

Astrophysique

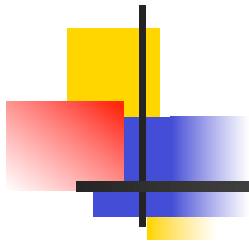
19 – Les amas de galaxies



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

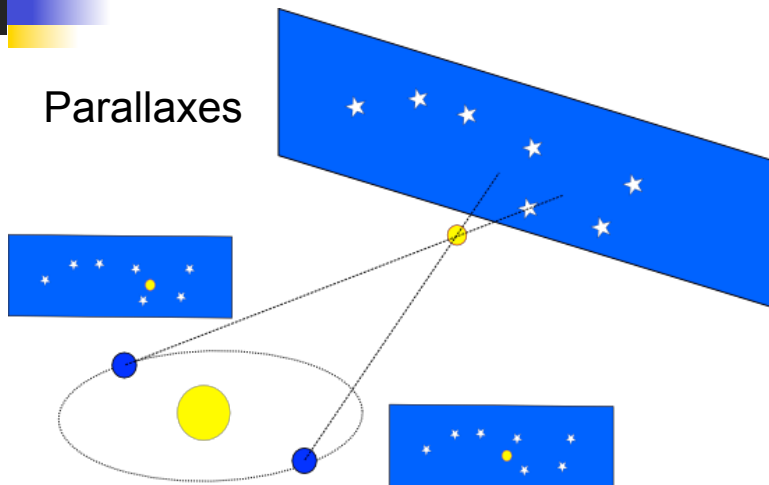
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



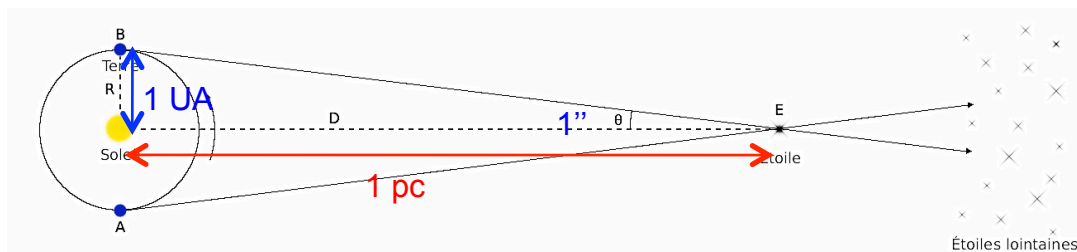
ÉCHELLES DE DISTANCE

Dans la Galaxie proche

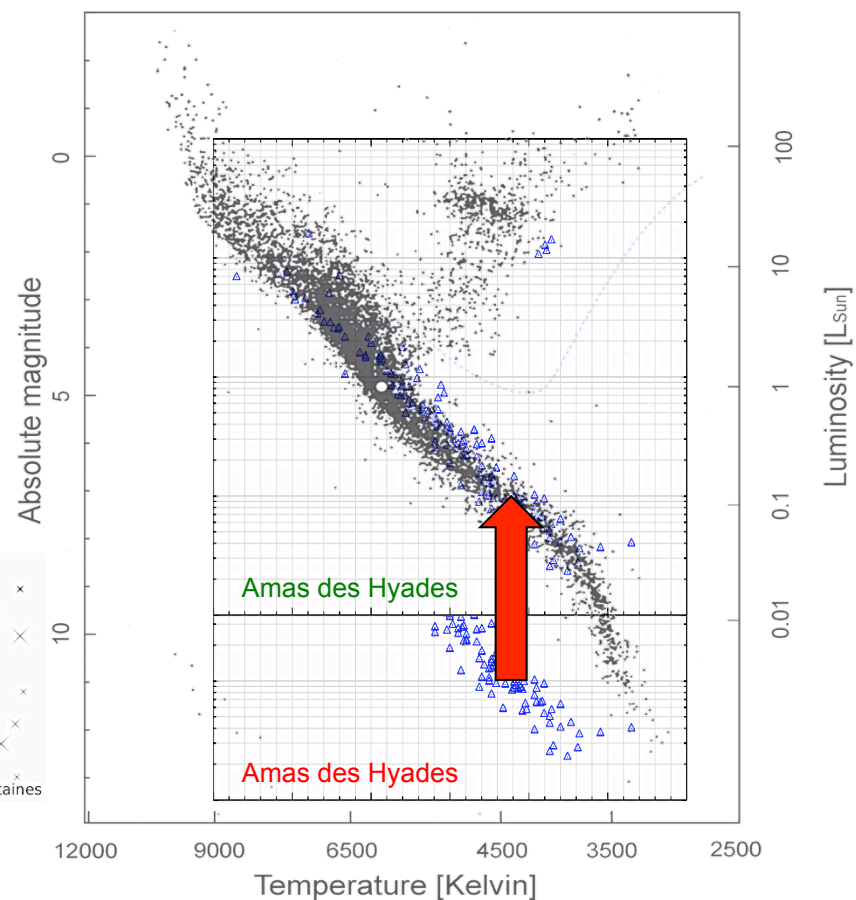
- Parallaxes



- Rayon terrestre → UA → parsec

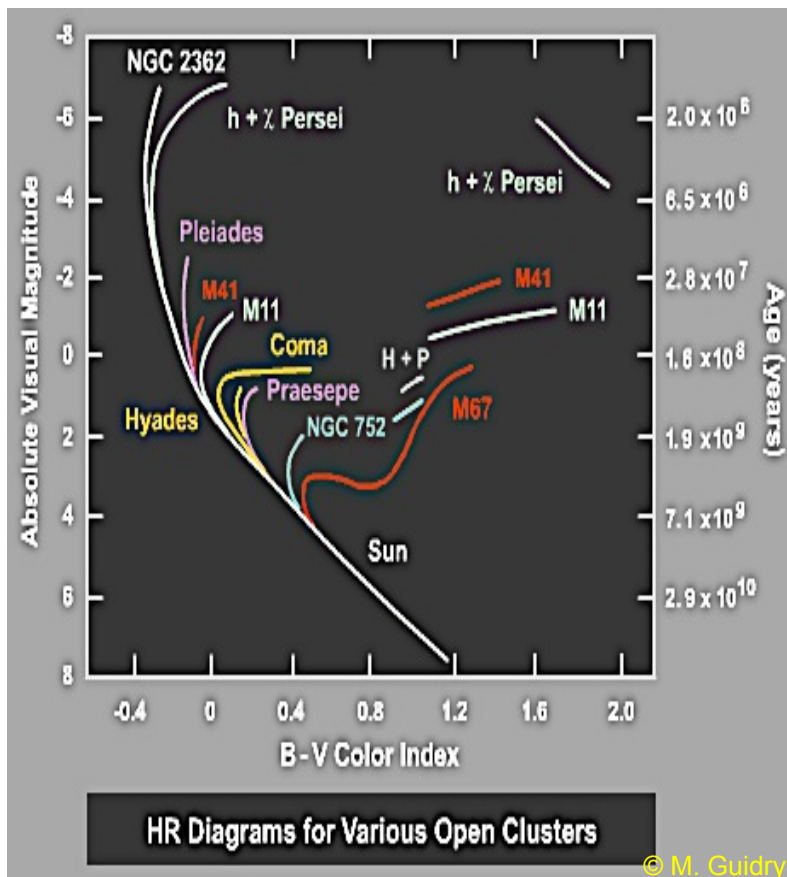


- Ajustement du diagramme de Hertzsprung-Russell → Magnitude absolue → distance



Dans la Galaxie

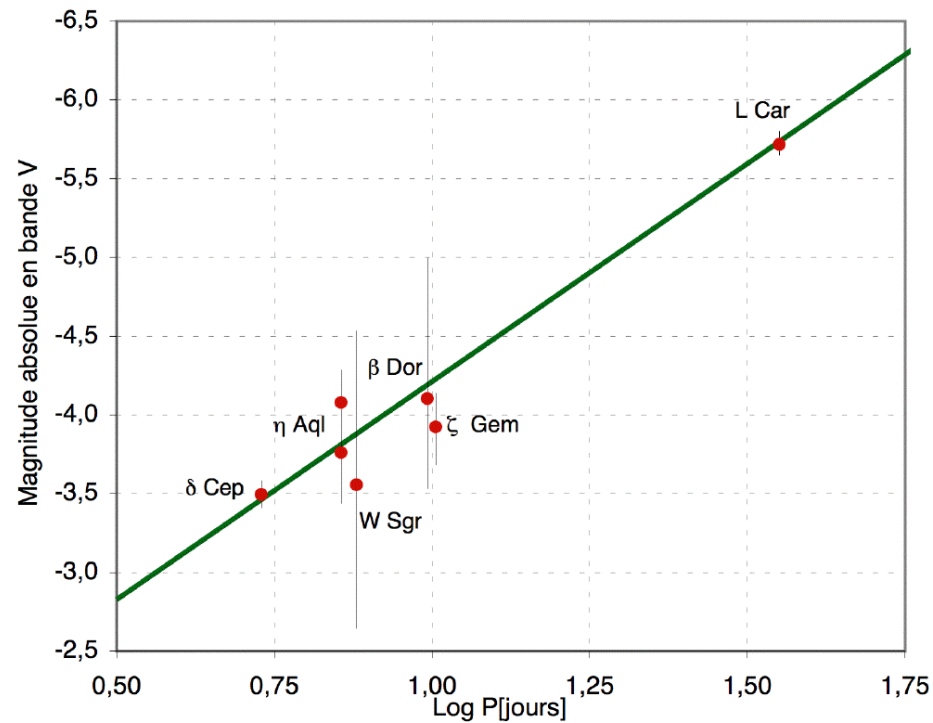
- Ajustement du diagramme de Hertzsprung-Russell



- Céphéides

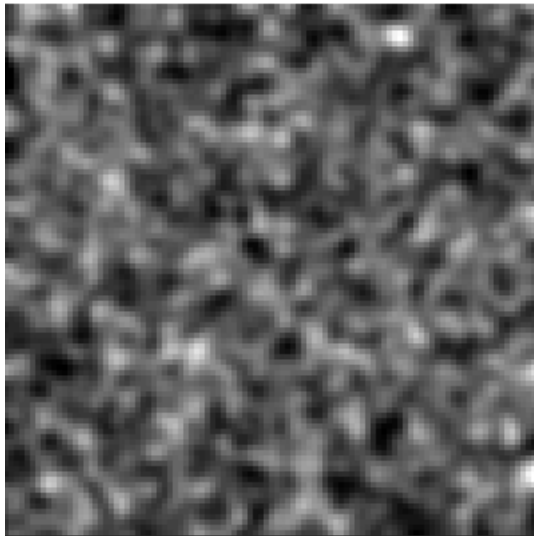
- Période → magnitude absolue M
- Magnitude apparente m → distance D

$$D = 10 \text{ pc } 10^{0,2(m-M)}$$

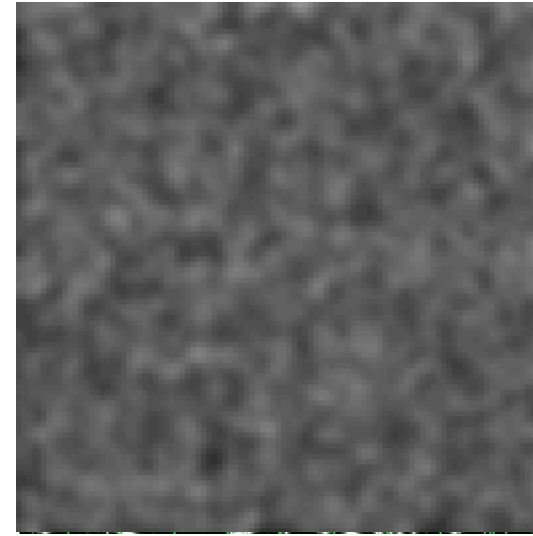


Fluctuations de brillance de surface

- Le nombre d'étoiles dans une petite zone est une variable aléatoire (Tonry et Schneider 1988)
 - sur l'image d'une galaxie 3 fois plus éloignée, chaque étoile est $3^2 = 9$ fois moins lumineuse, mais leur nombre est 9 fois plus élevé par unité de surface angulaire → variance 9 fois plus faible
 - → la luminosité par unité de surface **angulaire** (brillance) ne change pas avec la distance
 - **mais la variance diminue comme le carré de la distance, et la dispersion comme la distance**



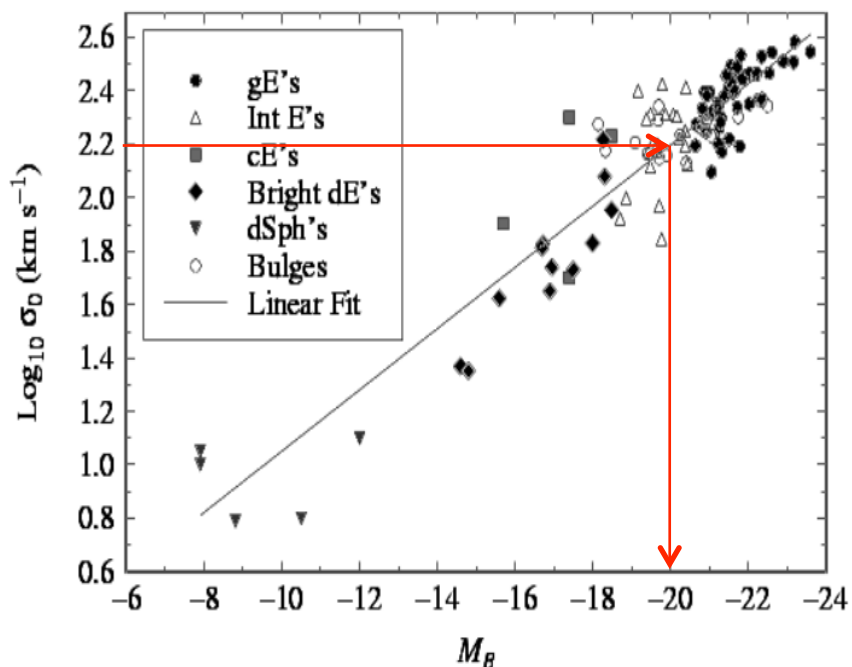
$$\langle L \rangle = \text{constante}$$
$$\langle L^2 \rangle - \langle L \rangle^2 \propto 1/D^2$$



