



Astrophysique

20 – Les amas (suite)



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

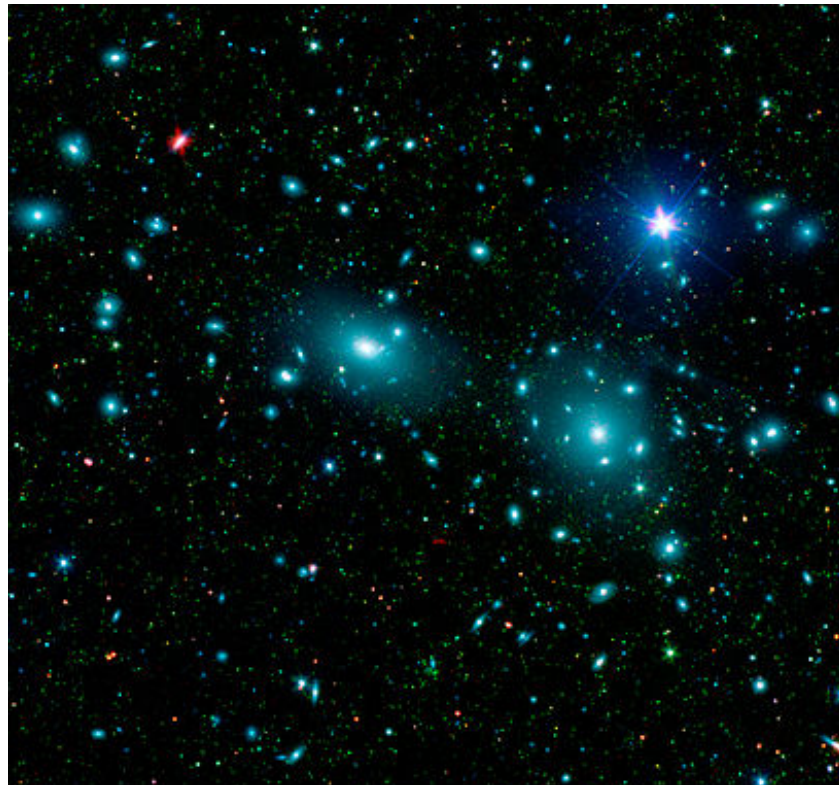
Amas

- Abell 1689 (distance 670 Mpc) → où s'arrête l'amas ?

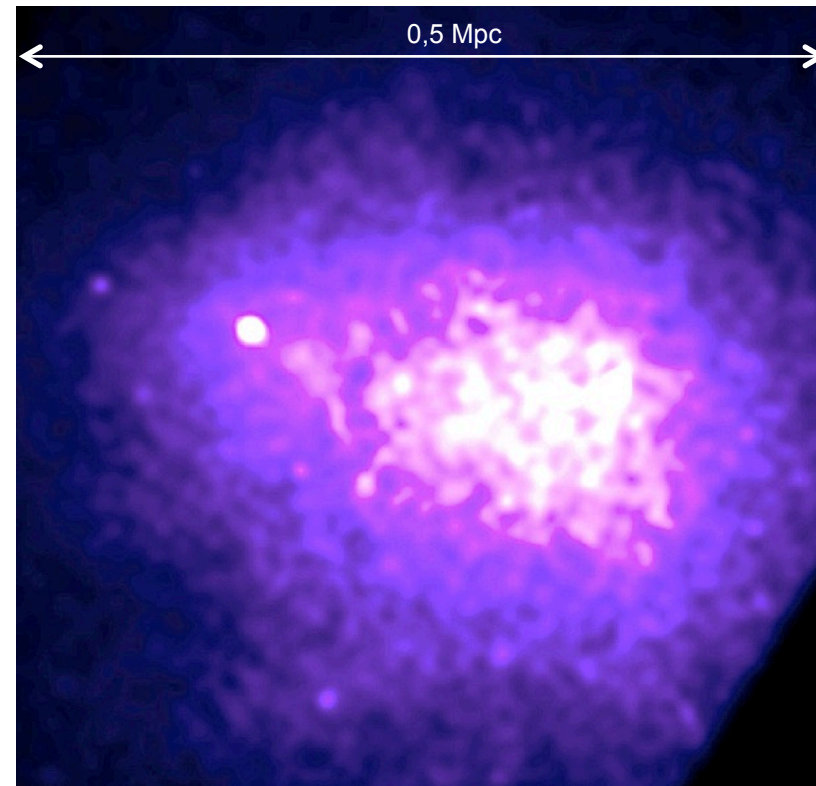


Le même amas en optique et en rayons X

- Amas de Coma

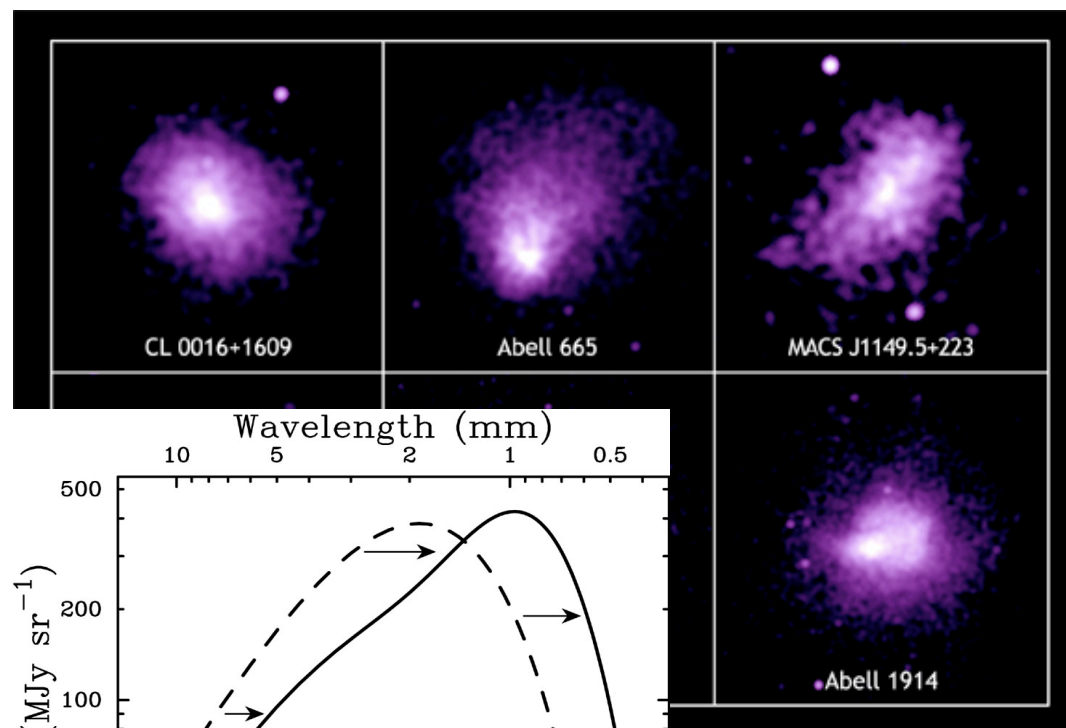


- Gaz chaud **intergalactique** à 10 MK



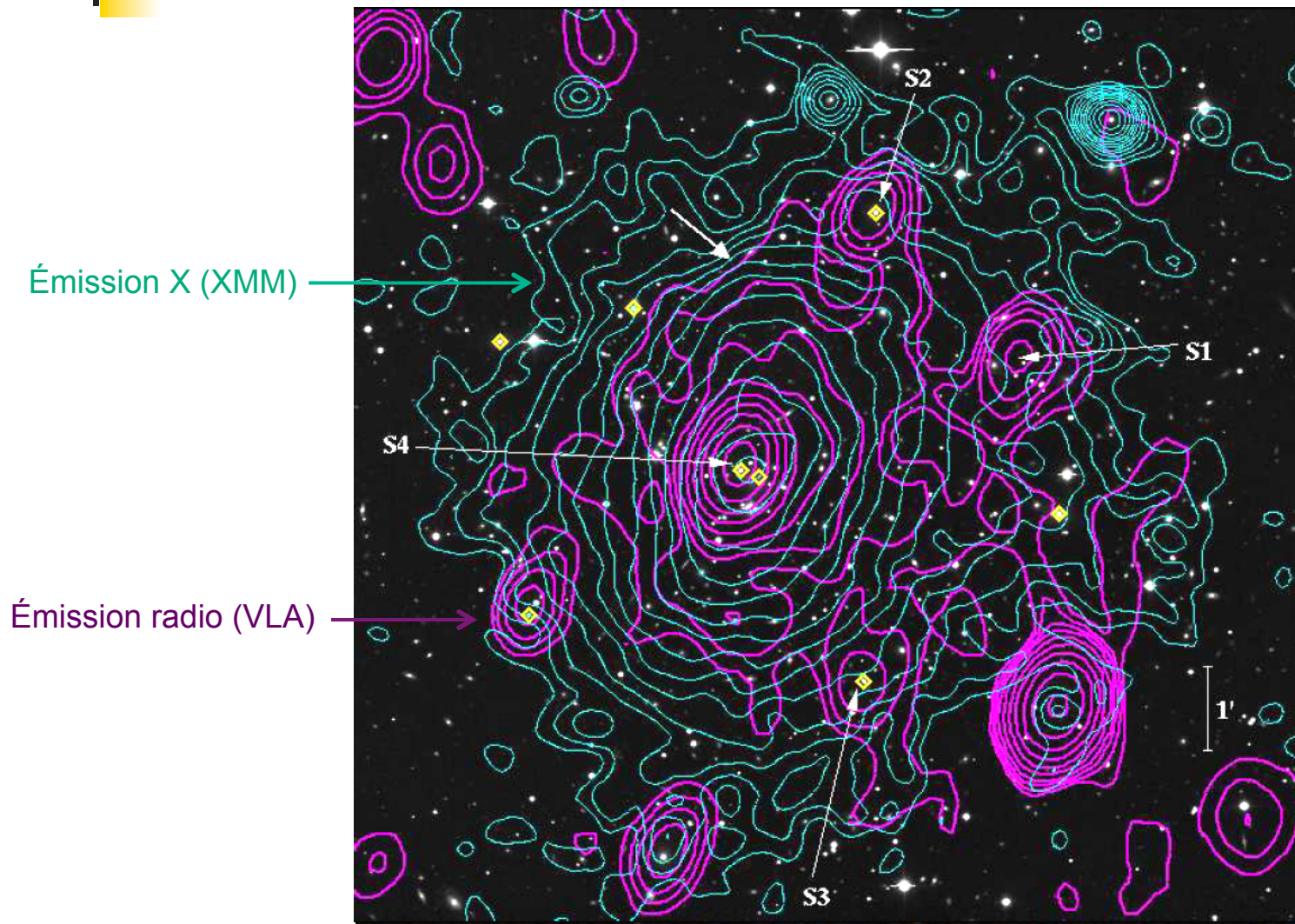
Selon la méthode choisie... le résultat diffère

