c^2}{E} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

Polarisation forte, jusqu'à 70%

Emission synchrotron $\nu \propto \gamma^2 B$



Rayonnement total émis : pour $\gamma \gg 1$

$$P = 2e^4 B_{\perp}^2 / 3m^2 c^3 \beta^2 \gamma^2 = \mathbf{2/3 r_0^2 c \gamma^2 B_{\perp}^2}$$

Ou $P \propto \gamma^2 U_B \sin^2 \theta$ (U_B densité d'énergie magnétique)

$$\mathbf{P \sim 1.6 \times 10^{-15} \gamma^2 B^2 \sin^2 \theta \text{ erg s}^{-1}}$$

Durée de vie d'une particule de cette énergie $\tau \propto E/P \sim 20/\gamma B^2$ an

Exemple du Crabe -- Durée de vie d'un électron (X) ~ 20 ans

$P \propto 1/m^2$: synchrotron négligeable pour les particules massives (p)

Amas de galaxies -- Durée de vie des électrons (radio) ~ 20 Myr

$\gamma \sim 10^4$, $B = 10 \mu\text{G}$ $\nu \sim 3 \text{ GHz}$

Energie des électrons requise

L'émission synchrotron dépend de l'intensité du champ magnétique

→ Hypothèse de l'équipartition de l'énergie,
Ou B mesuré par la **rotation Faraday (RM)**

$$\text{RM} \propto \mathbf{B} \lambda^2 \int n_e d\mathbf{l}$$

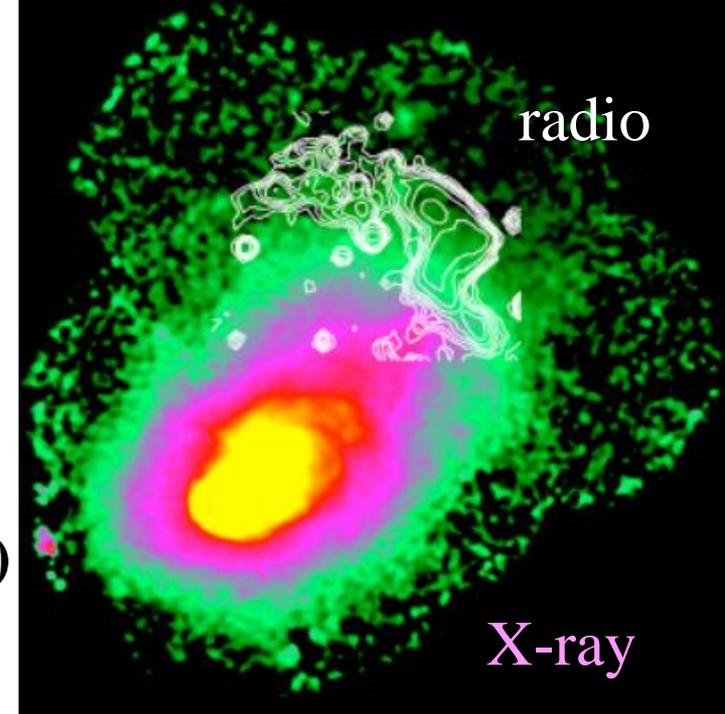
Ou par l'émission **Inverse-Compton (IC)**

$$\rightarrow B = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Gauss}$$

Pour produire des rayons X de $\nu_m \sim 10^{18} \text{ Hz}$, il faut

$$\nu \propto \gamma^2 eB/m \quad \rightarrow \gamma (X) \sim 3 \cdot 10^8$$

$$\rightarrow \gamma(1.4\text{GHz}) = 10^4$$



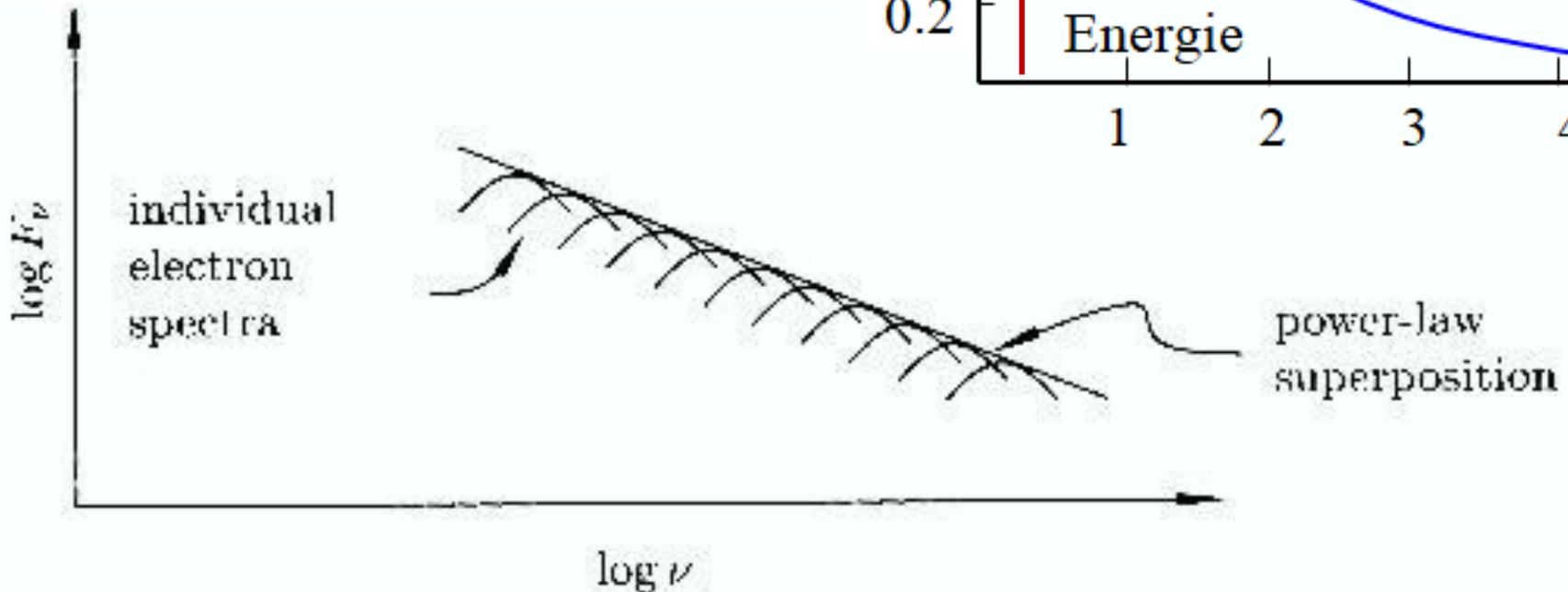
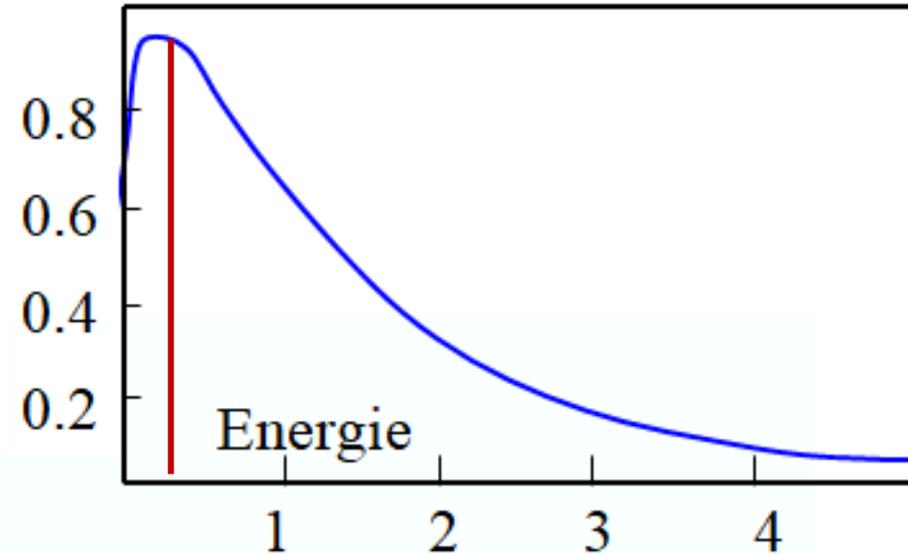
A3667 Sarrazin +2016

Spectre total

Si la distribution en énergie des électrons
est une loi de puissance

Le spectre total sera aussi une loi
de puissance

Spectre individuel



Spectre en énergie des électrons

Les électrons, responsables de l'émission à la fréquence ν ,
ont une énergie, $E = \gamma mc^2$ $\nu \propto \gamma^2 eB/m \rightarrow \gamma \propto (\nu/B)^{1/2}$

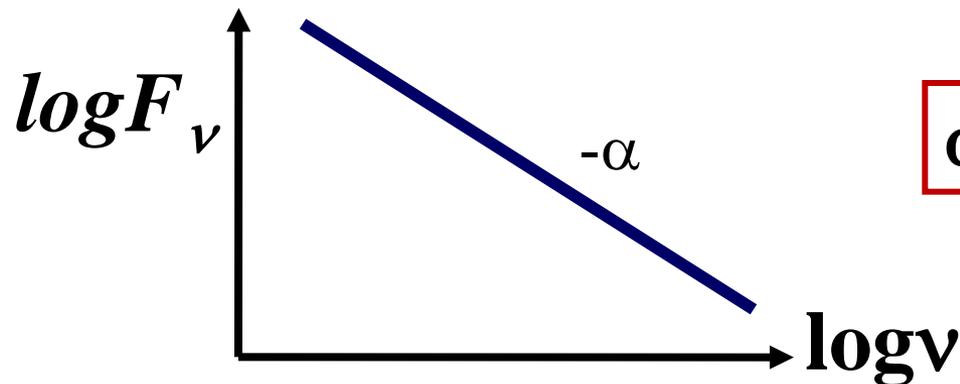
$$E \propto (\nu/B)^{1/2} \quad dE/d\nu \propto (\nu B)^{-1/2} \quad P = dE/dt \propto \gamma^2 U_B \propto \gamma^2 B^2$$

$$F(\nu) d\nu \propto dE/dt N(E) dE, \text{ avec } N(E) \propto E^{-p}$$

$$F(\nu) \propto \gamma^2 B^2 E^{-p} (\nu B)^{-1/2} \propto \nu^{(1-p)/2} B^{(1+p)/2}$$

Alors le flux $F(\nu)$ est une loi de puissance $F(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$

$\alpha=0.7-0.8$
 $p=2.5$
observé



$$\alpha = (p-1)/2$$

$$\alpha=2.5$$
$$p=6$$

Evolution du spectre

Les particules les plus énergétiques perdent plus d'énergie
Leur durée de vie est plus limitée $\tau \propto 20/\gamma B^2$ an

→ Le spectre montre une coupure à haute fréquence

Il devient plus pentu

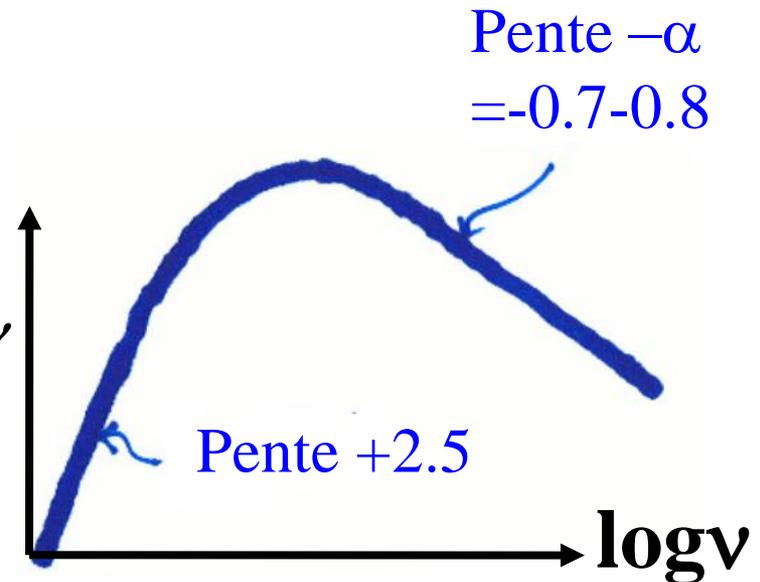
Emission d'un plasma non-thermique plus âgé: $\alpha = 2-2.5$

→ Le cas des radio halos

A basse fréquence, le spectre montre aussi un retournement, et devient plus plat

C'est à cause de la self-absorption $\log F_\nu$
Température de brillance du rayonnement
synchrotron $F\nu = 2 kT_b/\lambda^2$

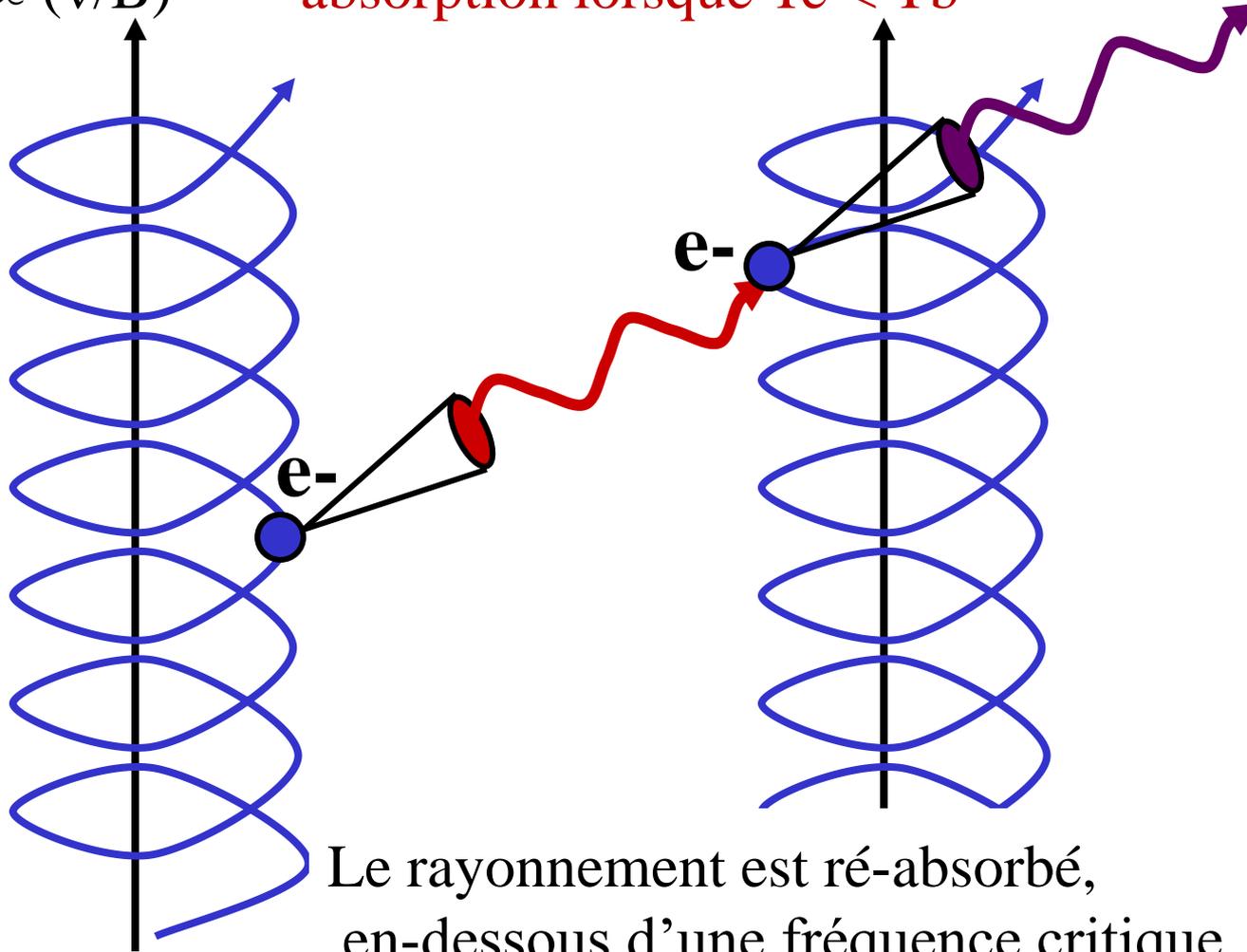
Devient = $T_e \sim E \propto (\nu/B)^{1/2}$



Self-Absorption Synchrotron

$$T_e \sim E \propto (\nu/B)^{1/2}$$

absorption lorsque $T_e < T_b$



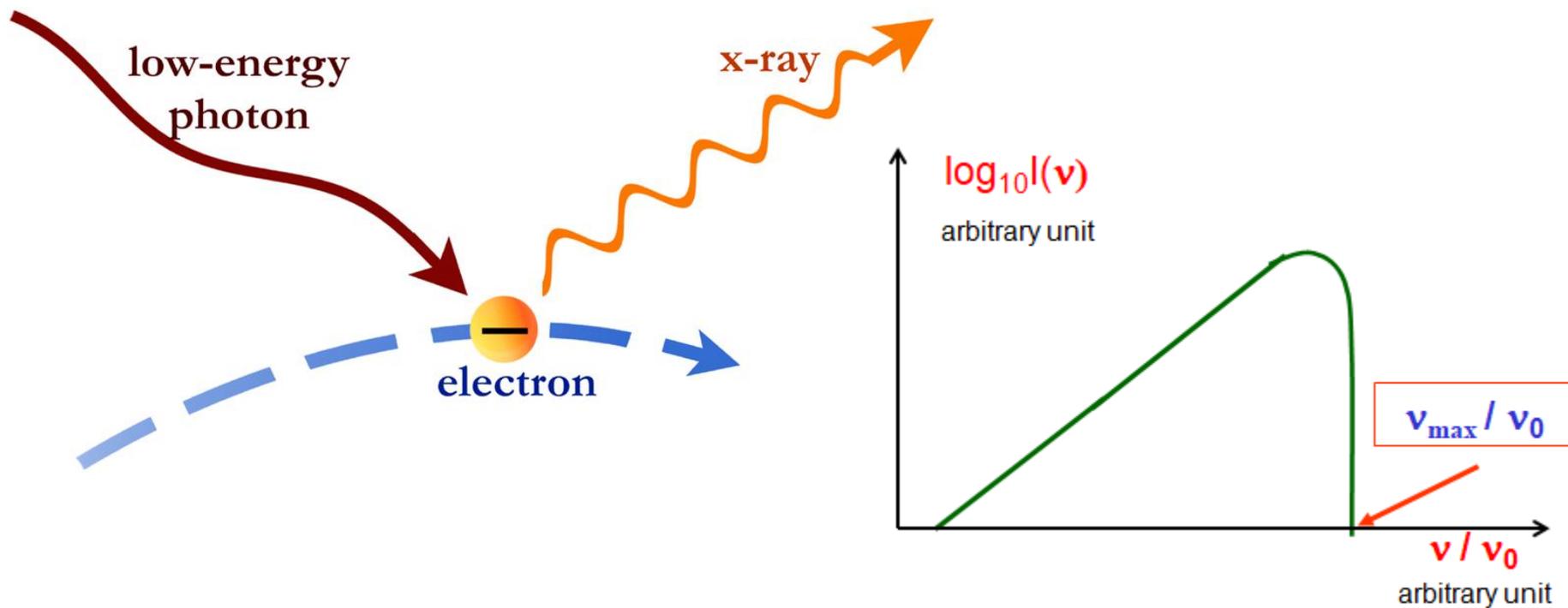
Le rayonnement est ré-absorbé,
en-dessous d'une fréquence critique
Car T_b doit être $< T_e$ pour rayonner

Inverse Compton (IC)

Pour les électrons **thermiques du gaz chaud** → effet SZ

Pour les électrons **non-thermiques relativistes** $\gamma_{IC}^2 \approx h\nu_{final}/h\nu_{initial}$
(jets radio, radio halos, reliques) on peut obtenir des rayons X

Fond à 3K: $\langle h\nu \rangle \sim 3 \times 10^{-4}$ eV $\rightarrow \gamma^2 = 3 \times 10^7$ pour $h\nu_f = 8$ keV



Diffusion Inverse Compton (IC)

La puissance IC totale émise

$$P_{\text{compt}} \sim 4/3 c \sigma_T \gamma^2 U_{\text{ph}}$$

U_{ph} est la densité d'énergie initiale des photons

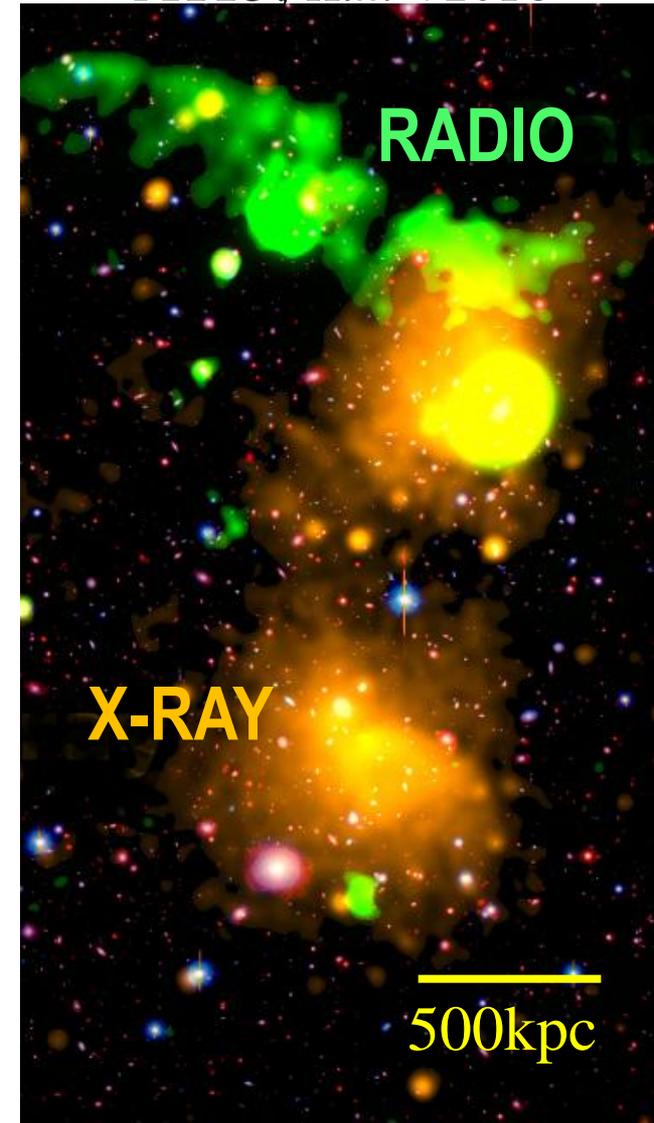
Puissance synchrotron $P_{\text{sync}} \propto c \sigma_T \gamma^2 U_B$

Rapport: $P_{\text{sync}}/P_{\text{compt}} = U_B/U_{\text{ph}}$

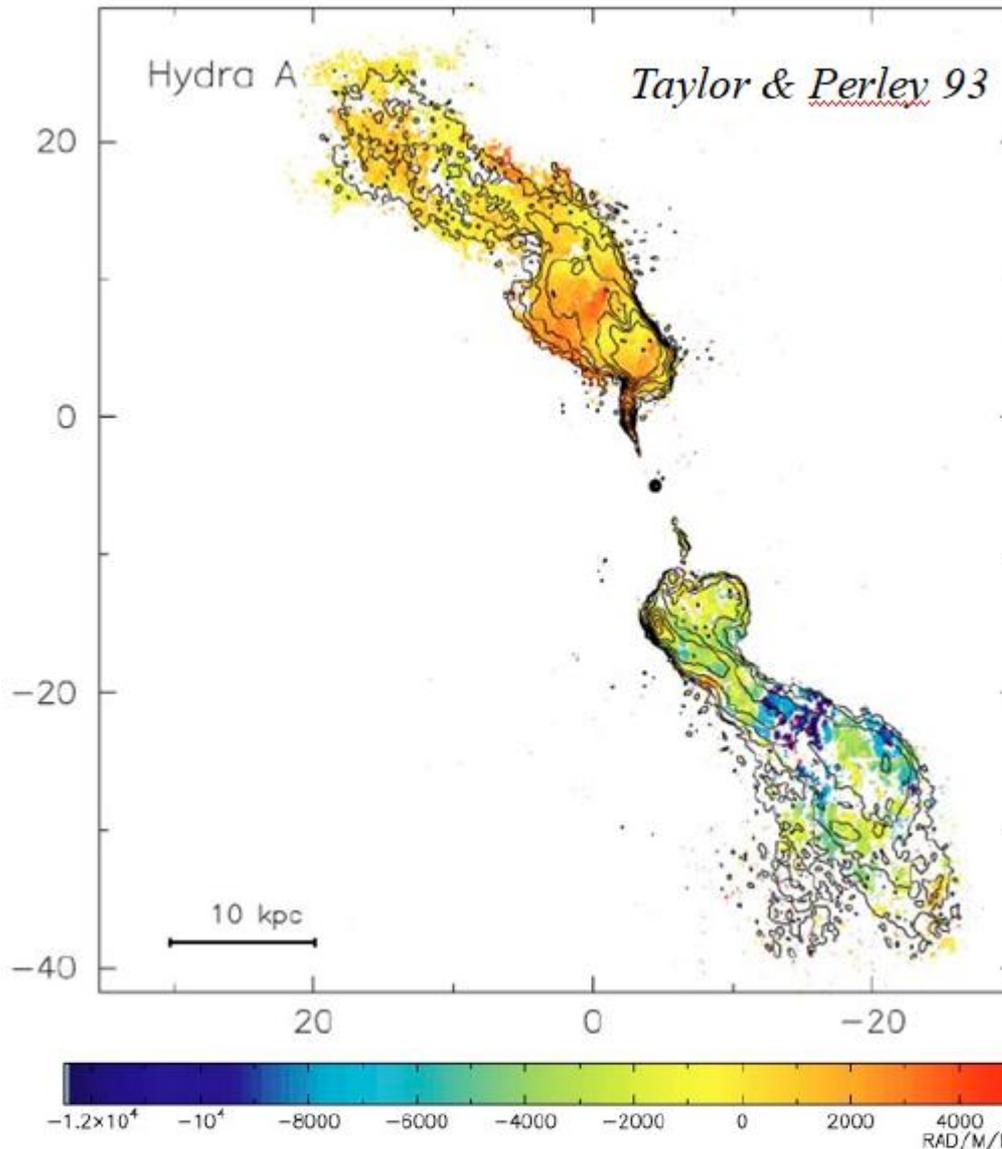
L'émission synchrotron \equiv l'émission IC des électrons diffusés par les photons virtuels du champ B

Synchrotron et IC deux outils très puissants \rightarrow champ B et U_{ph}

A115, Kim +2018



Rotation Faraday: RM (*Rotation Measure*)



Mesure de B: RM et IC

$$\mathbf{RM} \propto \mathbf{B} \lambda^2 \int n_e dl$$

En général RM donne B plus fort
La rotation Faraday serait plus locale?