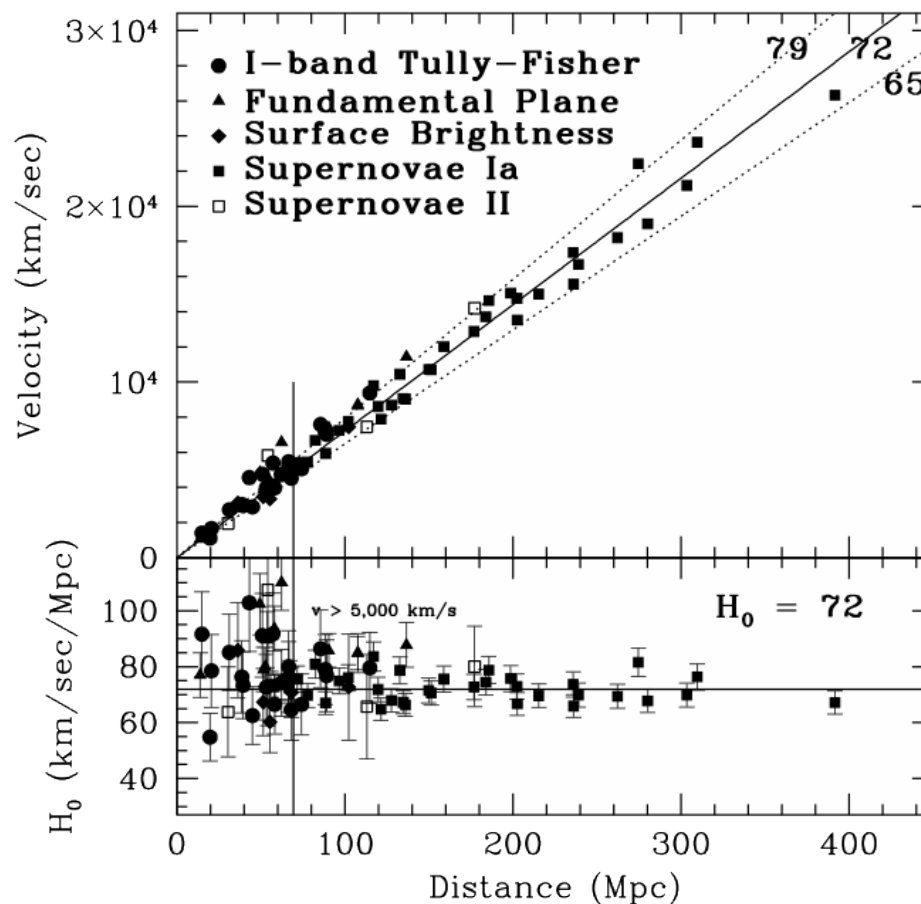
Galaxies et amas proches

■ Tully-Fisher & Faber-Jackson

- Vitesse de rotation $V \rightarrow$ luminosité absolue $L \propto V^4$
- Dispersion de vitesse $\sigma \rightarrow$ luminosité absolue $L \propto \sigma^4$

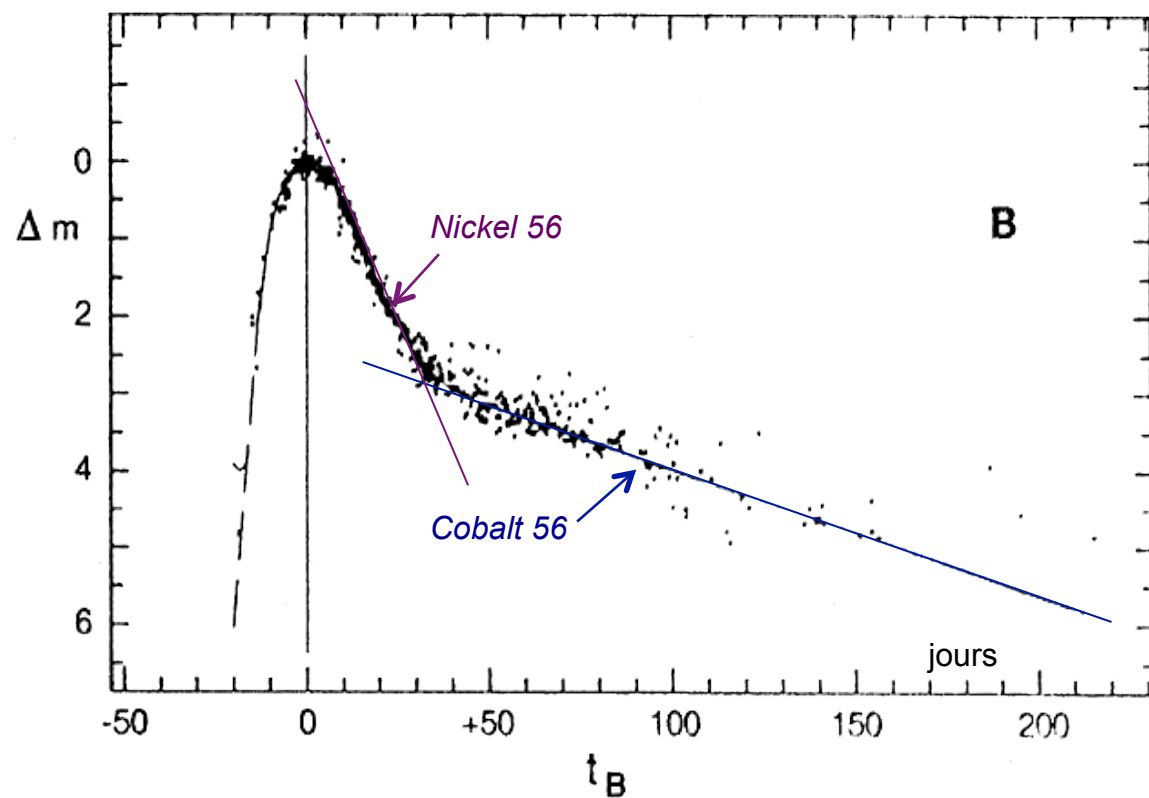


■ \rightarrow Loi de Hubble

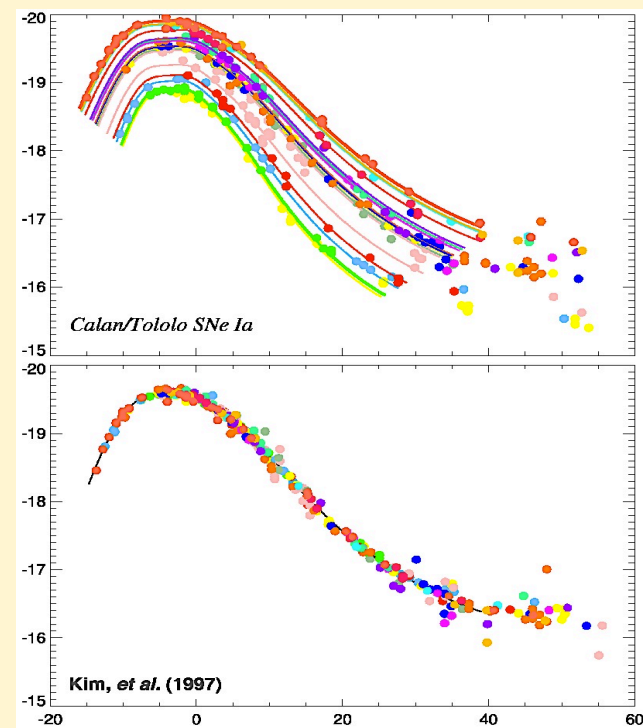


Supernovae Ia

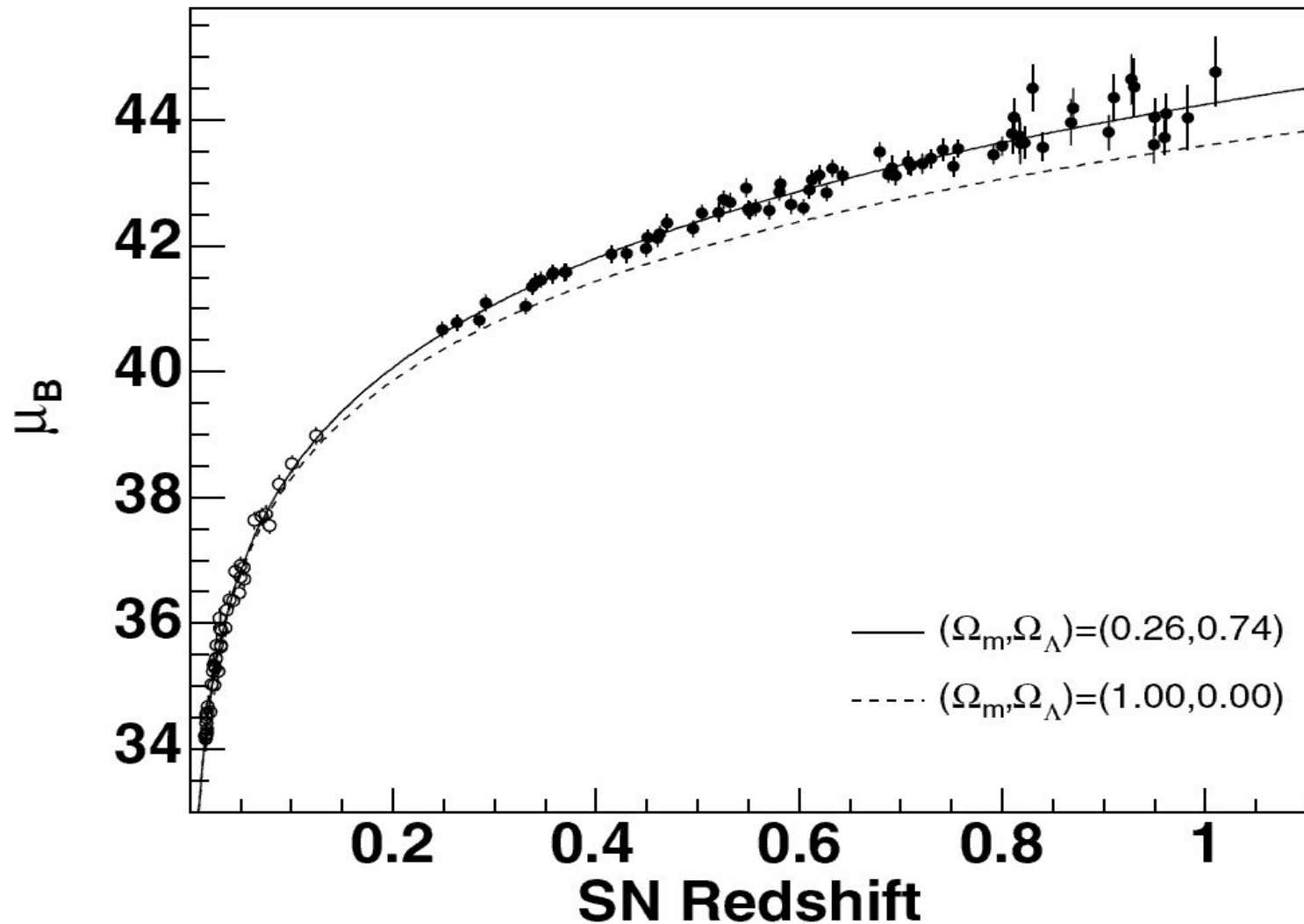
- Explosion d'une naine blanche C-O atteignant la masse de Chandrasekhar
→ « chandelle standard »

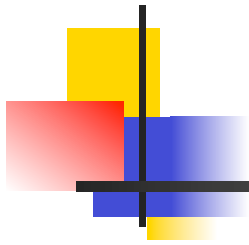


- Variations $\sim 10\%$
■ → corrigées via corrélation hauteur-largeur



Plus loin encore : supernovae et loi de Hubble





DES GALAXIES PROCHES AUX AMAS LOINTAINS



Groupes, amas, superamas de galaxies...