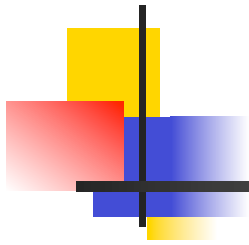
- Optique, infrarouge
 - galaxies \pm isolées
- Rayons X, rayons gamma
 - « nuage » diffus \rightarrow gaz **chaud** intergalactique
- Effet Sunyaev-Zeldovitch
 - interaction des photons du fond millimétrique avec le gaz chaud \rightarrow décalage du spectre de corps noir
- Distorsion de la lumière
 - arcs lumineux, « arclets »
 - distorsion des formes
- Radio
 - halos sans contreparties galactiques
- Forêt Lyman alpha
 - absorption de la lumière de quasars par des nuages **froids** intergalactiques



© Chandra

Amas Abell 545 : des sous-structures



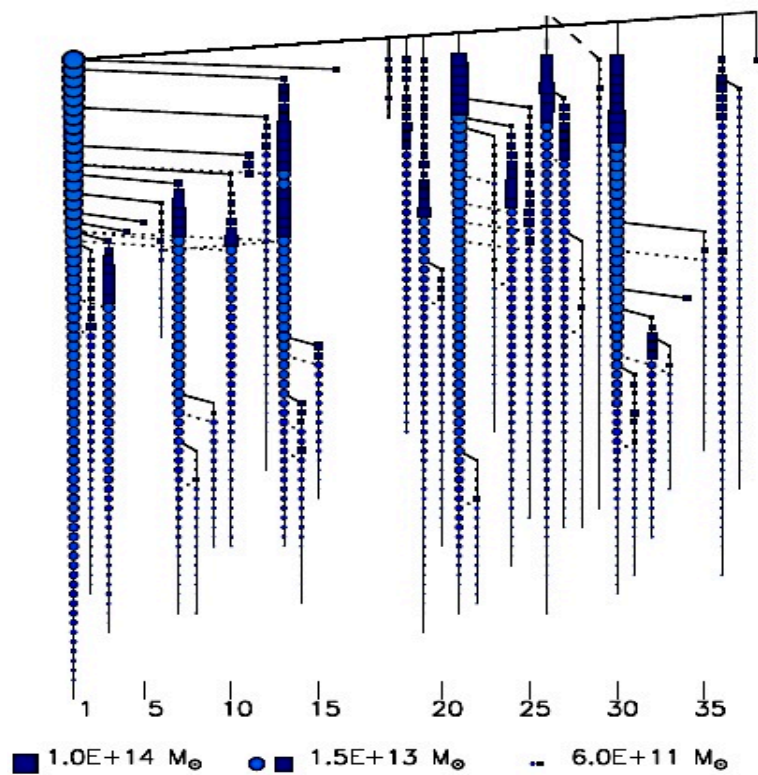


DÉLIMITER UN AMAS

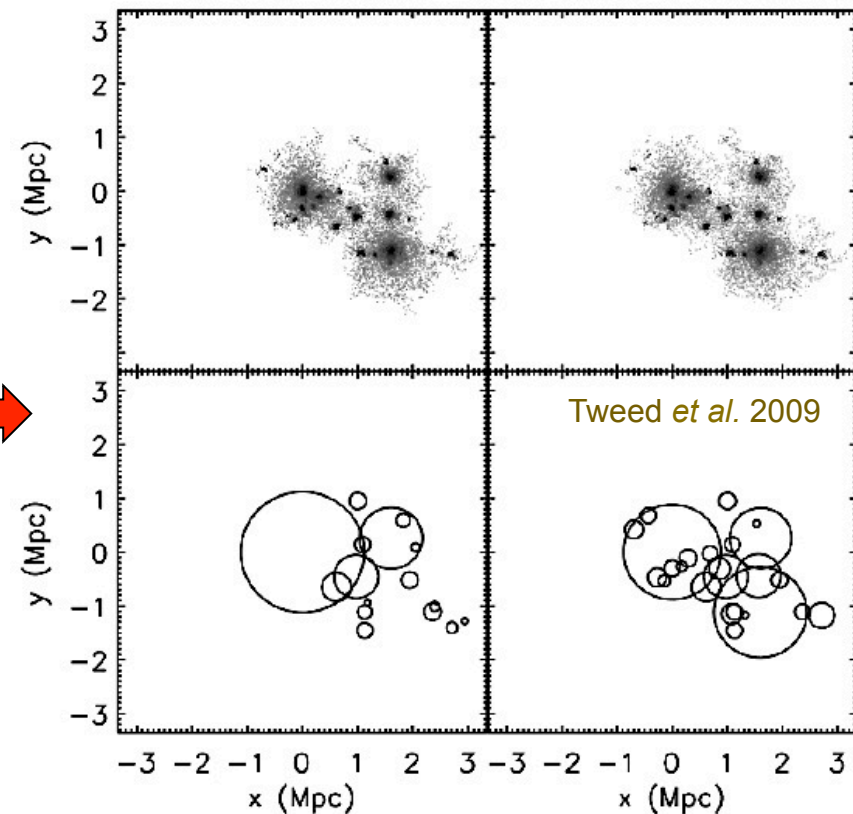
Définitions opératoires

- Groupes → amas → superamas
- Mais où s'arrête un amas?

- → algorithmes de recherche d'amas
 - les amis de mes amis...



16 FOF haloes MSM halo + subhaloes



Quantitativement : la fonction de corrélation $\xi(s)$

- Excès de probabilité de trouver une galaxie à distance s d'une autre

- $\delta P = n [1 + \xi(s)] \delta V$

- Observations

$\Rightarrow \xi(s) \approx (s/s_0)^\gamma$

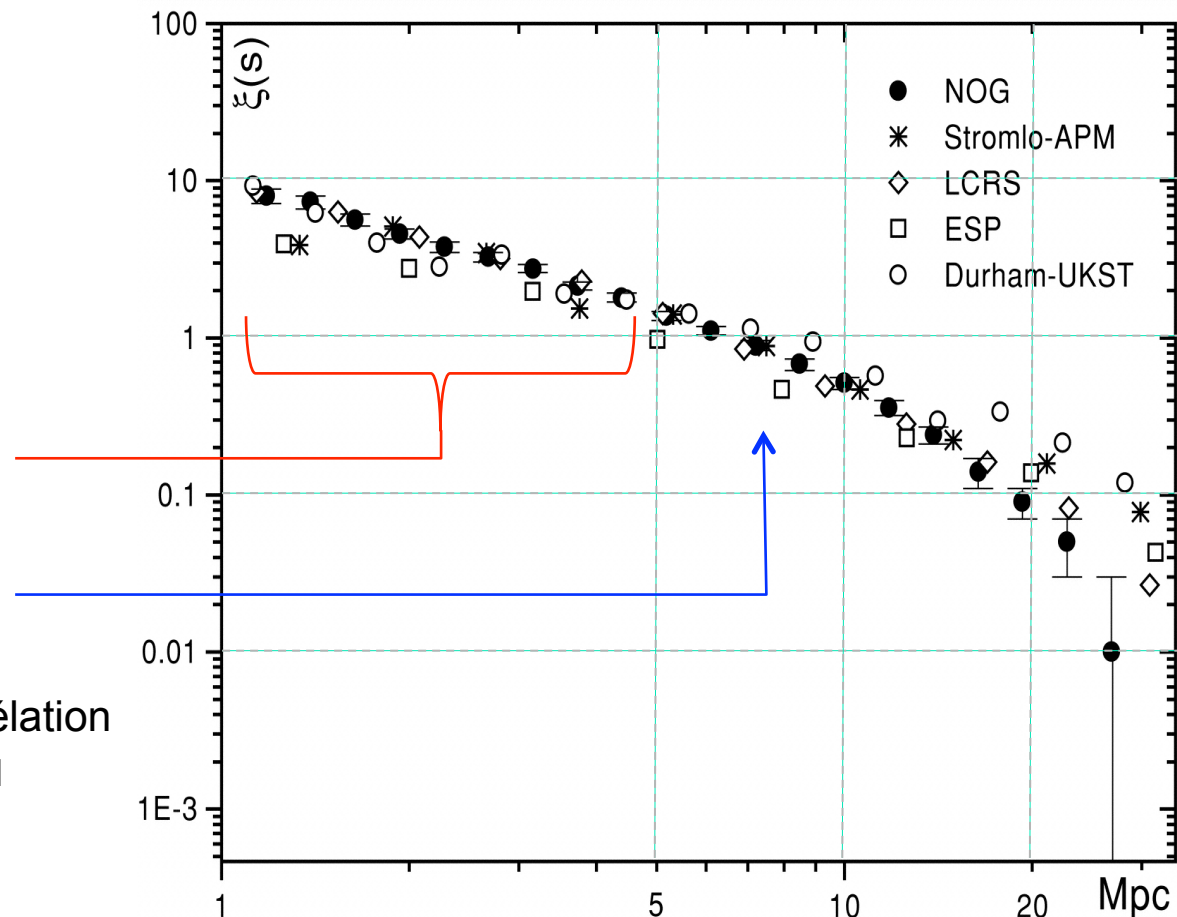
- $s_0 \approx 8$ Mpc
- $\gamma \approx -1,8$