Champ B enchevêtré (halo)
Aligné (choc, front froid)

Origine de B

Compression adiabatique

Vortex avant recombinaison

Etoiles, AGN

Amplification par fusion, flots
de refroidissement

Champs magnétiques dans l'Univers

Milieu interstellaire: 10^{-6} Gauss

Centre des amas de galaxies: 10^{-5} Gauss

Nébuleuse du Crabe: 10^{-3} Gauss

Dans cette pièce: 0.3 Gauss

AGN -- BLR: 10 Gauss

Pôle magnétique Jupiter: 14 Gauss

Tâches solaires: 1500 Gauss

Naine brune: 5000 Gauss

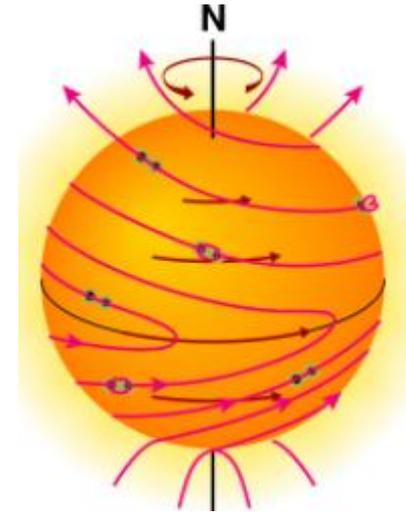
AGN-- Horizon: 10^5 Gauss

Maximum en labo: 10^6 Gauss

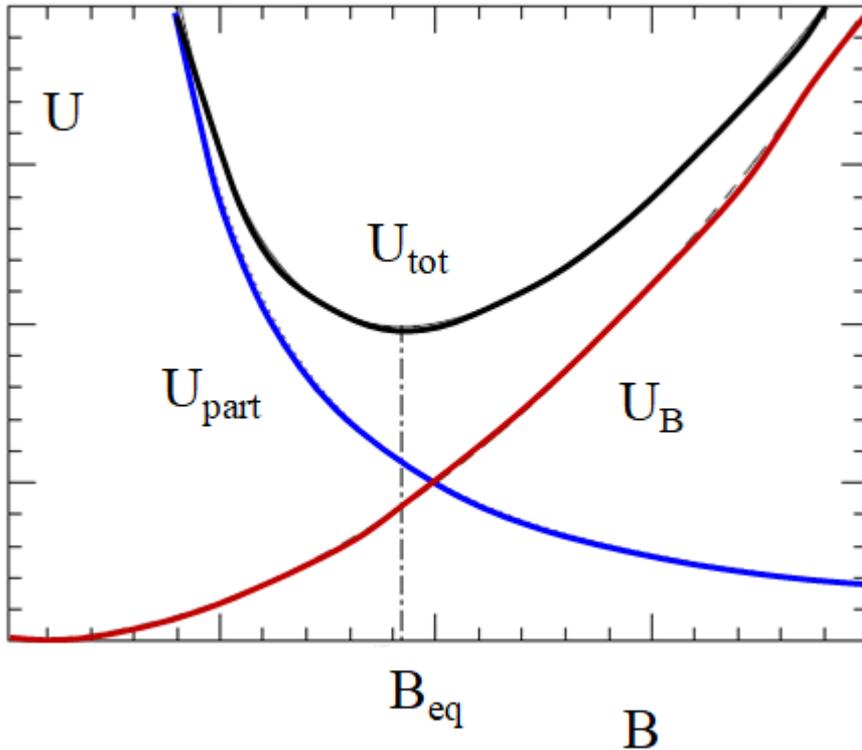
Naine blanche: 10^9 Gauss

Etoile à neutrons: 10^{15} Gauss

1 Gauss = 10^{-4} Tesla



Equipartition



$$U_B \propto B^2$$

U des particules, pour une luminosité donnée

$$U_{\text{part}} \propto L_{\text{syn}} B^{-3/2}$$

Rayonnement X par Inverse Compton (IC)

Ce sont les mêmes électrons à l'origine de l'émission synchrotron qui rencontrent les photons du fonds 3K pour donner les rayons X

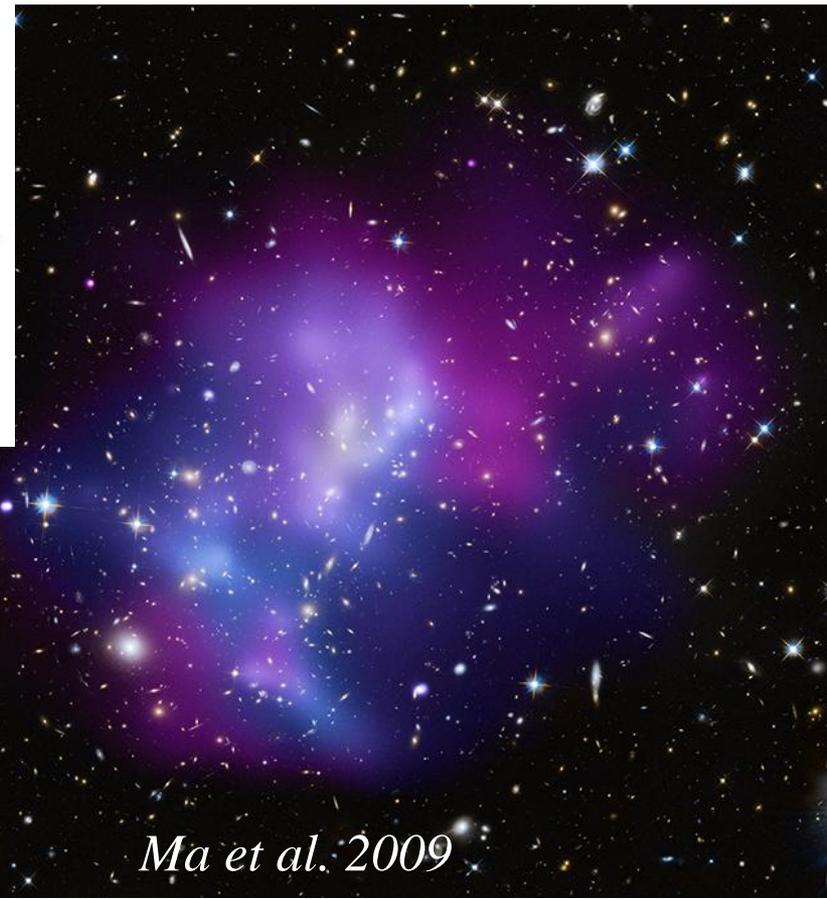
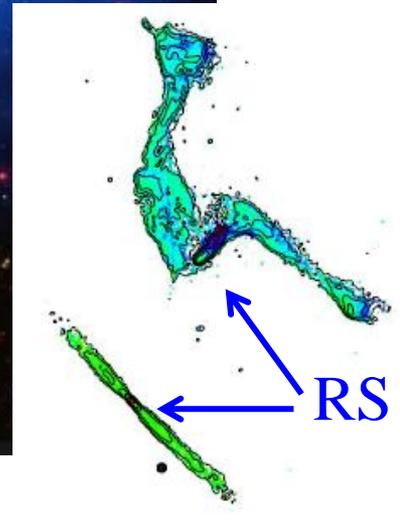
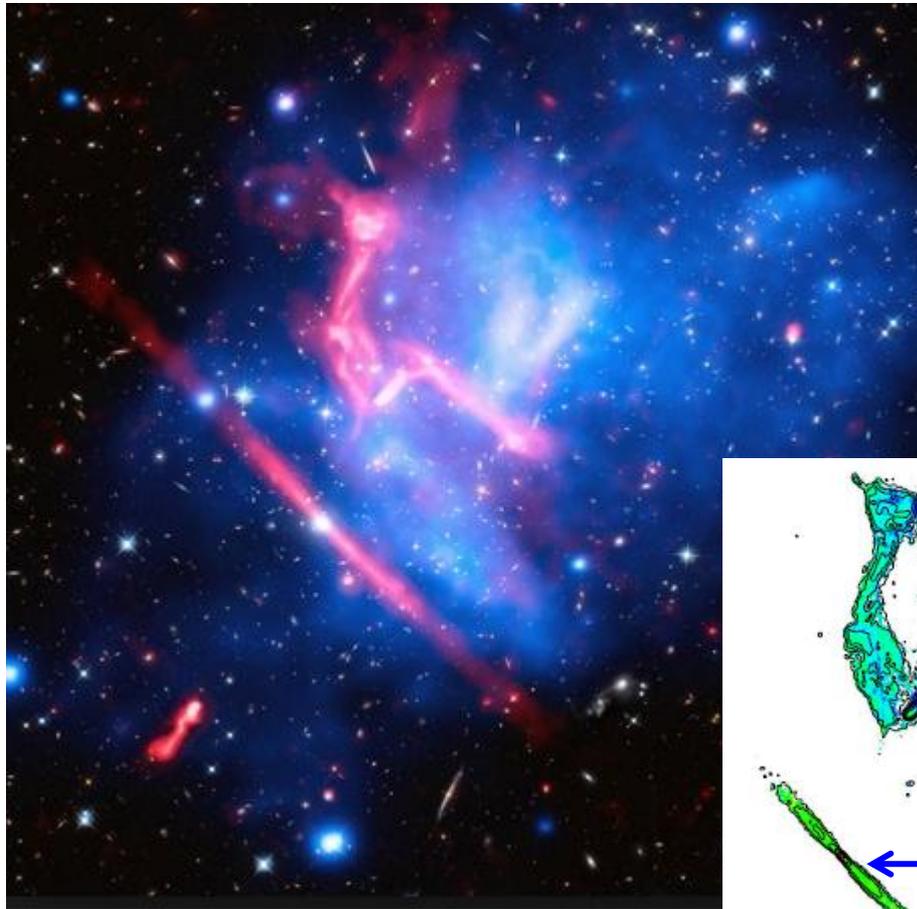
$$\frac{L_{\text{syn}}}{L_{\text{IC}}} \propto \frac{u_B}{u_{\text{ph}}}$$

$B_{\text{eq}} \sim 0.5 \mu\text{G}$, plus faible que $B_{\text{RM}} \sim 5-10 \mu\text{G}$
 B plus fort dans les fronts froids et chocs

La chaise

Fusion de 3-4 amas
Plusieurs reliques

MACSJ0717.7+3745



Des radio sources fournissent
des électrons au choc
Les électrons sont ré-accélérés
et prolongent les jets radio

Van Weeren+2017

Ma et al. 2009

Abell 3411 et Abell 3412



X: bleu

Radio: rouge

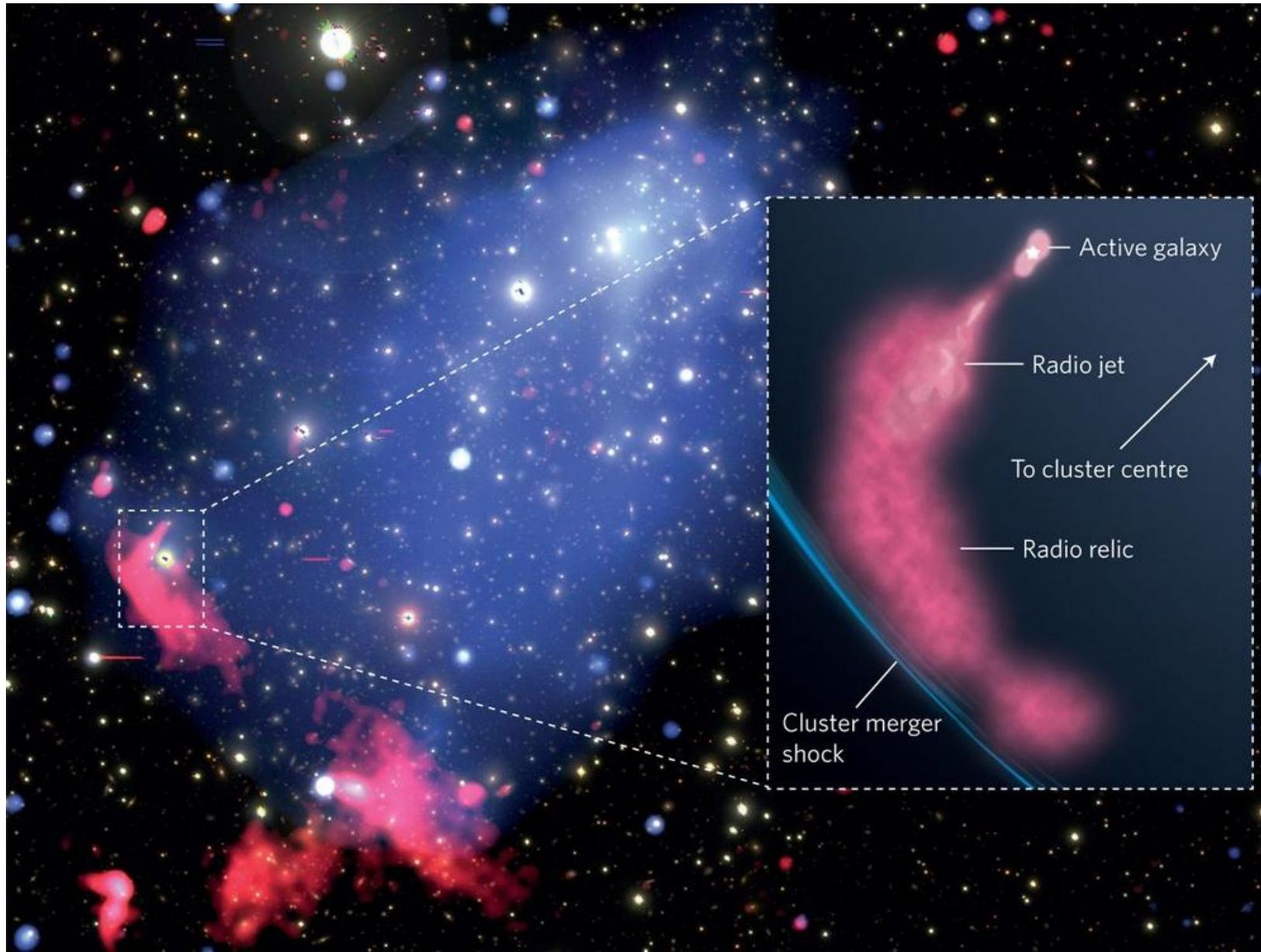
Mach faible

Front froid

*Van Weeren
et al 2017*

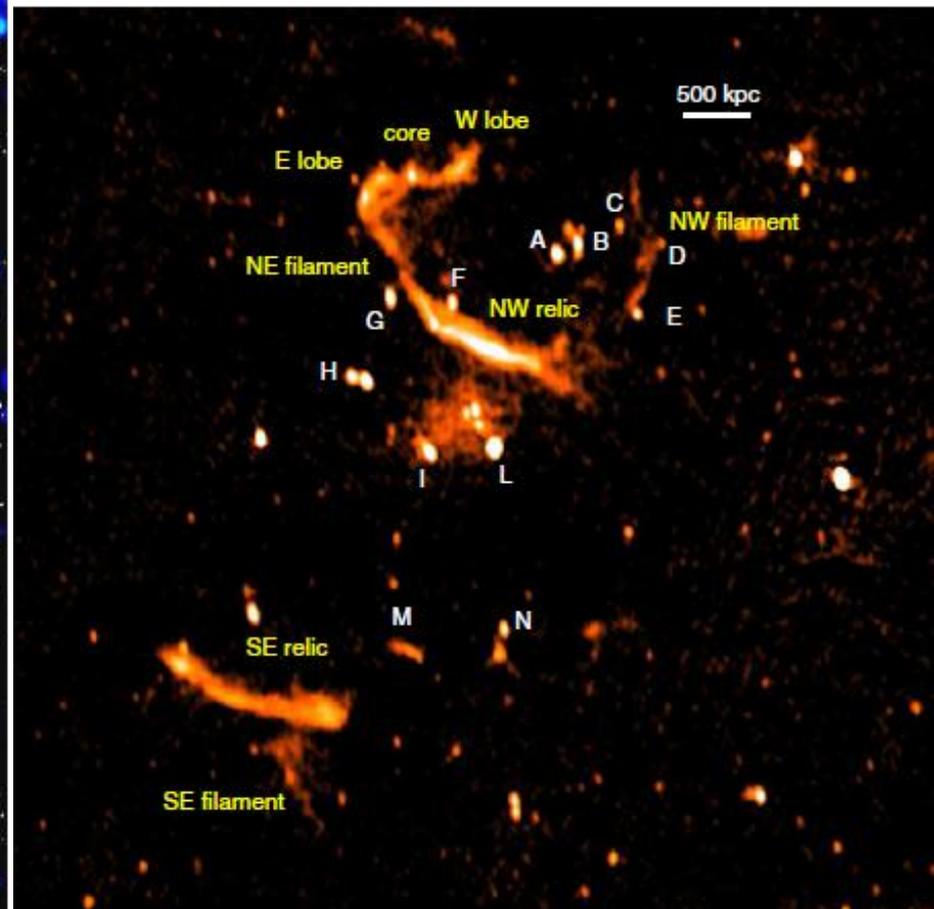
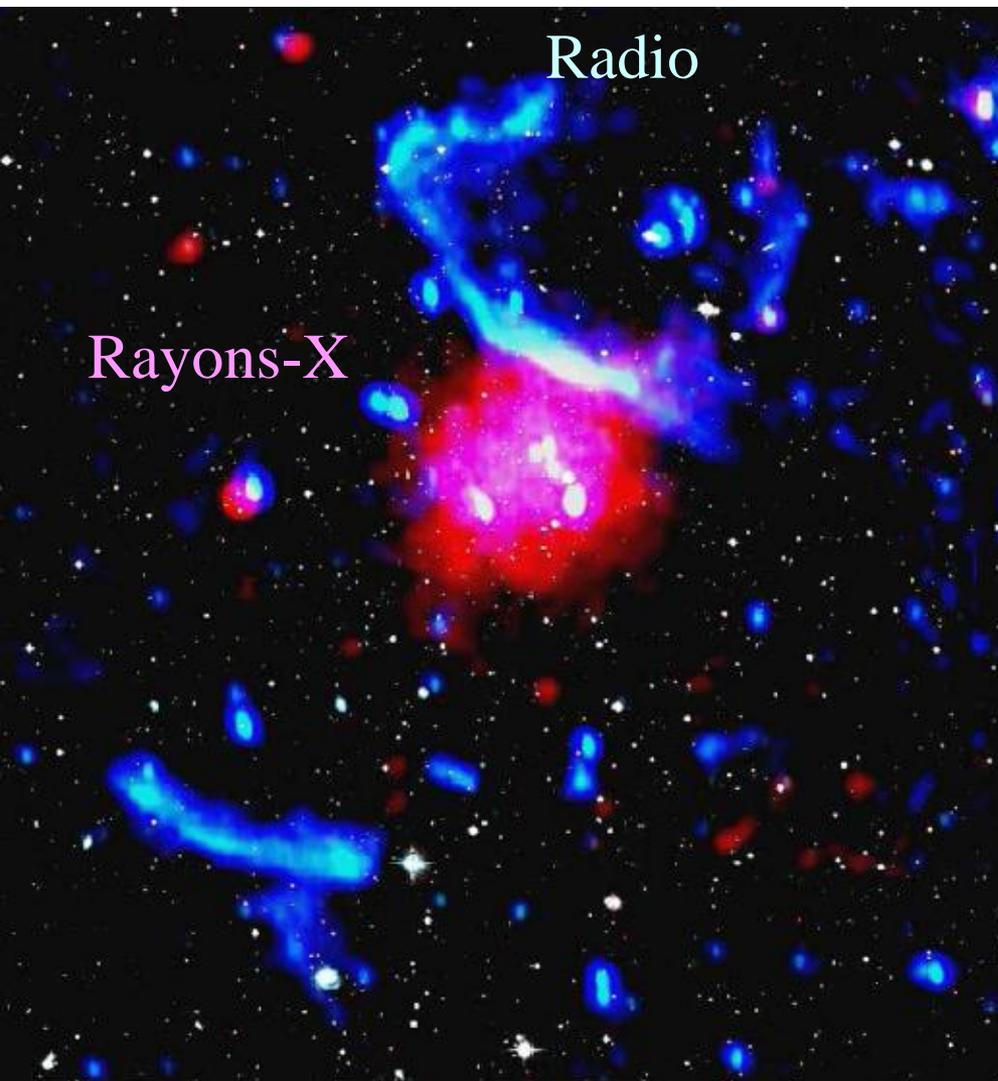
Chocs + jet radio

Des jets radio fournissent des électrons fossiles



PLCKG287.0+32.9, $z=0.39$

$M = 1.4 \cdot 10^{15} M_{\odot}$
Index spectral ~ 1.3
Homogène sur l'amas

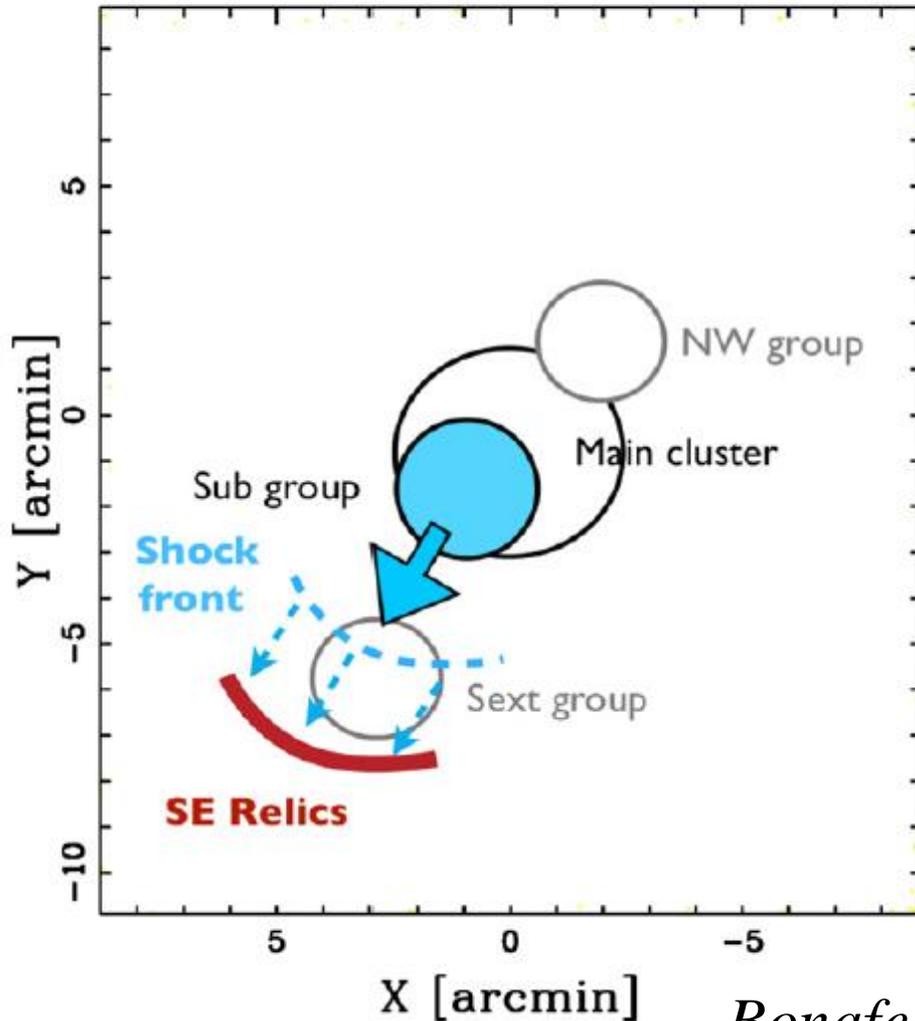


Bonafede et al 2014

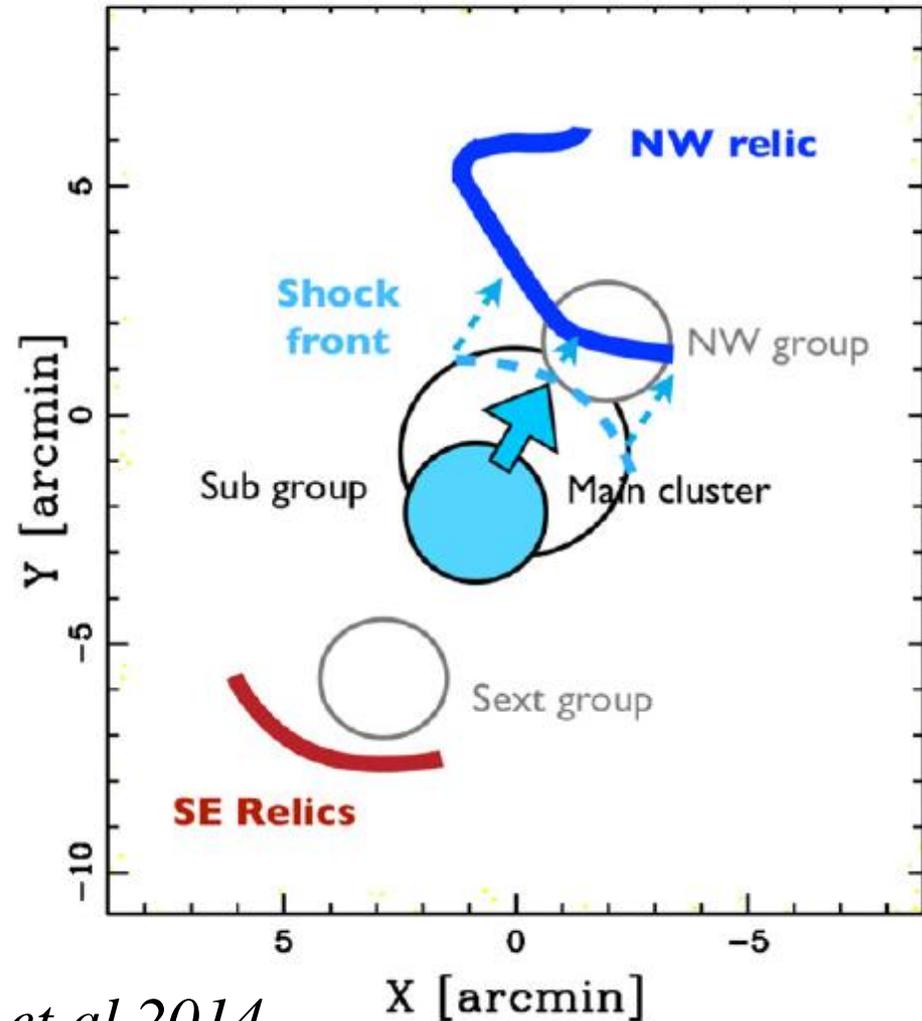
Deux passages: 3 sous-groupes

Pour expliquer l'asymétrie, Mach = 3.7 -- + fossil jets to provide e-

1st core passage - SE relic



2nd core passage - NW relic



Bonafede et al 2014

La brosse à dents: RX J0603.3+4214

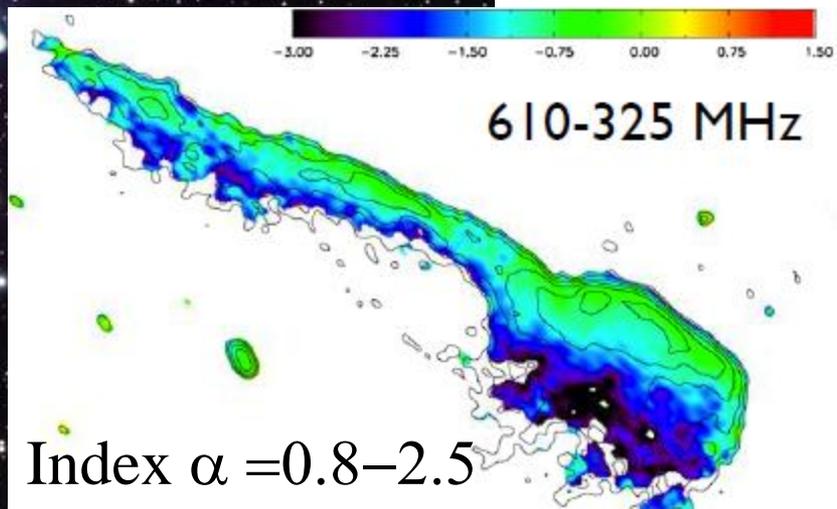
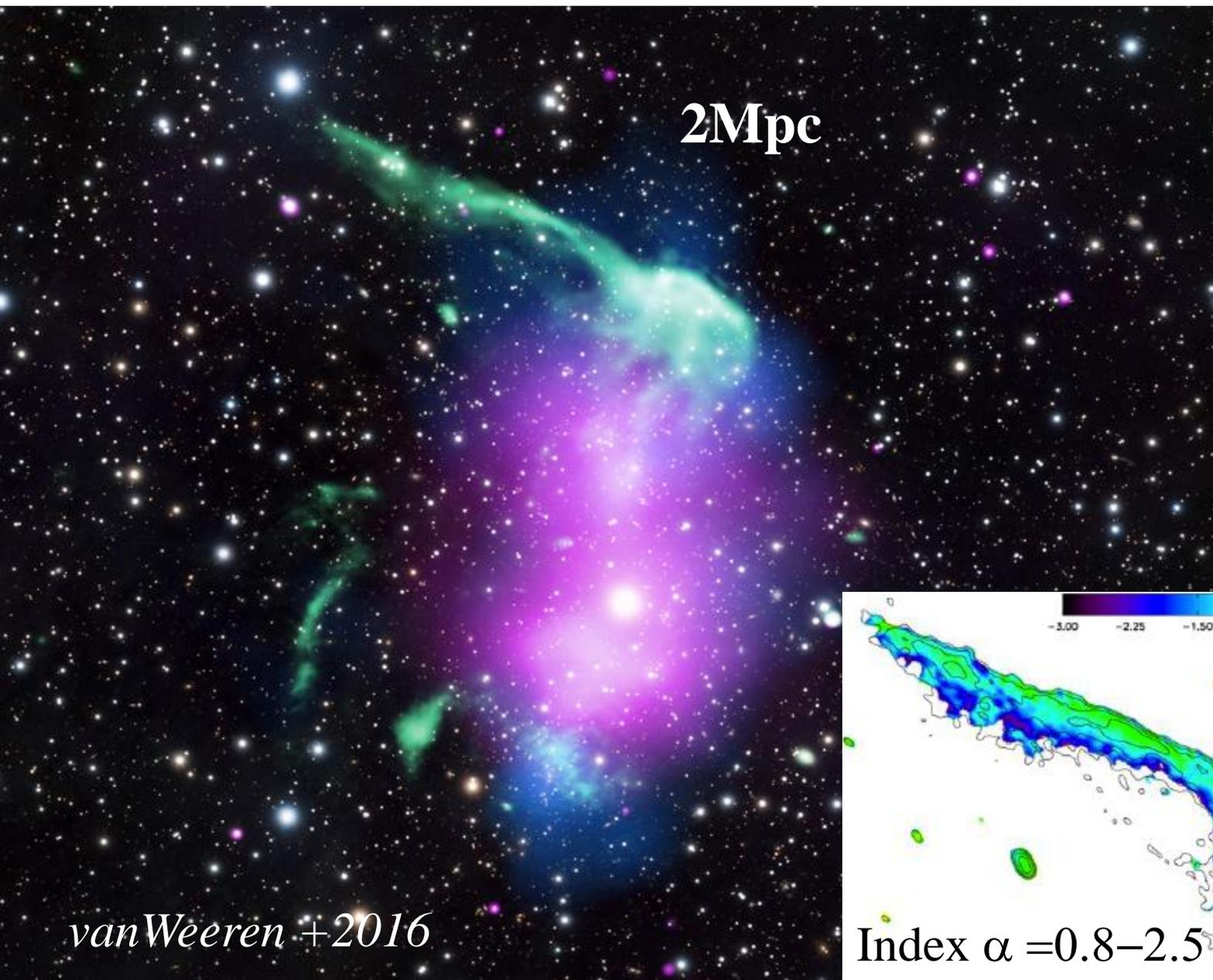
Polarisé
à 60%

Mach=2.8
(avec DSA)

Mach=1.5
(radio)+
Temp (X)
Itahana+15

Chocs
Multiples?