Groupes

- 2 à 50 membres
- Rayon ~ 1 à 2 Mpc
- Masse ~ $10^{13} M_{\odot}$

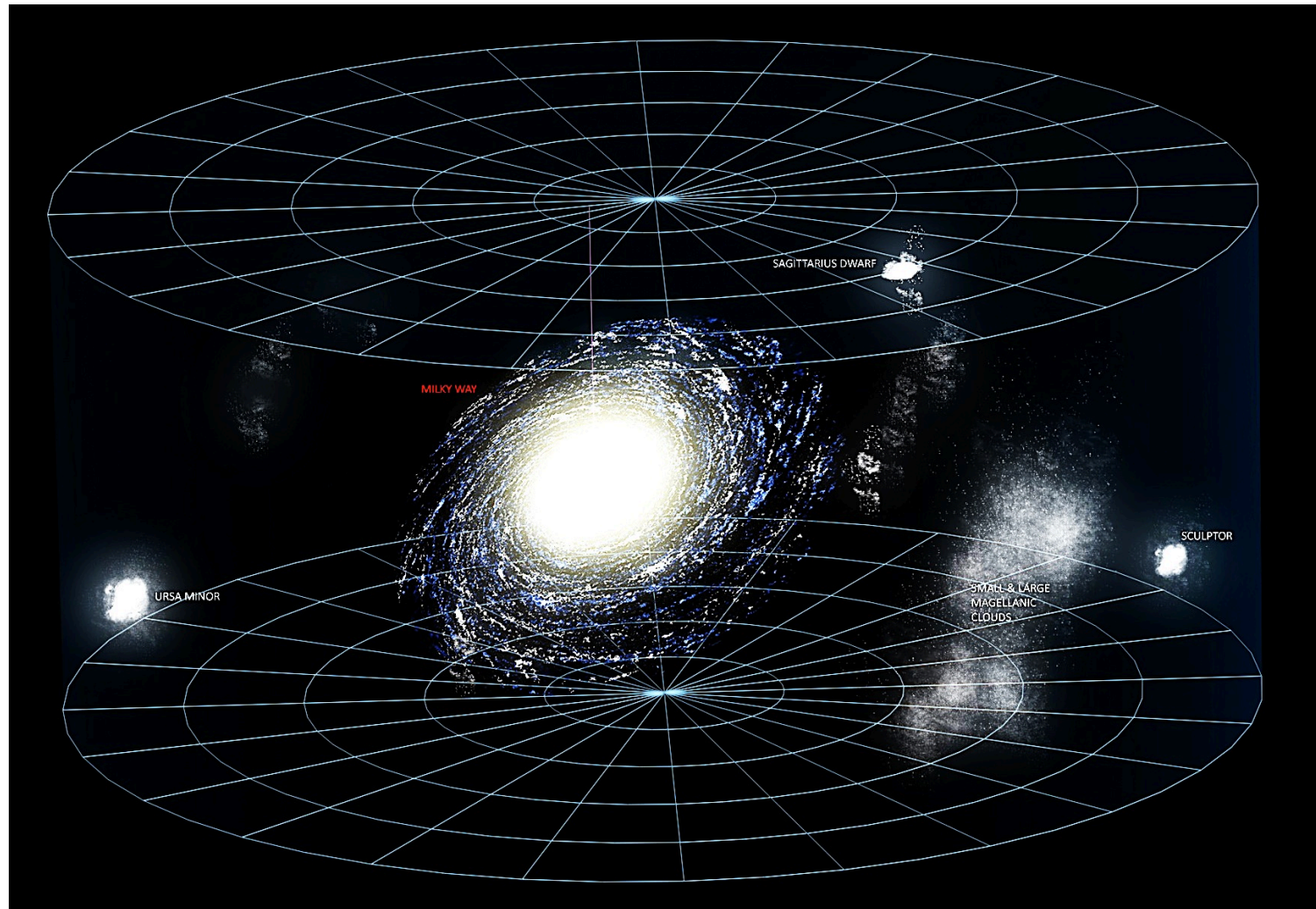
Amas

- 50 à 2000 membres
- Rayon ~ 3 à 10 Mpc
- Masse ~ 10^{14} à $10^{15} M_{\odot}$

Superamas

- 2000 à 50 000 membres
- Rayon ~ 10 à 50 Mpc
- Masse ~ $10^{16} M_{\odot}$

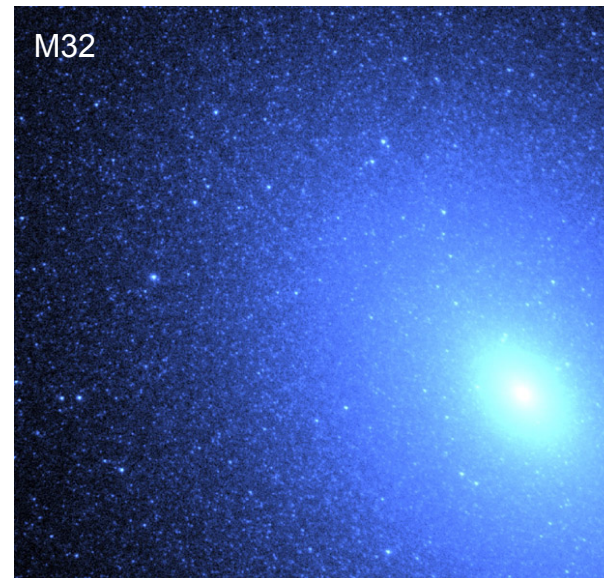
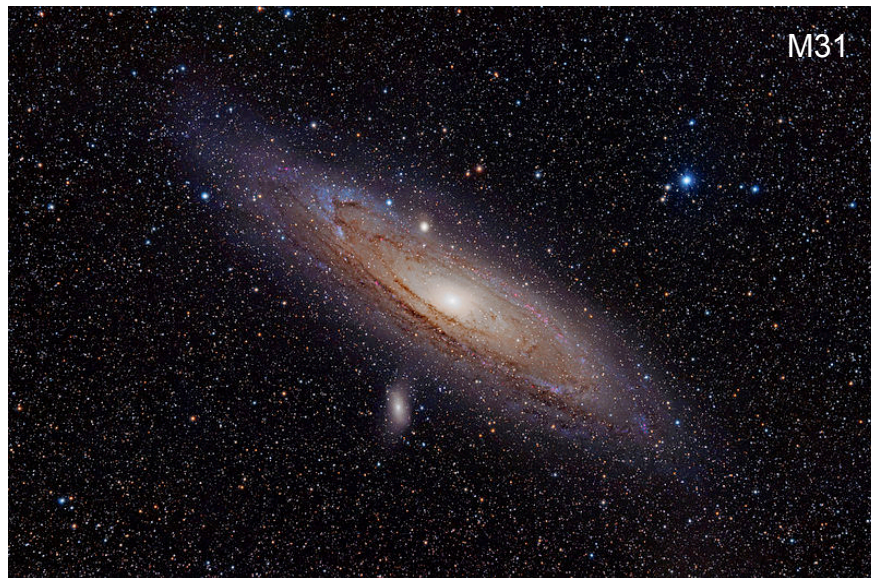
La Voie lactée et ses satellites



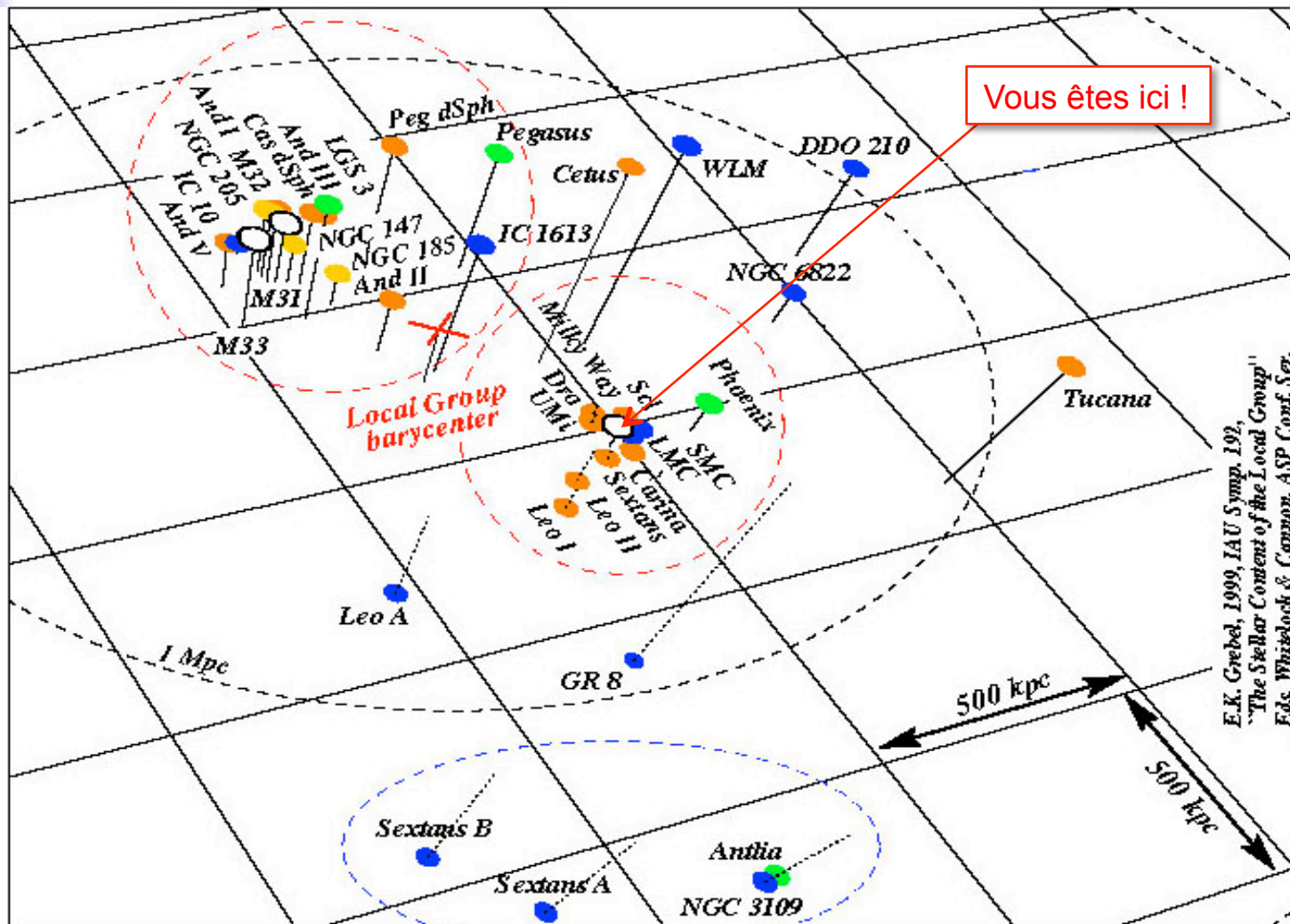
Groupe local

- Une quarantaine de galaxies en 2 sous-groupes (\varnothing 3 Mpc)
 - Voie lactée et satellites (Nuages de Magellan, galaxies naines)
 - Andromède (M31) et satellites (M32, M110...) et galaxie du Triangle (M33)
 - Mouvements → **masse totale $\sim 10^{13} M_{\odot}$**

	Rayon (kpc)	Masse (M_{\odot})	Luminosité (L_{\odot})	Distance (kpc)
Voie lactée	15	2×10^{11}	2×10^{10}	
M31	25	3×10^{11}	3×10^{10}	760
M32	1	$1,2 \times 10^9$	4×10^8	760
M33	15	$1,1 \times 10^{10}$	3×10^9	830

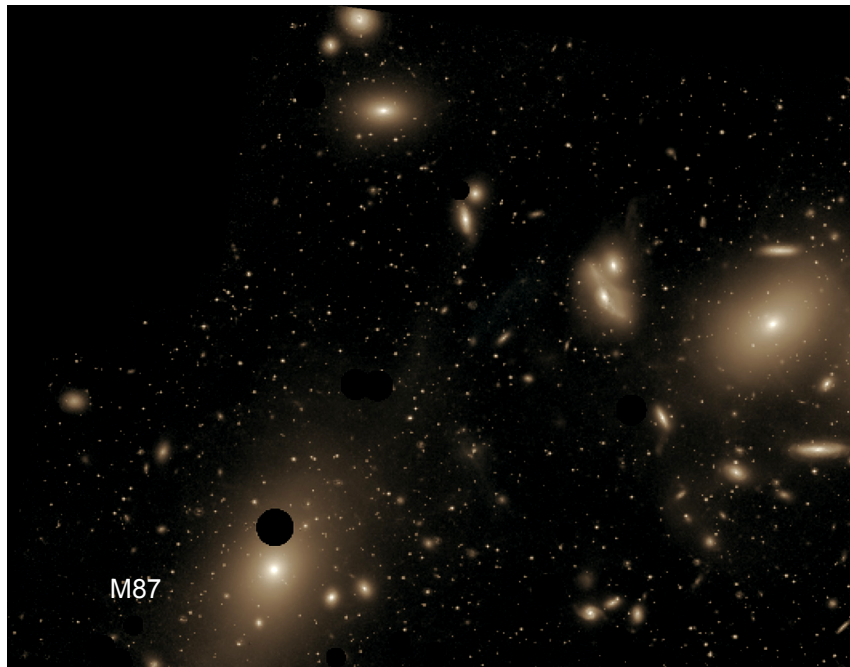


Le Groupe local en 3D

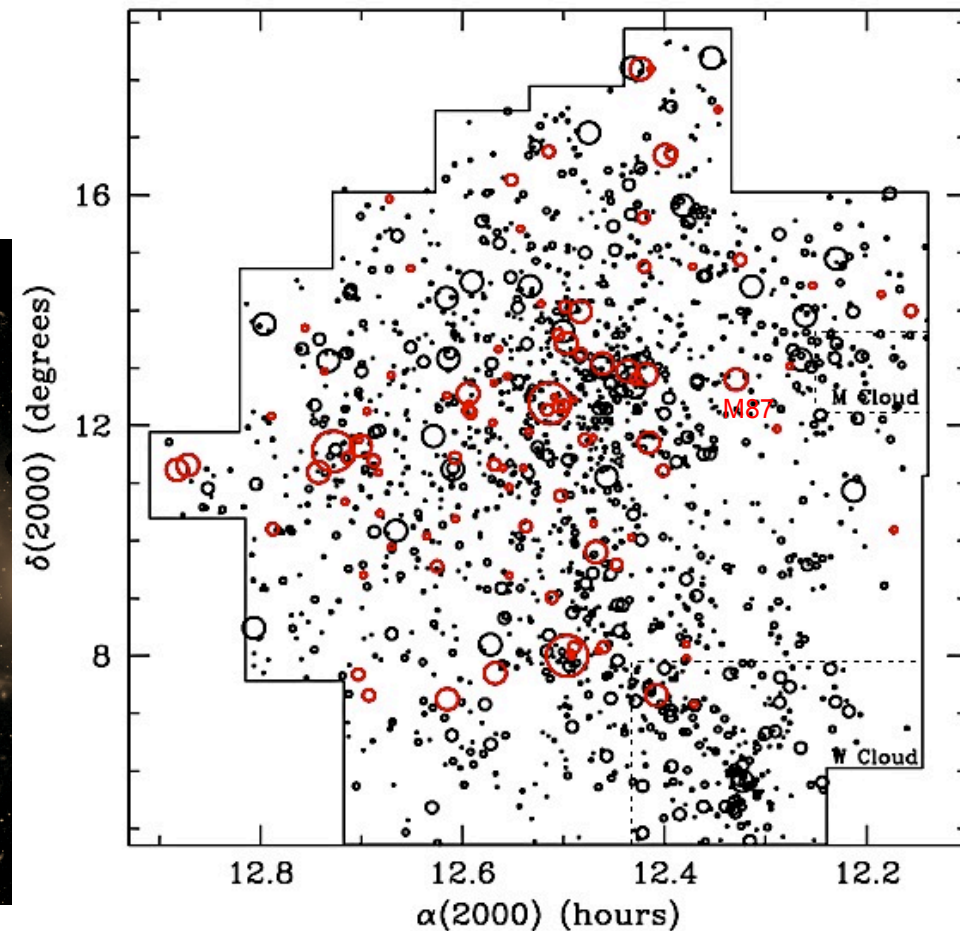


L'amas de la Vierge (*Virgo*)