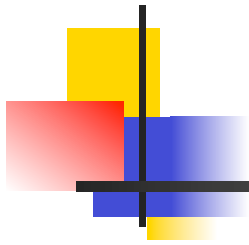
- \Rightarrow existence des amas

- \Rightarrow taille ~ 5 à 10 Mpc

- Autres fonctions de corrélation

- Spirales-spirales, ell-ell
- Amas

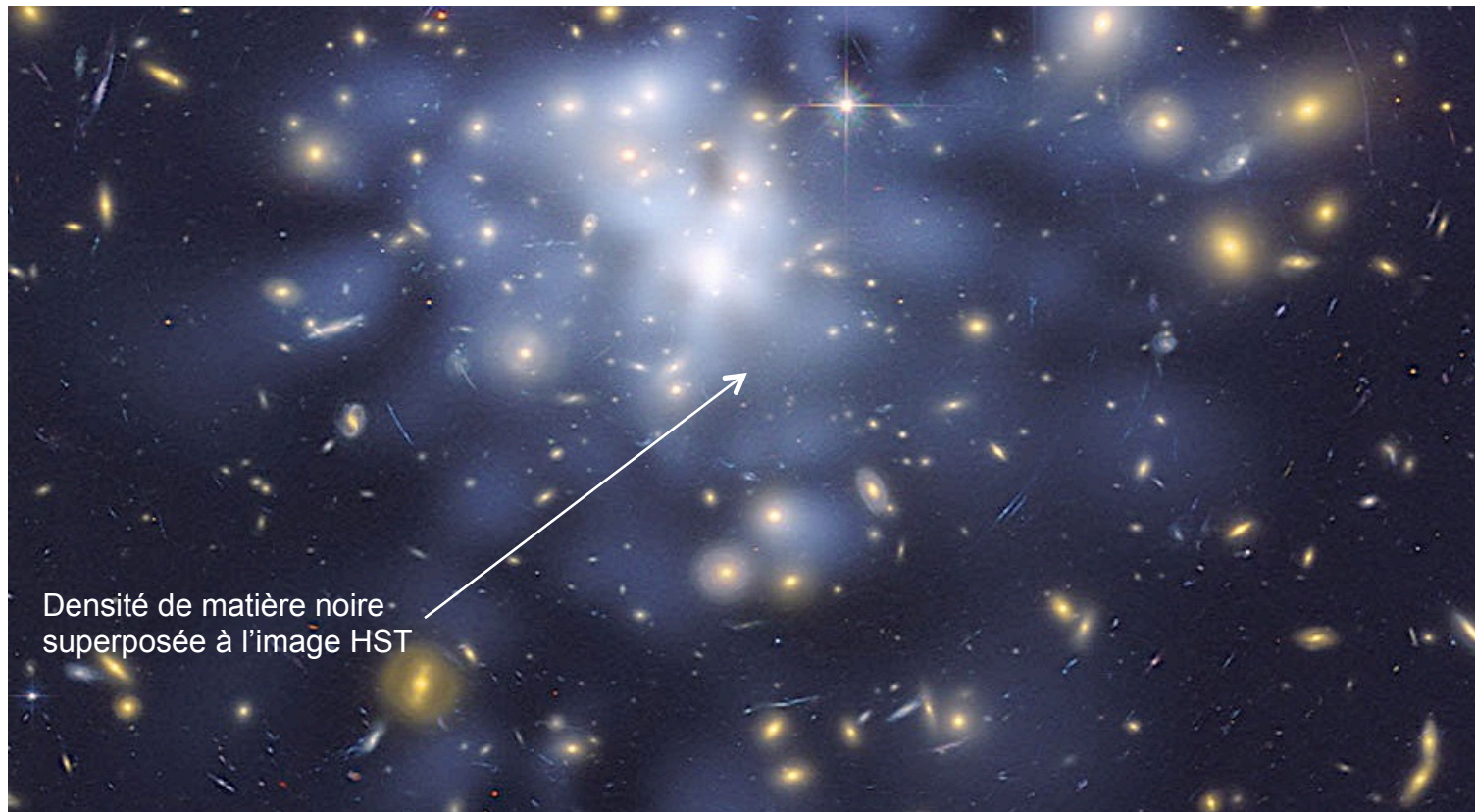




DYNAMIQUE DES AMAS

Amas et matière noire

- Abell 1689 : les galaxies sont loin d'être l'essentiel d'un amas



Un homme très dynamique

- 1933 : Fritz Zwicky mesure les vitesses de 7 galaxies de l'amas de Coma

Energie cinétique \propto Masse x (Vitesse)²

- ainsi que leurs distances mutuelles

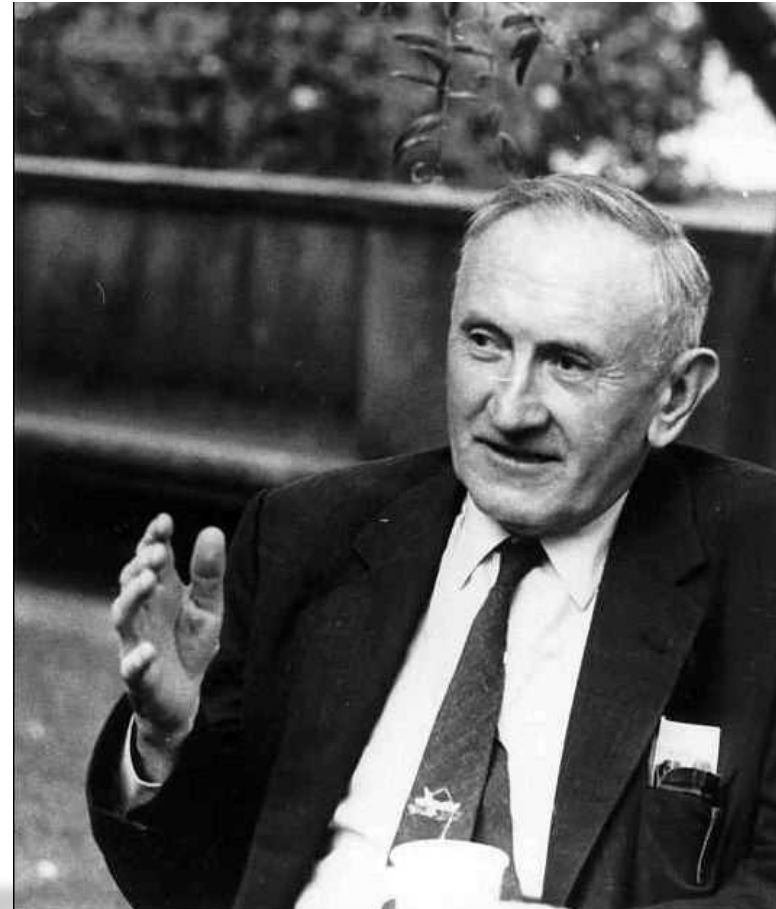
Energie potentielle \propto (Masse)²/Distance

- et il suppose que l'amas est en équilibre dynamique

En. potentielle = - 2 x En. Cinétique

- \Rightarrow Masse \propto Distance x (Vitesse)²

Il trouve ainsi 100 à 500 fois plus de masse que son estimation de la masse totale des galaxies de l'amas



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.

Cinématique des amas de galaxies

- Énergie cinétique $K = \frac{1}{2} \sum m_i V_i^2 = \frac{1}{2} M \langle V^2 \rangle = \frac{1}{2} M 3 \sigma_{\text{radial}}^2$

- Énergie potentielle $U = -G \int \frac{M(r) 4\pi r^2 \rho(r) dr}{r}$

- Densité constante $\rightarrow \rho(r) = 3M/4\pi R^3 \Rightarrow U = -3 GM^2/R$

- Densité décroissant en $1/r^2 \rightarrow \rho(r) = M/4\pi R r^2 \Rightarrow U = -GM^2/R$

$U \approx -GM^2/R$

- Théorème du viriel : $2K + U = 0$

- $\Rightarrow M \approx \sigma_{\text{radial}}^2 R / G$

- Coma

- $\sigma_{\text{radial}} = 1000 \text{ km/s}$

- $R = 3 \text{ Mpc}$

- $\Rightarrow M \approx 3,3 \times 10^{15} M_{\odot}$

- Luminosité $\approx 5 \times 10^{12} M_{\odot} \Rightarrow M/L \approx 600$

- *Population stellaire* $M/L \approx 3 \rightarrow M_{\star} = 1,5 \times 10^{13} M_{\odot}$

- **Caveat**

- Trajectoires plutôt radiales, plutôt circulaires, ni l'un ni l'autre ?

- Estimation de la distance de l'amas \rightarrow estimation des distances dans l'amas

- Effets de projection 3D \rightarrow 2D

- Équilibre dynamique non garanti \rightarrow viriel

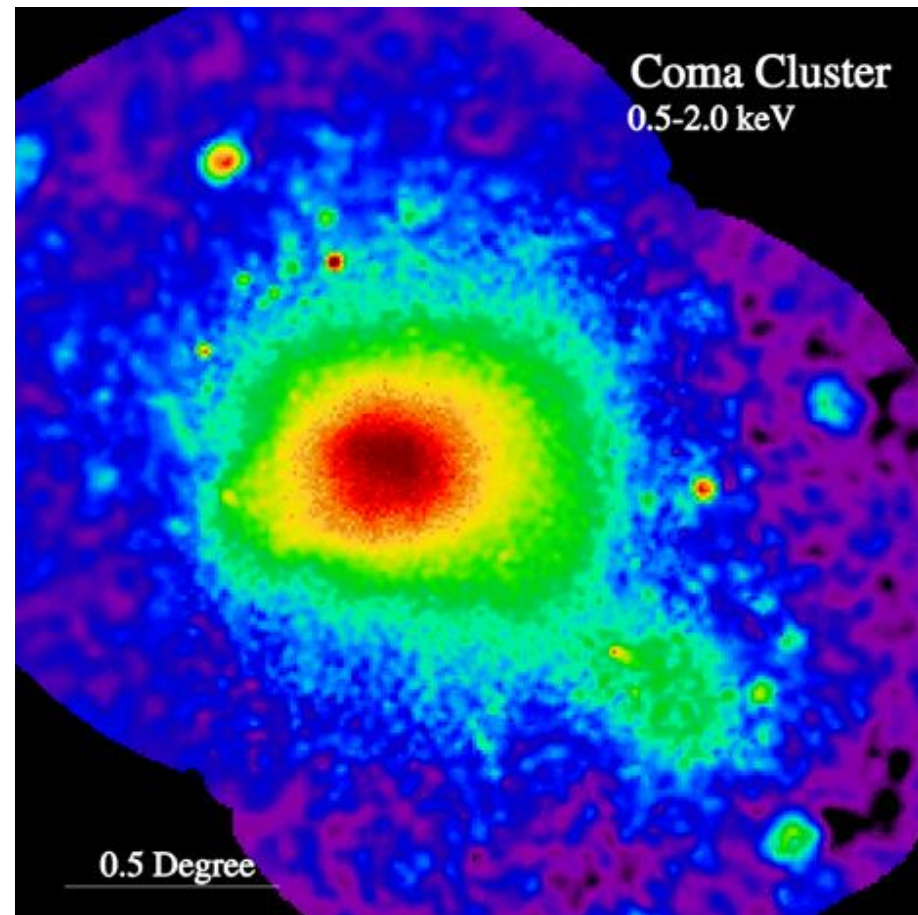
Cinématique des amas de galaxies

- Personne ne le prend au sérieux pendant 40 ans
 - **Zwicky a un caractère épouvantable**
 - la relation entre lumière et masse des étoiles est imprécise
 - la distance des amas est incertaine
- La conclusion majoritaire est que les amas sont des rassemblements éphémères
 - « nurseries » de galaxies imaginées dans la théorie de l'*Etat stationnaire*, alors rivale de celle du *Big bang*
 - de nouvelles mesures des distances réduisent le désaccord à un facteur 20 à 100
- Dans les années 1980, deux indications indépendantes le « réhabilitent » :
 - l'intense émission de rayons X
 - la déviation des rayons lumineux