2Mpc

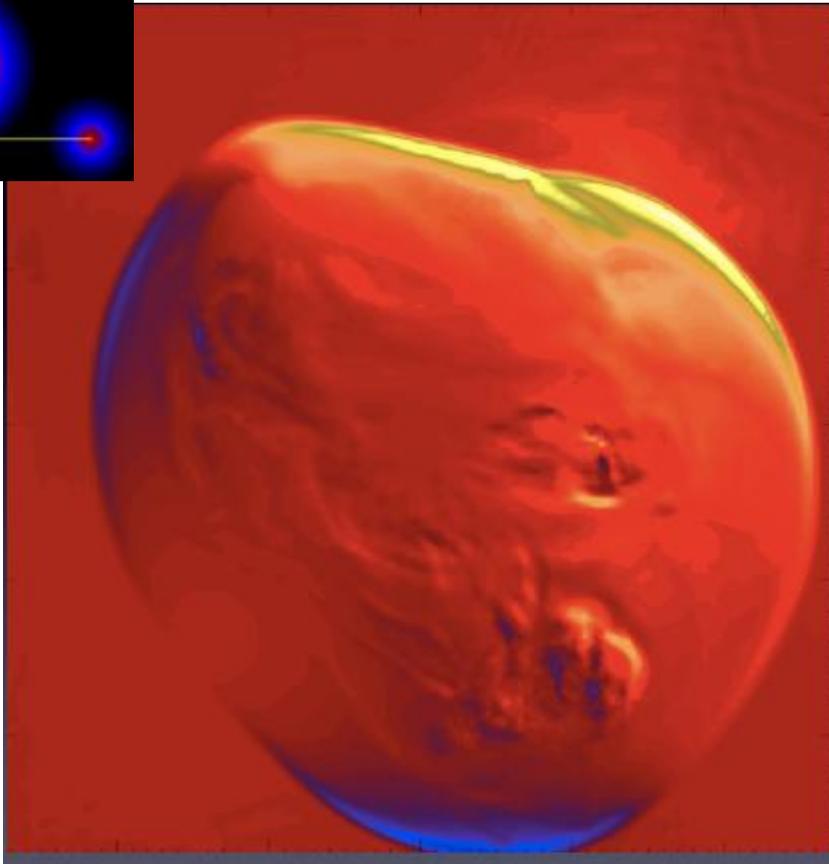
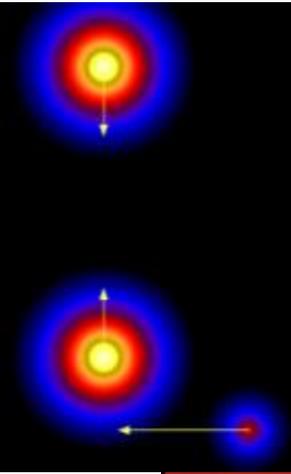


van Weeren +2016

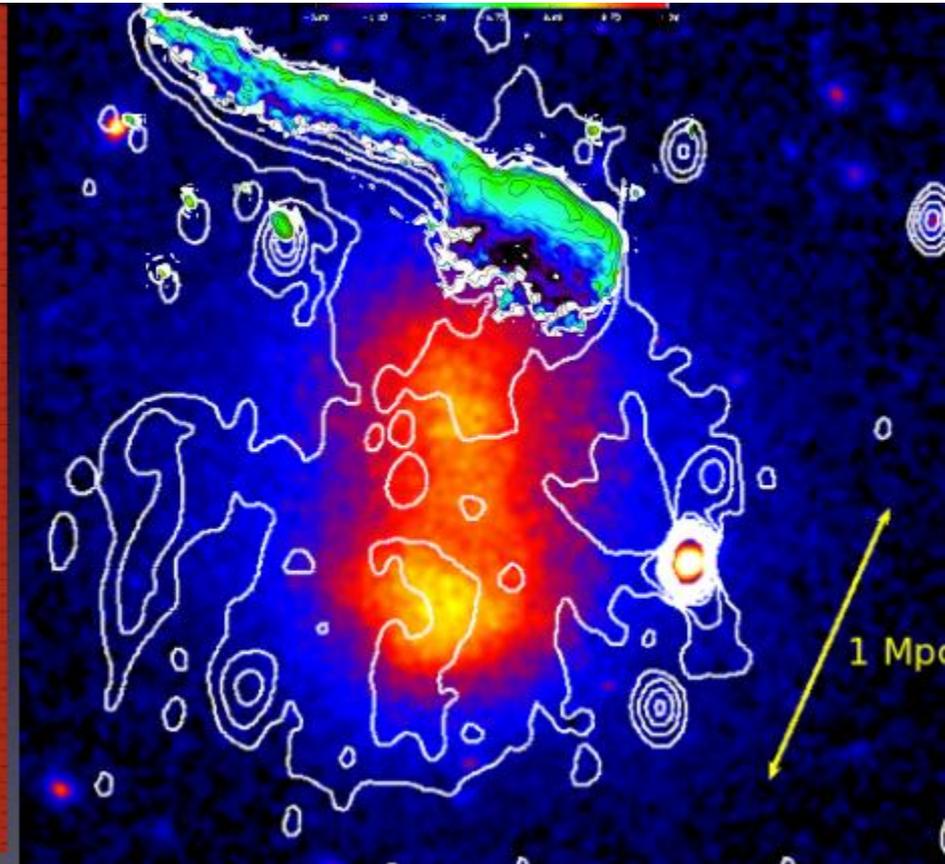
Comment créer un choc droit?

Collision 3 amas

Bruggen et al 2012



Simulation: énergie dissipée dans les chocs



Observations: X+radio + Index α dans le choc

Abell 1033: radio phoenix

Le nuage dormant d'électrons se réveille dans le choc

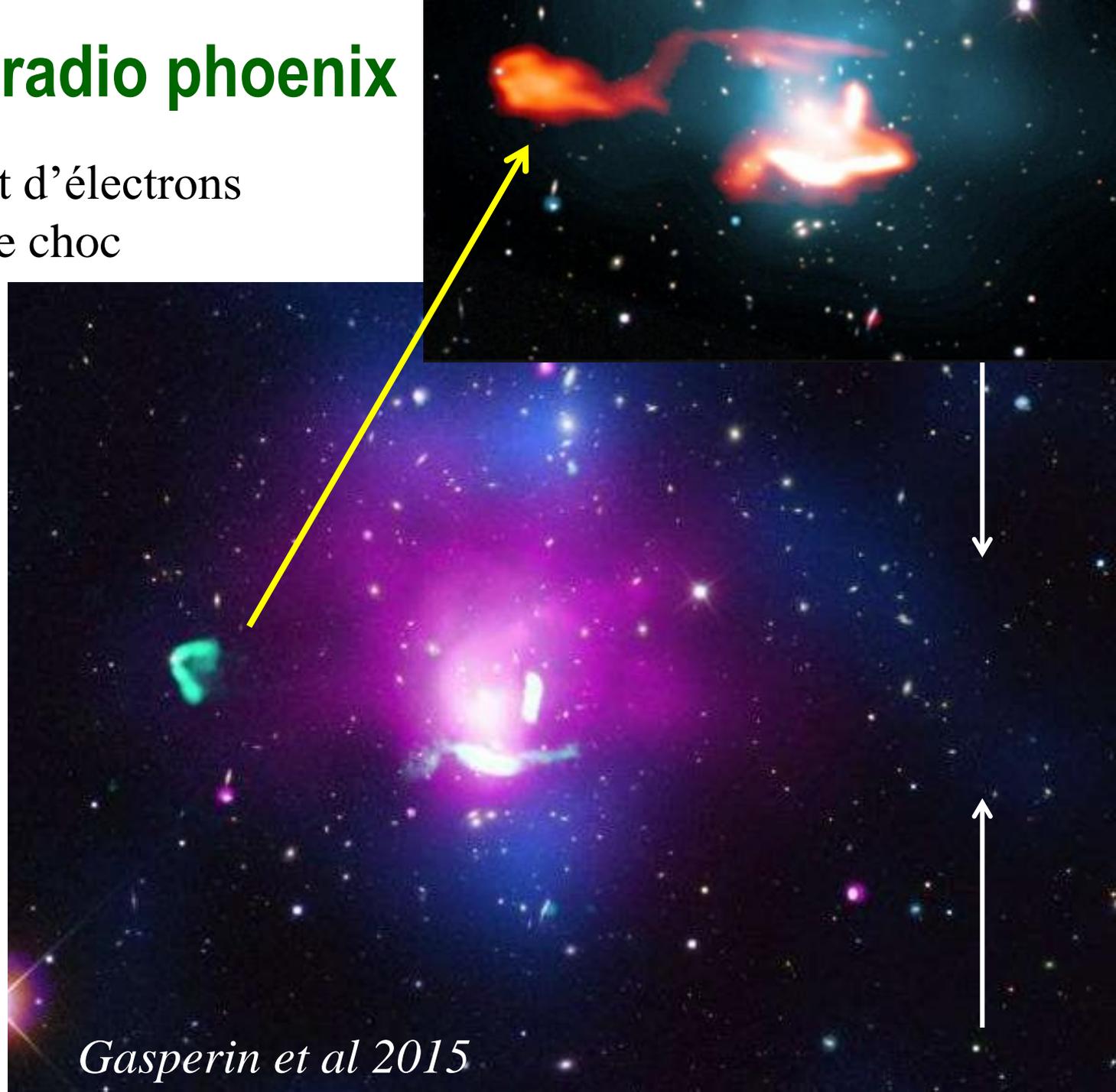
Vert: radio

Rose: rayons X

Bleu: matière

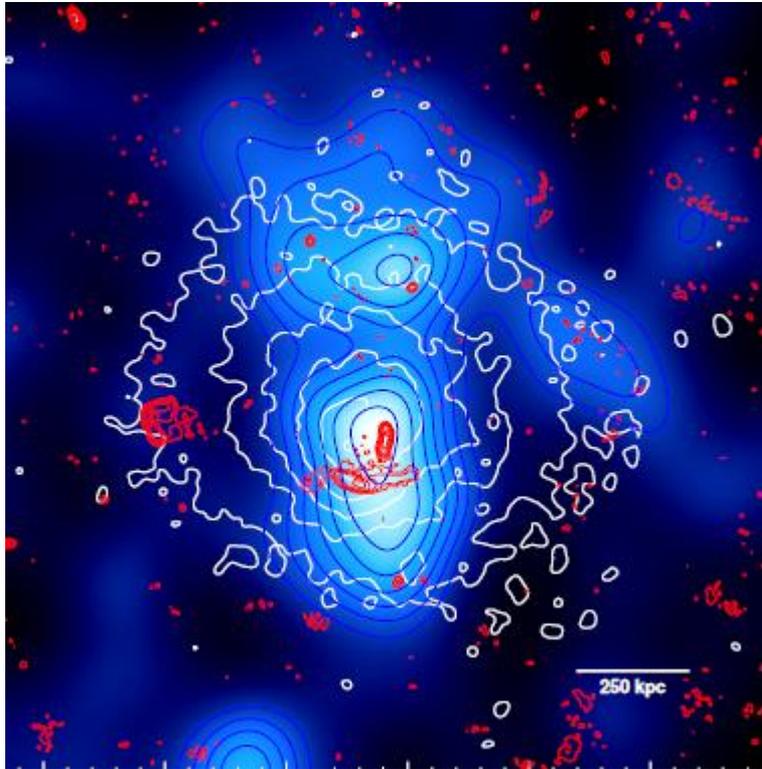
L'émission dure qq 10 Myr

La collision entre les 2 amas réveille les jets radio



Gasperin et al 2015

Abell 1033: radio phoenix



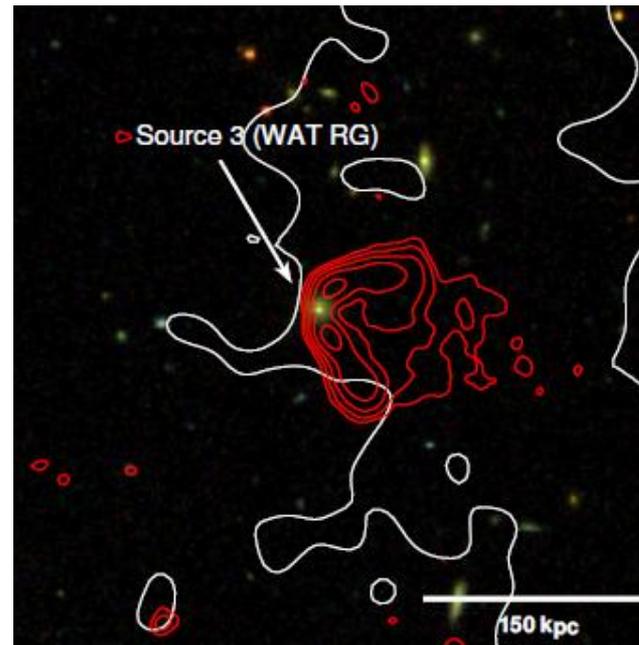
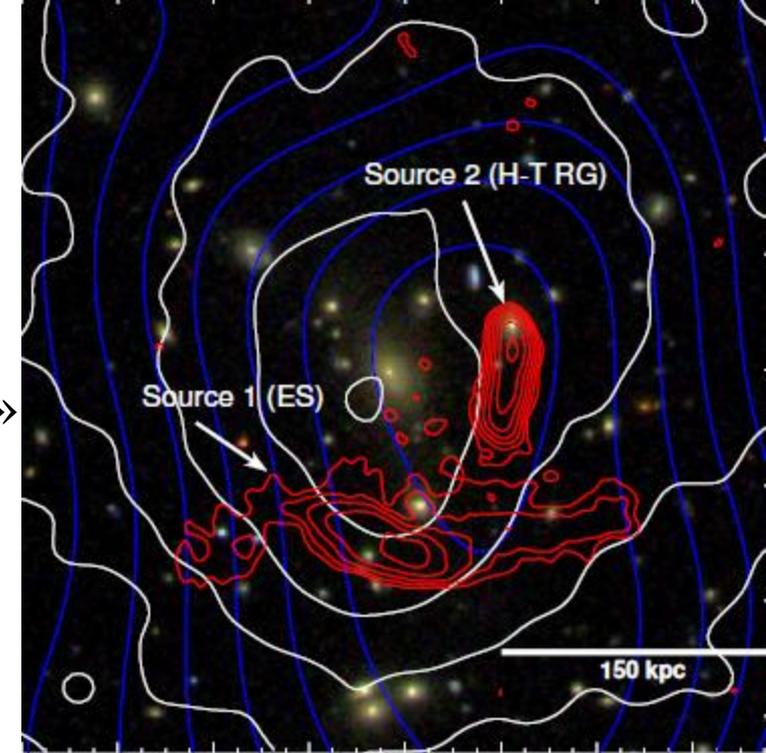
Blue: nbre de galaxies

Contours: rayons X

Rouge: radio

Gasperin et al 2015

HT=
« Head-Tail »



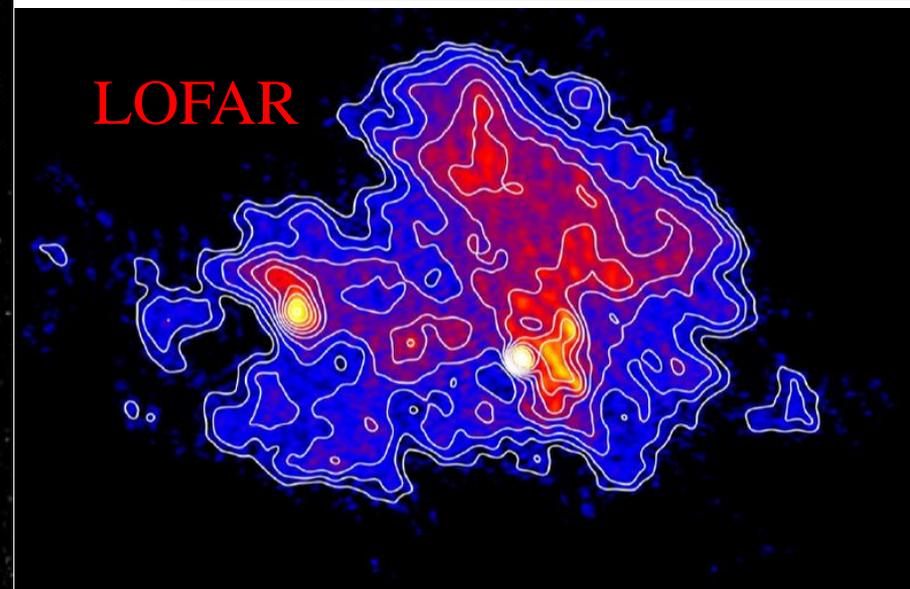
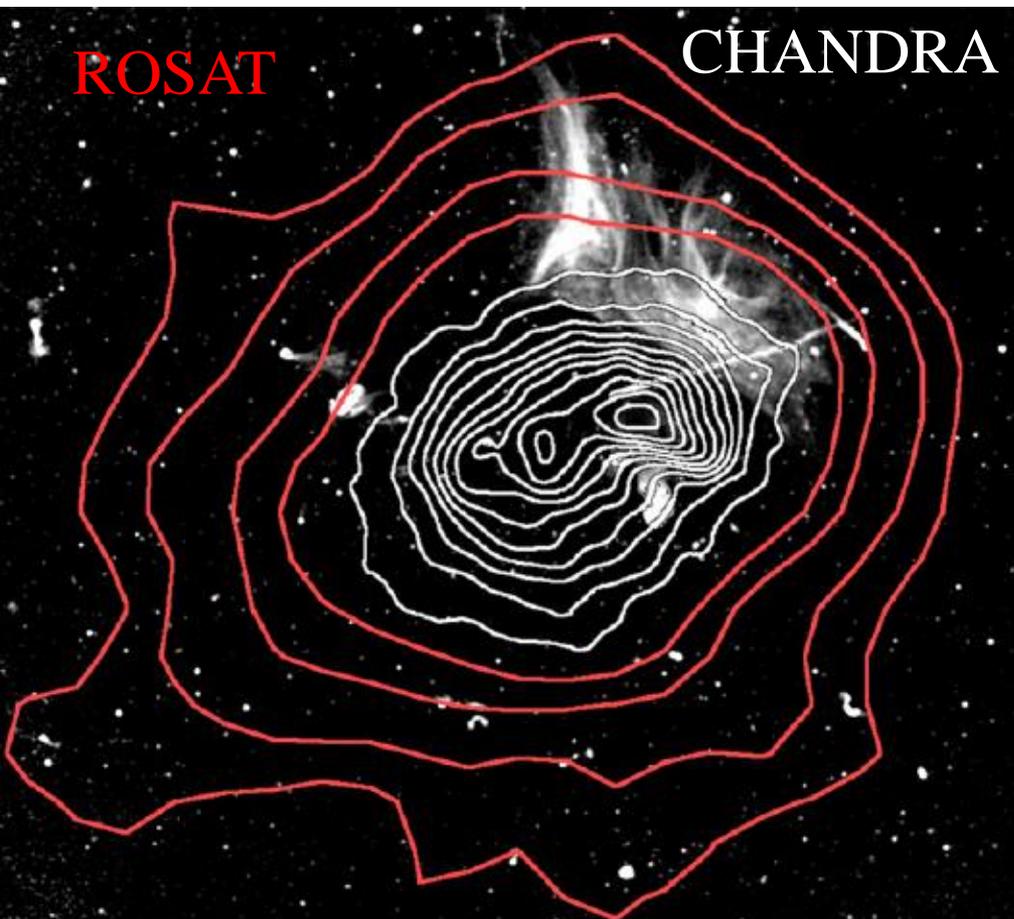
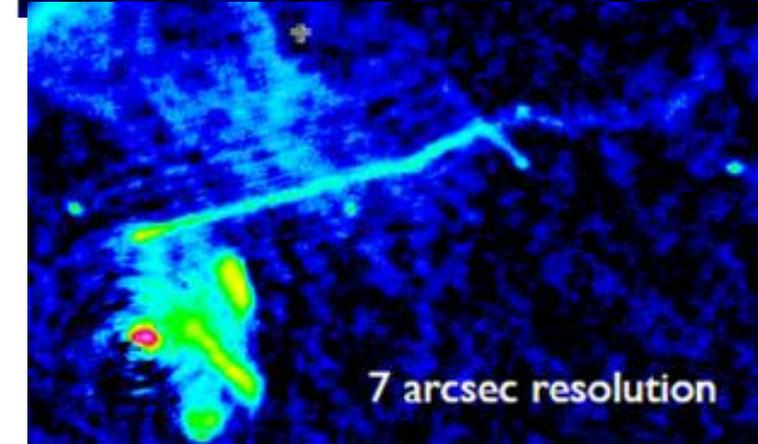
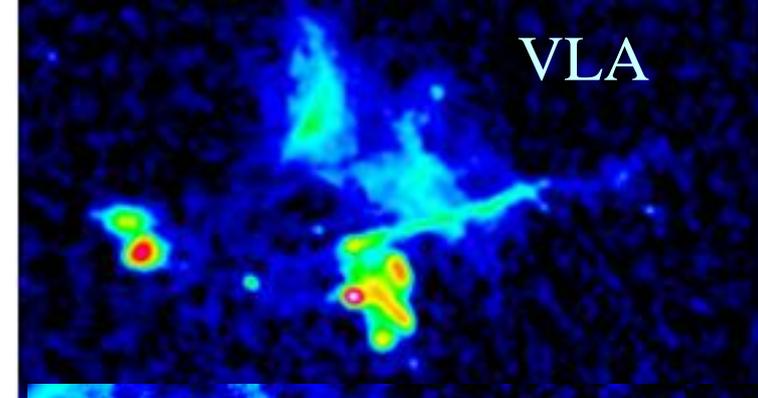
WAT=
« Wide Angle
Tail »

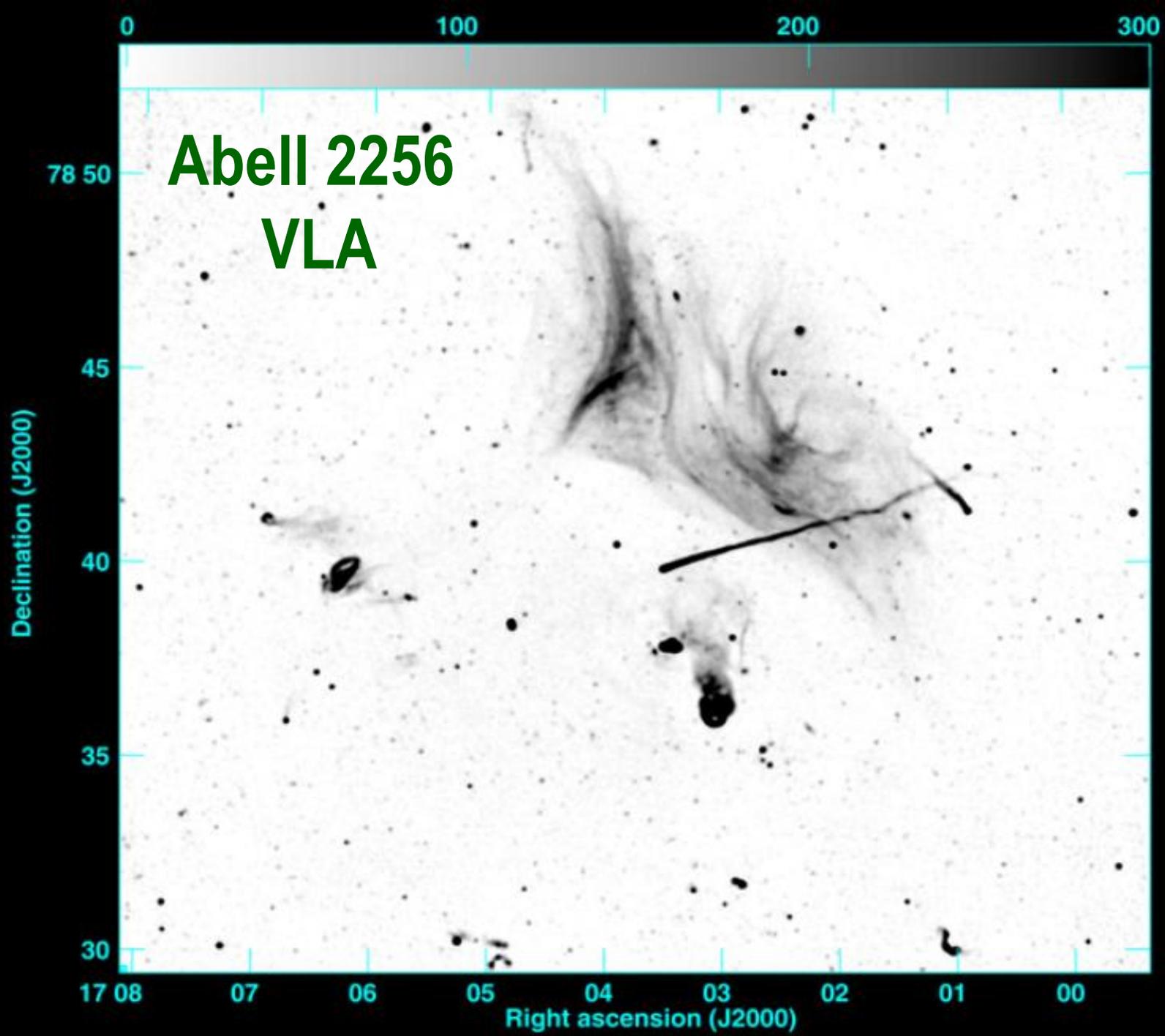
Abell 2256: VLA + LOFAR

Grandes radio relics, plusieurs filaments

Et plusieurs restes de radio sources

Owen+ 2014, Van Weeren et al 2015

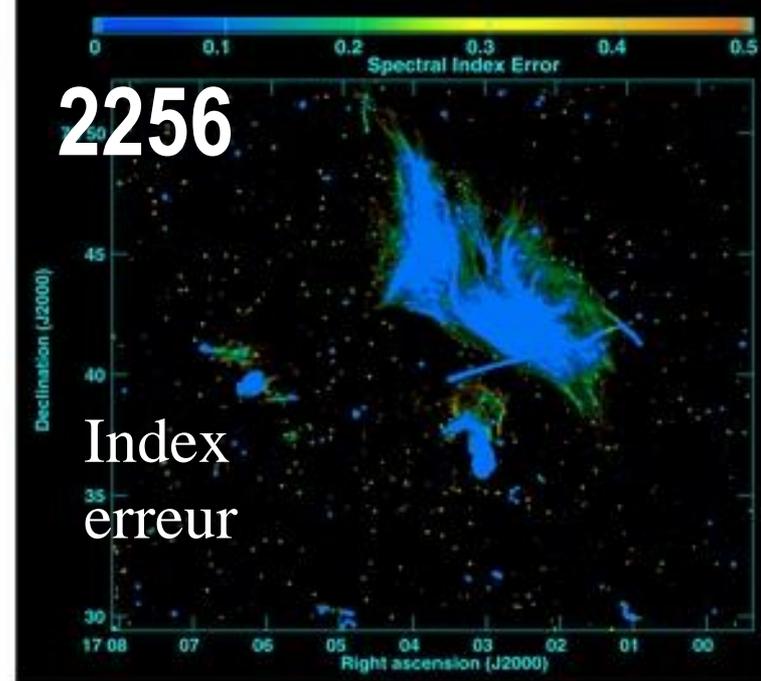
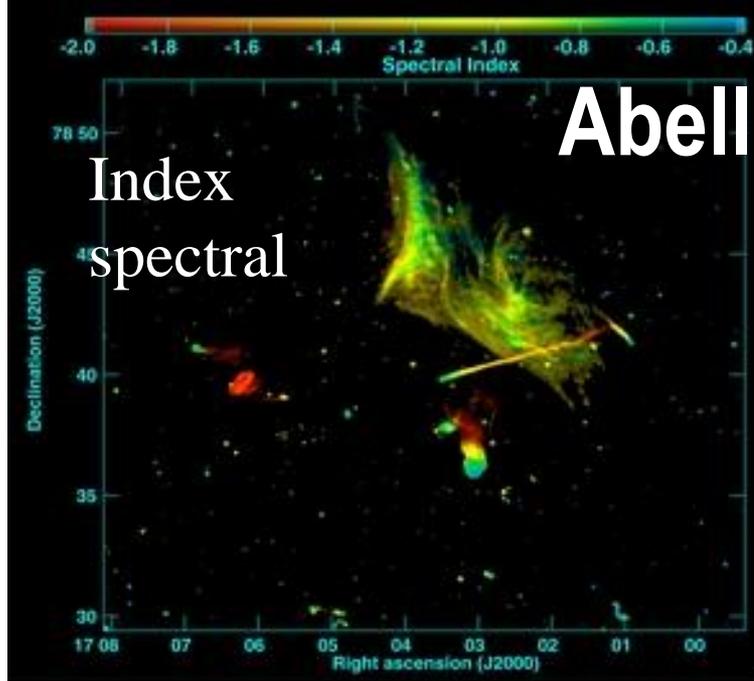




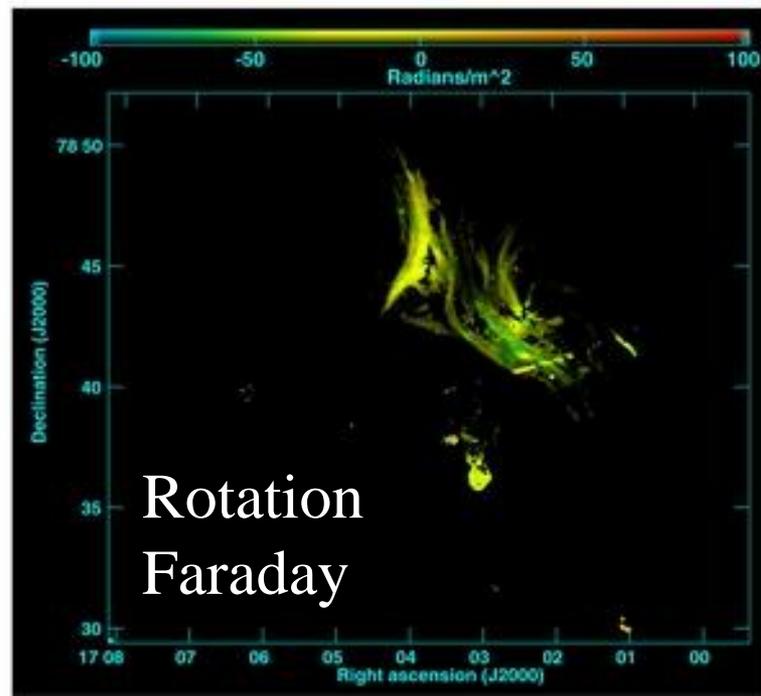
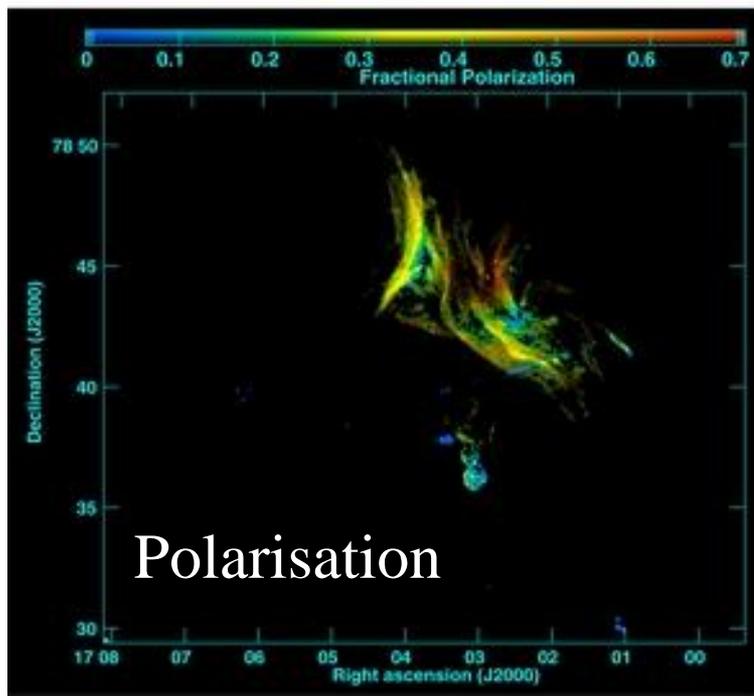
*Owen et al
2014*