- Virgo
 - distance ~ 16 Mpc
 - ~ 1800 galaxies
 - rayon $\sim 2,2$ Mpc
 - masse $\sim 1,2 \times 10^{15} M_{\odot}$



- Virgo (*Côté et al. ApJ2004*)



Le superamas de Coma

■ Coma (*Abell 1656*)

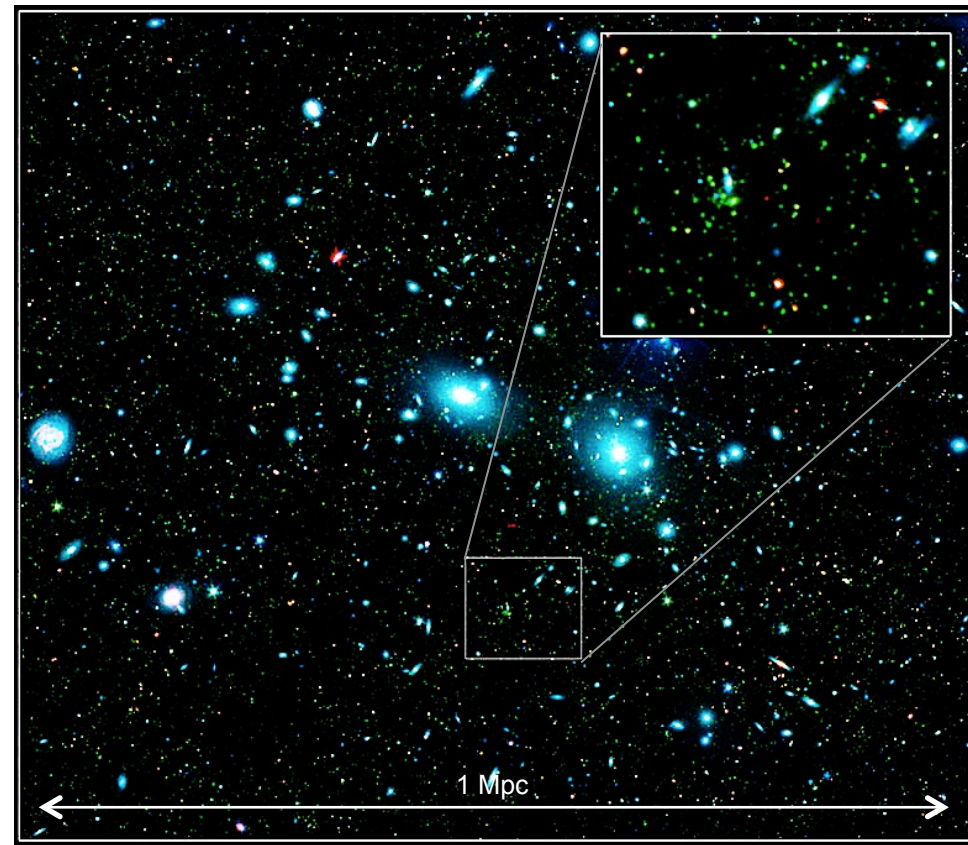
- distance ~ 100 Mpc
- > 800 galaxies elliptiques massives
- $> 30\,000$ galaxies naines
- rayon ~ 5 Mpc
- masse $> 2 \times 10^{15} M_{\odot}$
- sous-structures apparentes

■ Zwicky 1933

- masse de l'amas $\gg \Sigma$ masses des galaxies
- \Rightarrow matière noire

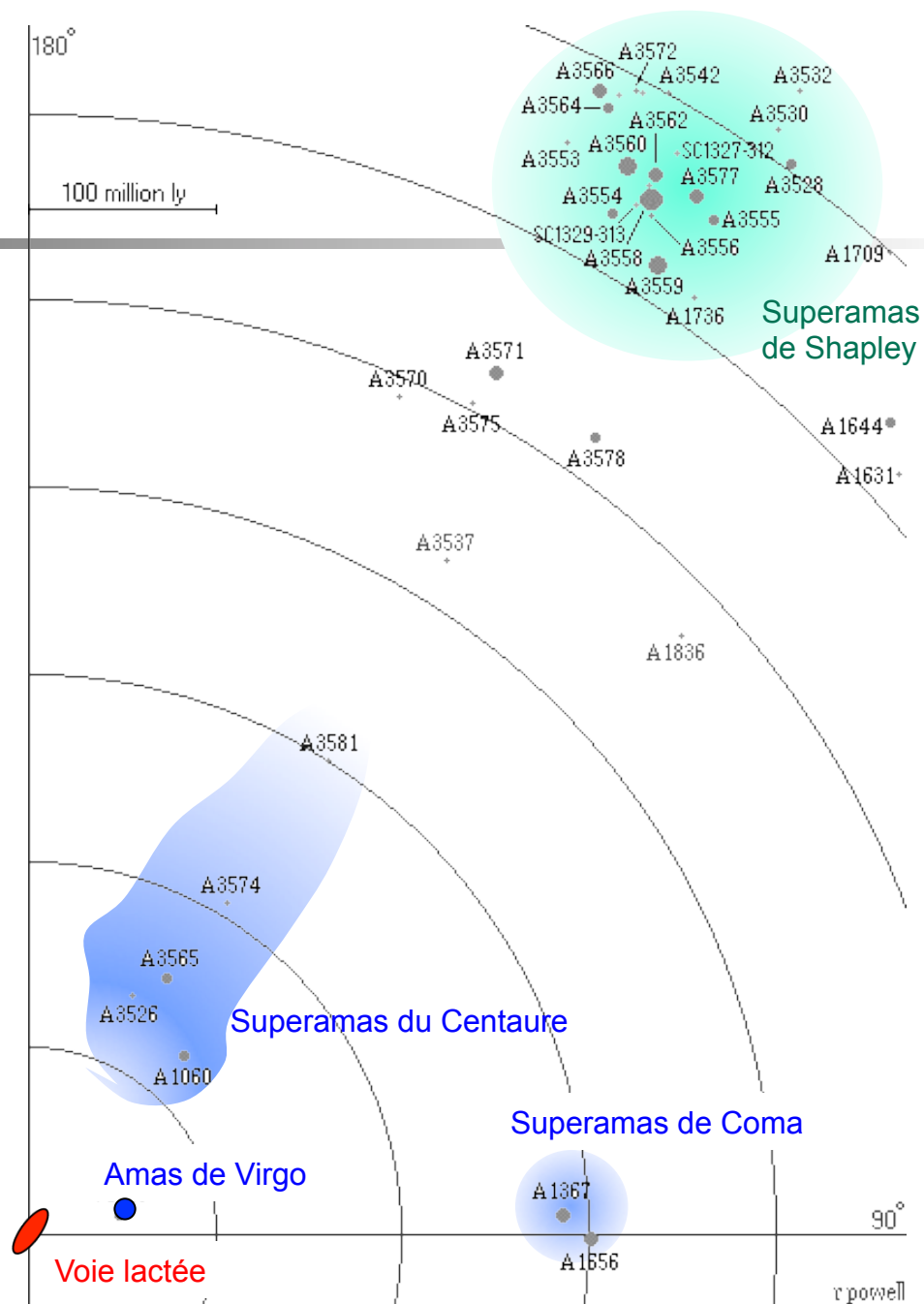


■ Région **centrale** de l'amas de Coma (SDSS [bleu] & Spitzer [vert] 2007)



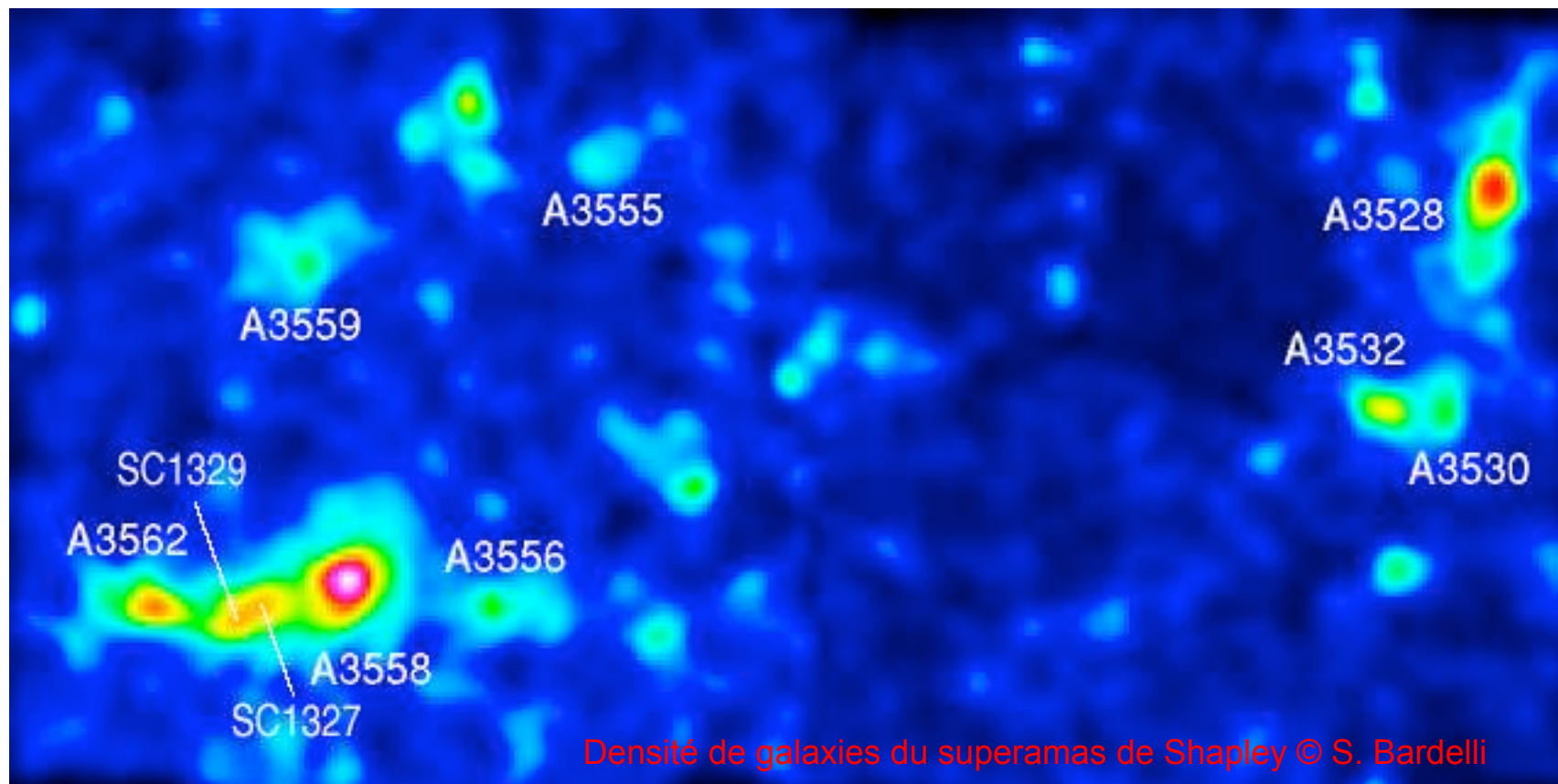
Notre voisinage

- Recensement d'amas
 - Shapley (1933) : 25 amas
 - Abell (1958, puis 1987)
 - → catalogue de 4073 amas riches jusqu'à $z = 0,2$ (distance < 800 Mpc)
- Autres catalogues
 - Zwicky (1968) : 9134 amas
 - Hickson (1982) : 100 groupes compacts
 - Catalogues X, SZ



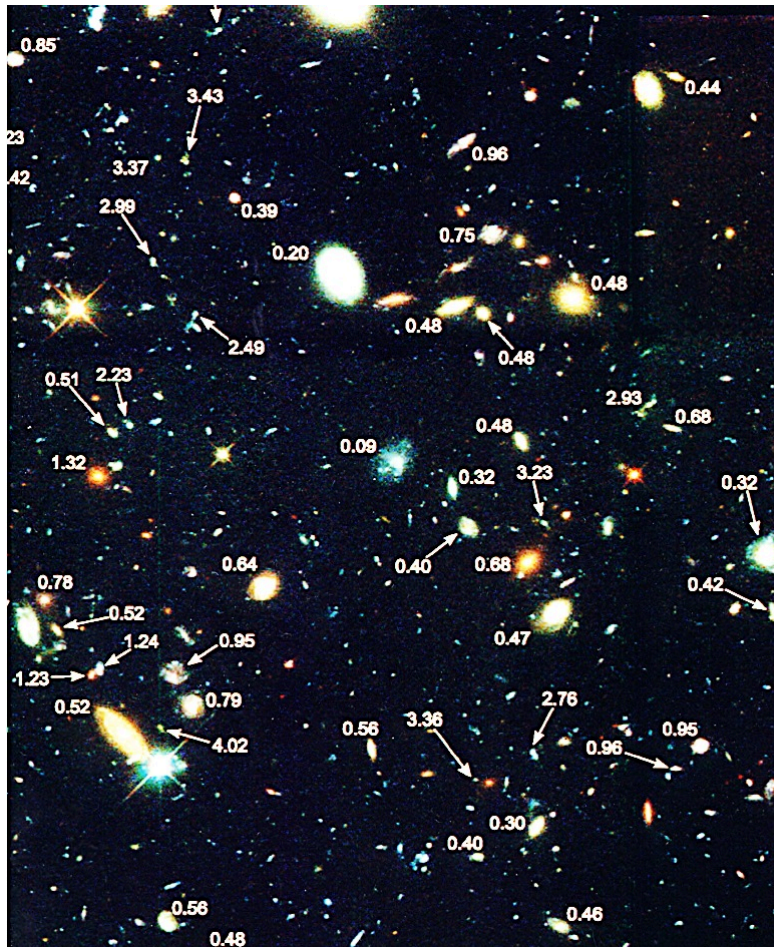
Le superamas de Shapley

- Il contient des dizaines d'amas de galaxies, dont 7 plus riches que Virgo ou Coma
 - Distance 200 Mpc masse $> 7 \times 10^{15} M_{\odot}$