Amas de galaxies : émission en rayons X

- Les amas émettent beaucoup de rayons X
- Ces rayons viennent d'hydrogène intergalactique **très chaud**
- Il est chaud parce que les atomes sont accélérés par la masse
 - des galaxies
 - et du gaz lui-même
- Mais il est « **trop** » chaud
 - il y a quelque chose d'autre que les galaxies et le gaz
 - quelque chose qui n'émet pas de lumière (ni de radio, ni de X, ...)
 - quelque chose de massif

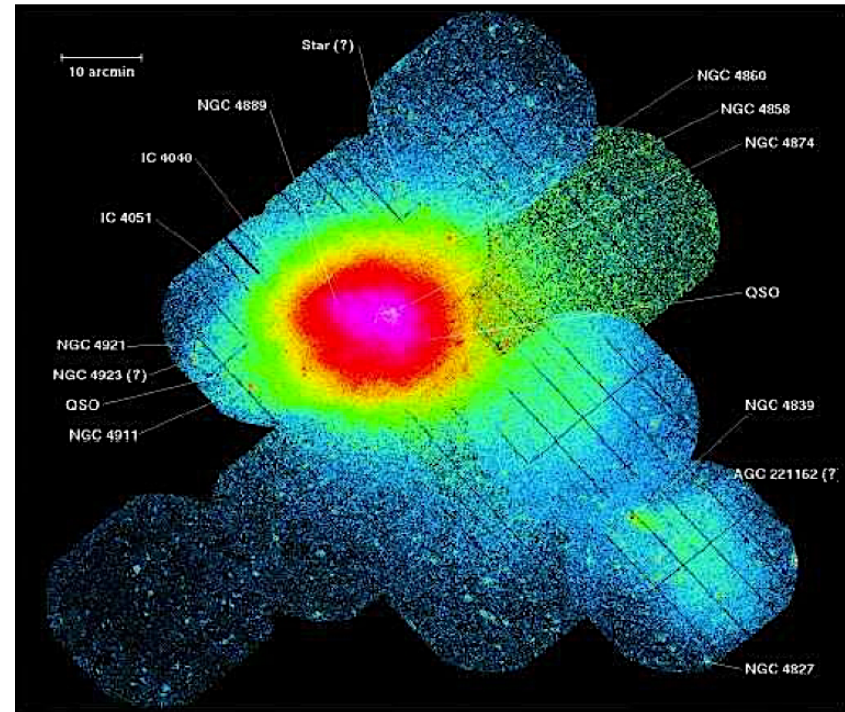


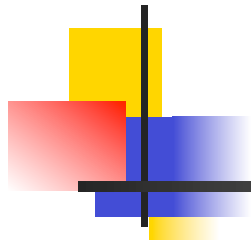
Émission de rayons X

- $T_H = 70 \text{ MK } (\sigma_{\text{radial}} / 1000 \text{ km/s})^2 \Rightarrow$ émission dans le domaine des rayons X
 - le gaz est très chaud mais sa densité est très faible \rightarrow durée de refroidissement $\gg 10^{10}$ ans
 - mécanisme de refroidissement : accélération des électrons (relativement aux ions) lors des collisions entre atomes (*Bremsstrahlung*)

- Luminosité en rayons X : $L_X \propto n_e^2 \sqrt{T_H}$
- Énergie des rayons X $\rightarrow T_H \rightarrow \sigma_{\text{radial}}$
- Luminosité $\rightarrow n_e \rightarrow n_H \rightarrow M_{\text{gaz}}$

- Coma
 - $M_{\text{total}} = 3 \times 10^{15} M_{\odot}$
 - $M_{\text{gaz}} = 3 \times 10^{14} M_{\odot}$
 - à comparer à $M_{\star} = 1,5 \times 10^{13} M_{\odot}$