Rouge $\alpha=2$
e- agés
Vert $\alpha=0.8$

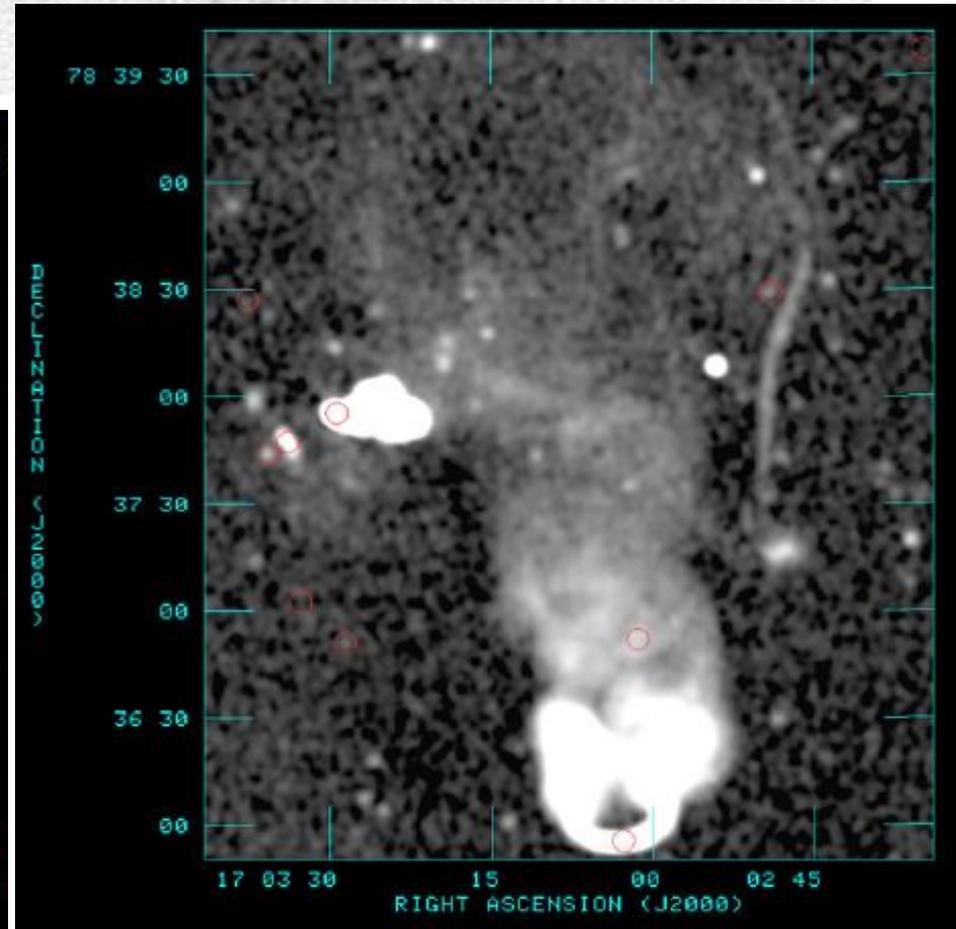
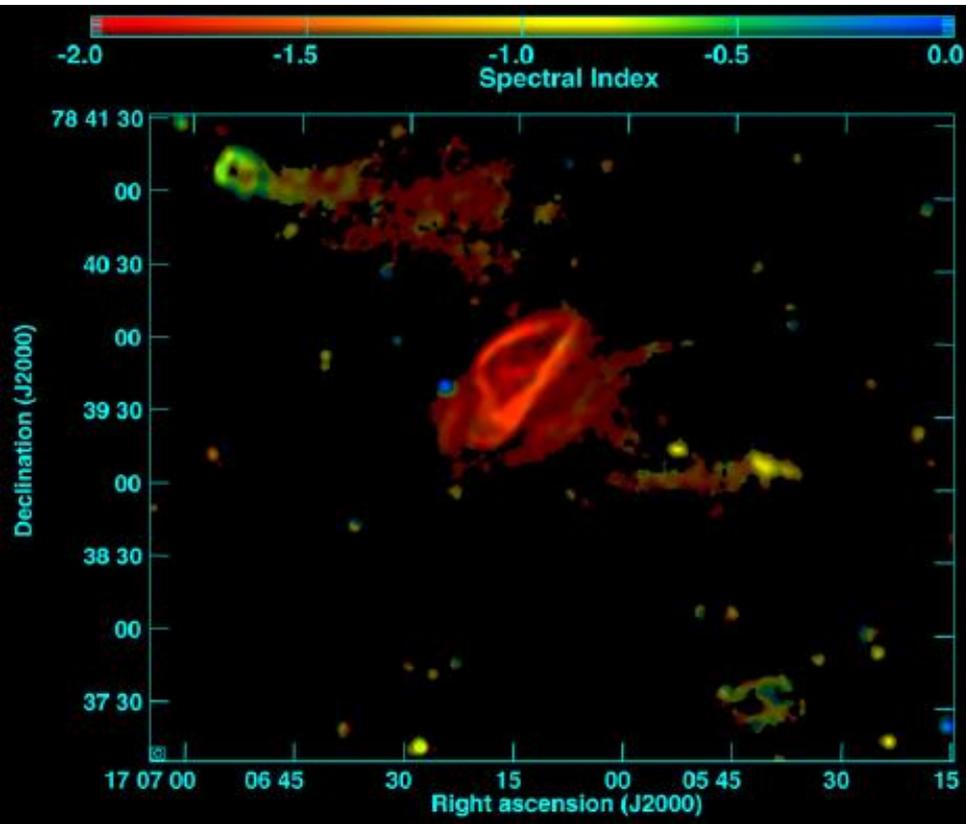
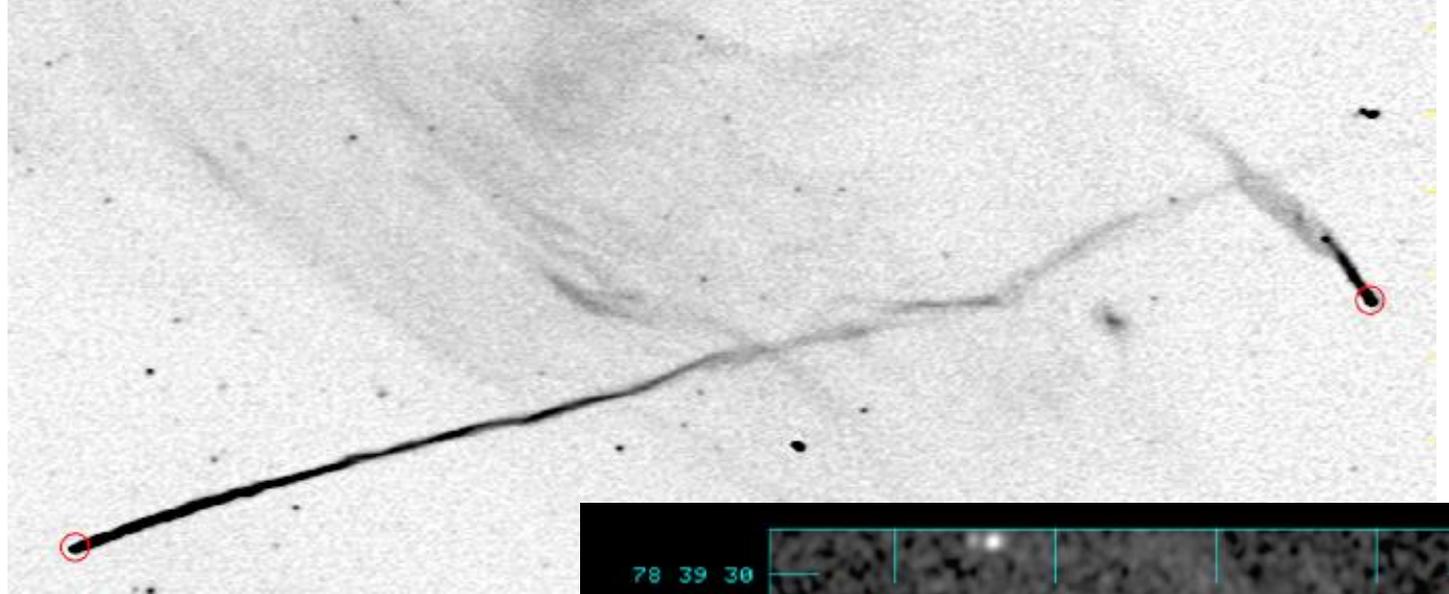
Owen et al
2014



Rouge 70%
Maximum
→ La grande
relique a un
champ B
cohérent



Abell 2256 -- Details



Abell 2256

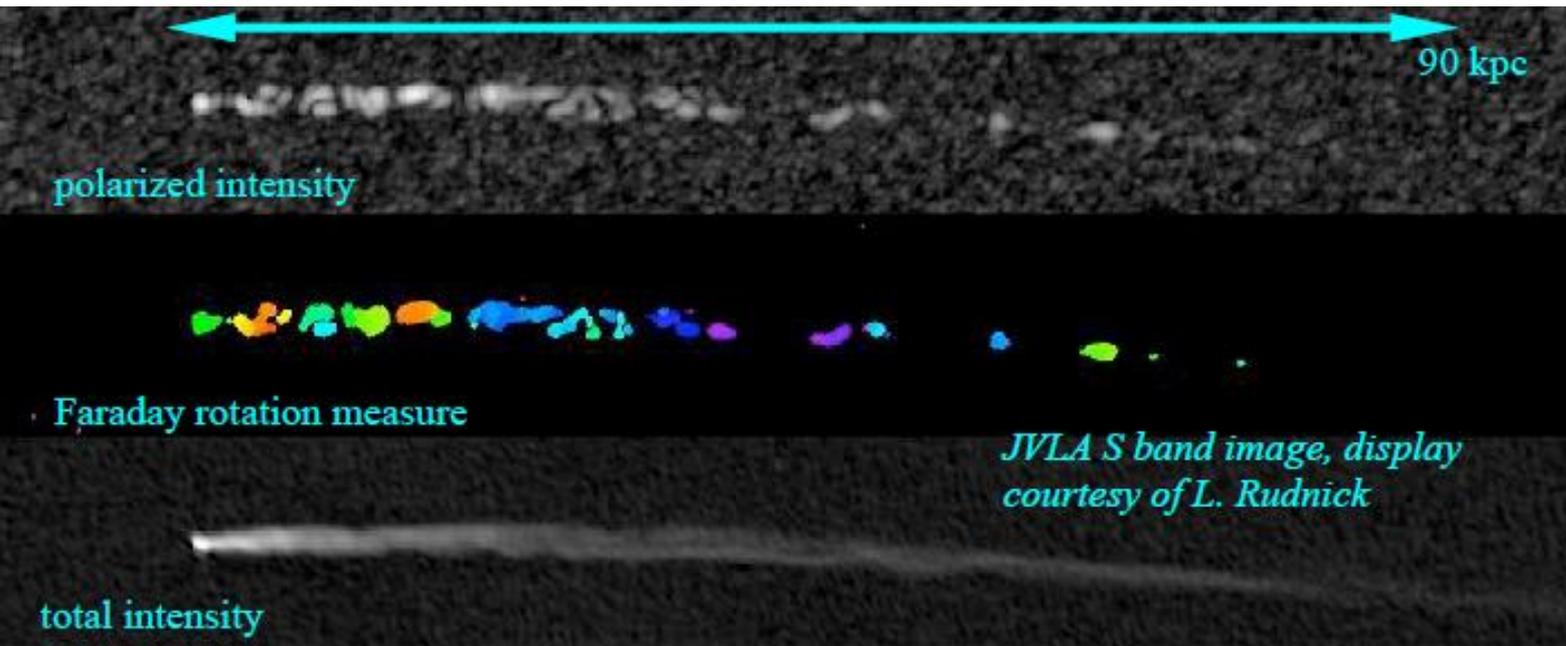
Le long filament est polarisé au début

Le champ magnétique change d'orientation

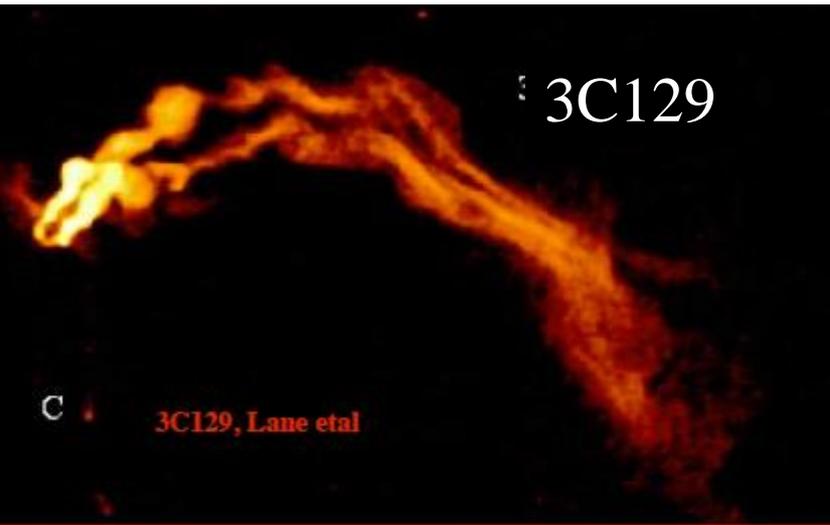
Milieu multi-phase?

Pas vraiment de noyau

→ La longueur nécessite de la ré-accélération



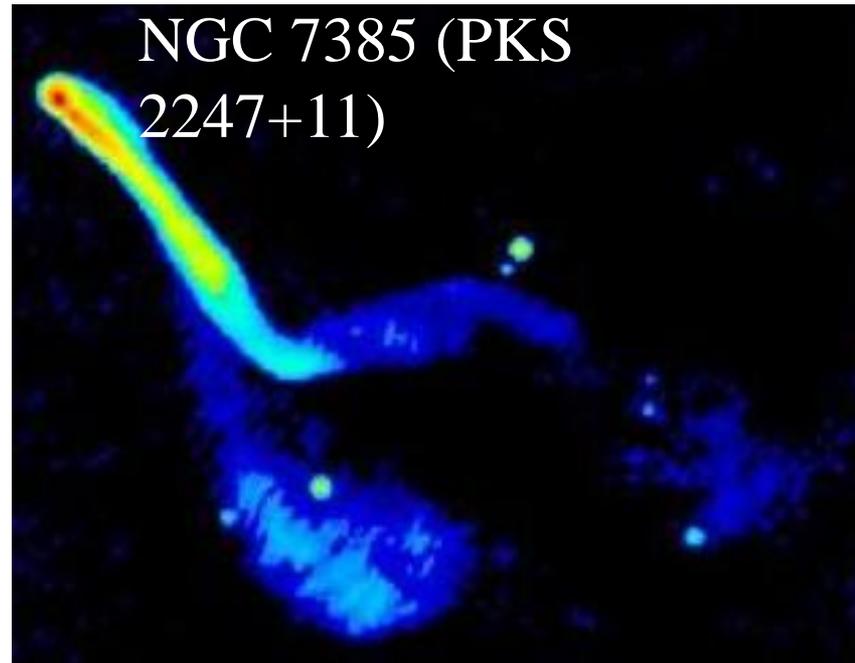
Qu'est-ce que ce long filament ?



Serait-ce comme une source radio

HT= « Head-Tail » ?

Les deux jets sont repliés sur eux-mêmes



En fait, il est impossible de distinguer 2 jets

La largeur devient aussi fine que 100pc

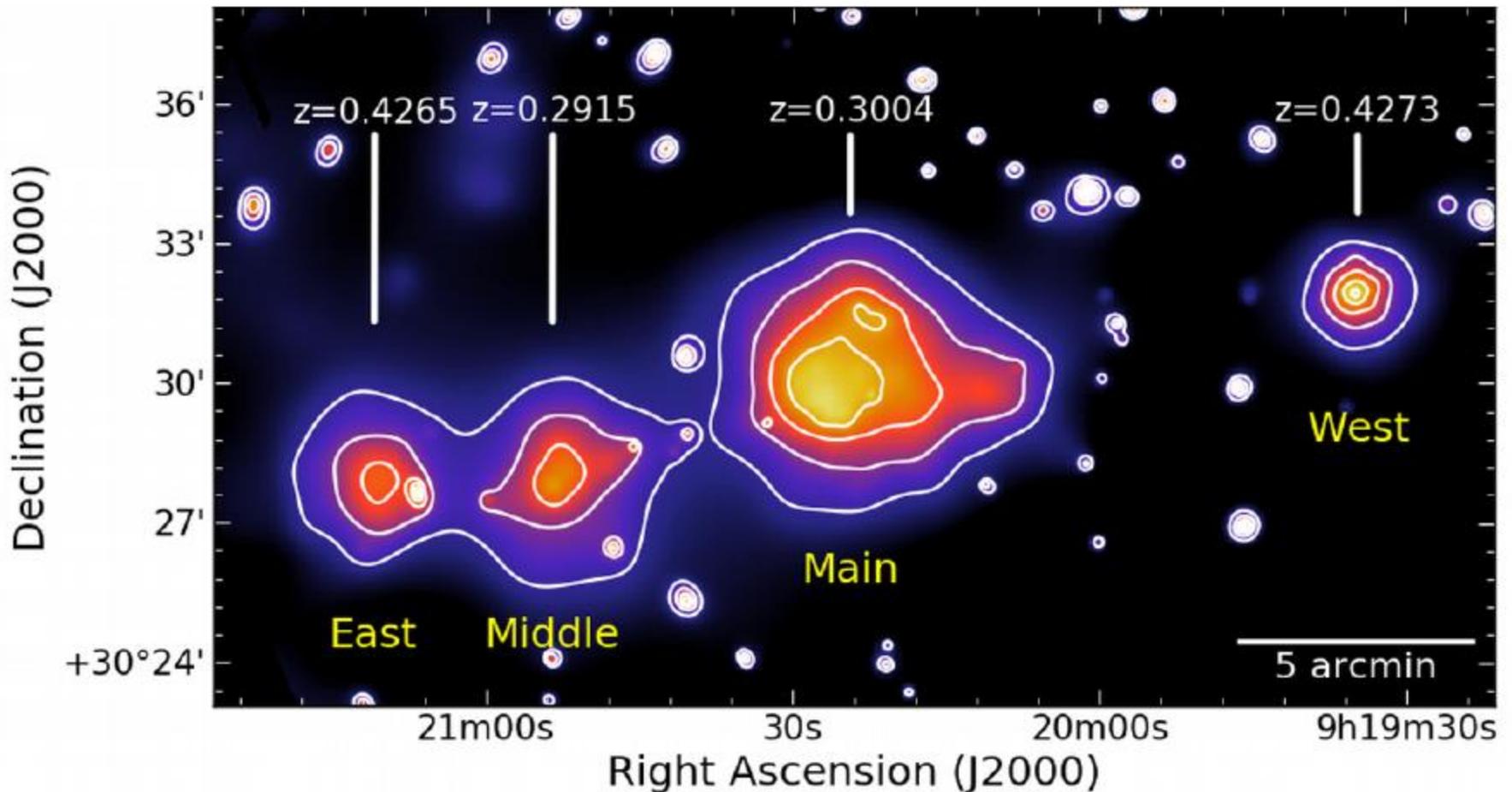
L'autre jet a-t-il été détruit par l'interaction avec l'amas?

Encore mystérieux..

Abell 781: une chaîne d'amas

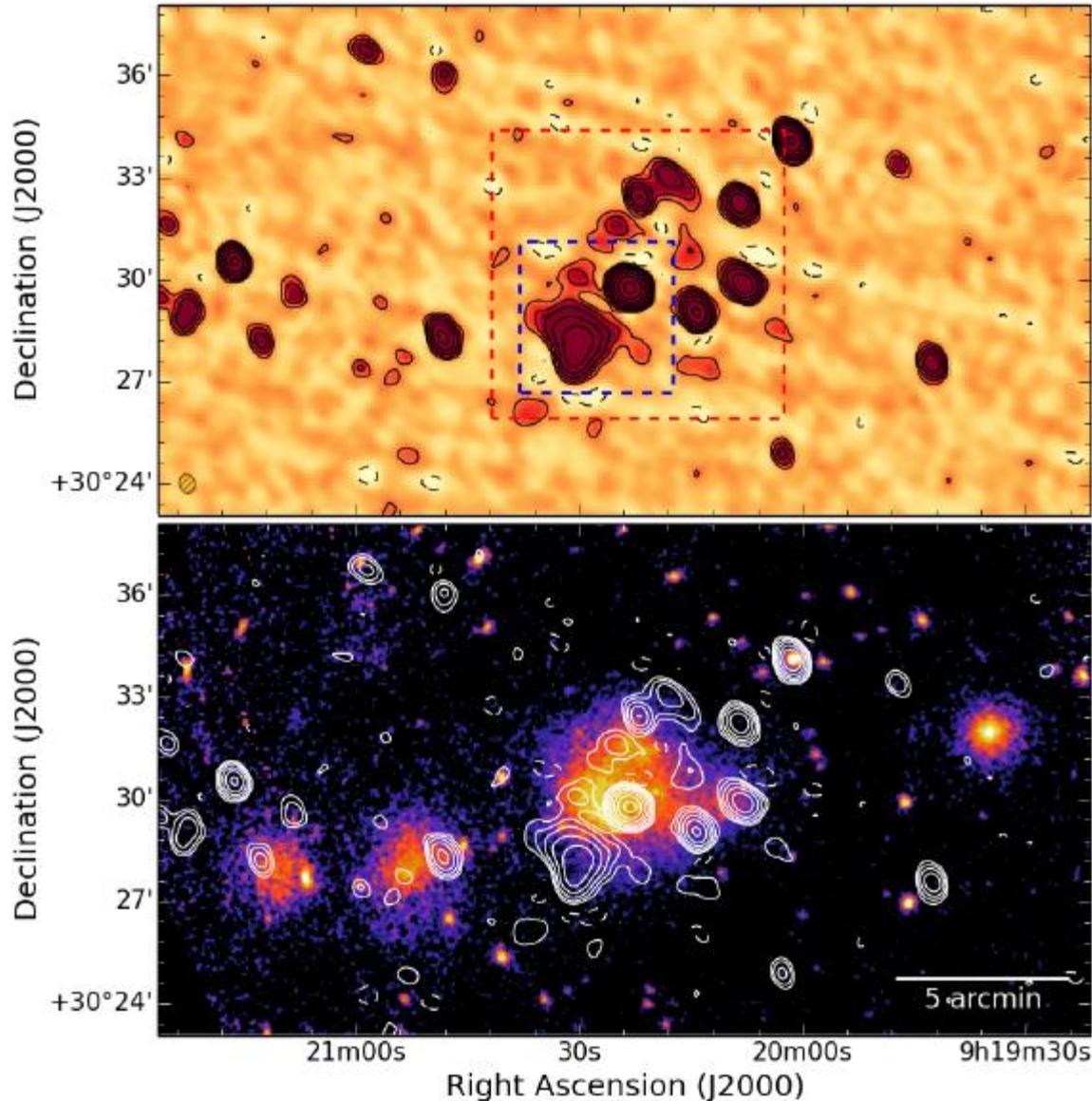
Rayons-X XMM-Newton

Botteon et al 2018

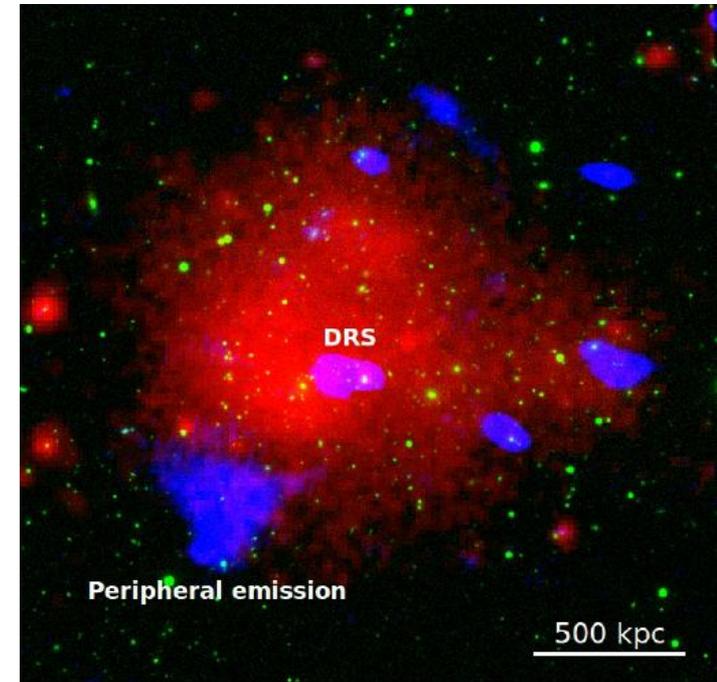


Radio basses fréquences: LOFAR
Très adaptées: spectres pentus

Structures radio



143 MHz



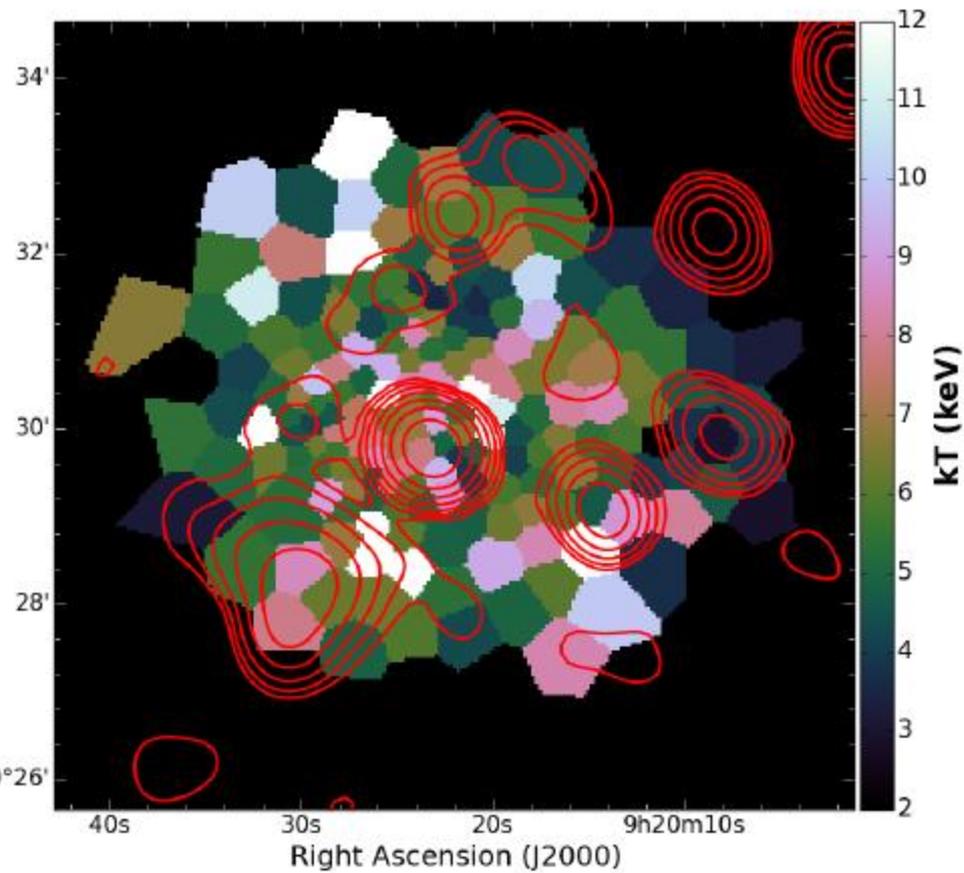
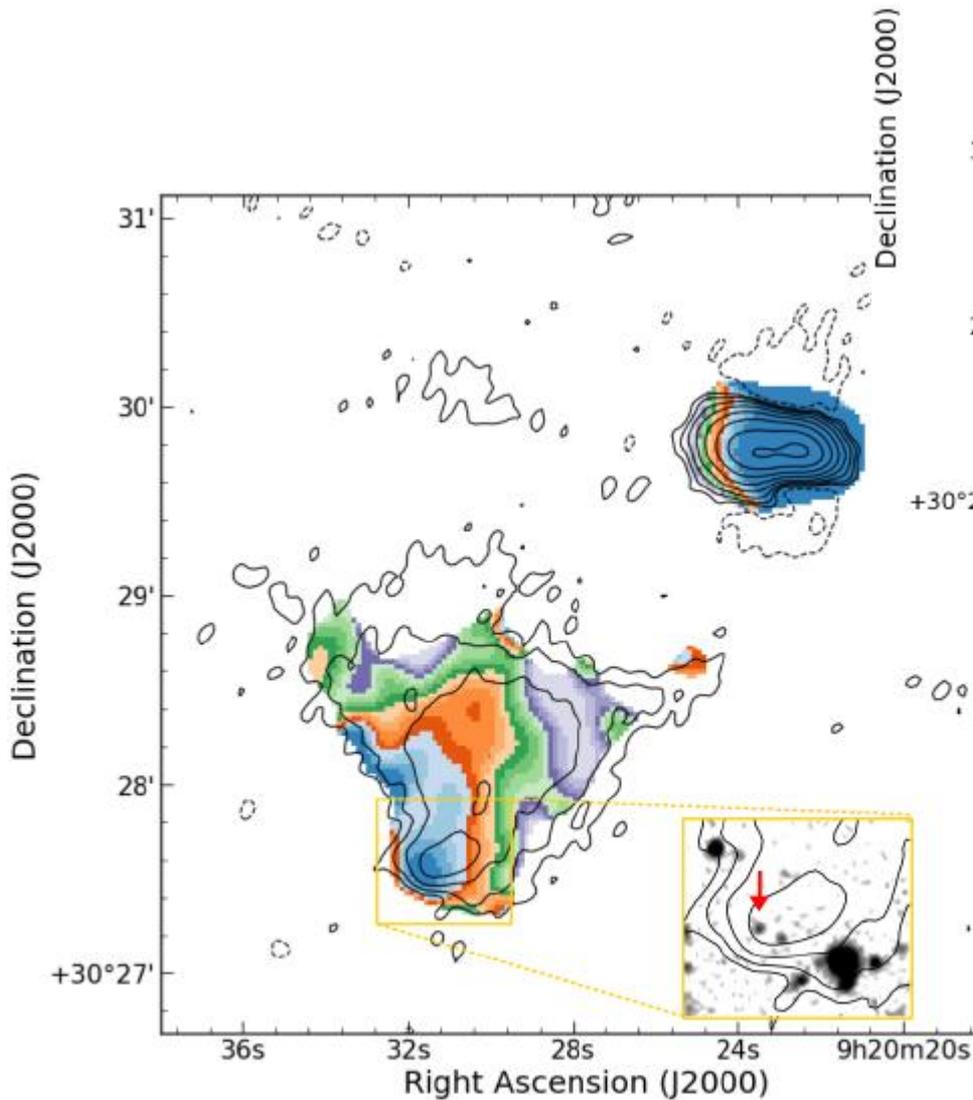
Bleu= Radio LOFAR