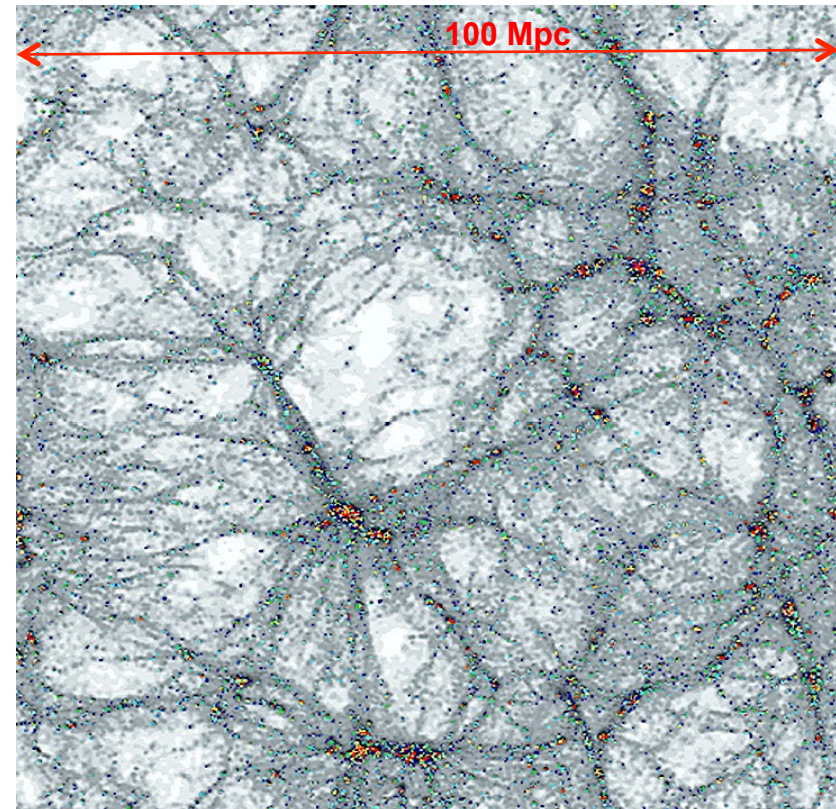
L'univers à grande échelle

- Hubble Deep Field



- Comparaison avec les simulations

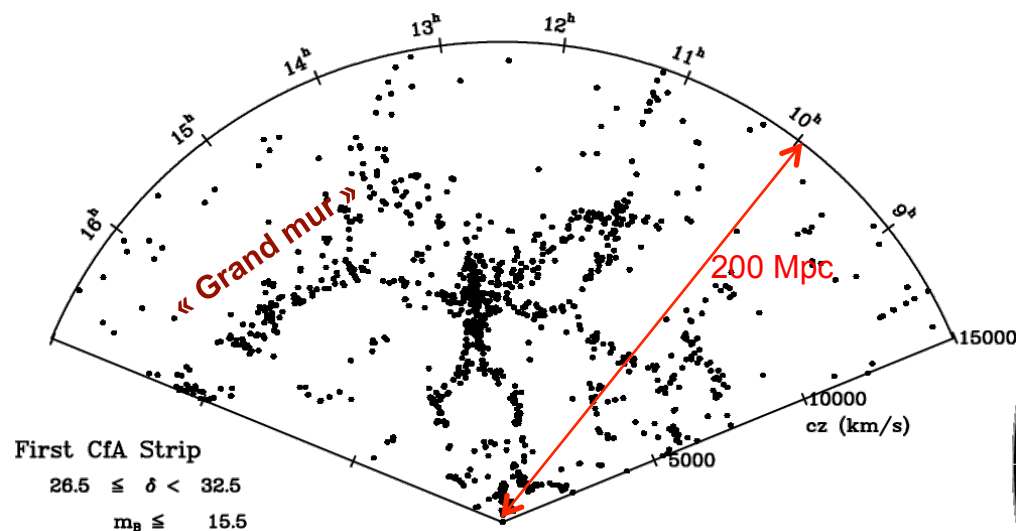
- matière noire en gris
- galaxies elliptiques en rouge, spirales en vert, irrégulières en bleu



Sondages 3D

- CfA (1978)

- 20 000 galaxies à $z < 0,05$



- Las Campanas redshift survey (1996)

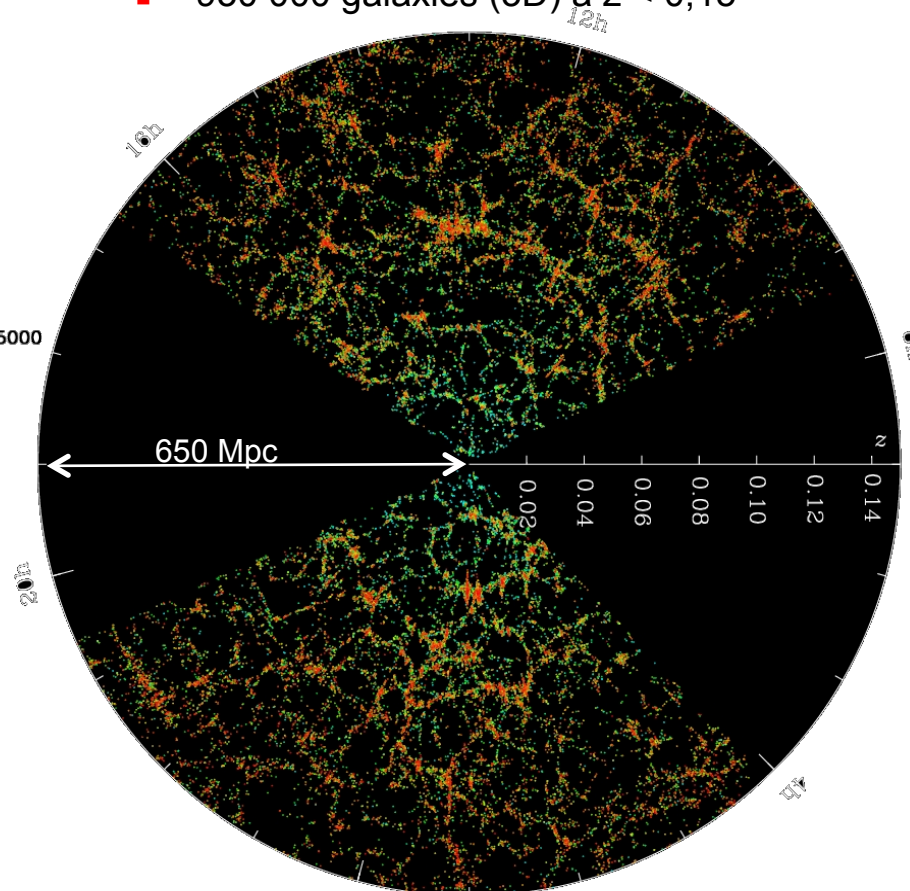
- 25 000 galaxies à $z < 0,2$

- 2dF (2 degrees field) 2003

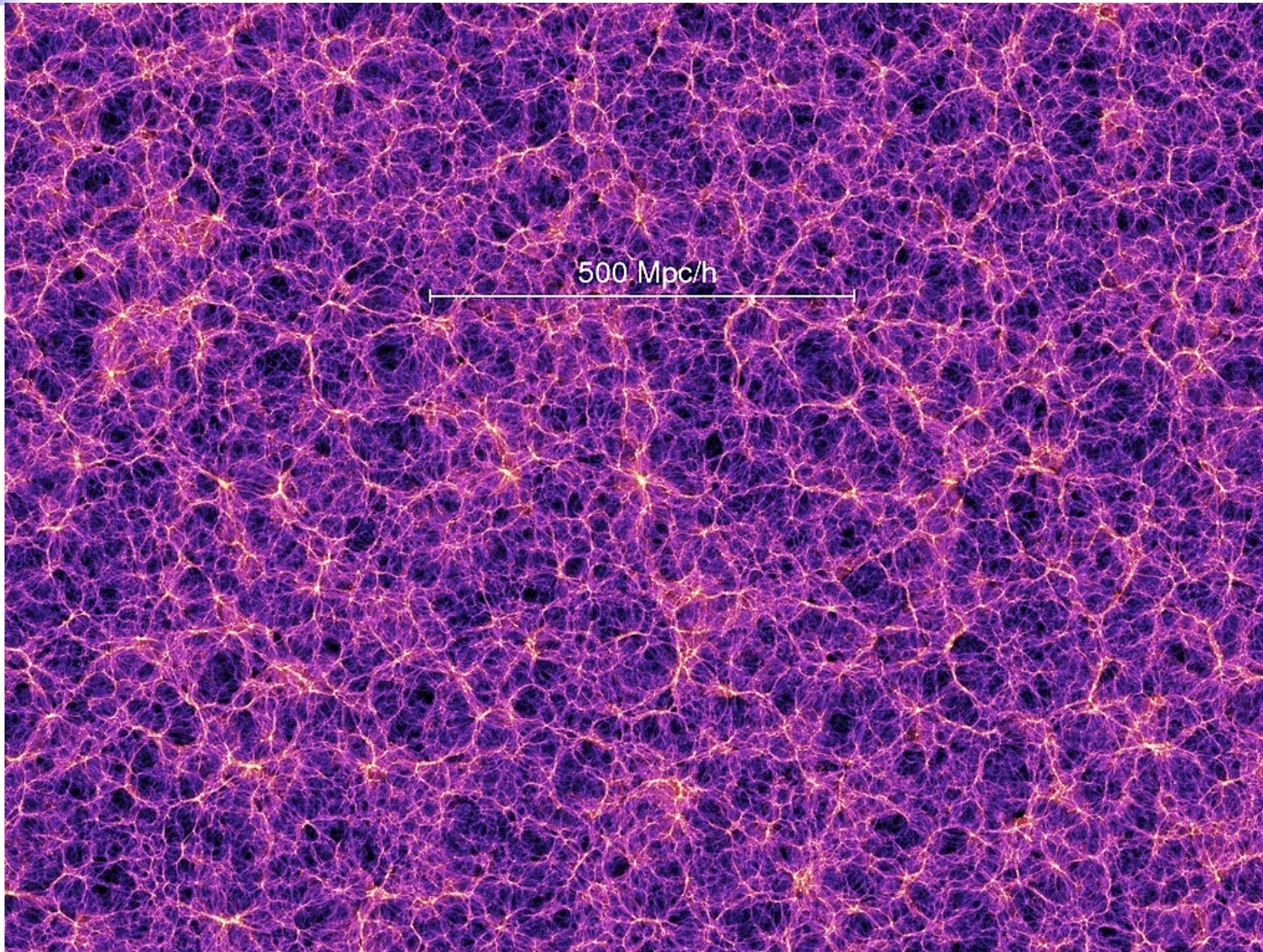
- 250 000 galaxies à $z < 0,3$

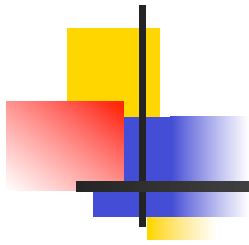
- SDSS (2000-2008)

- 208 millions de galaxies (2D)
- 930 000 galaxies (3D) à $z < 0,15$



Simulation « Millenium » (Virgo consortium)