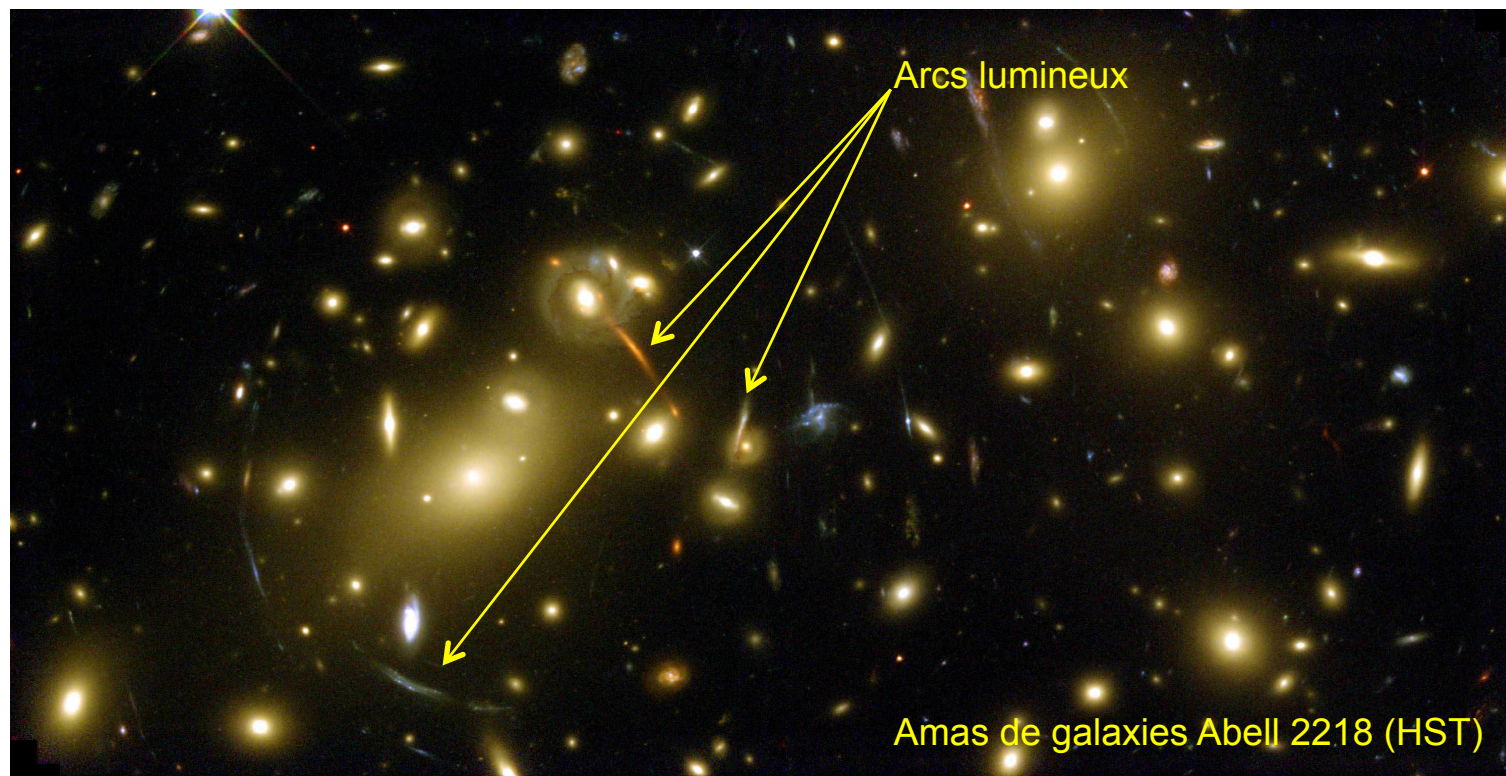




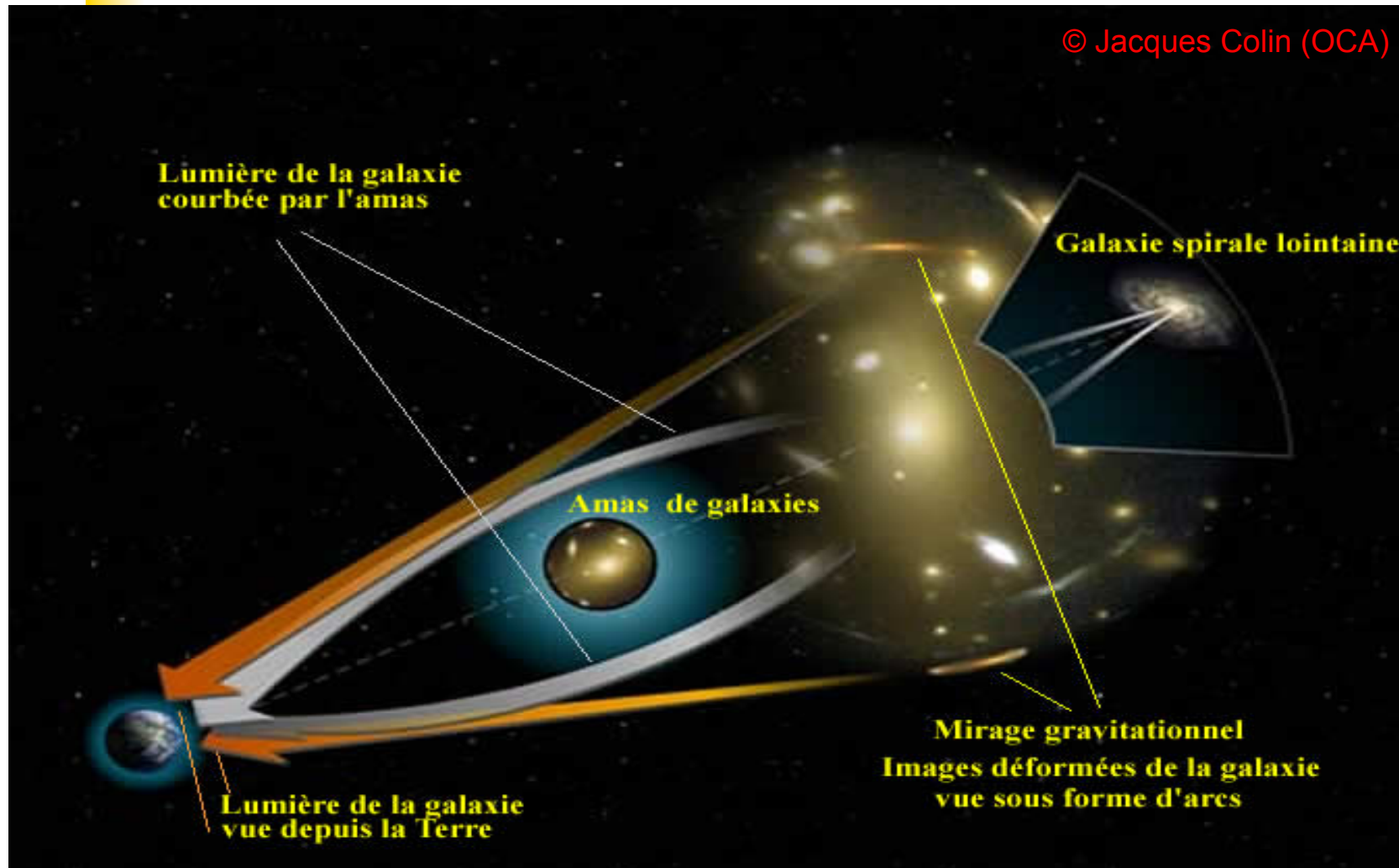
DISTORSIONS GRAVITATIONNELLES

Amas de galaxies : distorsions gravitationnelles

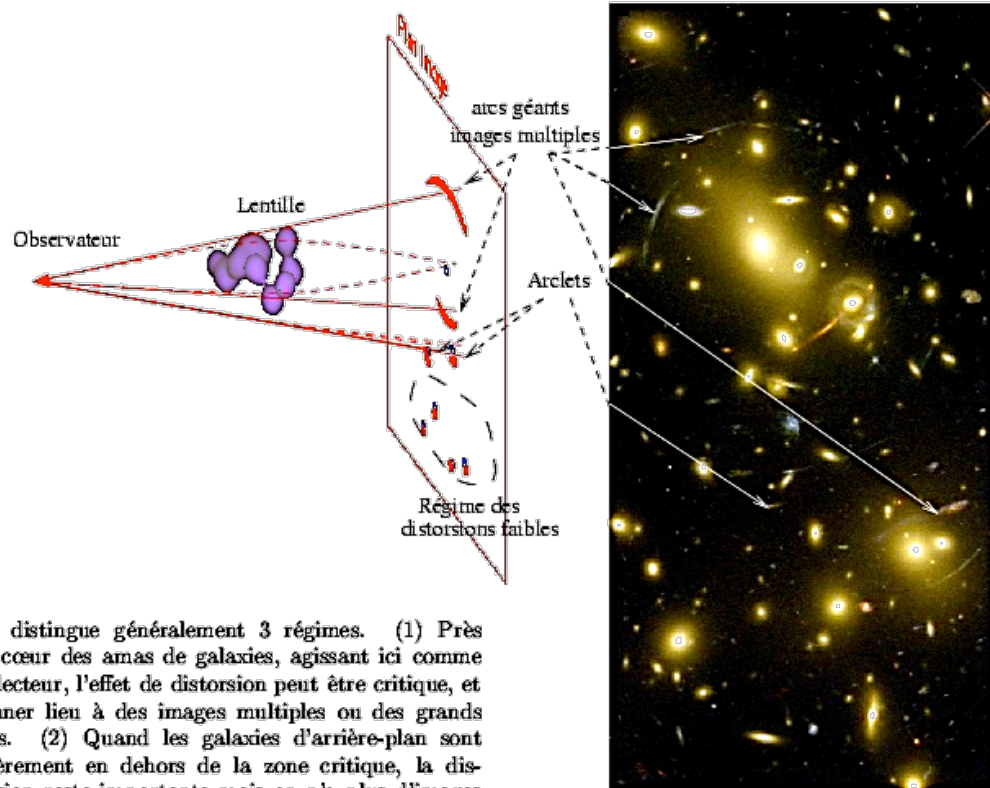
- Les masses dévient les rayons lumineux, déformant l'image des galaxies situées beaucoup plus loin → arcs lumineux



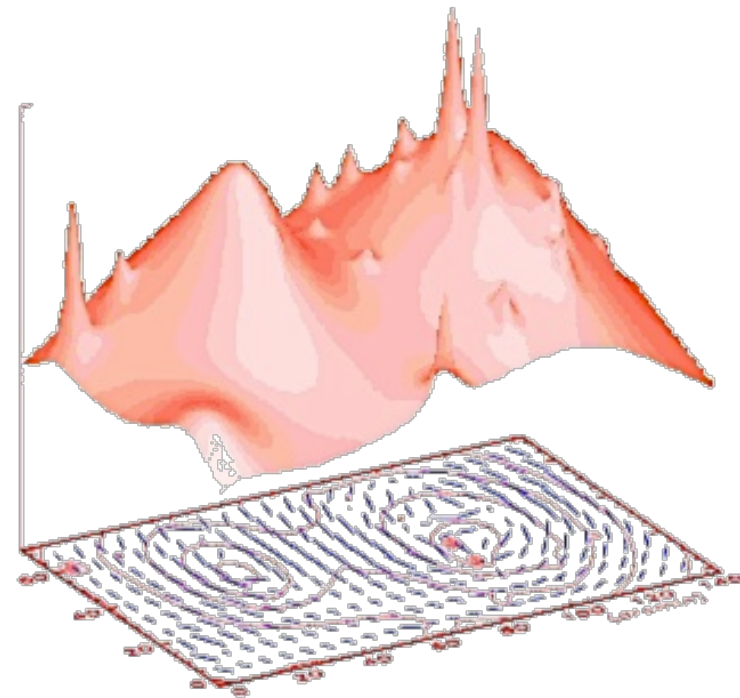
Les lentilles gravitationnelles



Reconstruction



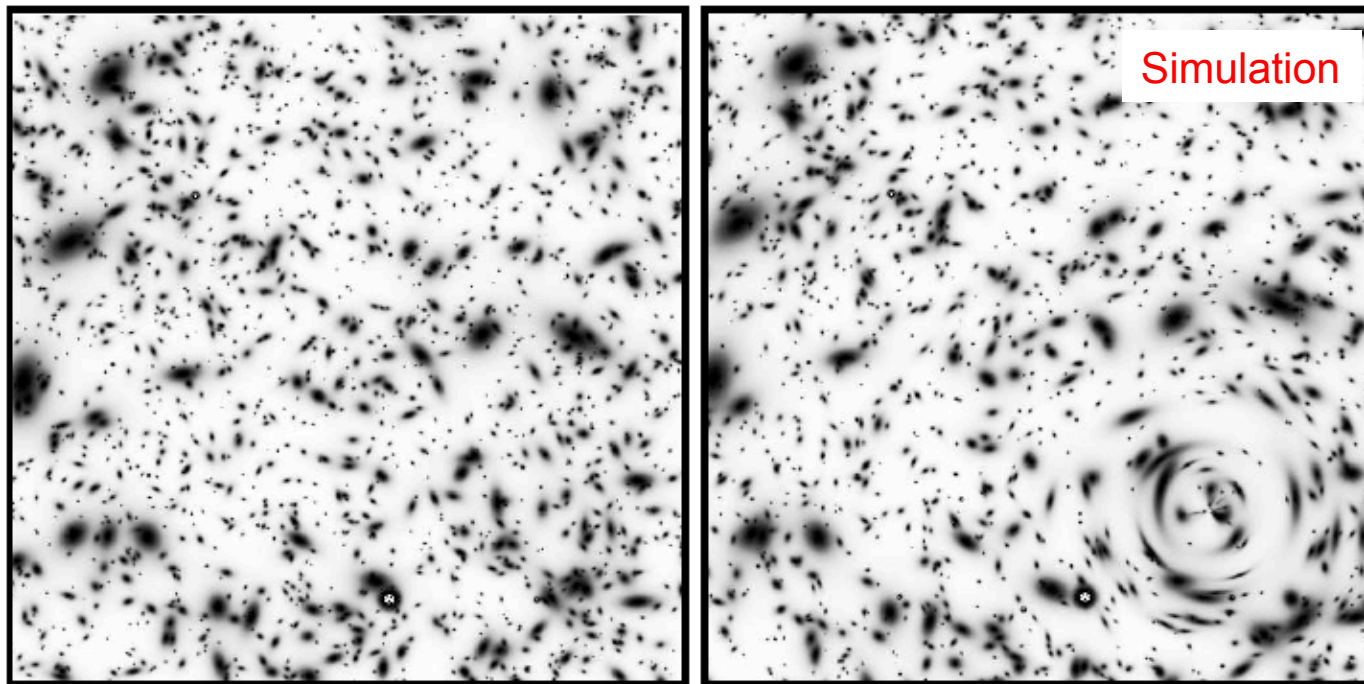
On distingue généralement 3 régimes. (1) Près du cœur des amas de galaxies, agissant ici comme déflecteur, l'effet de distorsion peut être critique, et donner lieu à des images multiples ou des grands arcs. (2) Quand les galaxies d'arrière-plan sont légèrement en dehors de la zone critique, la distorsion reste importante mais on n'a plus d'images



© Yannick Mellier (IAP)