Rouge= rayons X

Vert: optique SDSS

Botteon et al 2018

Abell 781: index spectral



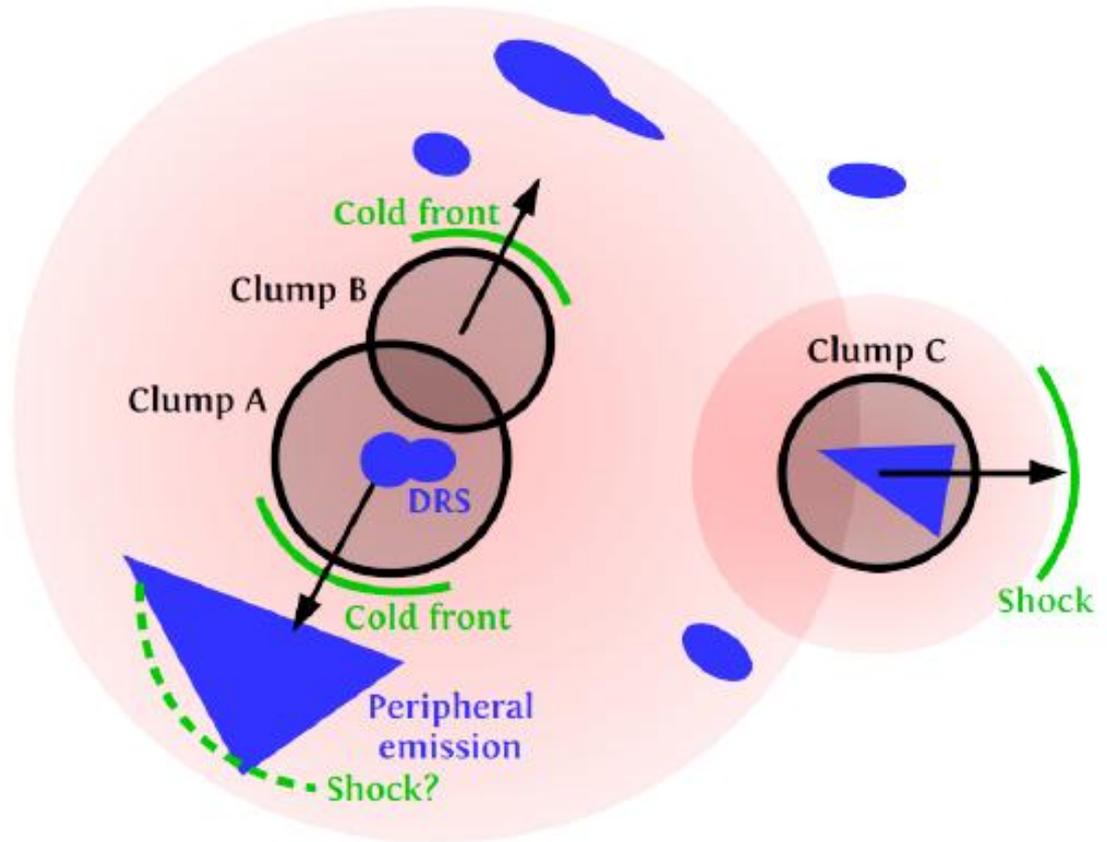
Température du
Gaz chaud (X)

Abell 781: scénario de collision

Emission SE périphérique:
Collision d'un choc avec un
jet radio fossile?

3 sous-amas fusionnent
Un choc et 2 fronts froids

Pas de radio halo diffus
Occupant tout l'ensemble

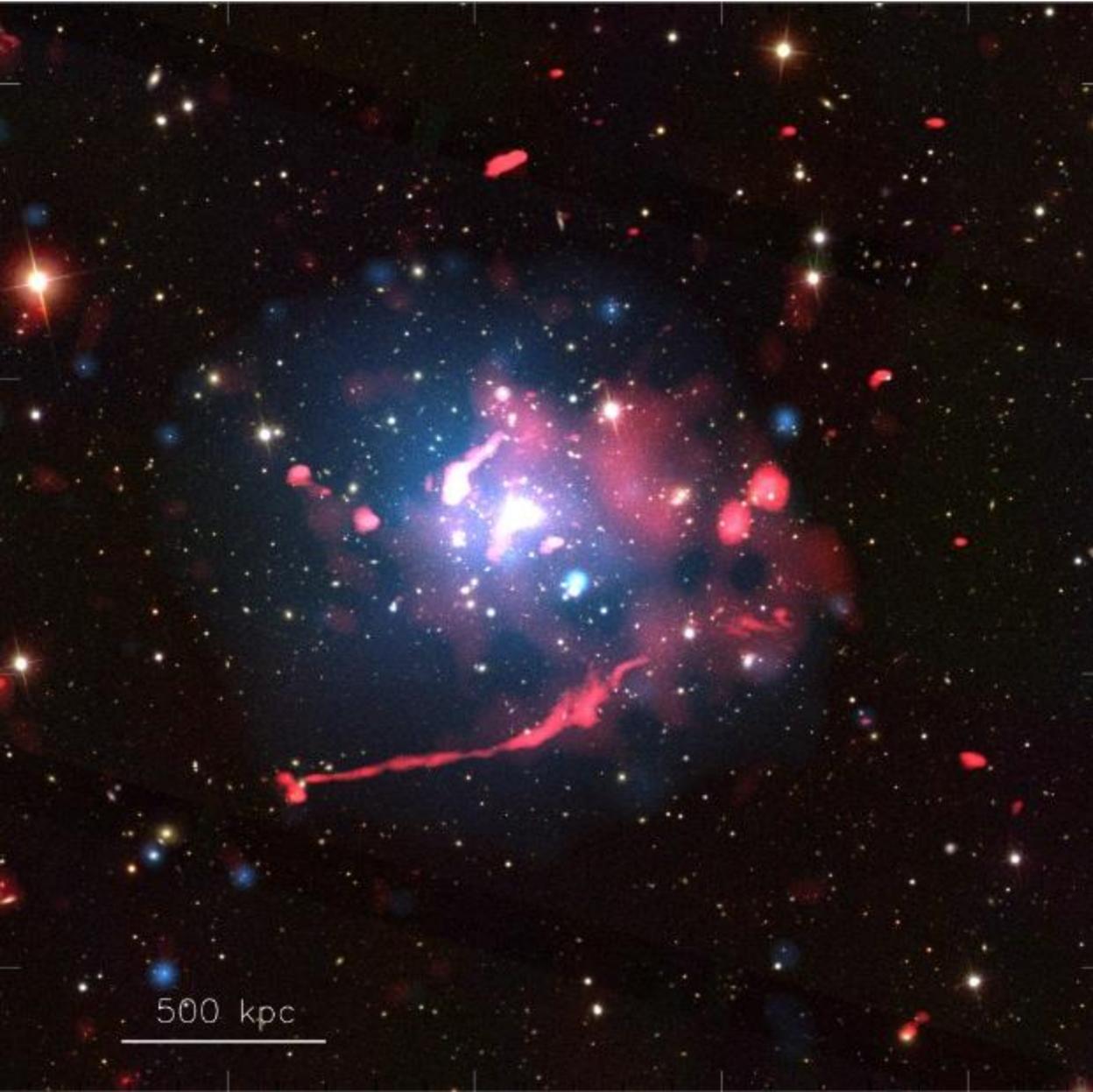


Botteon et al 2018

Faible choc
Mach < 1.4

Abell 1132

LOFAR 143 MHz, Spectre ultra-pentus
 $\alpha=1.75$



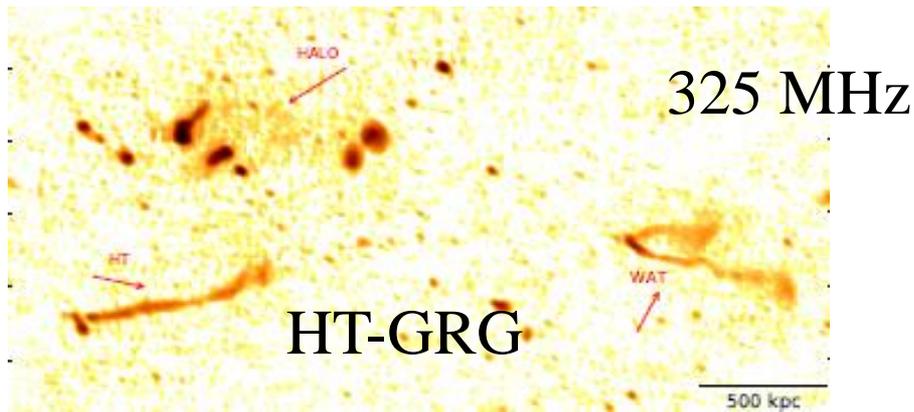
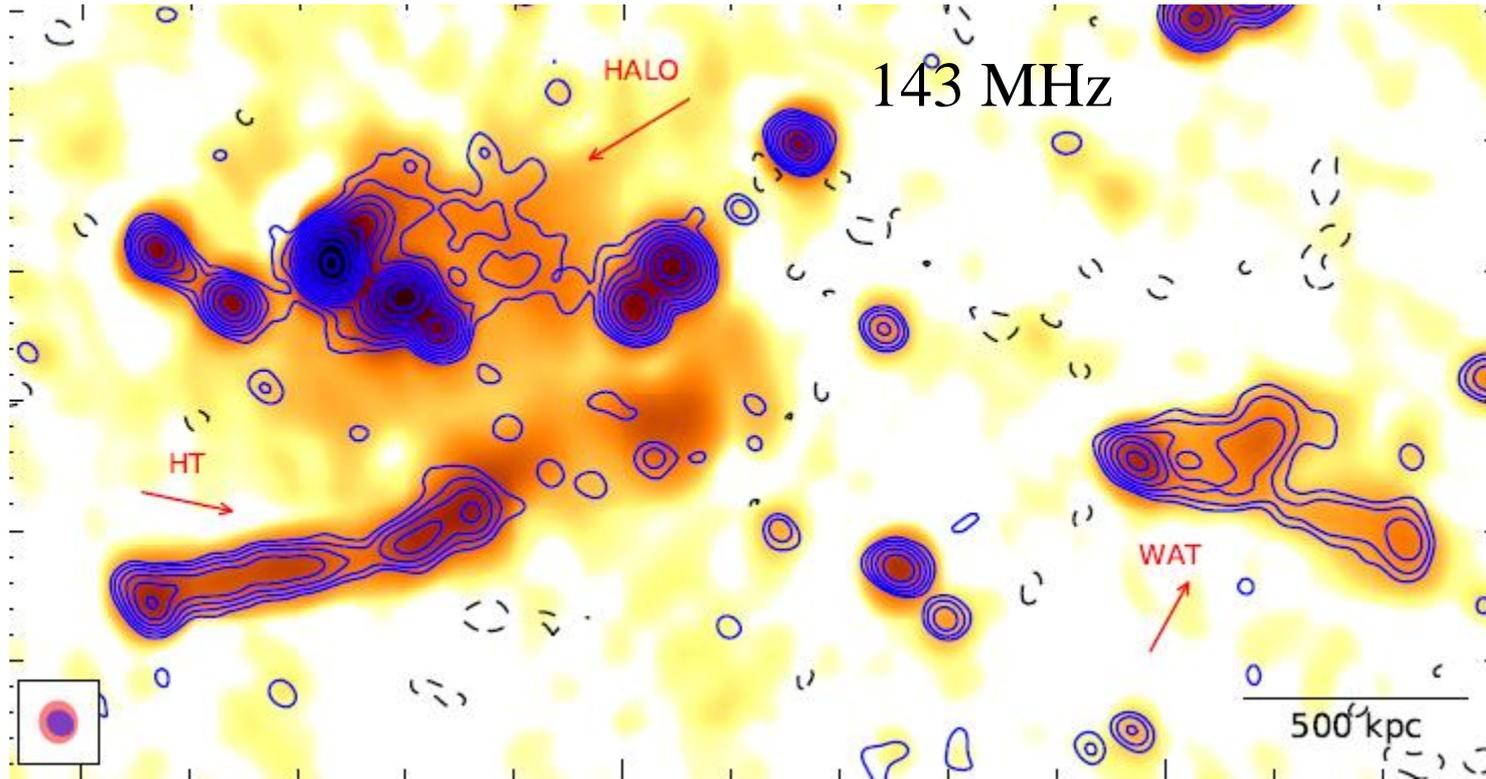
SDSS optique
Rayons-X en bleu
Radio en rouge

Radio galaxie géante
fournit des électrons
à la relique

Radio halo diffus
avec un spectre parmi
les plus pentus

Wilber et al 2017

Plusieurs radio sources

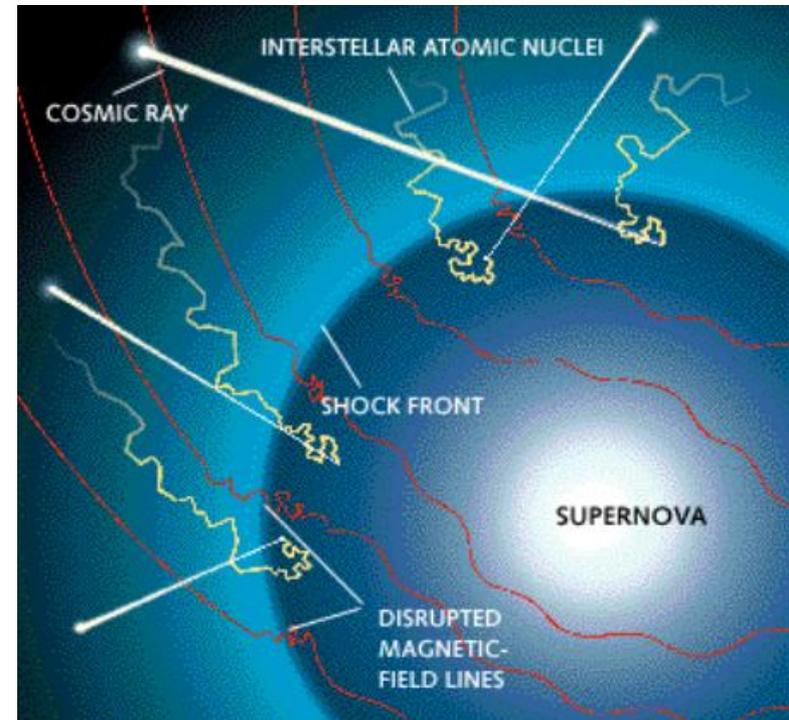
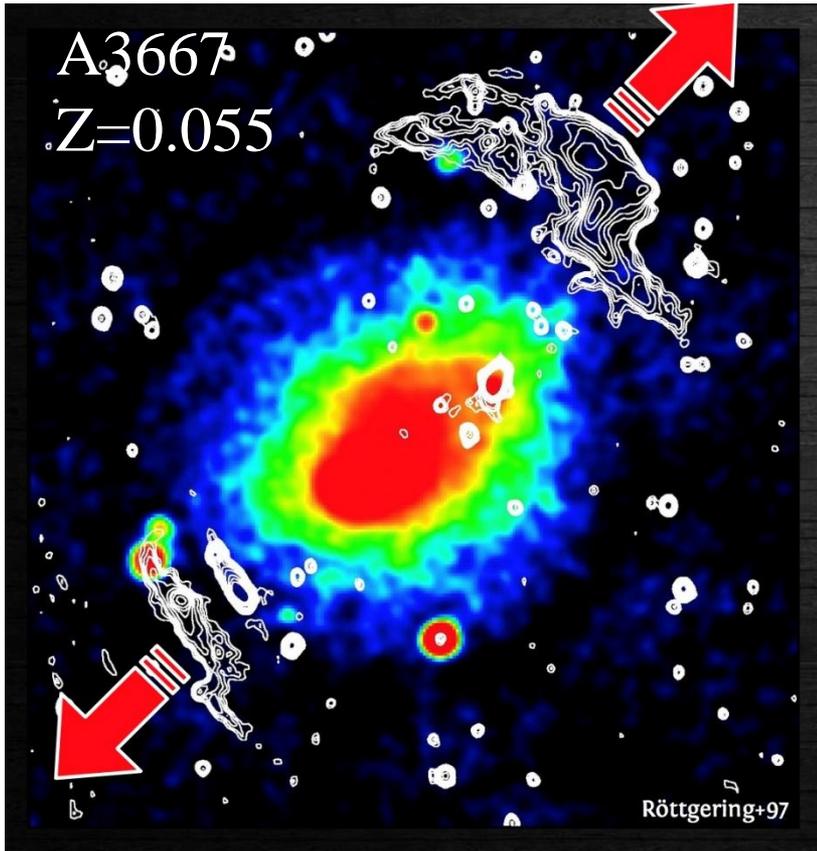


La radio source est longue
de 1.3 Mpc,
Probablement e- ré-accélérés
par le choc

Relation entre relique et choc

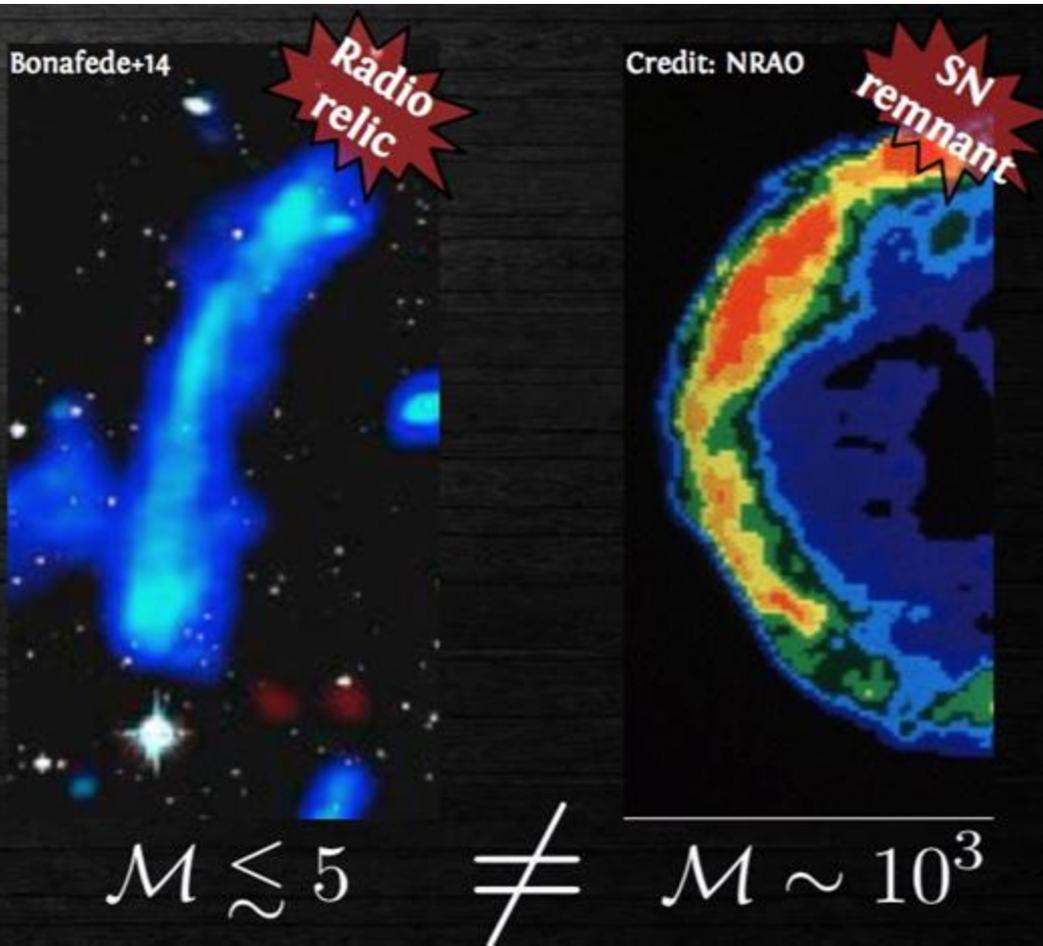
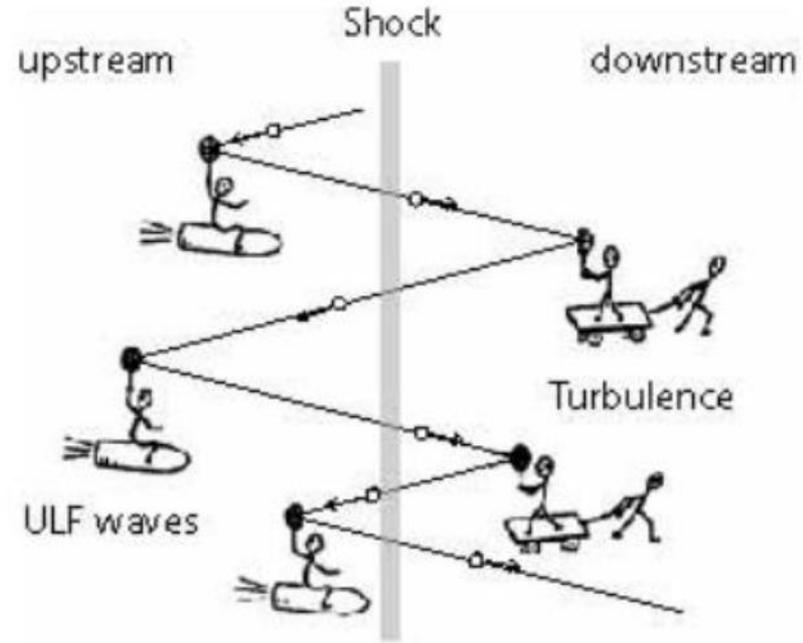
Les reliques sont des émissions radio diffuses et polarisées sur des échelles ~Mpc dans les bords des amas en collision

L'accélération dans les chocs est bien connue dans les supernovae, pour les rayons cosmiques

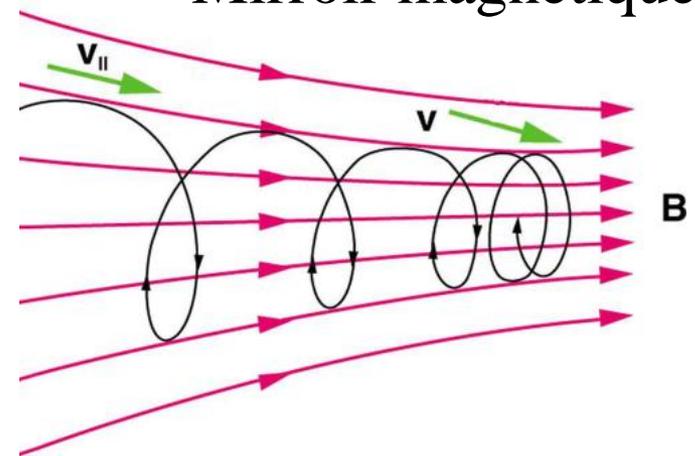


Accélération dans les chocs

Les particules sont diffusées par des inhomogénéités magnétiques



Mirrored magnetic



Accélération dans les chocs

Diffuse Shock Acceleration (DSA)

Processus de Fermi: particules sans collisions
(1pm ~ 1kpc), sinon → thermalisées

Fermi I: Mirroir magnétique

Reflections → plusieurs traversées du choc
gain d'énergie de $\beta = (u_2 - u_1)/c$ au 1er ordre

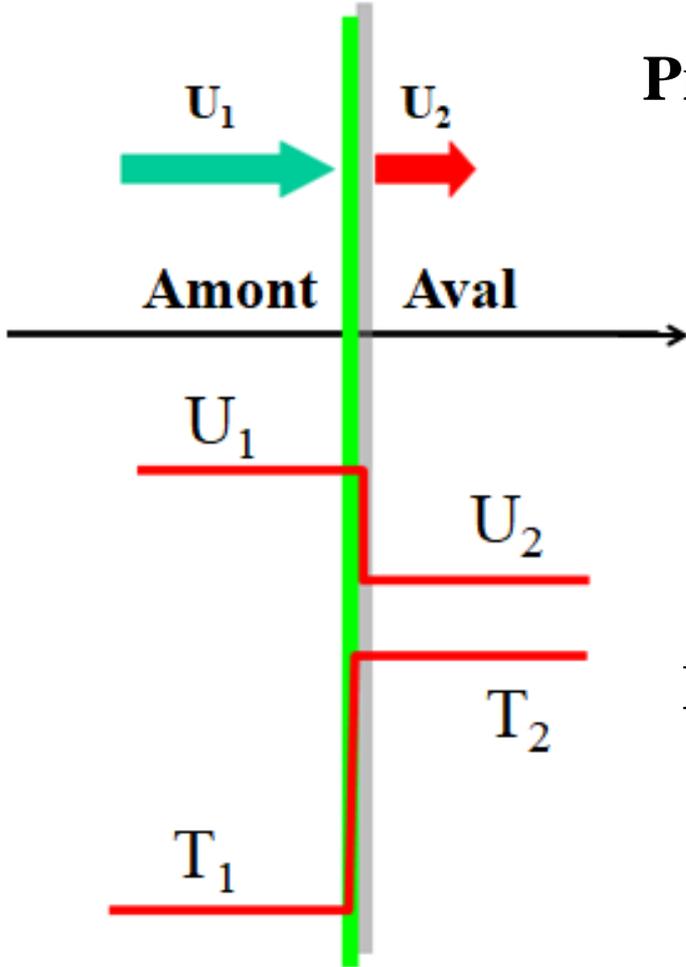
Fermi II: nuages magnétisés en mouvement
Les miroirs magnétiques aléatoires
(turbulence)

gain en énergie $\sim \beta^2$

Processus de second ordre

(Fermi 1949)

$$\frac{U_1}{U_2} \rightarrow 4$$



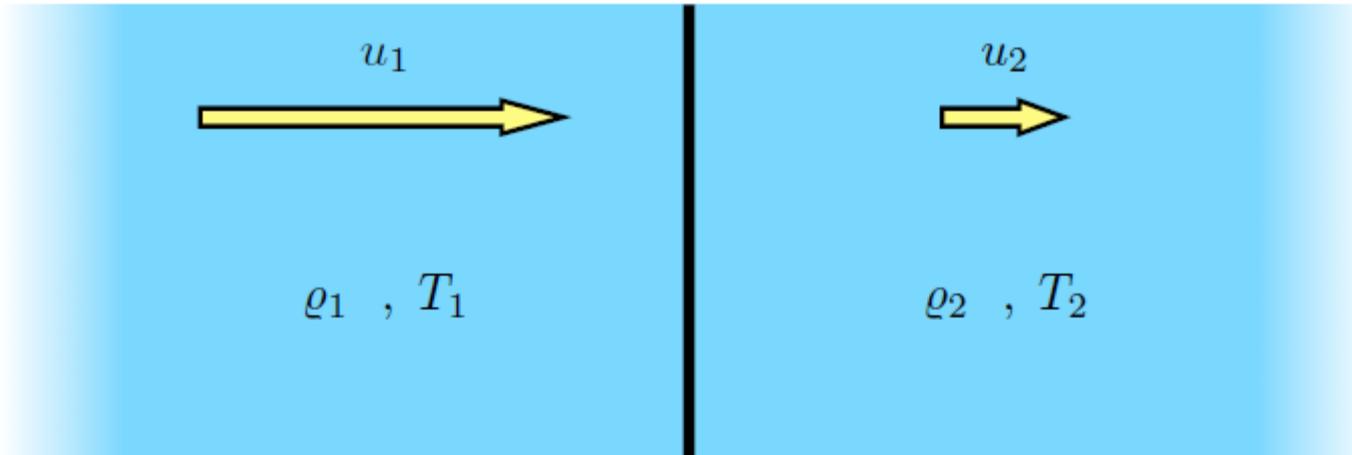
$$\frac{T_2}{T_1} \propto M^2 \gg 1$$

Accélération dans les chocs

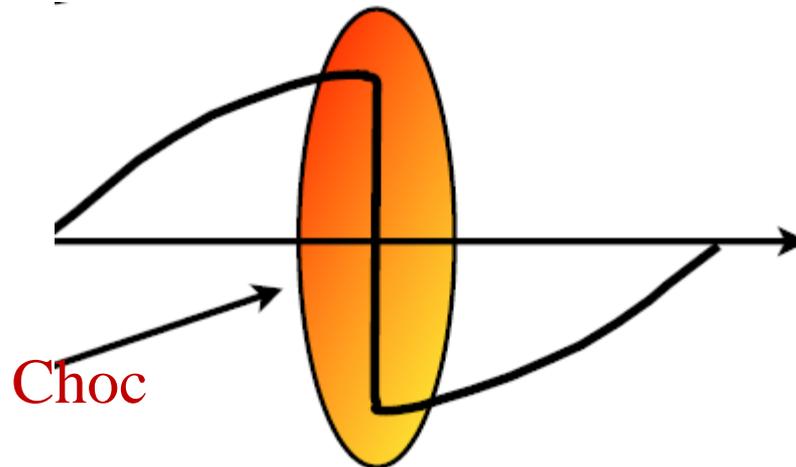
Dans le référentiel au repos du choc : $\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$