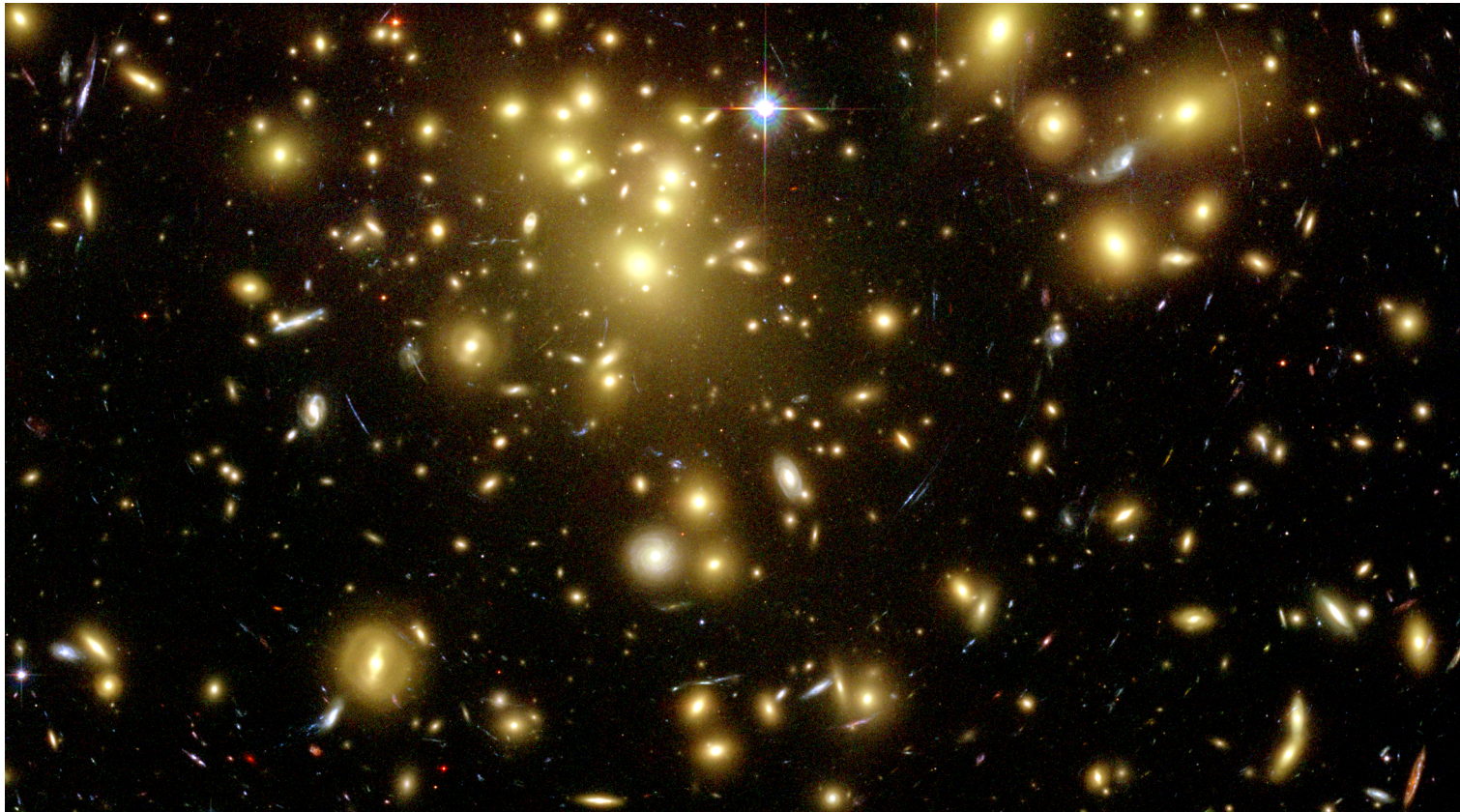




LES AMAS

Amas

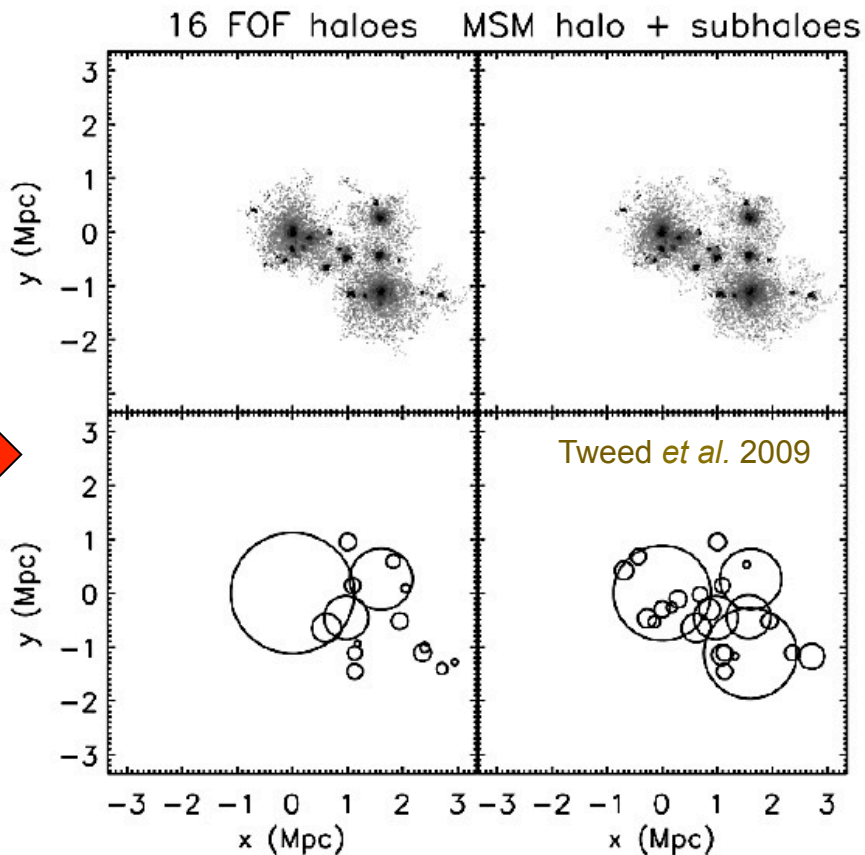
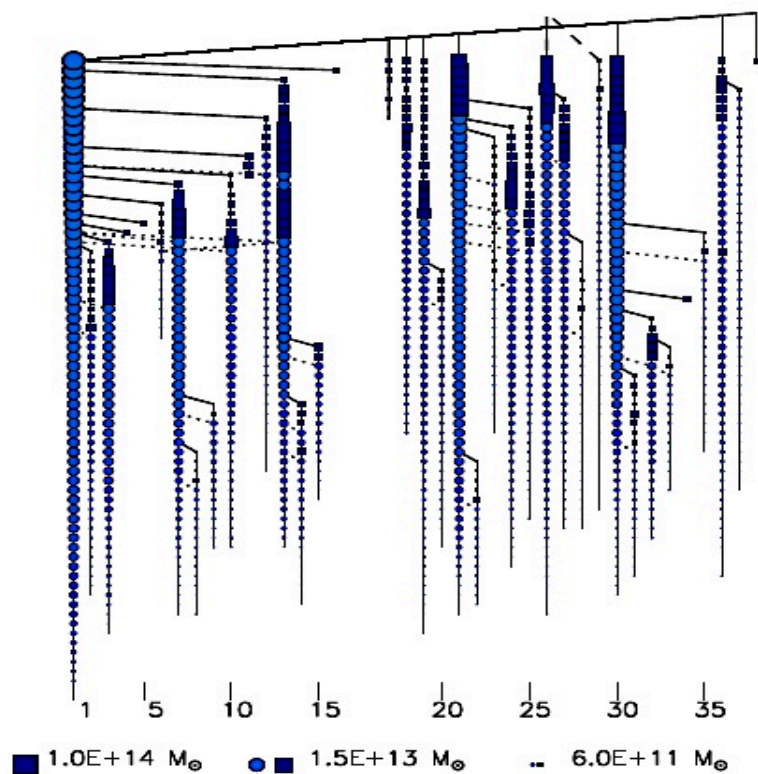
- Abell 1689 (distance 670 Mpc) → où s'arrête l'amas ?



Définitions opératoires

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

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



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

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

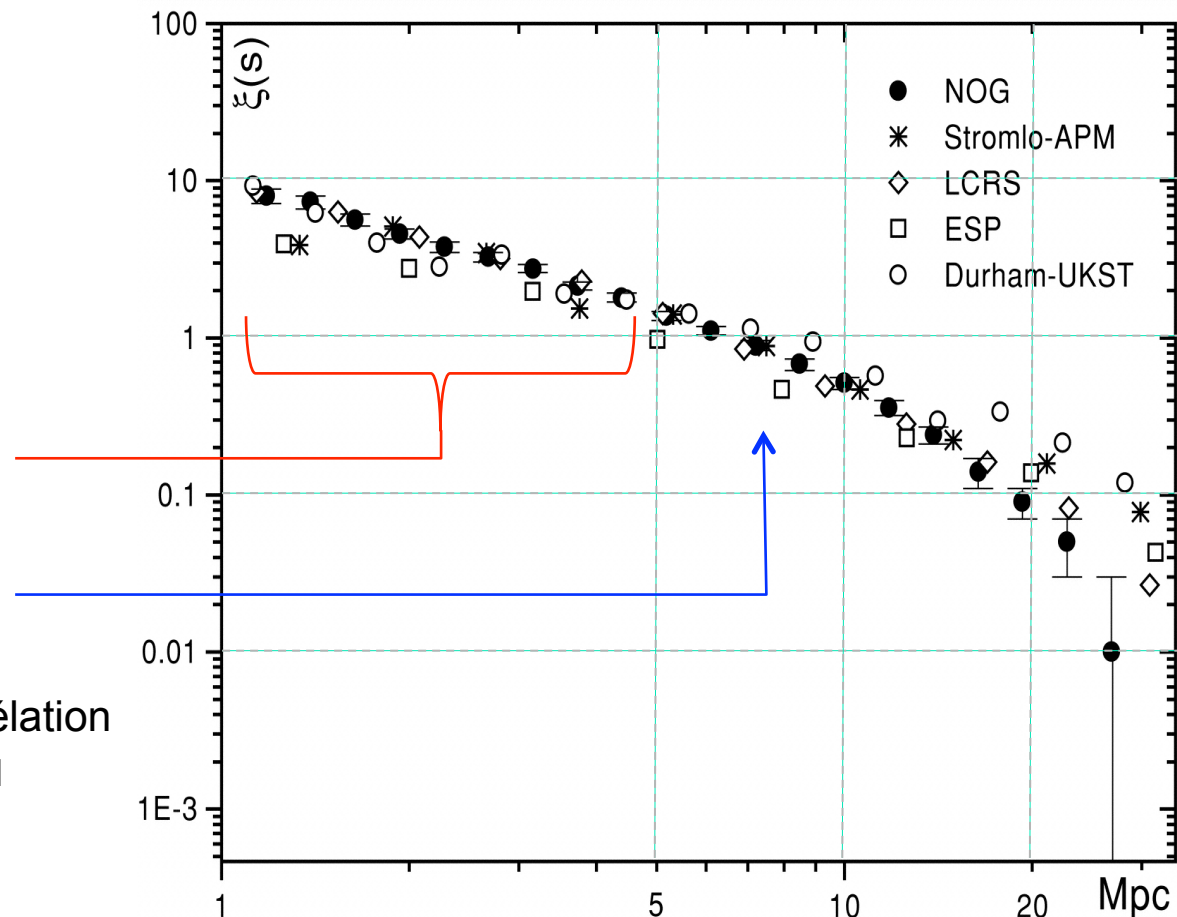
- $s_0 \approx 8$ Mpc
- $\gamma \approx -1,8$

- \Rightarrow existence des amas

- \Rightarrow taille ~ 5 à 10 Mpc

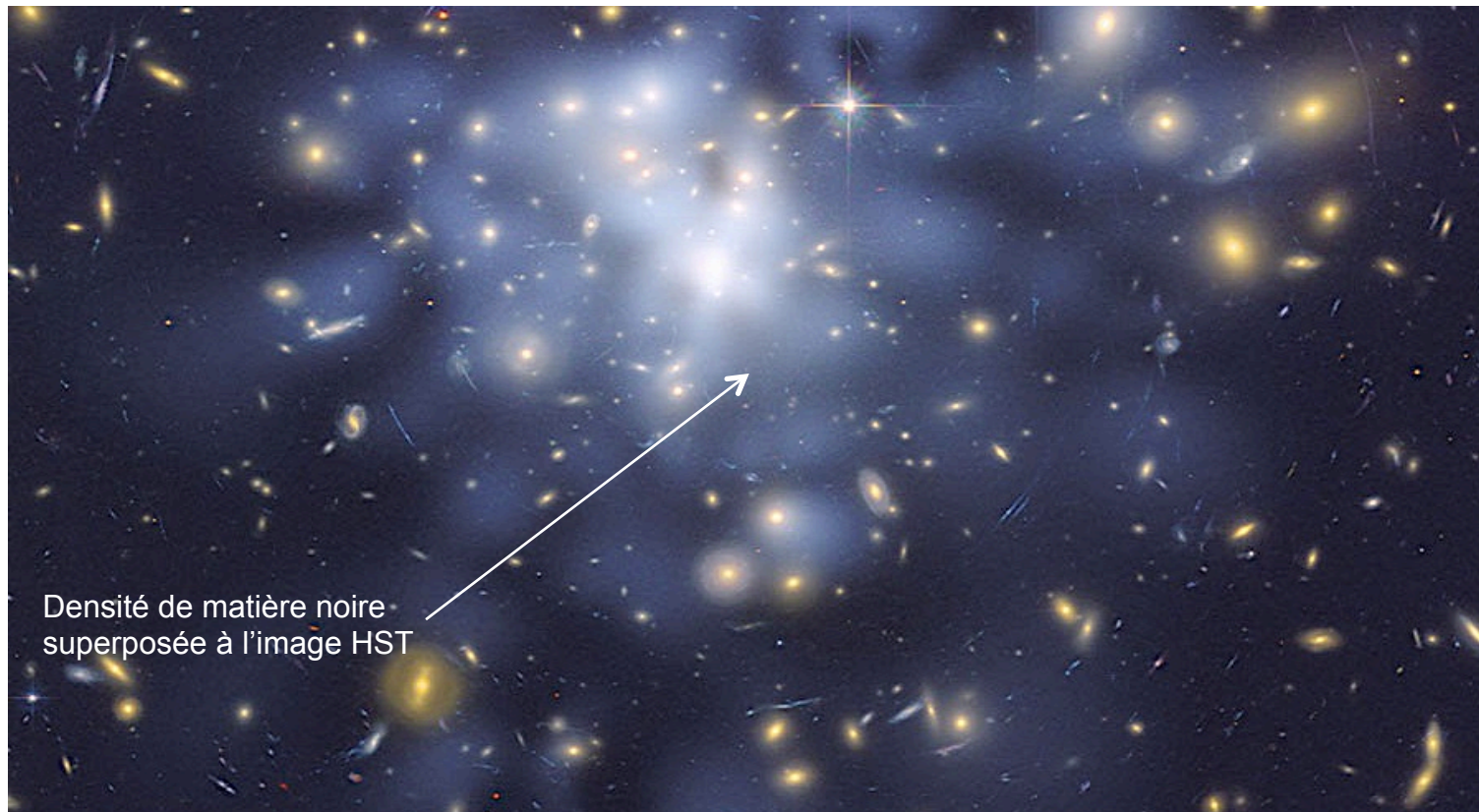
- Autres fonctions de corrélation

- Spirales-spirales, ell-ell
- Amas



Amas et matière noire

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



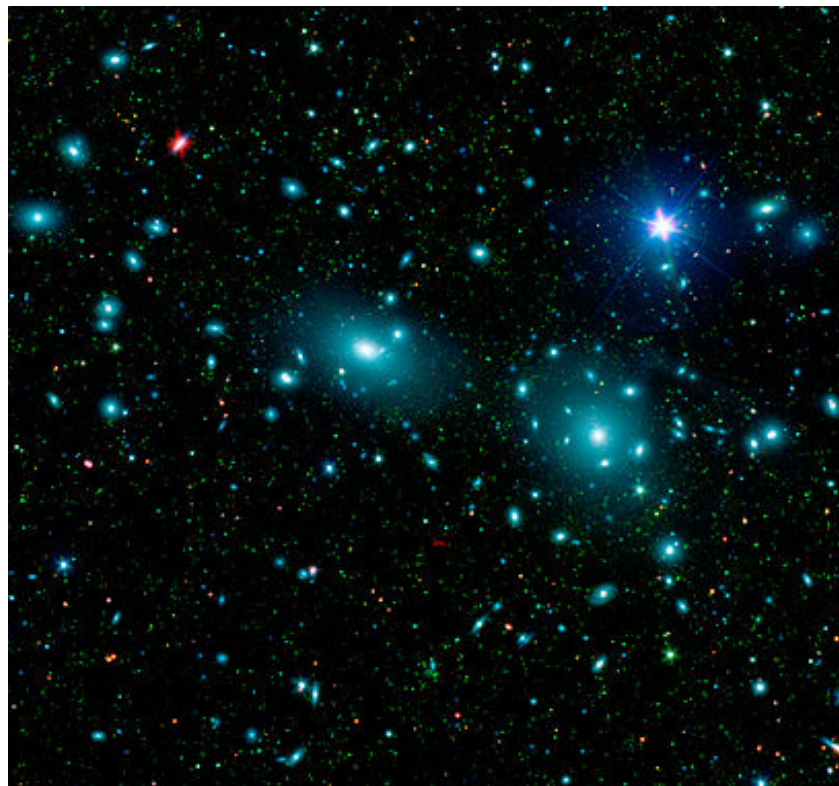
Cinématique des amas de galaxies

- Les galaxies d'un amas se déplacent à plusieurs centaines de km/s les unes par rapport aux autres
- C'est beaucoup trop rapide pour un mouvement entièrement dû à la masse des seules galaxies
- $\text{Masse} \propto \text{Distance} \times \text{Vitesse}^2$
- Premier calcul par Fritz Zwicky dès 1933
 - La masse calculée de l'amas de Coma est des centaines de fois plus grande que la masse totale des galaxies estimée à partir de la lumière émise
- Personne ne le prend au sérieux pendant 40 ans
 - Zwicky a un caractère épouvantable
 - La relation entre lumière et masse des étoiles est imprécise
 - Les amas sont longtemps considérés comme des structures transitoires