A très grande échelle : le cisaillement

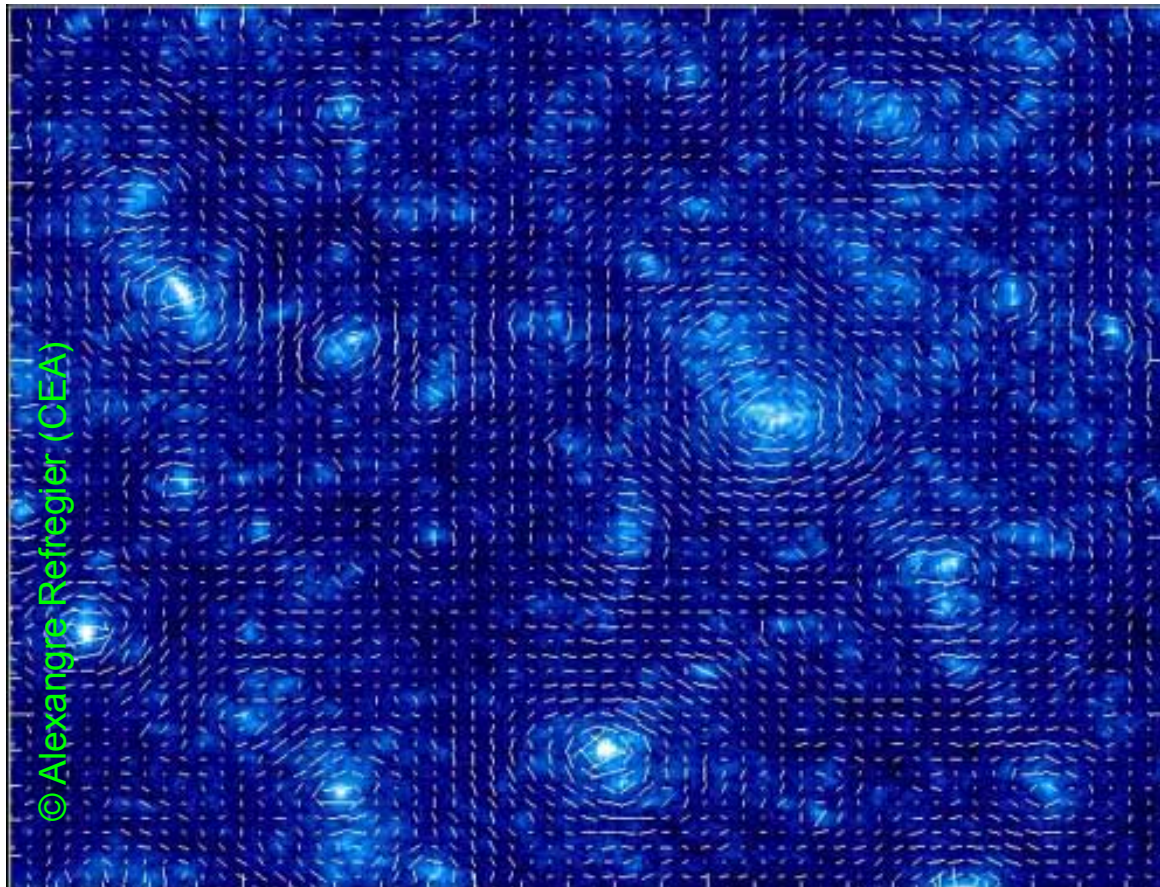
- Les rayons lumineux passant assez loin d'une concentration de masse comme un amas de galaxies déforment légèrement les images des objets en arrière-plan
- On parle de cisaillement gravitationnel (ou weak lensing)



Déformation des images d'arrière-plan par une concentration de masse en avant-plan

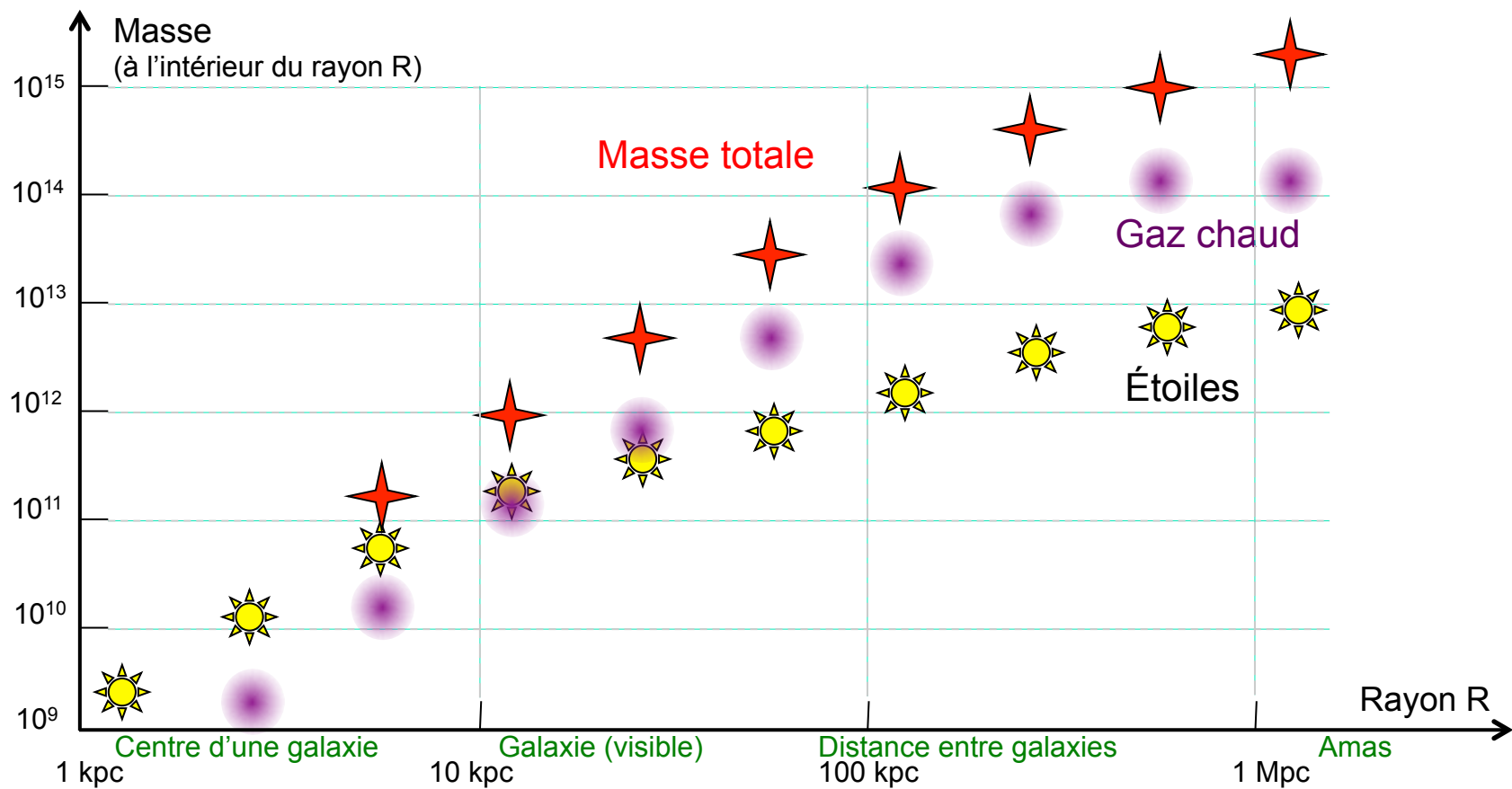
Le cisaillement trace la matière noire

- L'analyse statistique de la **forme** et de l'**orientation** des galaxies permet de reconstituer la carte de la matière noire sous-jacente



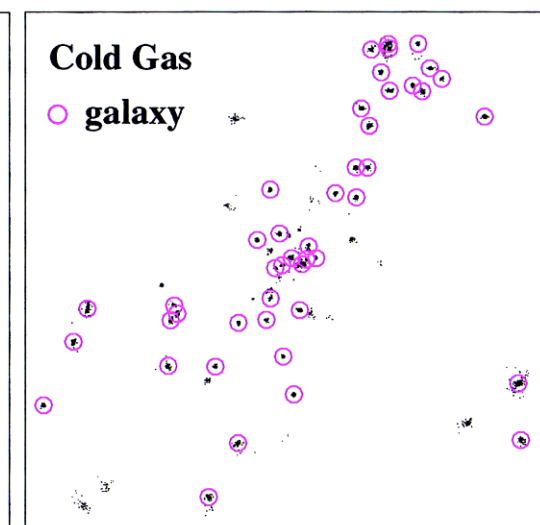
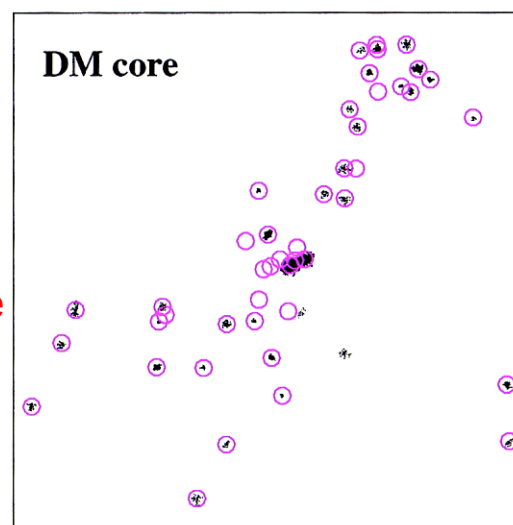
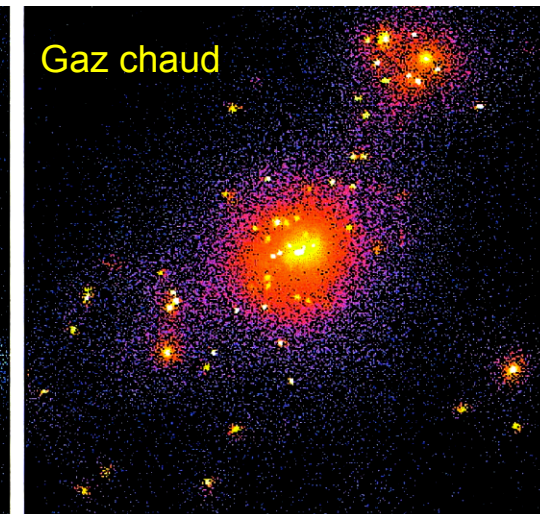
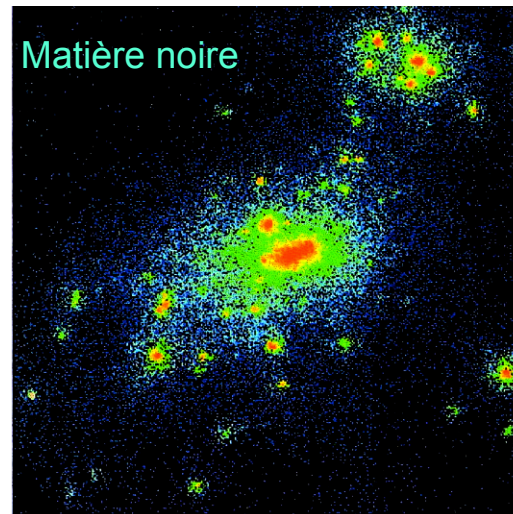
Selon la taille...