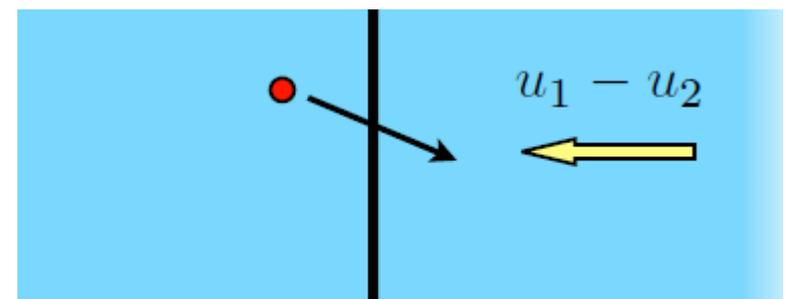
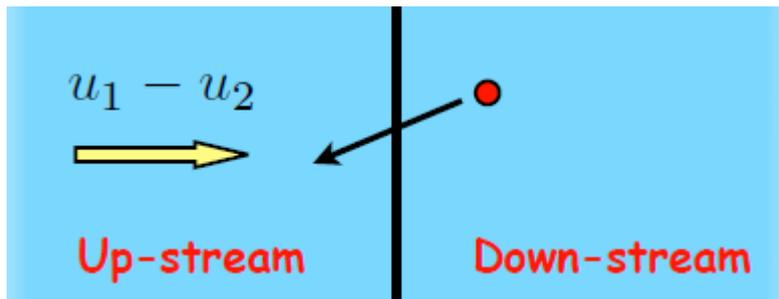
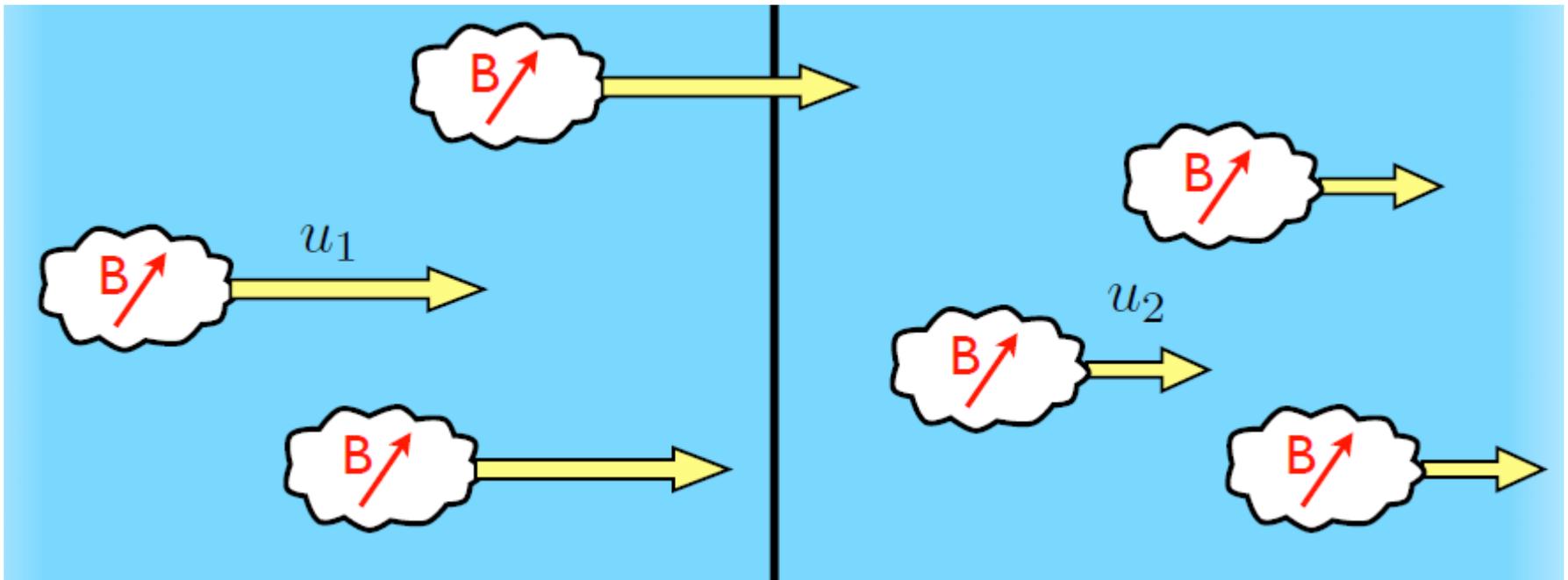
Amont

Aval



Choc fort
 $\rho_2/\rho_1 = 4$
 $M \gg 1$





A chaque traversée du choc, la particule rencontre le plasma de plein fouet avec la vitesse $u_1 - u_2$

On peut montrer que le spectre des particules à la fin est

$$N(E) \propto E^{-2}$$

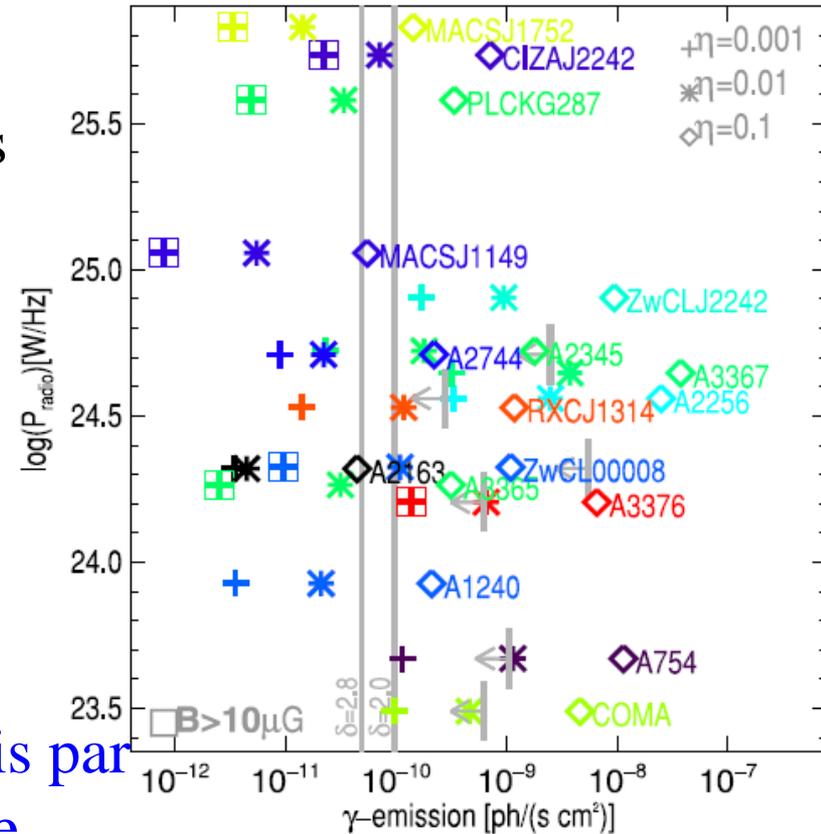
Problèmes du mécanisme

Si les électrons sont accélérés, les protons interagissent avec le gaz thermique pour donner des rayons γ
L'émission γ hadronique est détectable

La durée de vie des protons accélérés, de 10 Gyr, \gg électrons qui rayonnent

Si les électrons sont déjà accélérés, fournis par un jet radio, cela améliore un peu, mais ne résout pas complètement le problème

Ou alors les électrons sont accélérés mais pas les protons? Pourquoi?

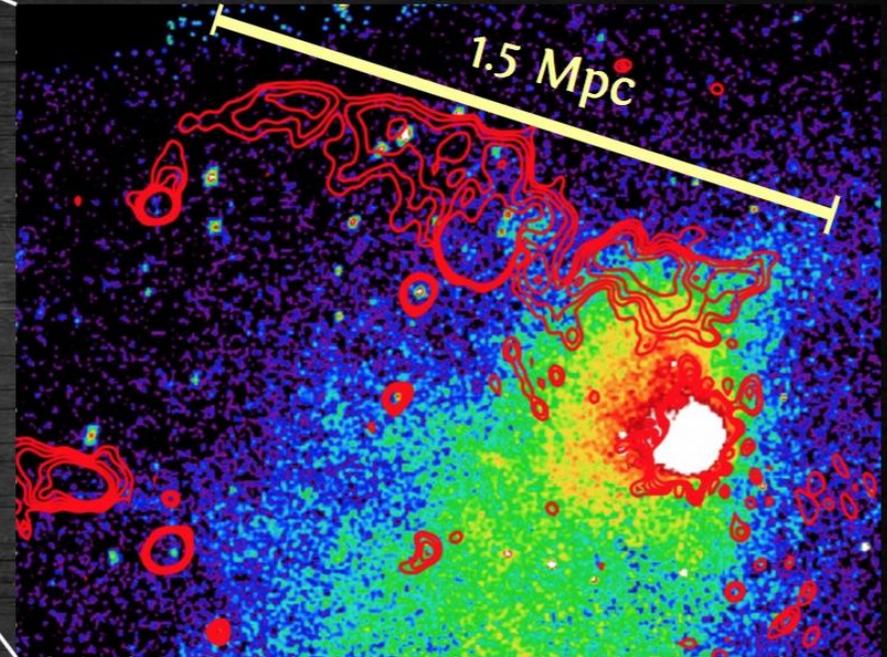
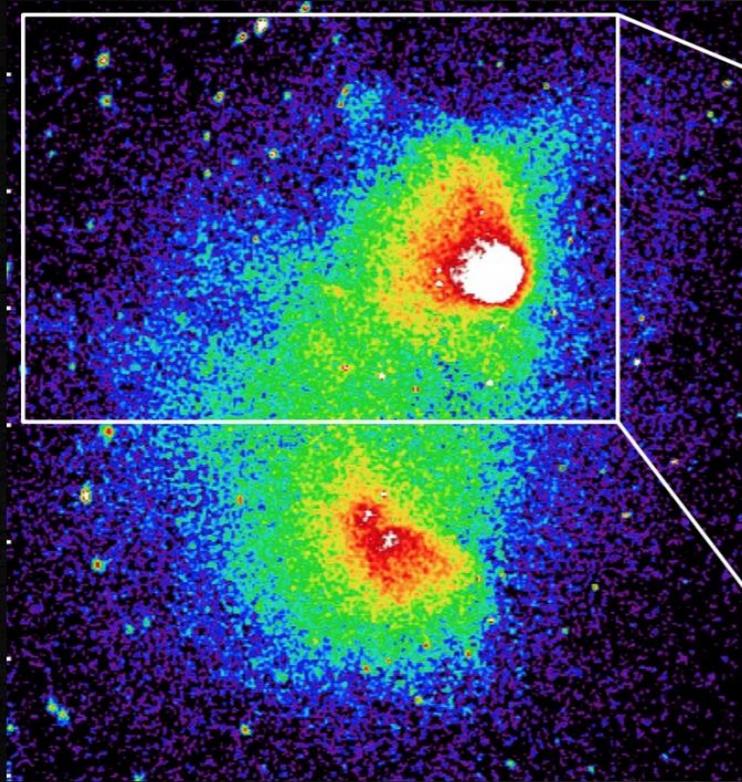


(Vacca & Bruggen 2014)

ABELL 115: Mach 1.8

Saut de T et de ρ dans le choc

$z=0.192$
 $L_{0.1-2.4 \text{ keV}} = 1.45 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$



- ✓ Fusion hors axe
- ✓ Dynamique perturbée

i Chandra 334 ks

- ✓ Relique radio géante

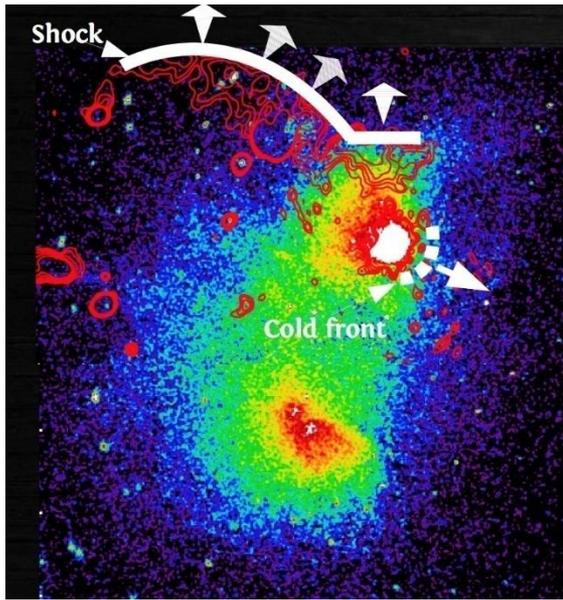
i VLA @ 1.4 GHz
Resolution 15" x 14"
r.m.s. 70 $\mu\text{Jy}/\text{beam}$ (1σ level)

La position du choc: Abell 115

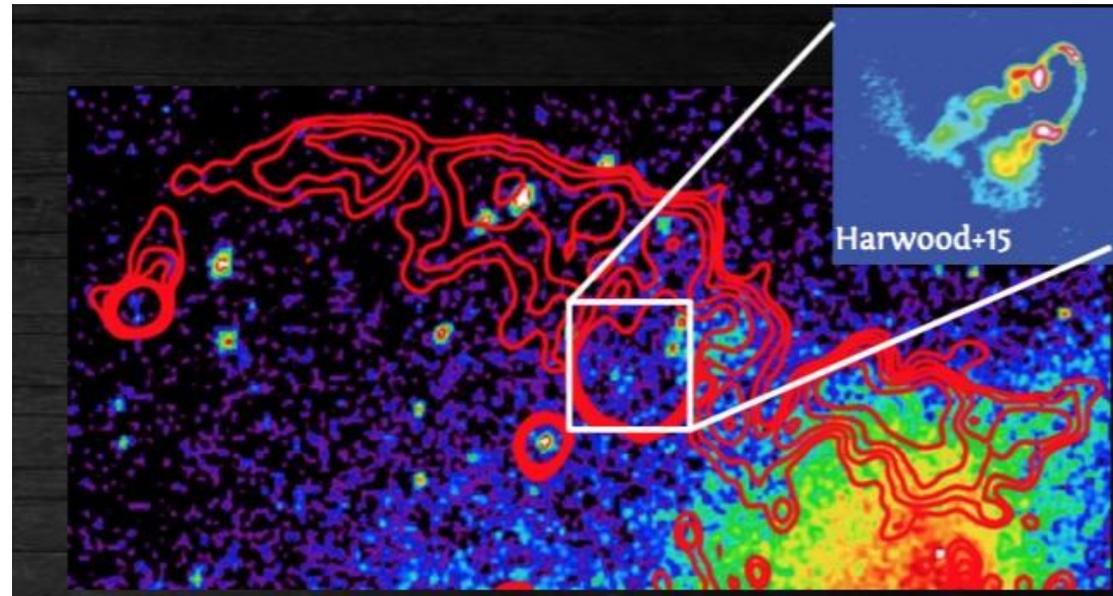
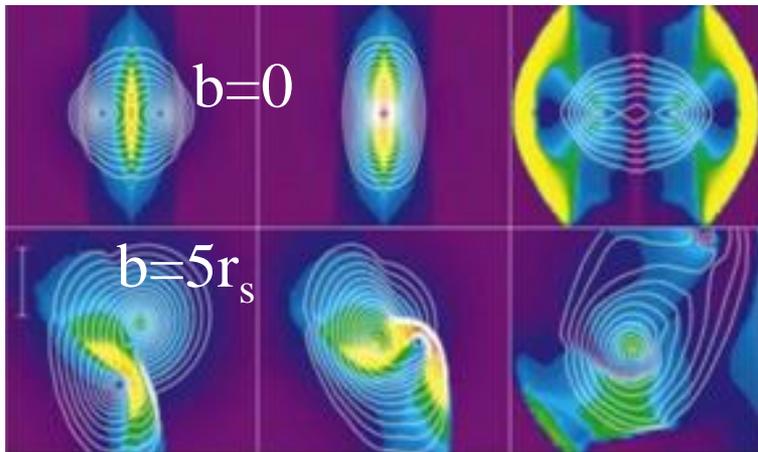
Compatible avec une fusion hors axe avec un rapport de masse 3

L'accélération de Fermi n'est efficace, que si les particules ont déjà beaucoup d'énergie

→ Les électrons proviennent d'un jet radio



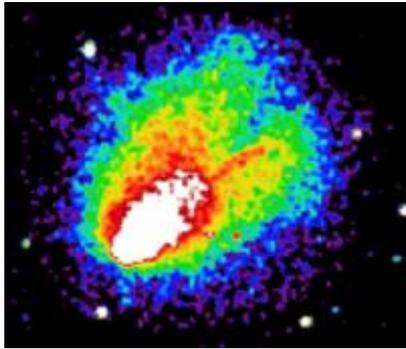
-0.5 0 1 Gyr



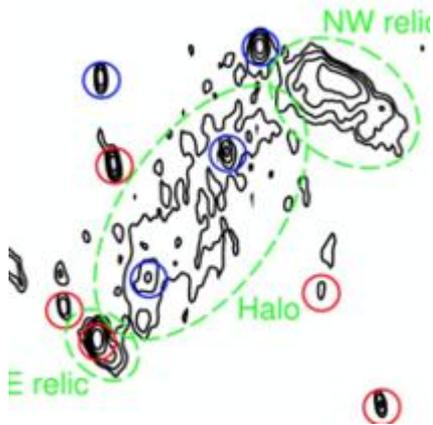
Botteon et al 2016

Ricker & Sarazin 2001

Le choc dans l'amas El Gordo

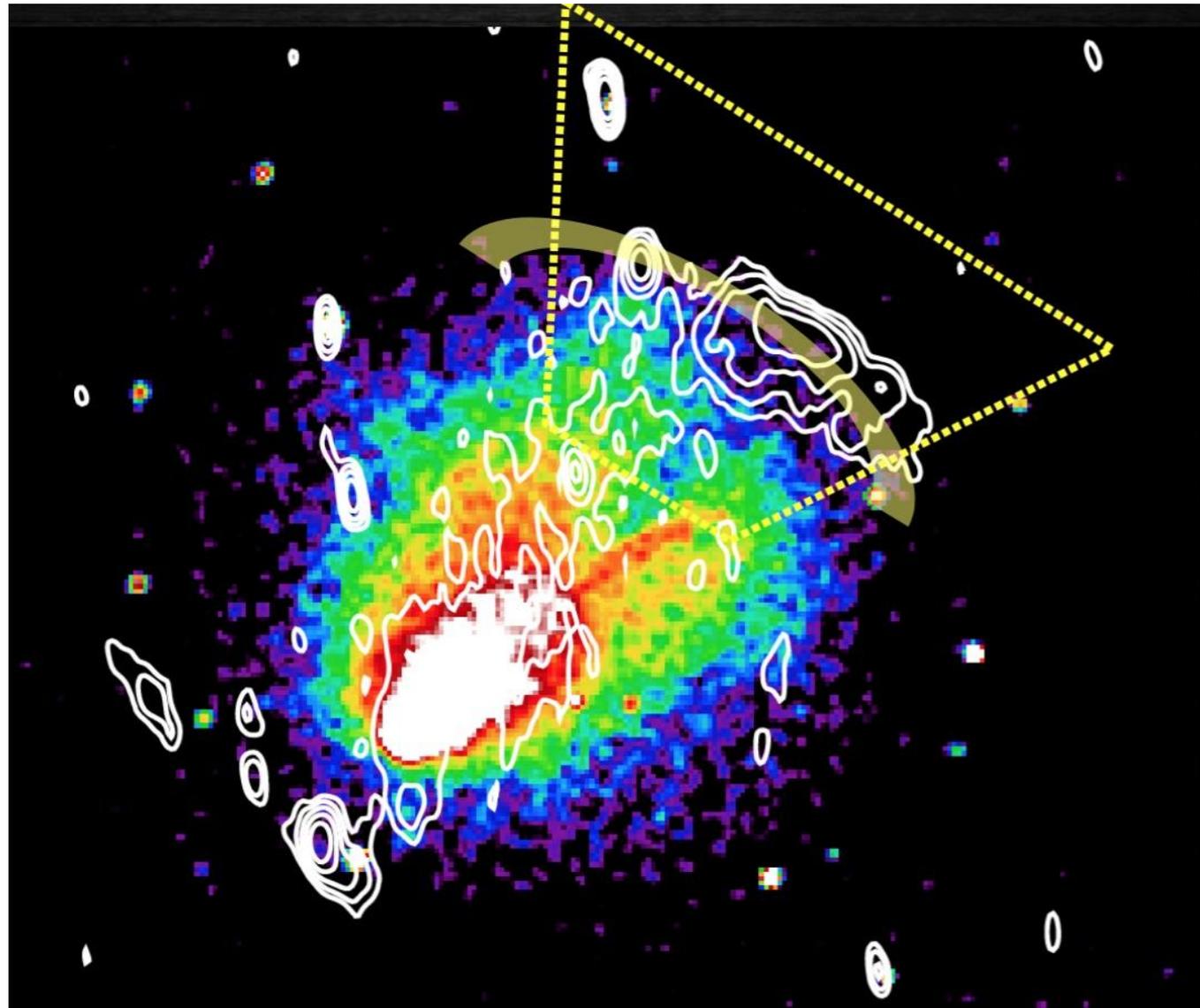


Chandra, X



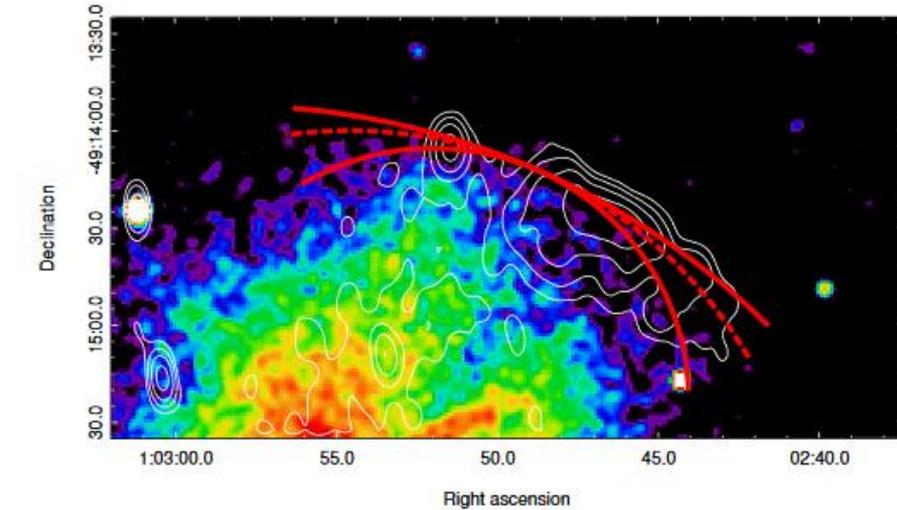
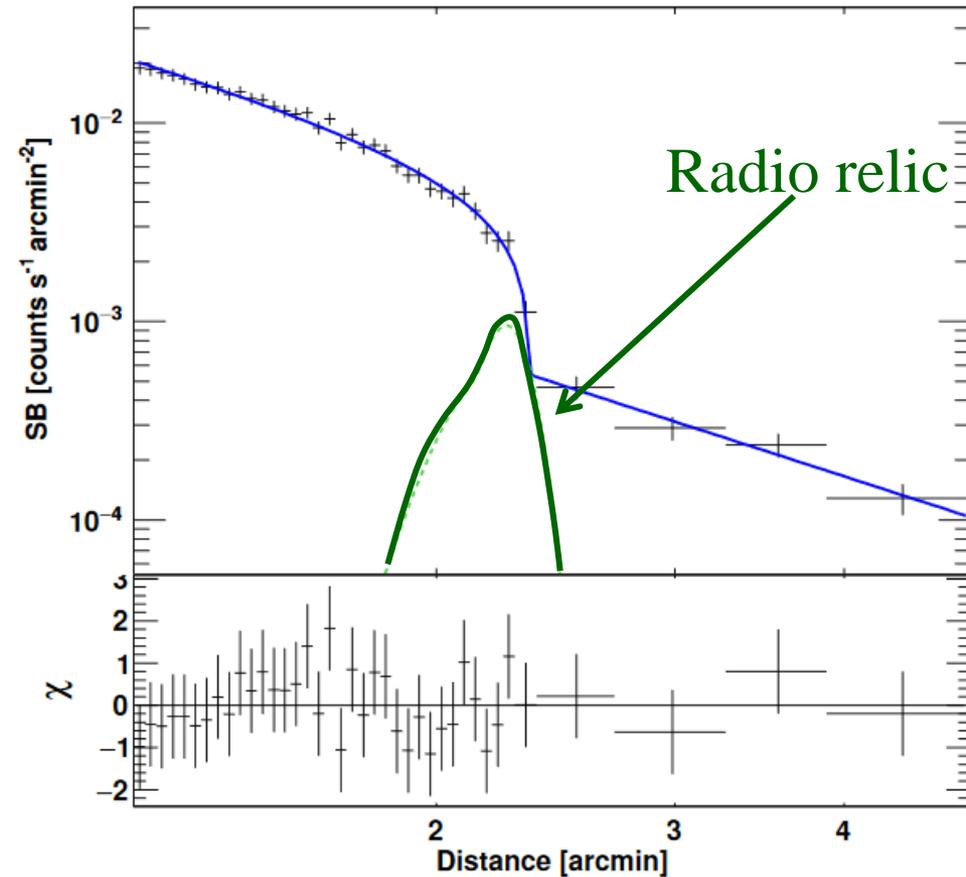
radio

GMRT 610 MHz $z=0.87$

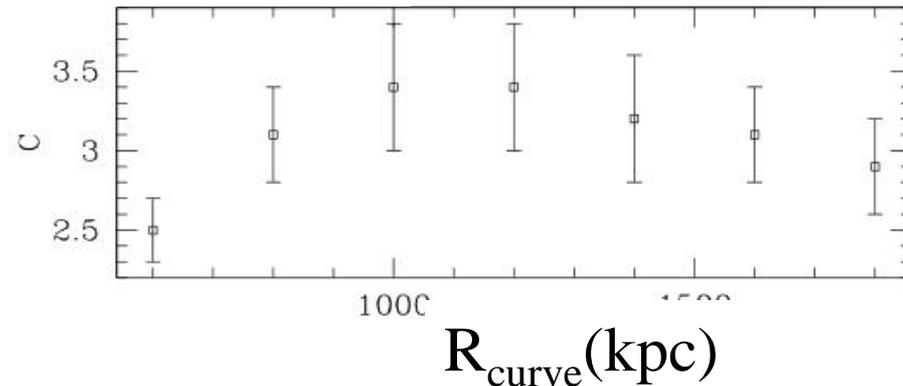


Botteon et al 2016

Le choc dans l'amas El Gordo



Compression



Un des rares chocs fort $\mathcal{M} \geq 3$ avec le Boulet (Markevitch+02, A665; Dasadia+16). Pour ces chocs forts, on pourrait aussi accélérer les électrons thermiques