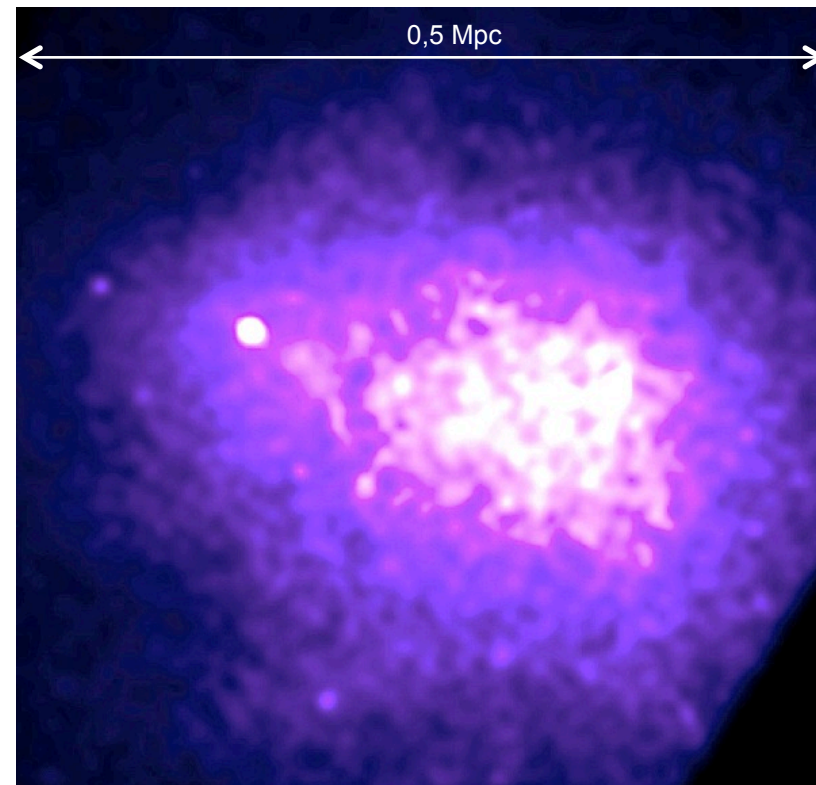


Émission X

- Amas de Coma

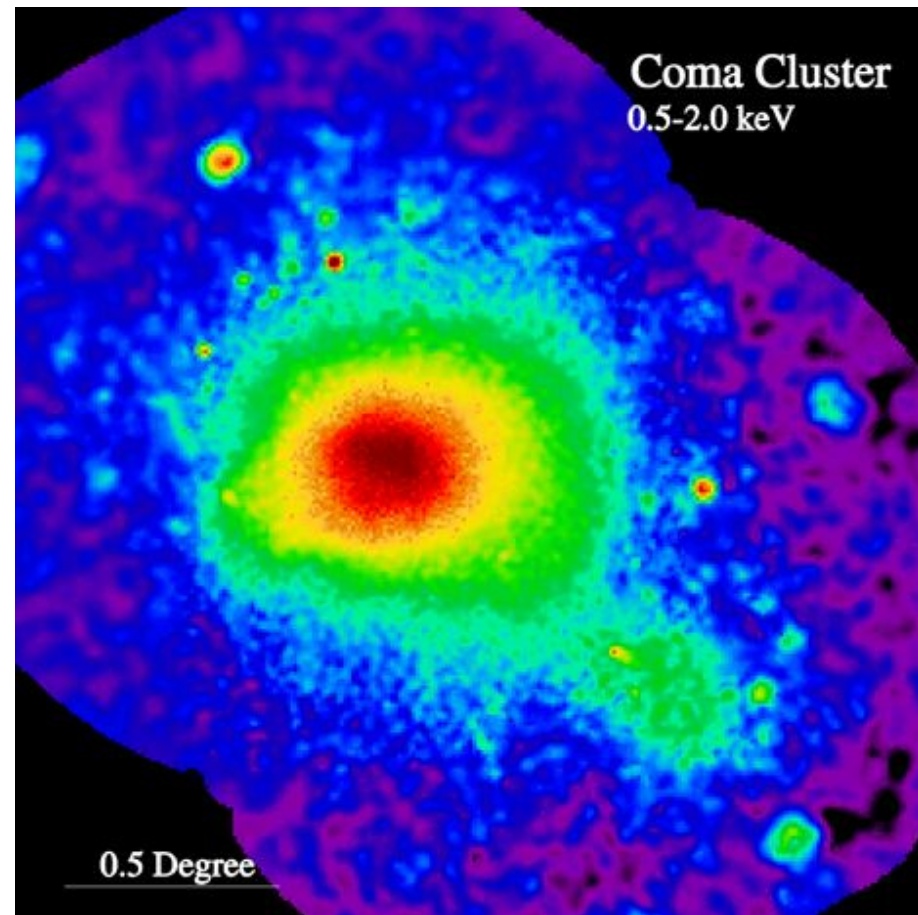


- Gaz chaud **intergalactique** à 10 MK



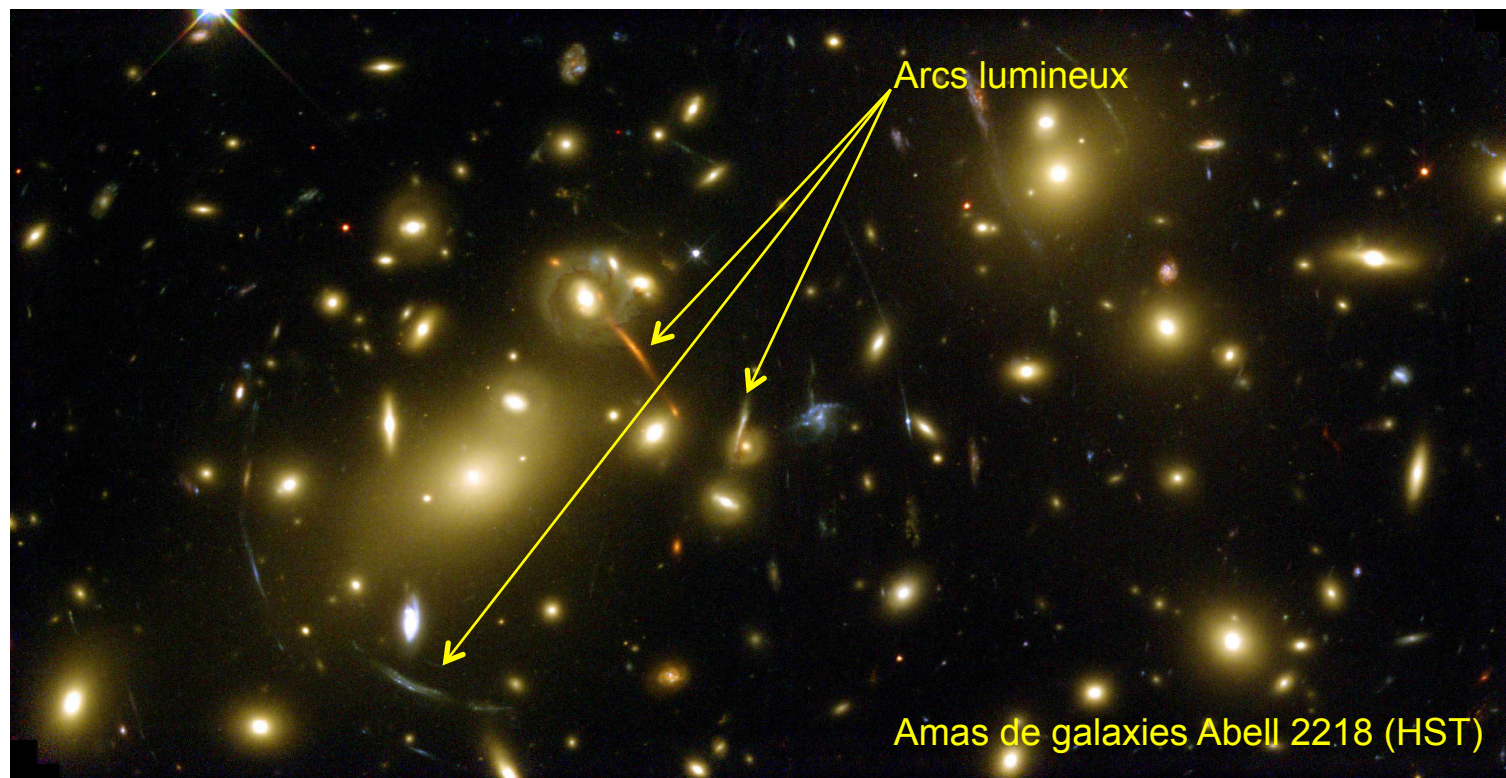
Amas de galaxies : émission en rayons X

- 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

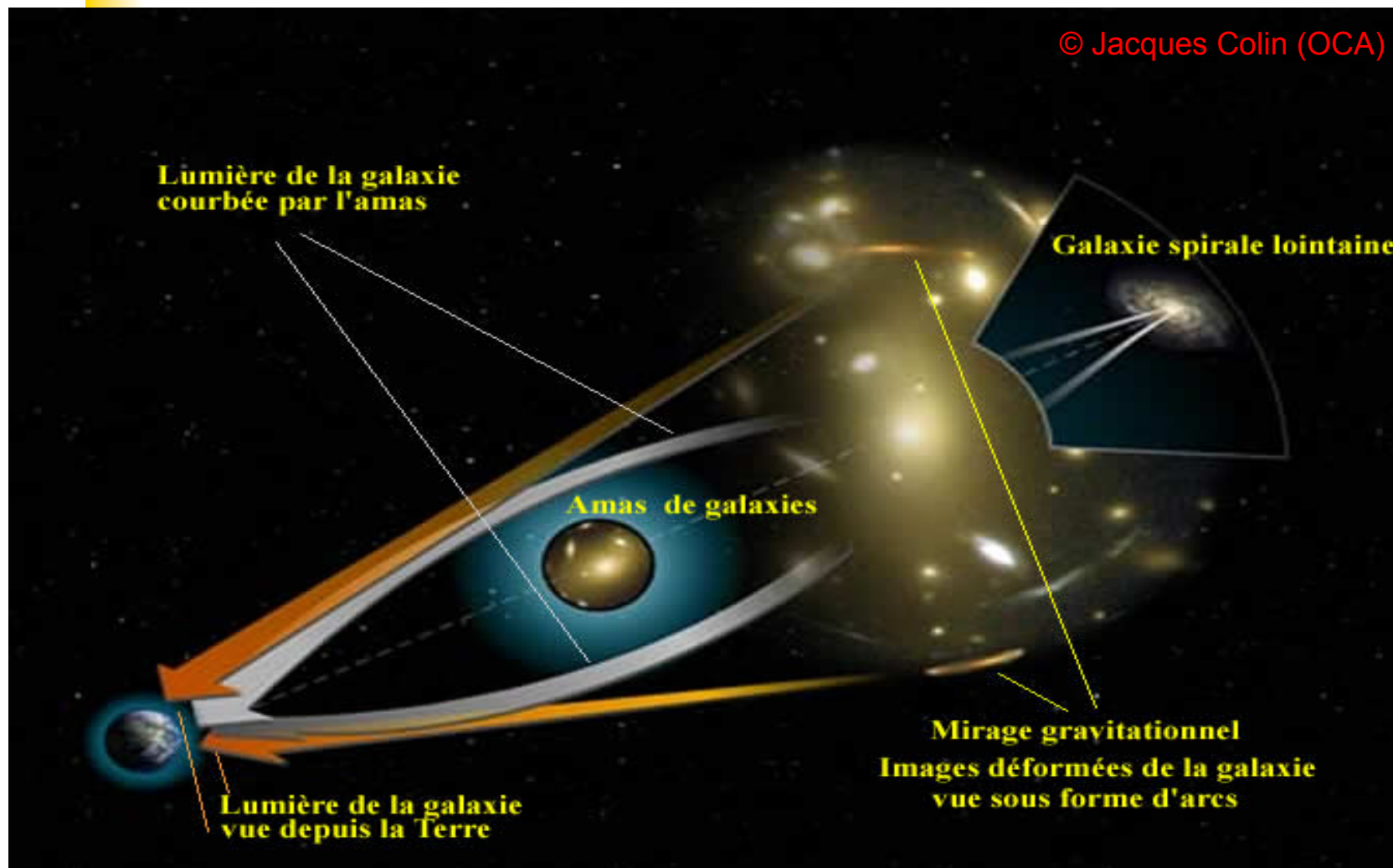


Amas de galaxies : distorsions gravitationnelles

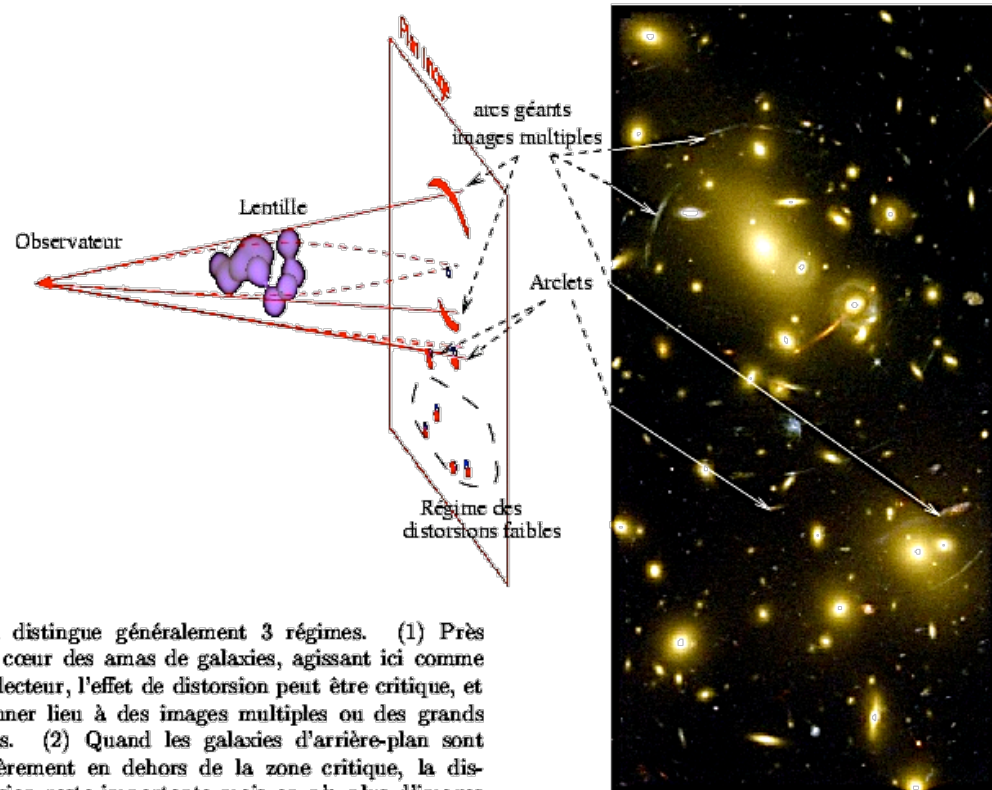
- Les masses dévient les rayons lumineux, déformant l'image des galaxies situées beaucoup plus loin → arcs lumineux



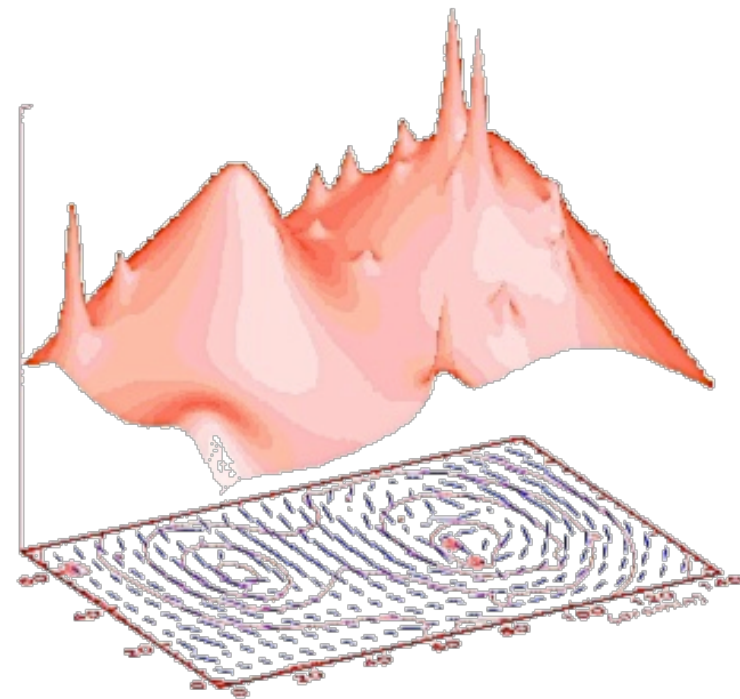
Les lentilles gravitationnelles



Reconstruction



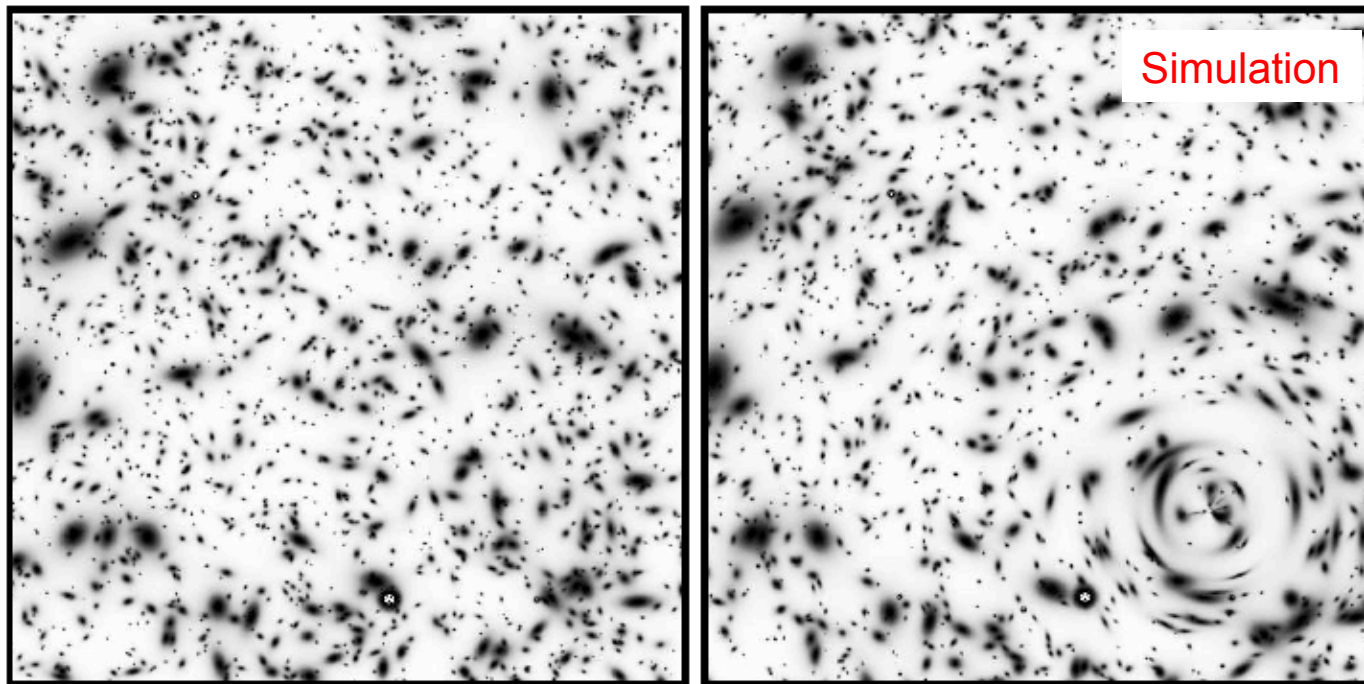
On distingue généralement 3 régimes. (1) Près du cœur des amas de galaxies, agissant ici comme déflecteur, l'effet de distorsion peut être critique, et donner lieu à des images multiples ou des grands