Bien plus de gaz que d'étoiles... ...et bien plus de matière noire que de gaz



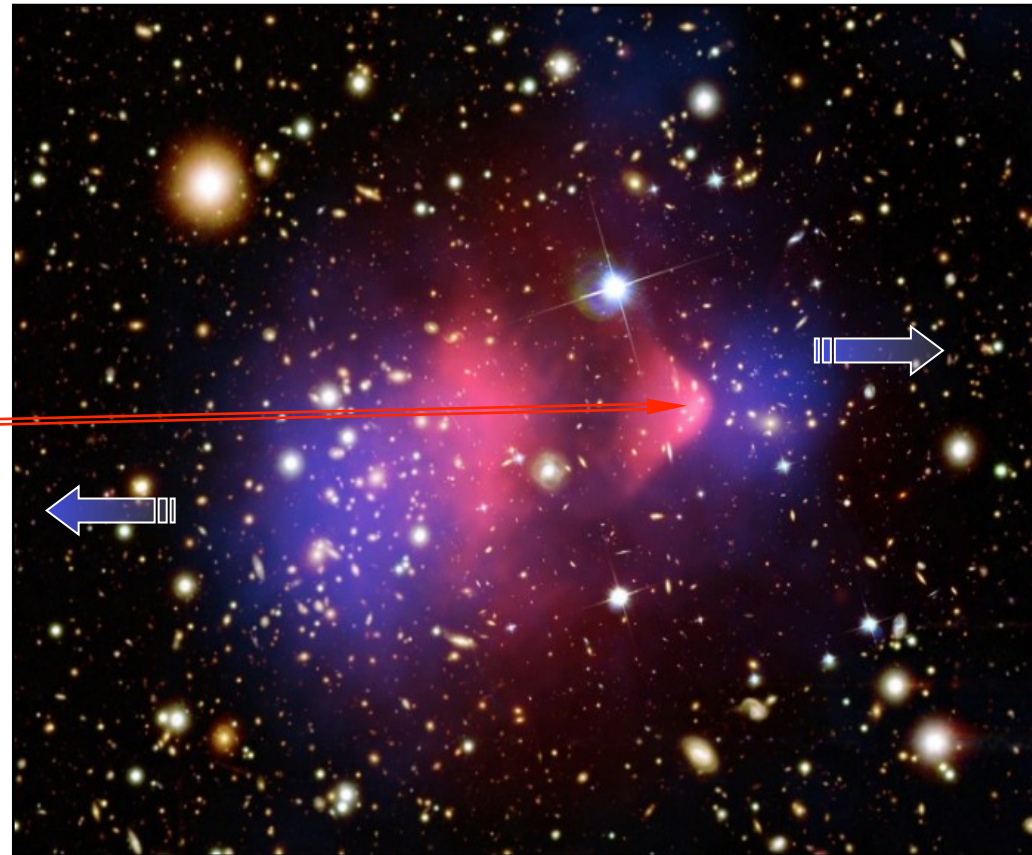
Bilan

- Cohérence des ≠ méthodes →
- Masse des galaxies
 - courbes de rotation
 - dispersion de vitesse des étoiles
- Masse du gaz intergalactique
 - intensité de l'émission X
- Matière noire
 - dispersion de vitesse des galaxies
 - intensité et température de l'émission X
 - distorsions gravitationnelles
- Gaz ~ 10 à 20% de la matière noire
- Galaxies ~ 10 à 20 % du gaz
- Et MOND ?



L'amas de la balle

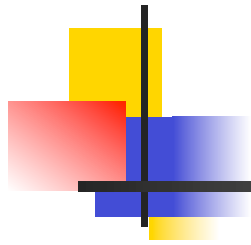
- Superposition de trois images d'une collision entre deux amas de galaxies
 - Les galaxies (en blanc)
 - Le gaz (en rouge)
 - La matière noire (en bleu)
- La collision a provoqué dans le gaz une onde de choc le séparant de la matière noire
- ⇒ MOND ?



Ce n'est pas un cas isolé

- Amas MACS J0025.4-1222
 - Gaz (en rouge) *Chandra*
 - Matière noire (en bleu) *HST*
 - Gaz et matière noire sont séparés