L'amas du Boulet

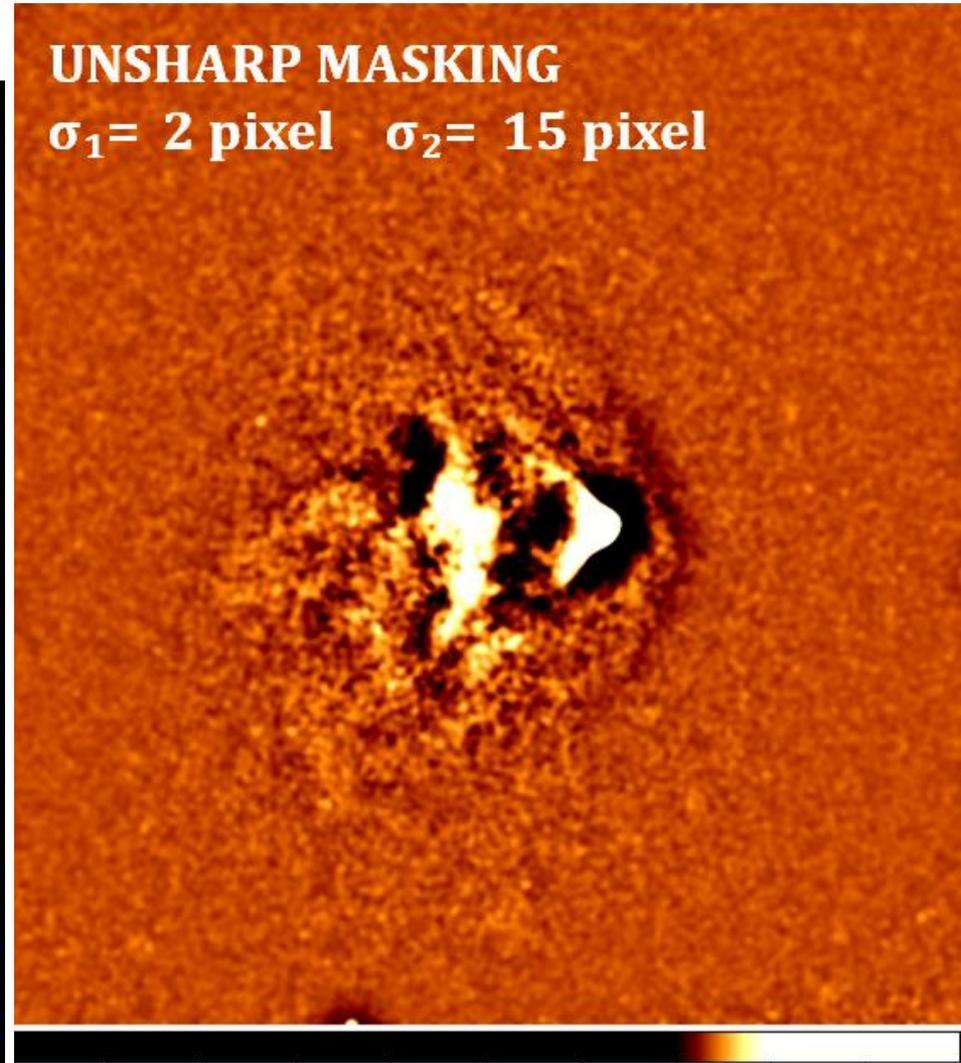
1E 0657-56

X-ray Chandra

500 kpc

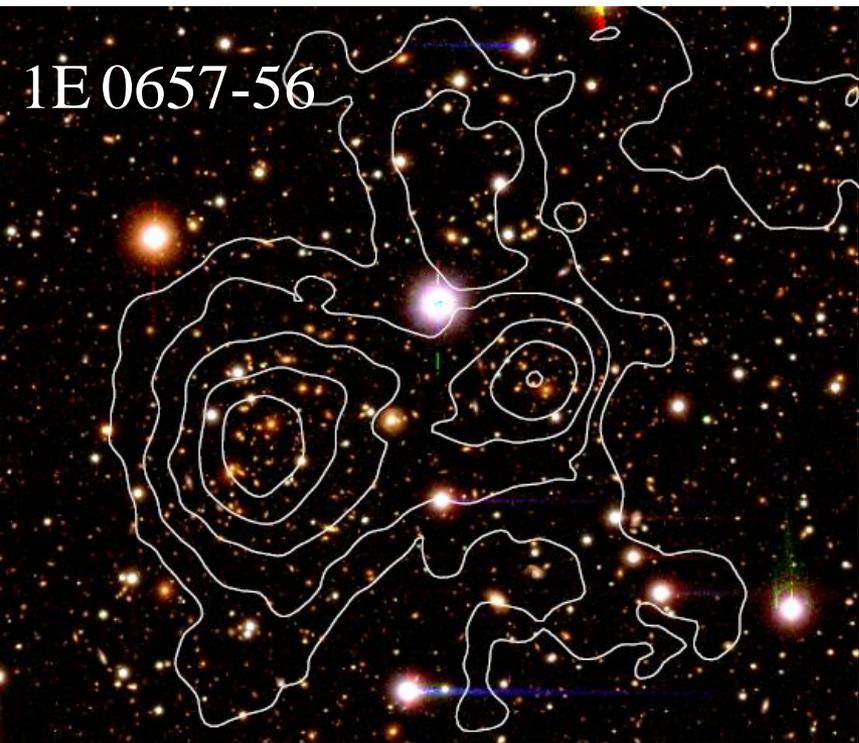
UNSHARP MASKING

$\sigma_1 = 2$ pixel $\sigma_2 = 15$ pixel

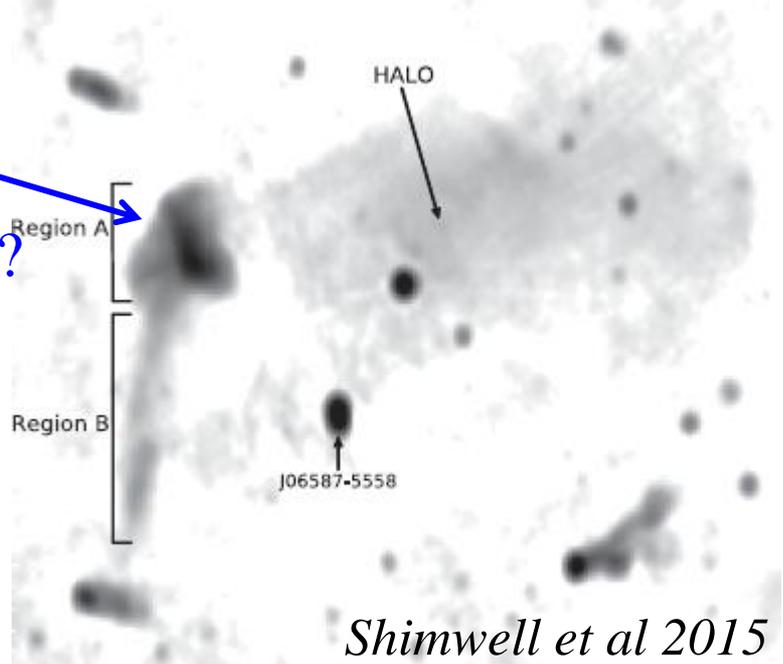


Galaxies + matière noire (lentilles)

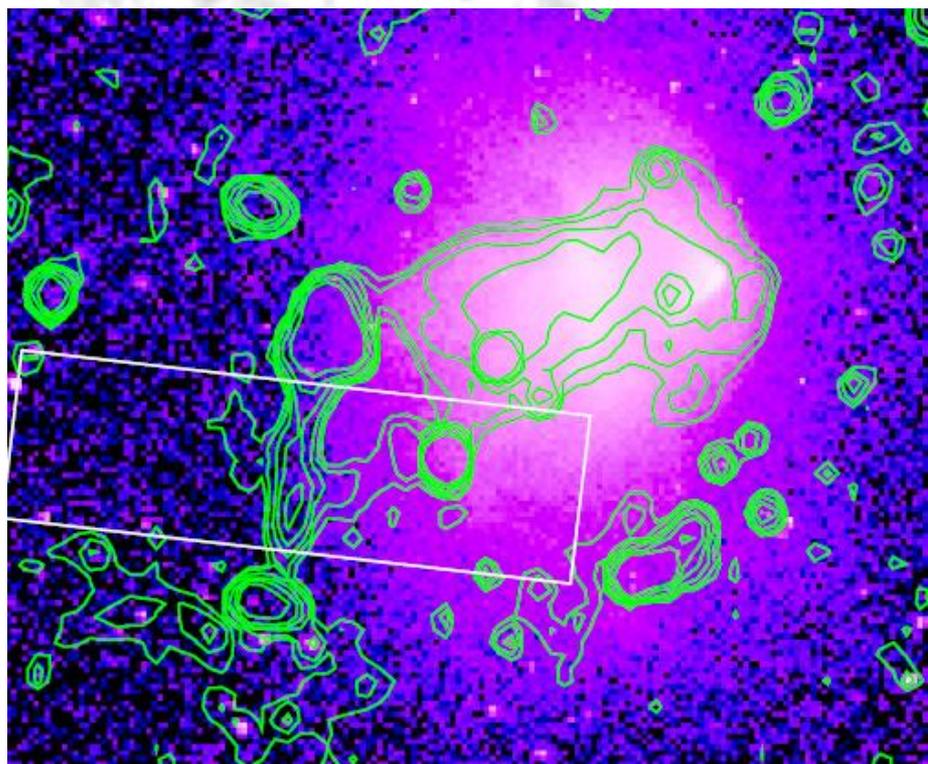
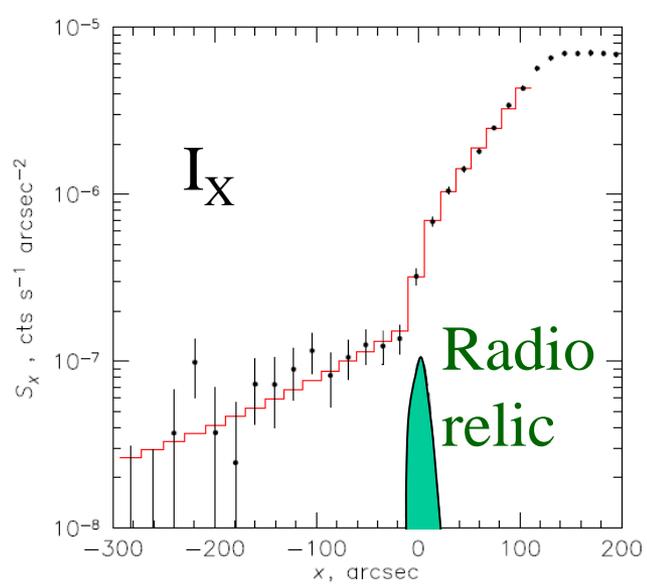
1E 0657-56



AGN
ancien?



Shimwell et al 2015



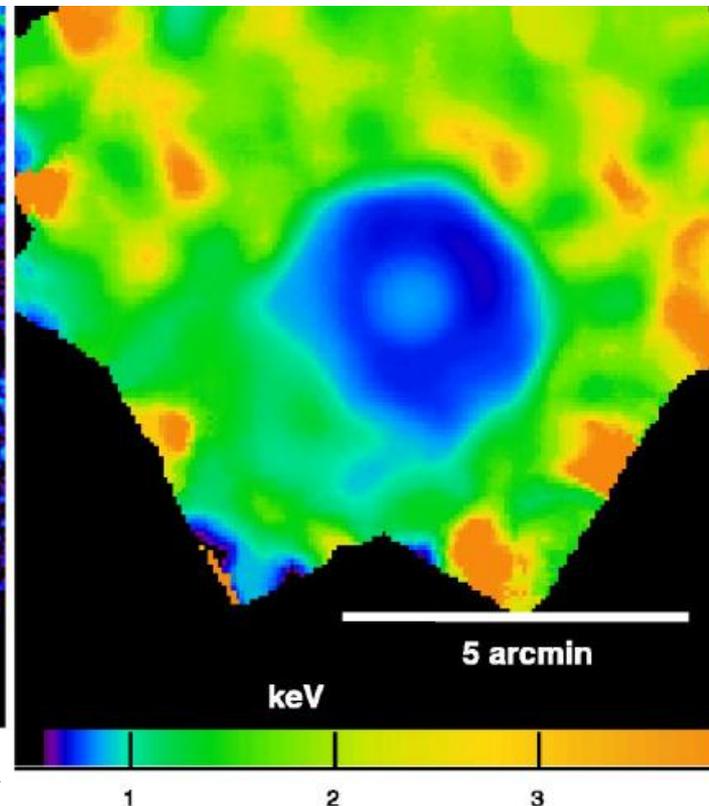
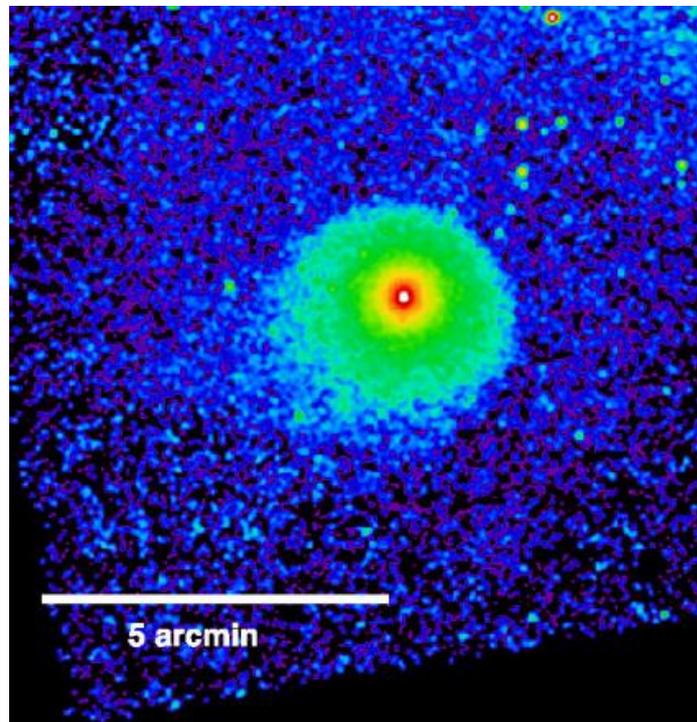
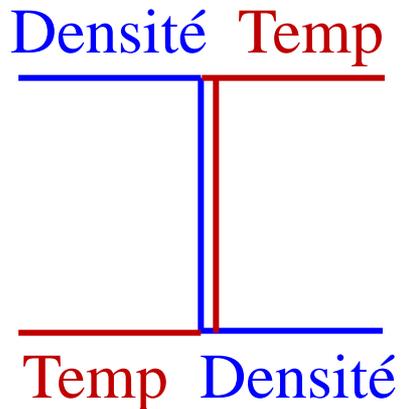
Les fronts froids

Différence entre chocs et fronts froids

→ dans le choc, il y a discontinuité de pression et d'entropie

→ dans un front froid uniquement densité et température

Densité monte quand température baisse → même pression



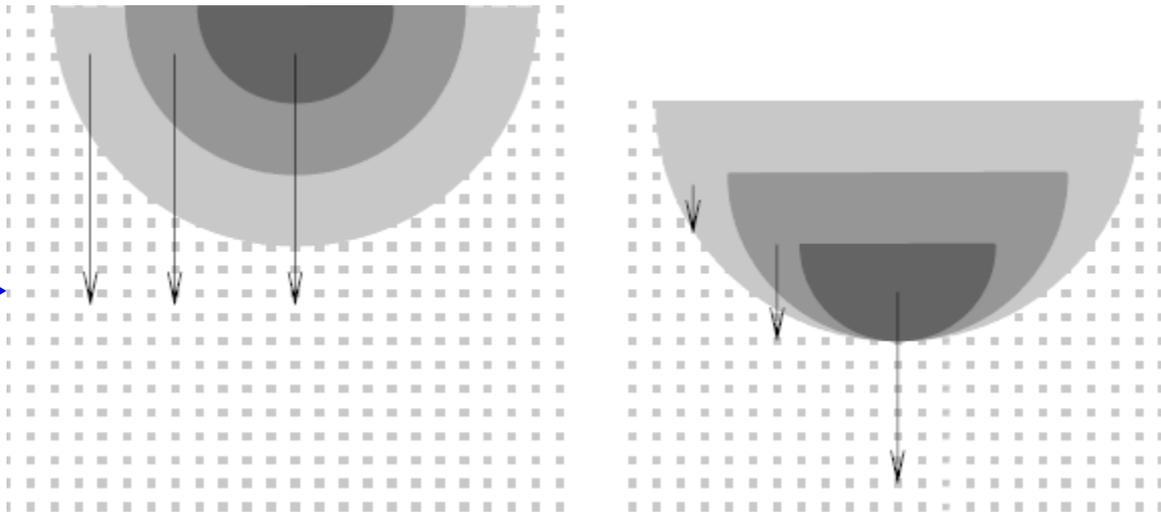
→ Discontinuité de contact: pas de transport

Conditions de formation

Deux sortes de fronts froids:

→ Ceux qui sont les restes de la collision d'un petit amas/groupe qui est entré dans un plus gros amas, plus chaud

→ ceux qui proviennent du mouvement du gaz dans le potentiel, le flottement ou balancement →



sloshing



Contraintes sur la conduction

Libre parcours moyen (lpm) électrons $\sim 1\text{kpc}$ (taille $R_{\text{vir}} \sim 1000\text{kpc}$)

Rayon de Larmor 0.05npc , et protons 2npc

Lors de choc, il y a équilibre entre protons et électrons

Sur des échelles $\ll 1\text{lpm}$

Oscillation du gaz sur 400kpc

Abell 2029, flot de refroidissement

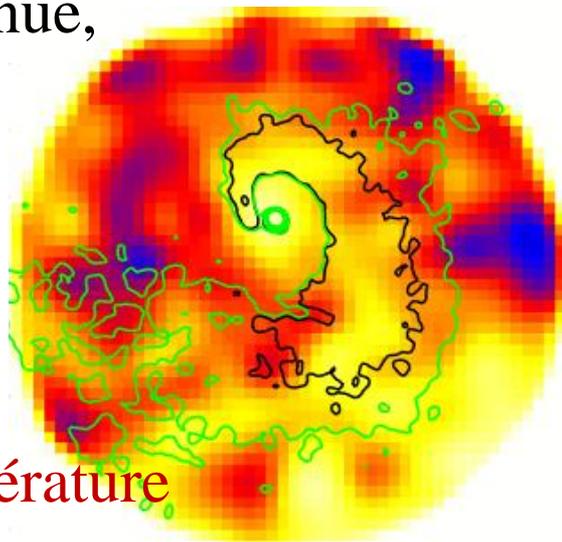
Le mouvement du gaz ralentit

le cooling?