arcs. (2) Quand les galaxies d'arrière-plan sont légèrement en dehors de la zone critique, la distorsion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



© Yannick Mellier (IAP)

A très grande échelle : le cisaillement

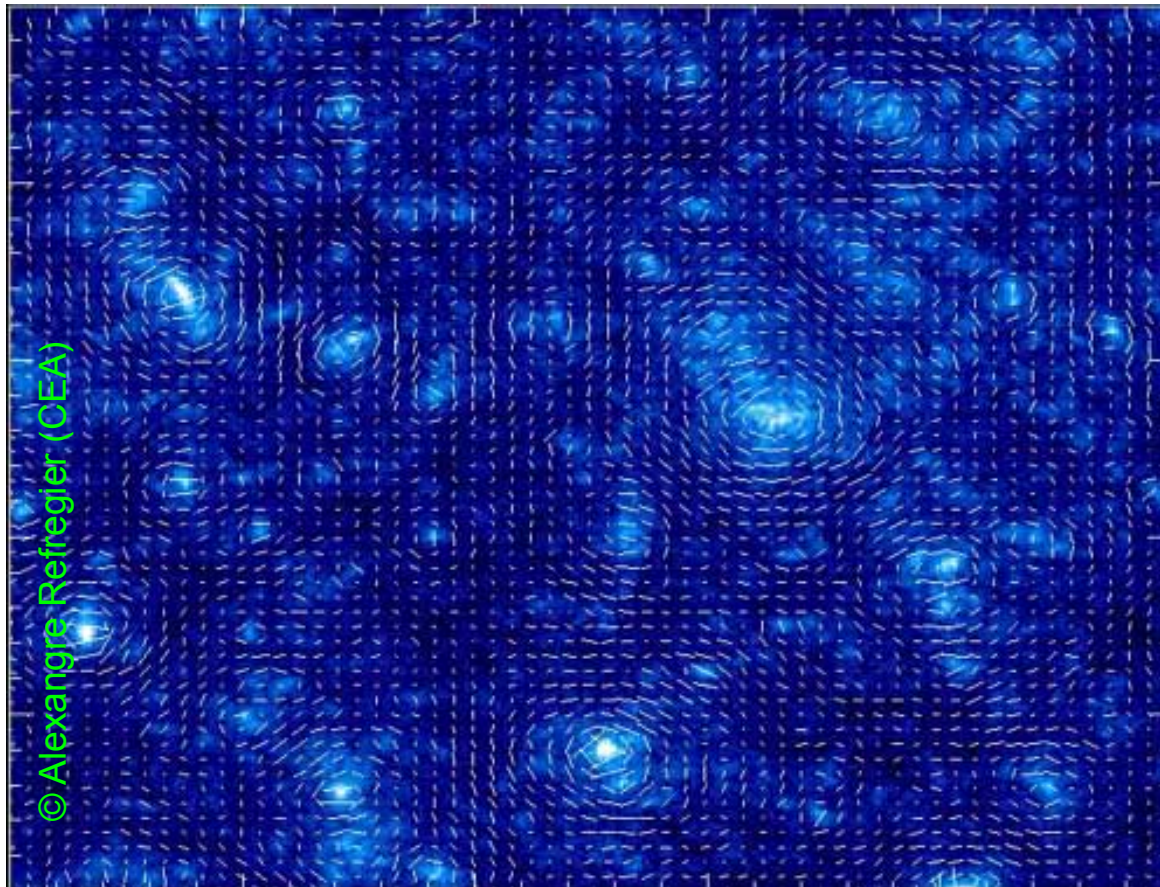
- Les rayons lumineux passant assez loin d'une concentration de masse comme un amas de galaxies déforment légèrement les images des objets en arrière-plan
- On parle de cisaillement gravitationnel (ou weak lensing)



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

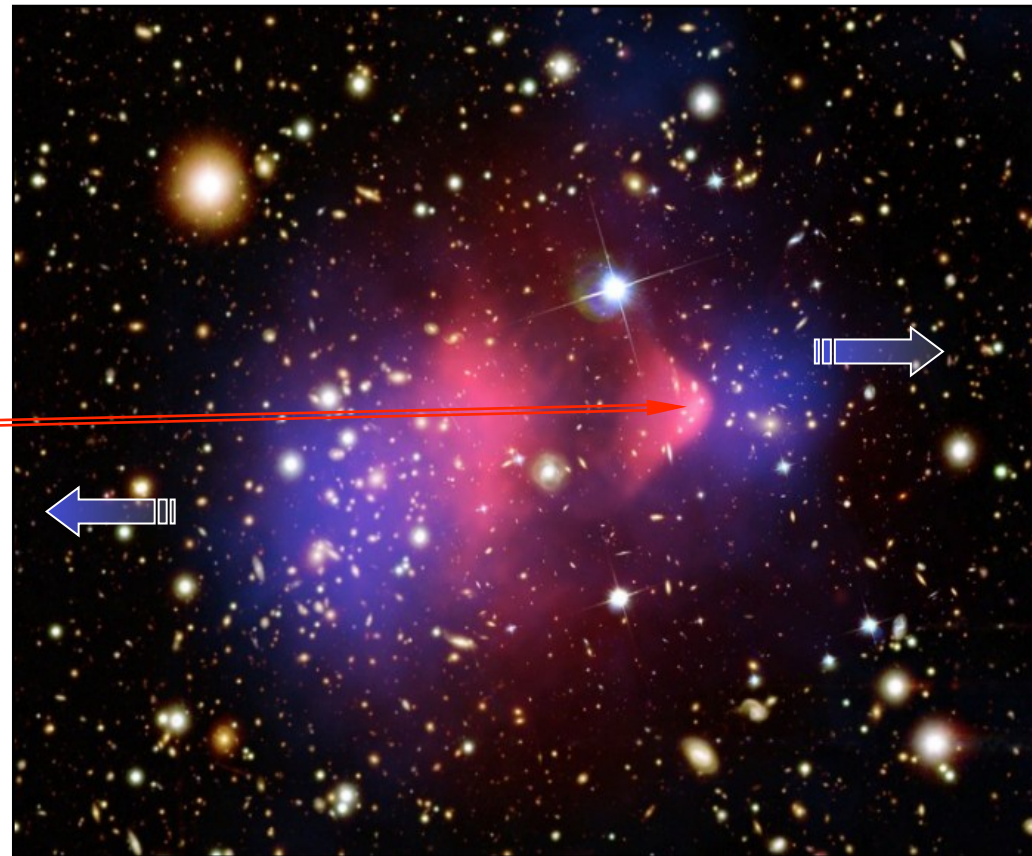
Le cisaillement trace la matière noire

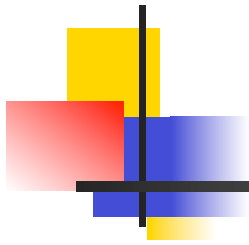
- L'analyse statistique de la **forme** et de l'**orientation** des galaxies permet de reconstituer la carte de la matière noire sous-jacente



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 ?





Merci de votre attention !