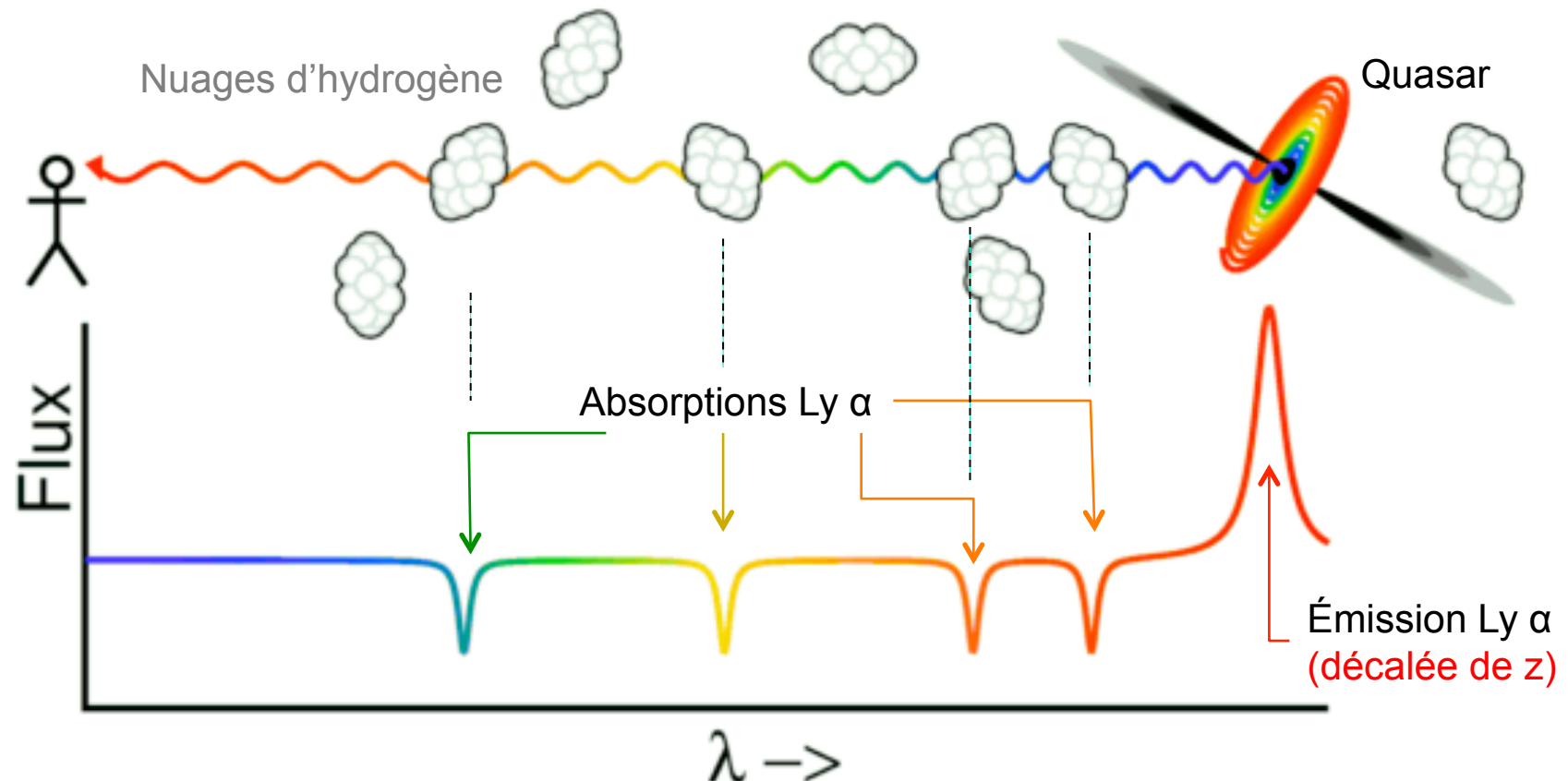




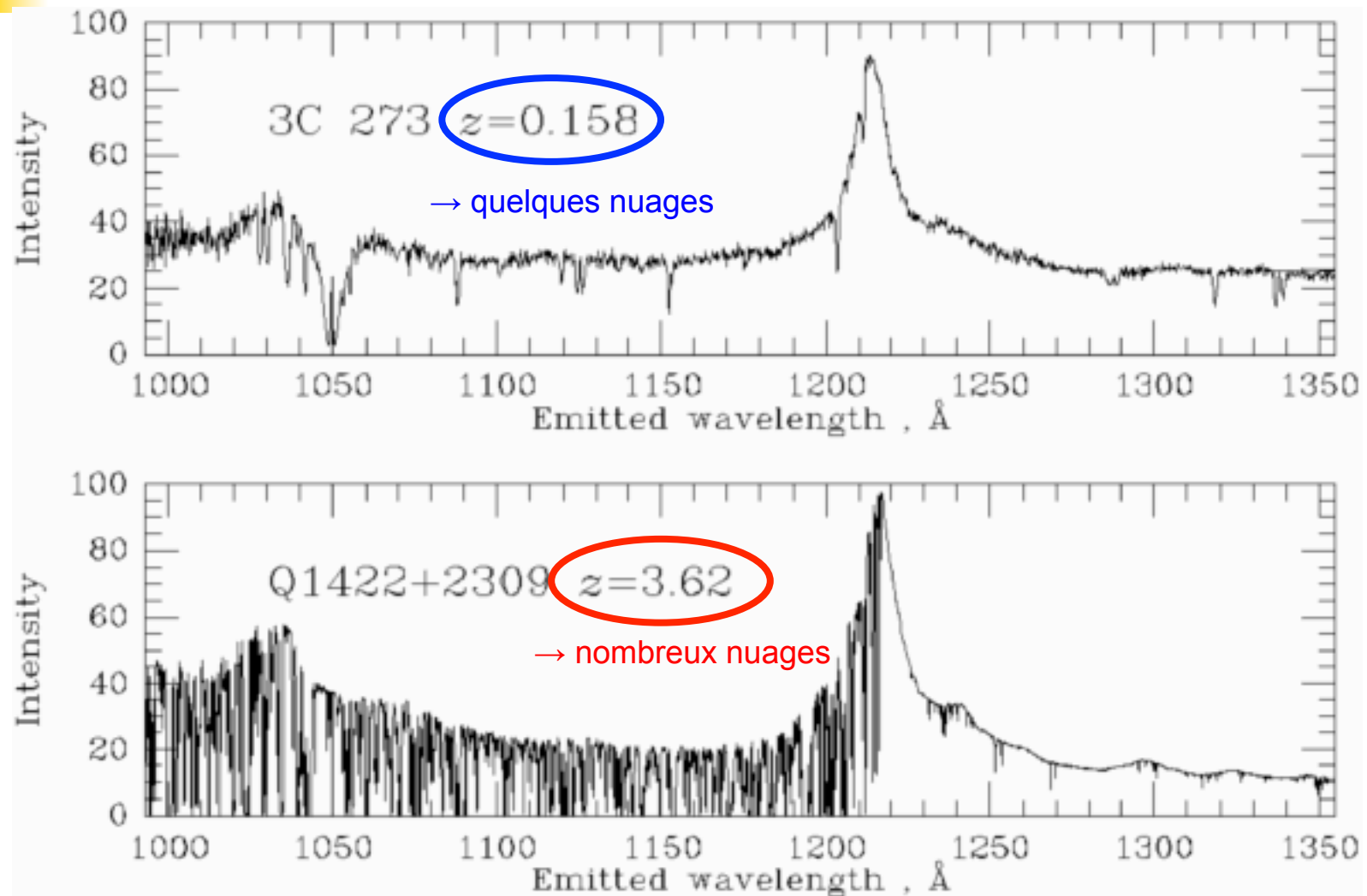
À TRÈS GRANDE DISTANCE

La « forêt » Lyman alpha

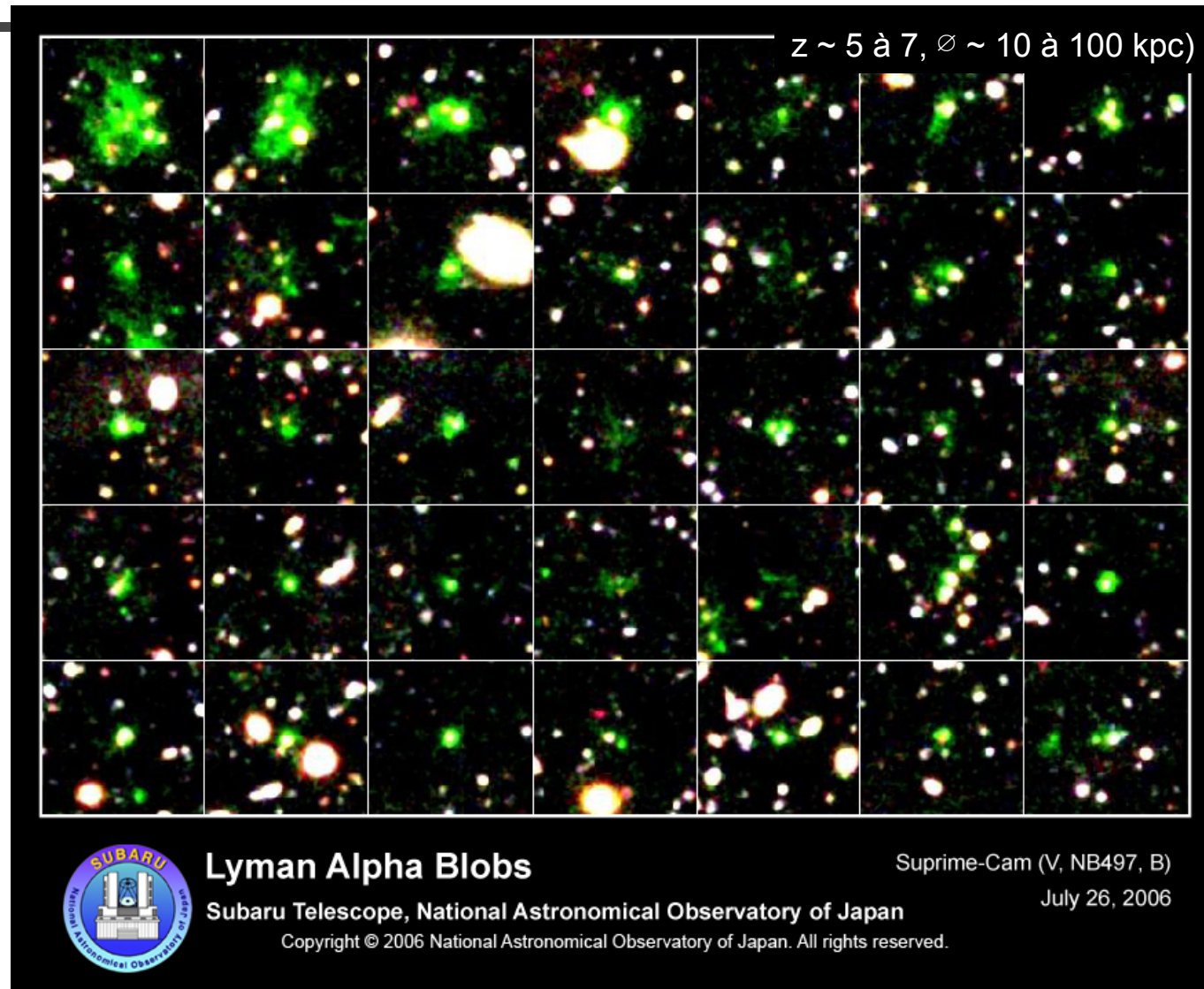
- Absorption de la lumière d'un quasar (lointain) par du gaz le long de la ligne de visée
- Raie de l'hydrogène Lyman alpha : $\lambda = 121,6 \text{ nm}$



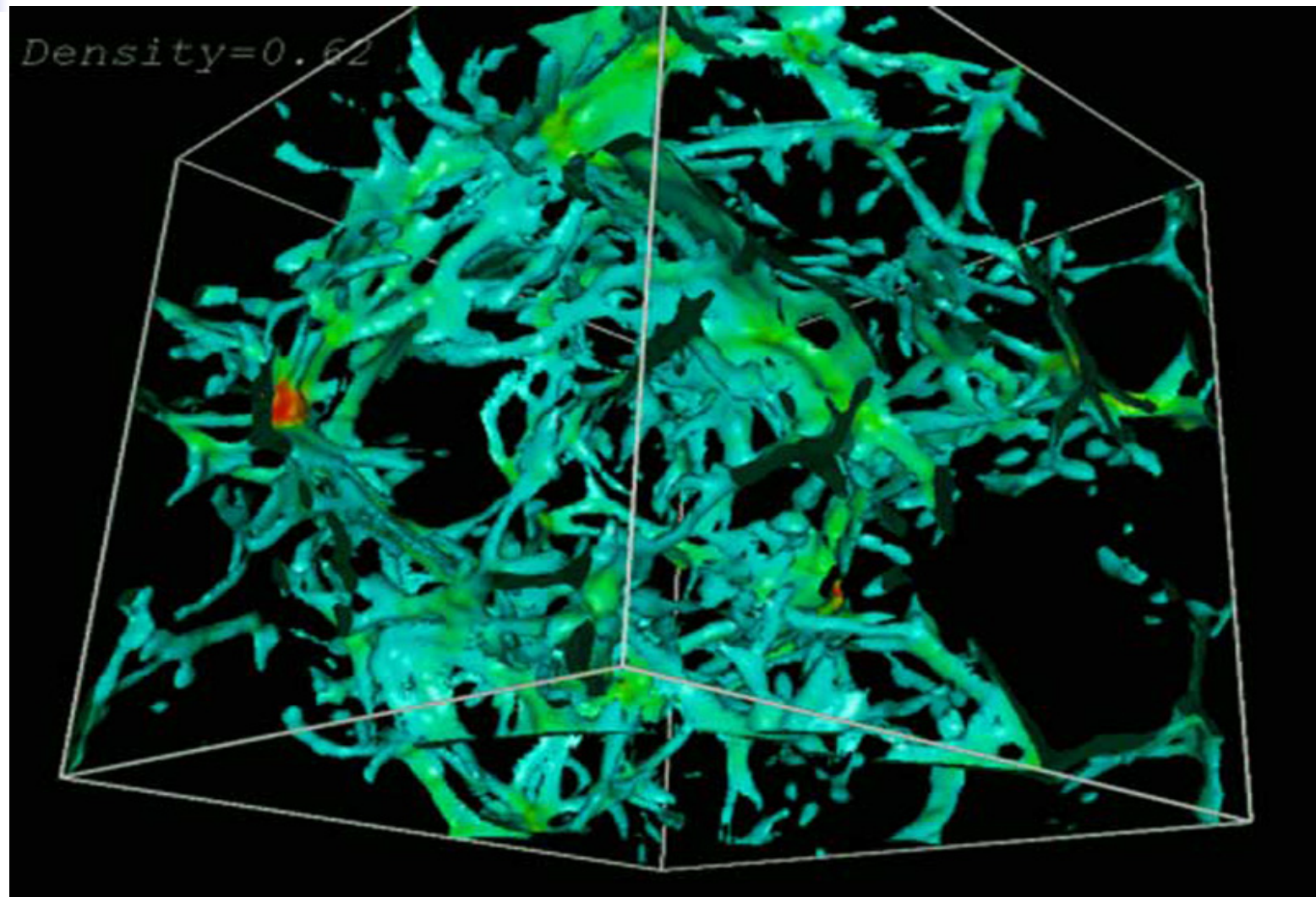
Forêt Lyman alpha

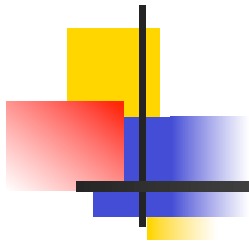


Les « blobs » Lyman alpha



L'univers en Lyman alpha (simulation)





Merci de votre attention !