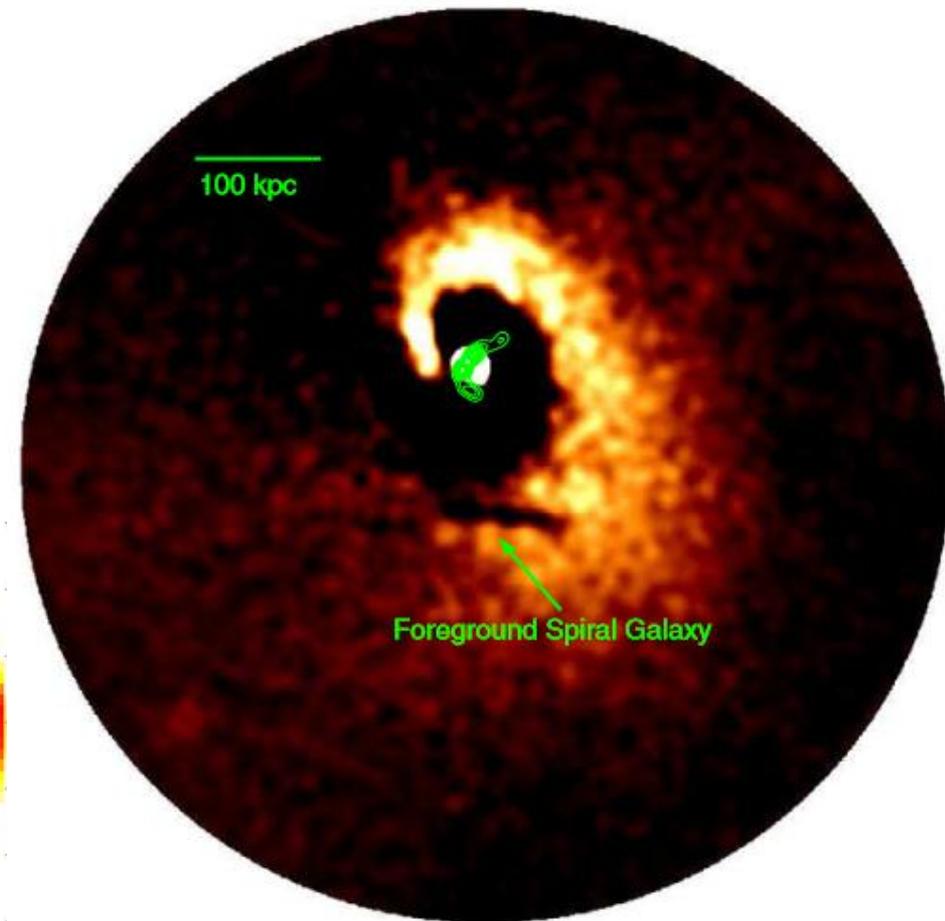
Pression continue,

Déformation

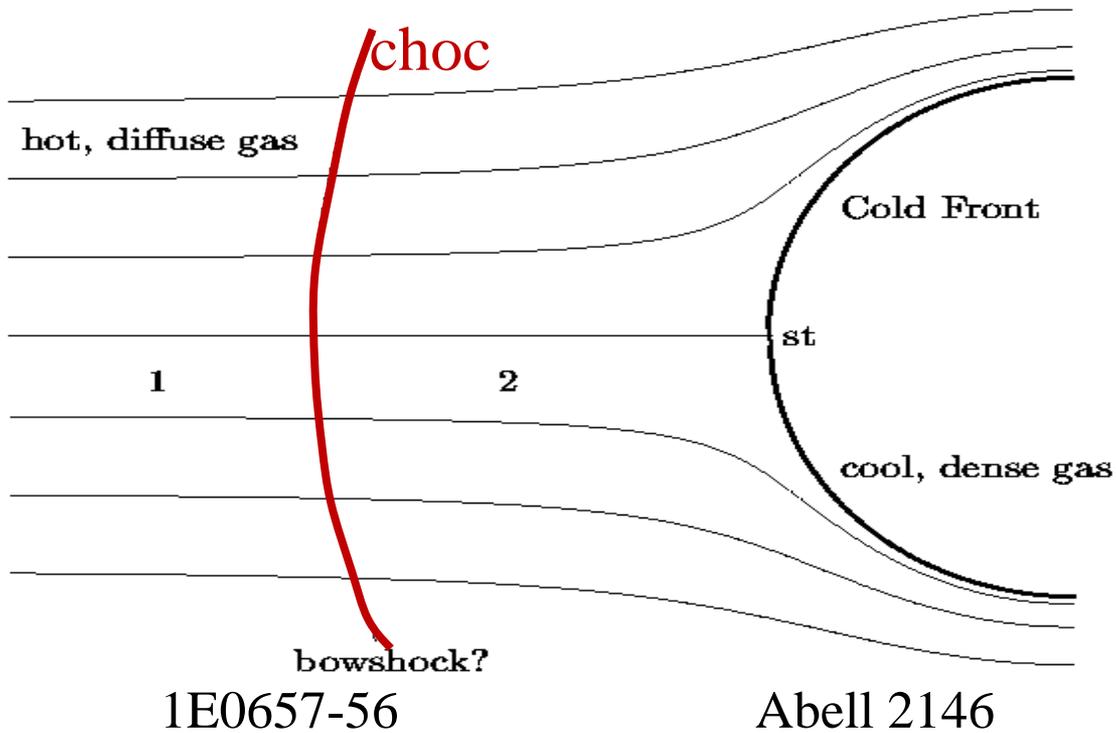
des jet radio



Température

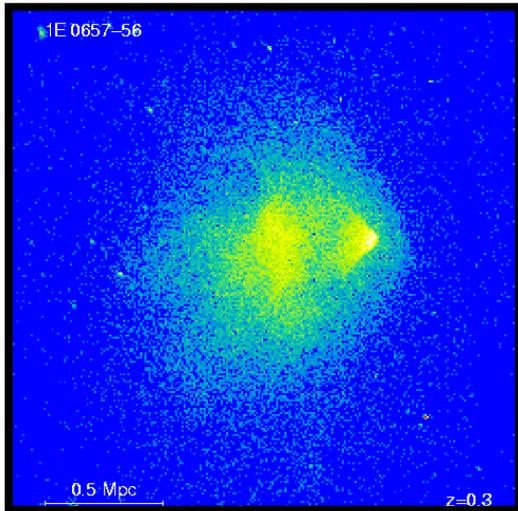


Paterno-Mahler et al 2013

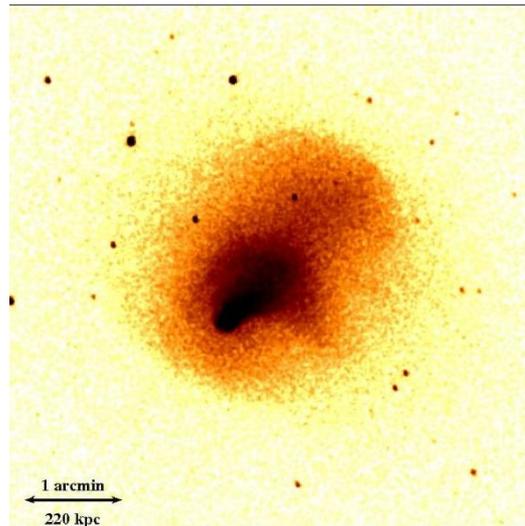


Fusion d'amas: fronts froids

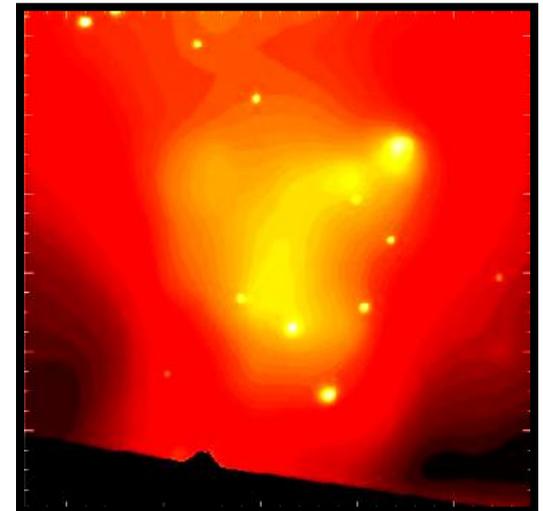
Abell 85 South



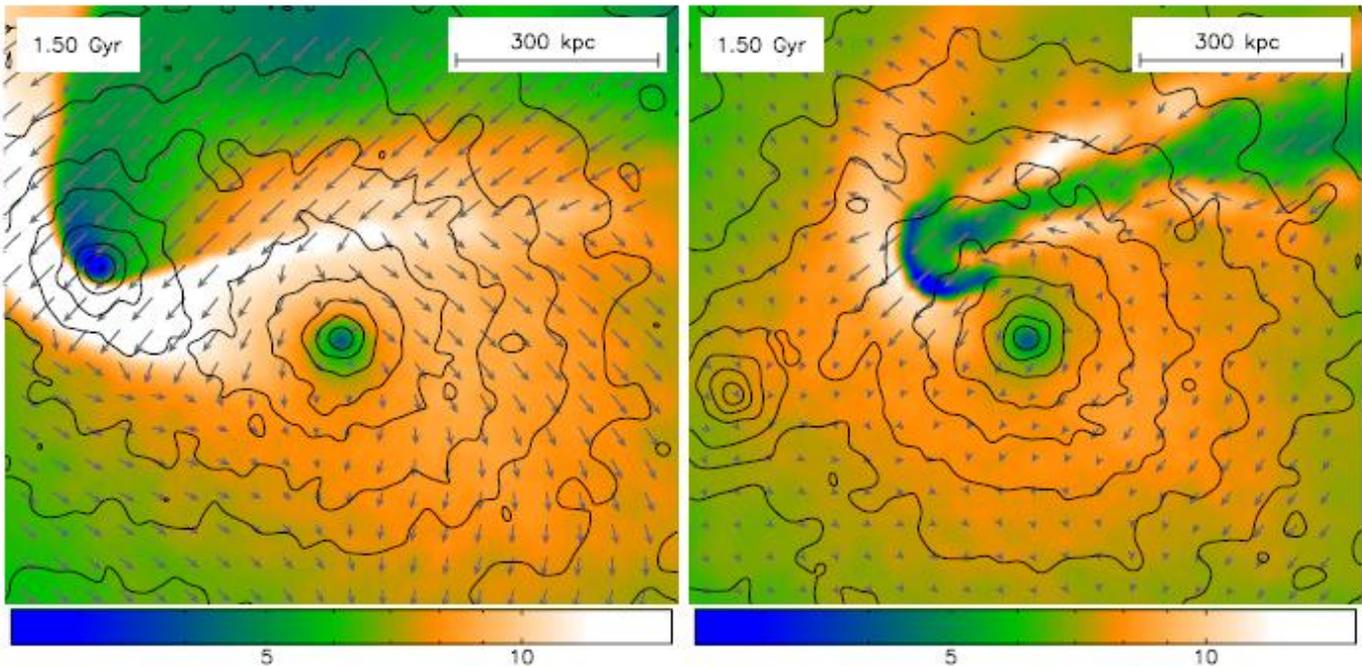
Markevitch et al. 2004



Russell et al. 2010



Kempner et al. 2002



Contours=
 Matière noire
 Couleurs=Temp.
 Flèches= V_{gaz}

→ Front froid
 Précédé d'un choc

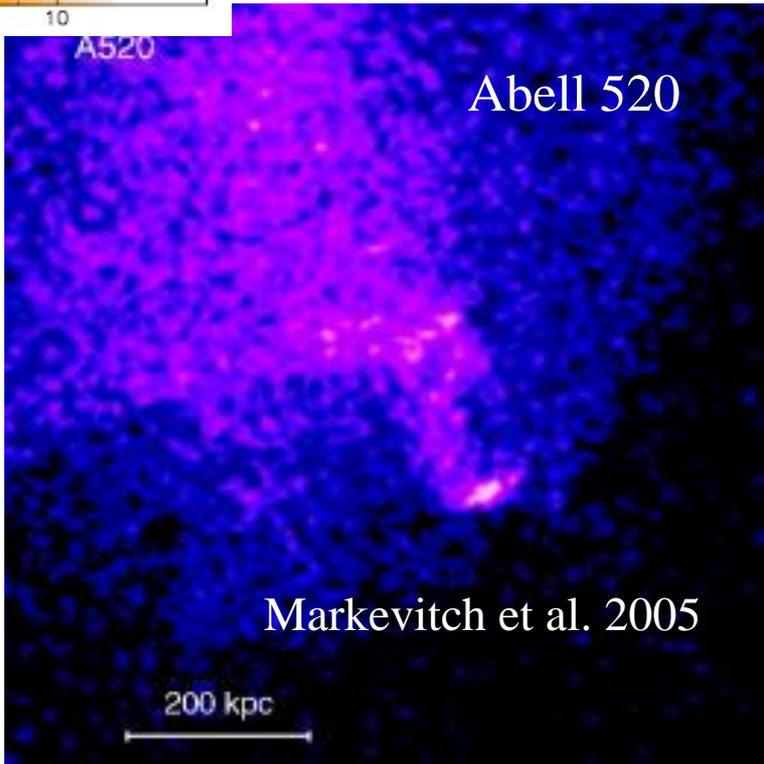
Chocs + fronts froids dans les fusions

Conditions de saut (ρ , T, P)
 de Rankine-Hugoniot

$$P_2/P_1 = 2\gamma/(\gamma+1) \mathcal{M}^2 + (\gamma-1)/(\gamma+1)$$

→ $\mathcal{M} \approx 2$, vitesse du choc ≈ 2000 km/s

Condition de stagnation du front froid

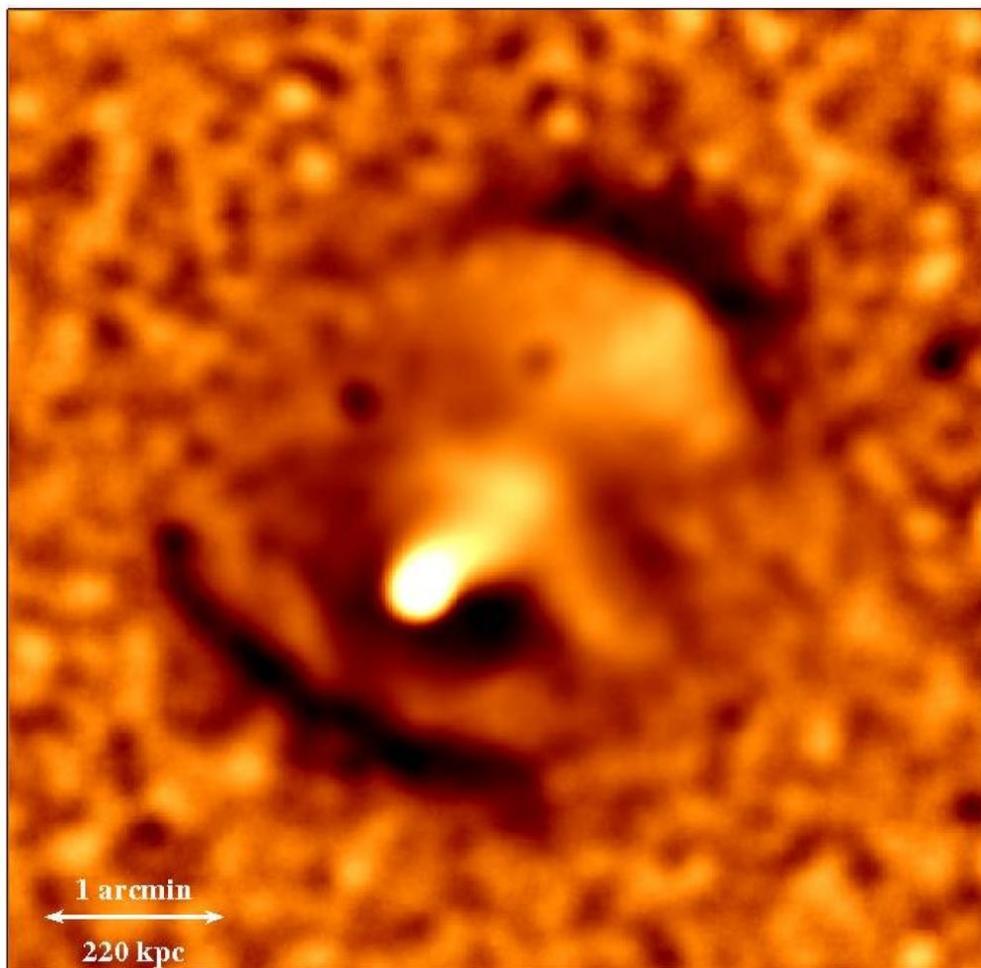


Markevitch et al. 2005

Double choc dans une fusion

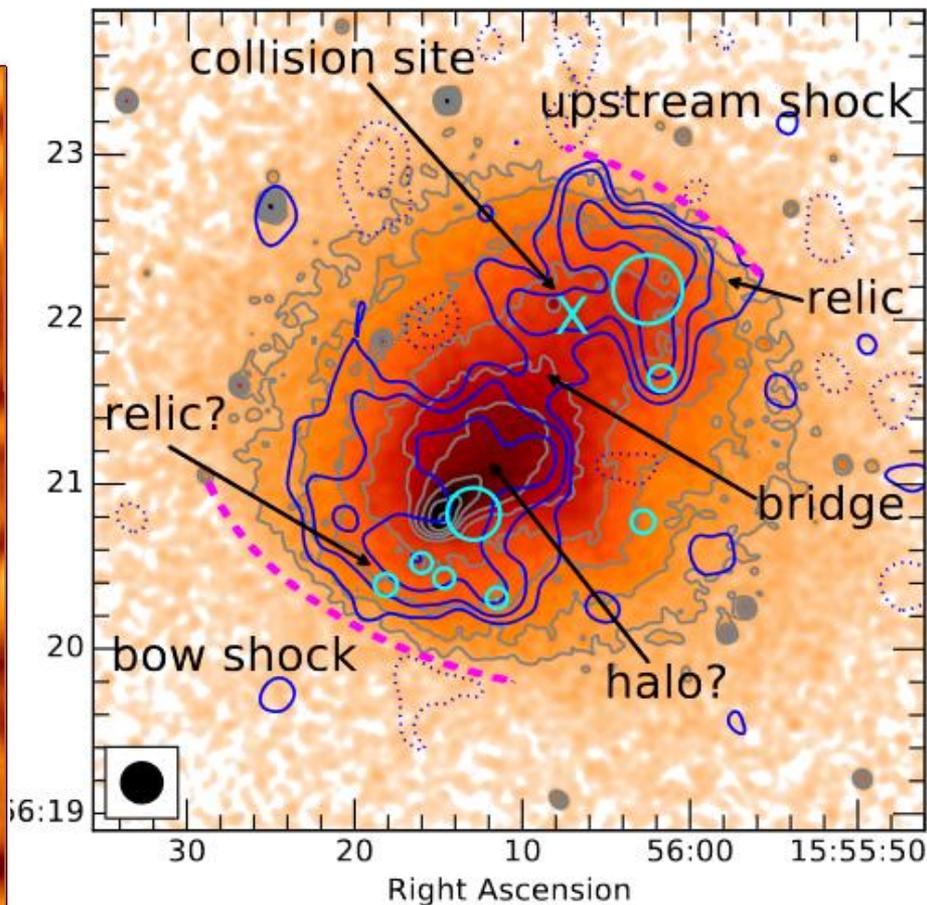
Abell 2146 (unsharp mask)

Russell et al. 2010



$$\frac{dN}{d\gamma} = N_0 \gamma^{-\delta_{inj}} \quad \delta_{inj} = 2 \frac{\mathcal{M}^2 + 1}{\mathcal{M}^2 - 1}$$

$$\alpha = (\delta_{inj} - 1) / 2 \quad \text{Mach} = 1.6 \quad \delta_{inj} = 4.5$$

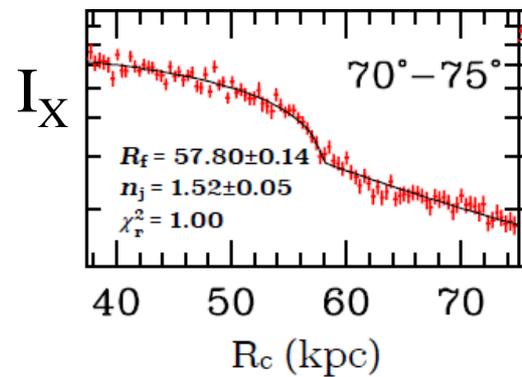
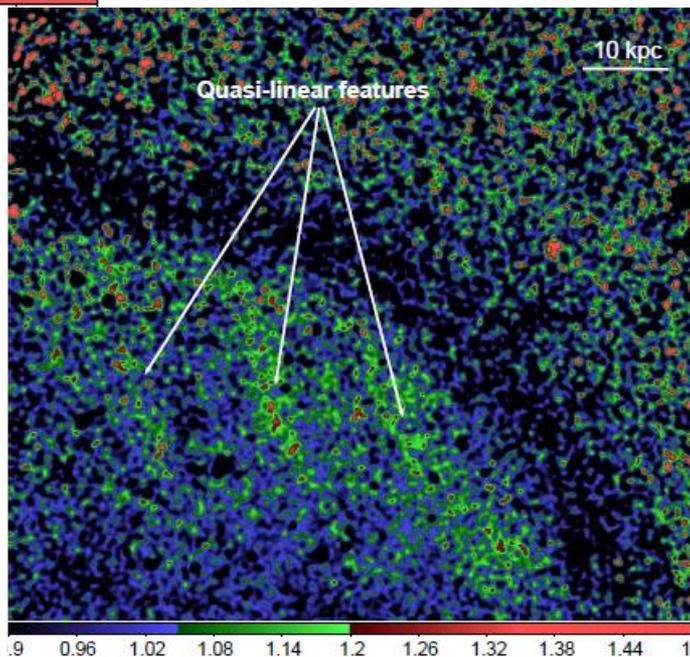
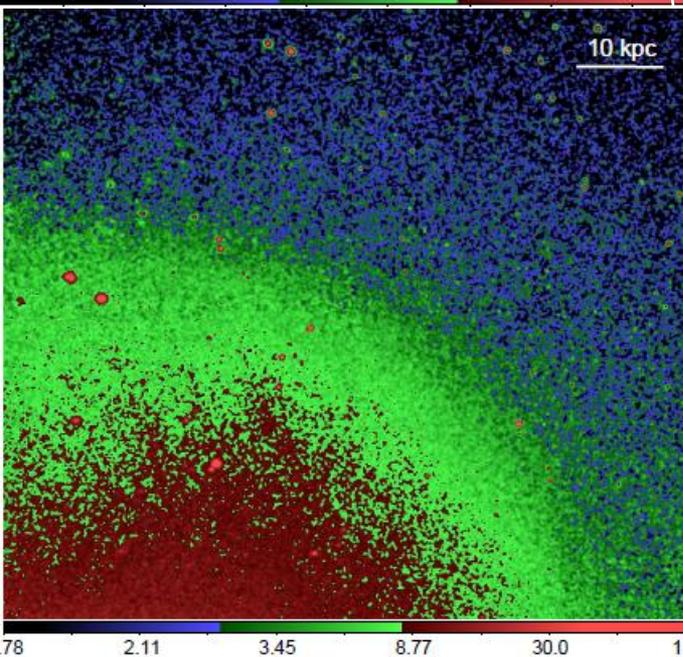
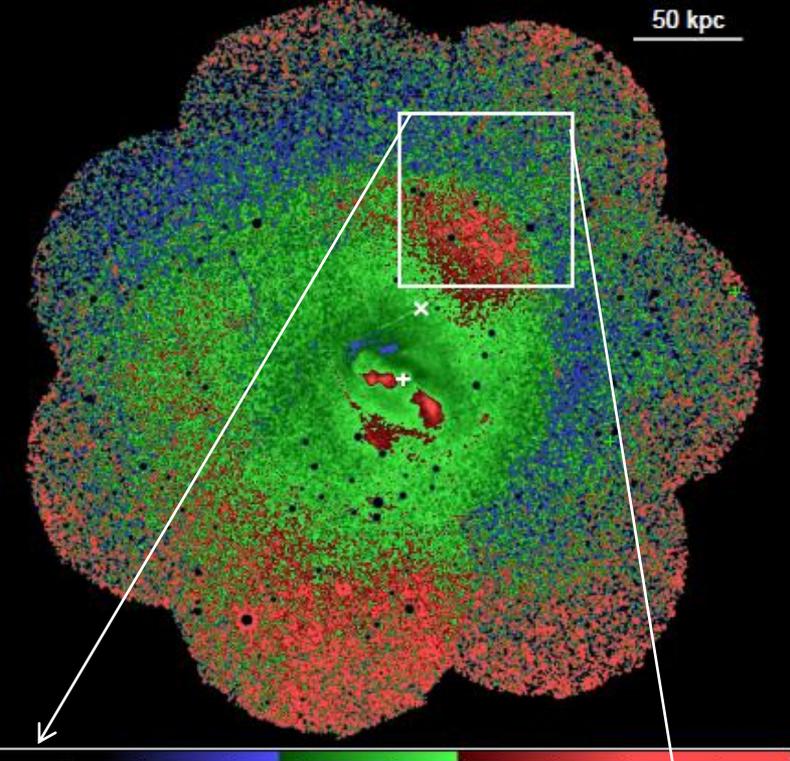


Hoang et al 2018

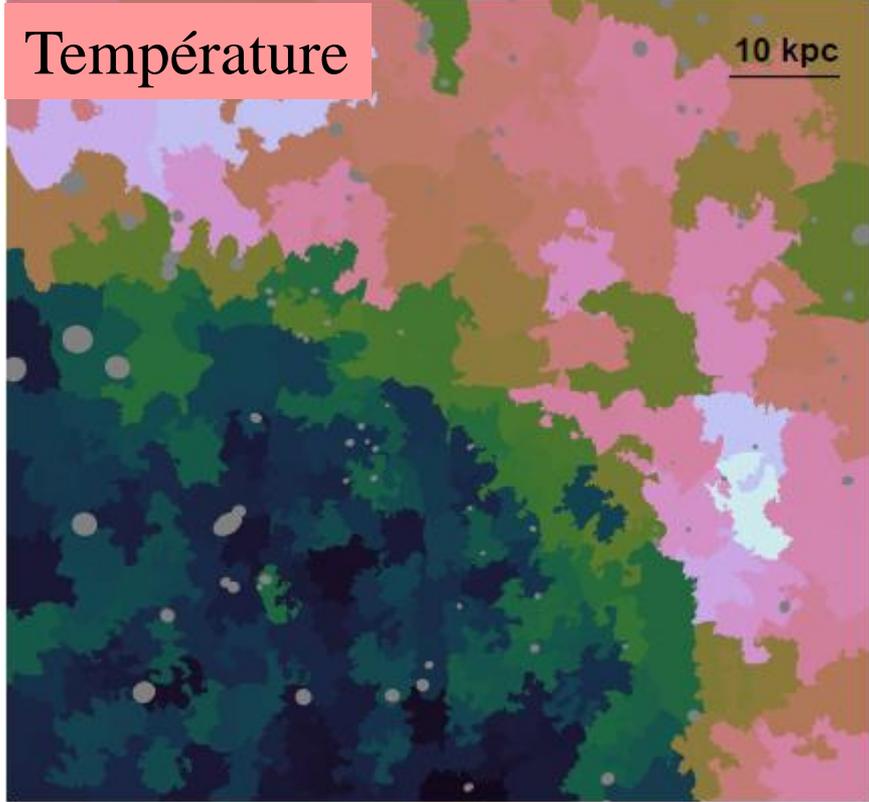
Front froid dans Virgo

Le plus proche front froid (sloshing)
→ Résolution spatiale

Les gradients de température, ou
d'abondance, se passe sur 2-5 kpc
→ Diffusion, conduction supprimées

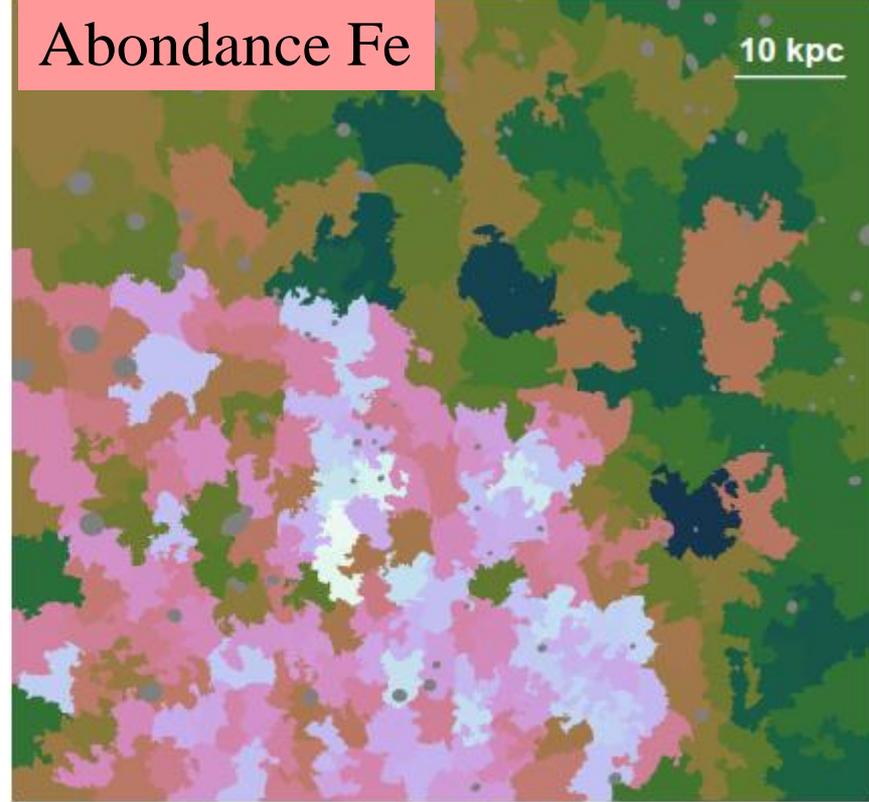


Température



2.4 2.6 2.8 2.9 3.1 3.3 3.4 3.6 3.8 3.9 4.1

Abondance Fe



0.15 0.24 0.34 0.44 0.53 0.63 0.72 0.81 0.91 1 1



avec 10%
viscosité
de Spitzer

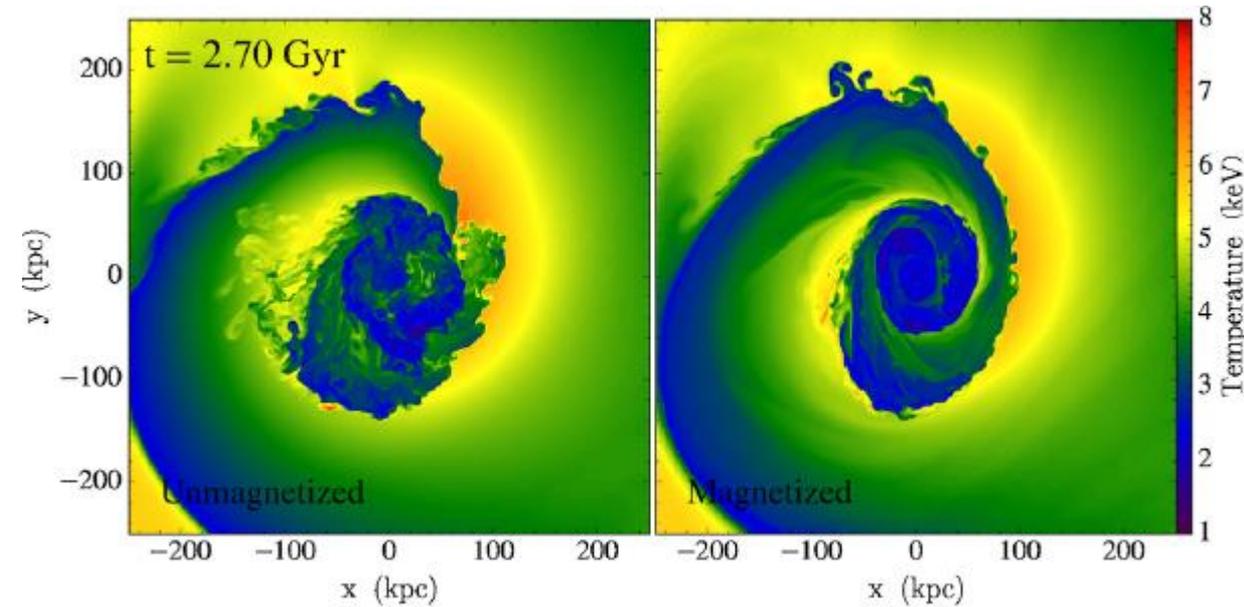
Simulations sans B
ni viscosité



avec B

Werner et al 2016

Processus de transport – Conduction

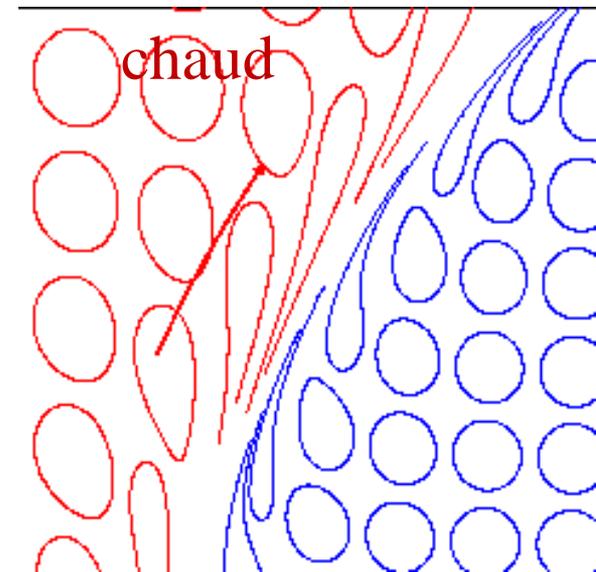


$$P_B < 10\% P_{\text{thermique}}$$

(Zuhone 2016)

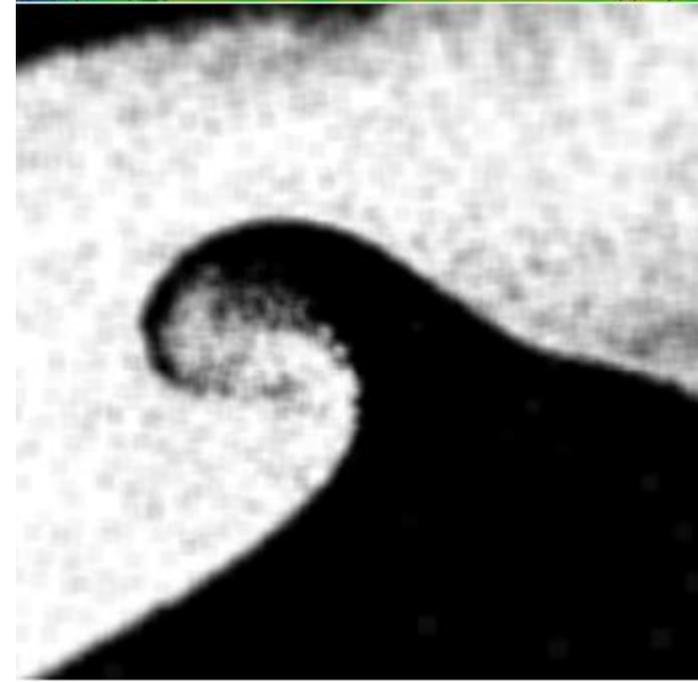
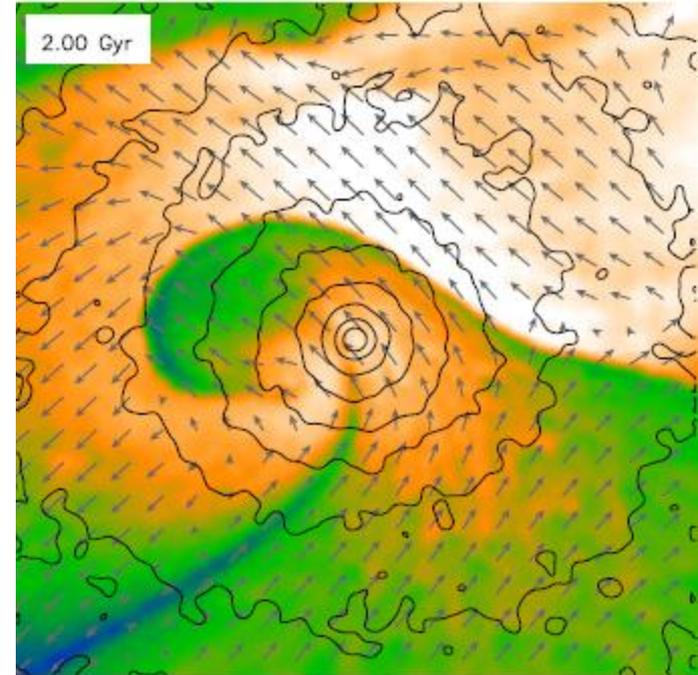
B=10 μ G plus
fort près du front

- La température $\times 5$ en $\lesssim 5$ kpc (libre parcours moyen)
 - La conduction thermique divisée par ~ 100
 - Les instabilités Kelvin-Helmholtz supprimées
- Champ magnétique transverse



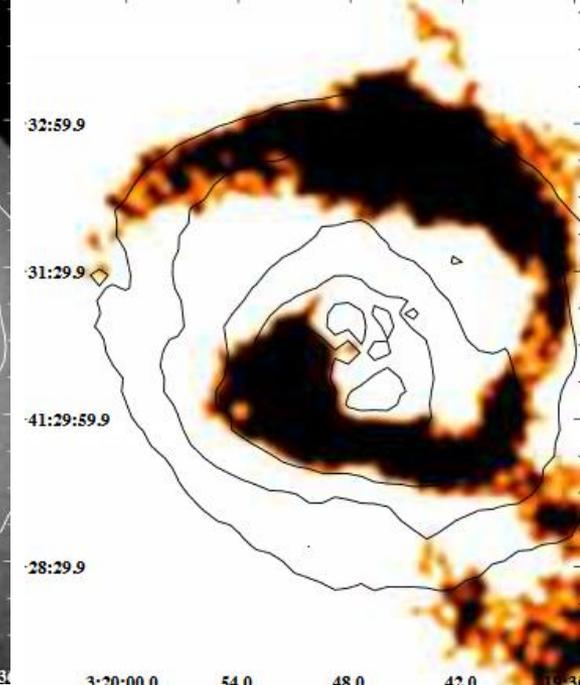
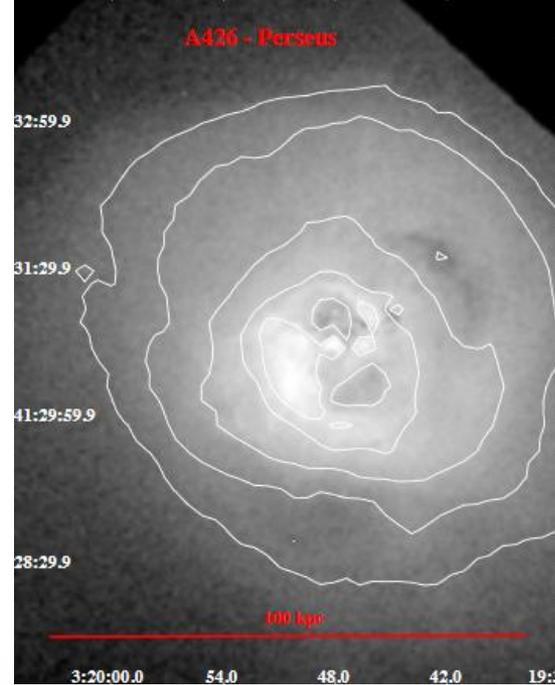
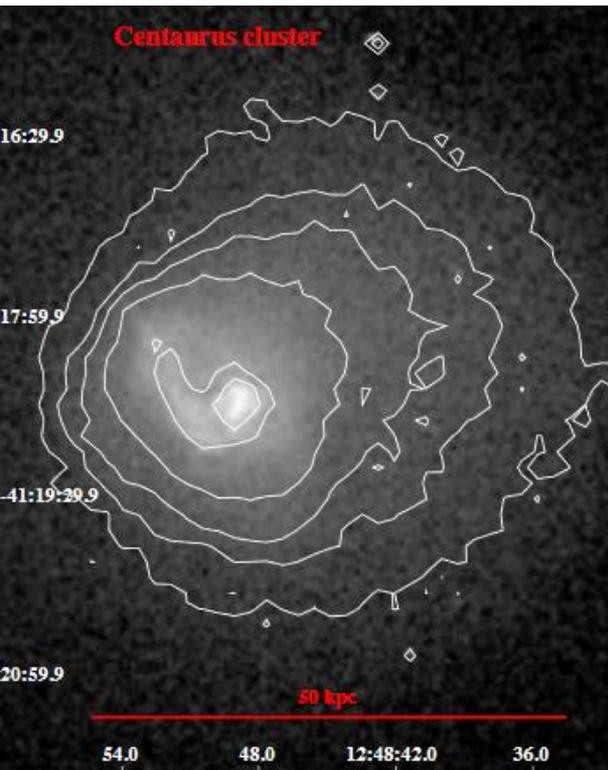
Les fronts froids de “flottement” (sloshing)

- Les fronts froids sont souvent observés dans les **amas à flots de refroidissement**
- Cinématique: nombres de Mach plus faibles
- Le gas se balance dans le potentiel soit à cause du passage d'un sous-amas, soit la galaxie centrale BCG oscille au centre du potentiel
- Discontinuité de contact, lorsque le coeur froid entre dans le gaz plus chaud de l'enveloppe
- Souvent prend la forme d'une spirale à un bras

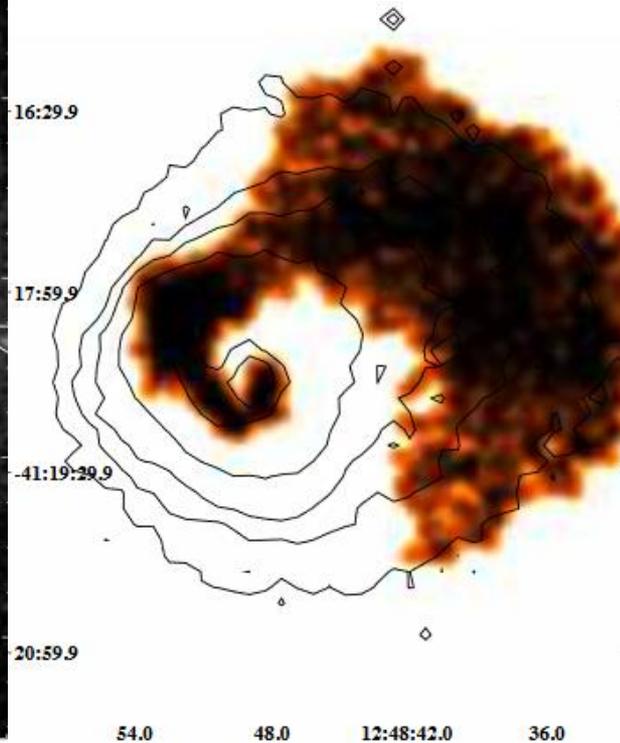


Structure spirale des fronts froids

Amas du Centaure



Amas de Persée



Lagana et al 2010

Conclusions: physique des collisions

Les **reliques d'émission radio** sont liées à des chocs, lors des fusions d'amas: les électrons non-thermiques sont ré-accélérés

Les **radio halos** sont des ré-accélérations dues à la turbulence de la fusion

Les **chocs et les fronts froids** sont des outils précieux pour mesurer le champ magnétique, et la physique: conduction, instabilités, etc.

Emission synchrotron et Inverse Compton: en parallèle pour pomper l'énergie des photons

