

# Astrophysique

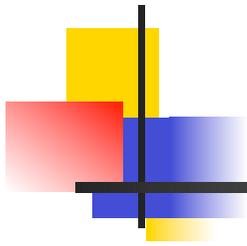
## 19 – Les amas de galaxies



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

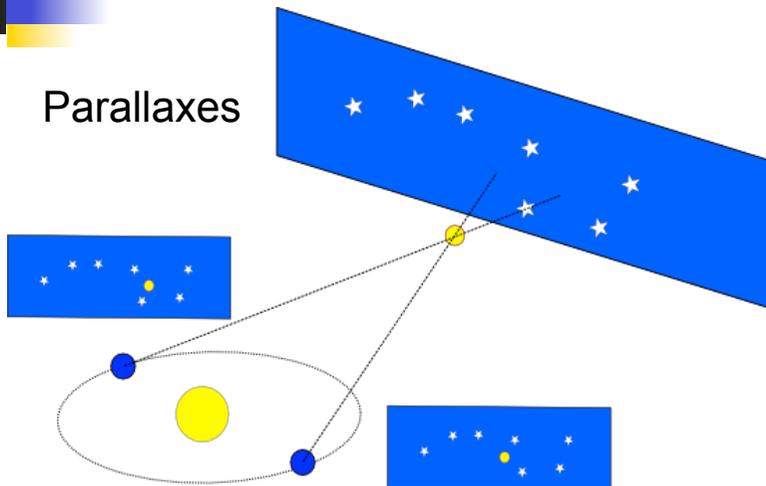
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



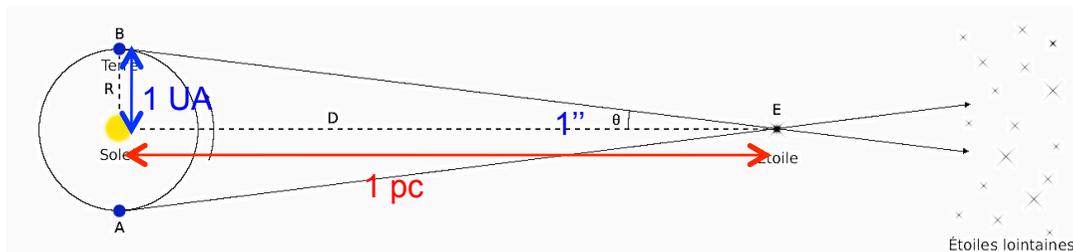
# ÉCHELLES DE DISTANCE

# Dans la Galaxie proche

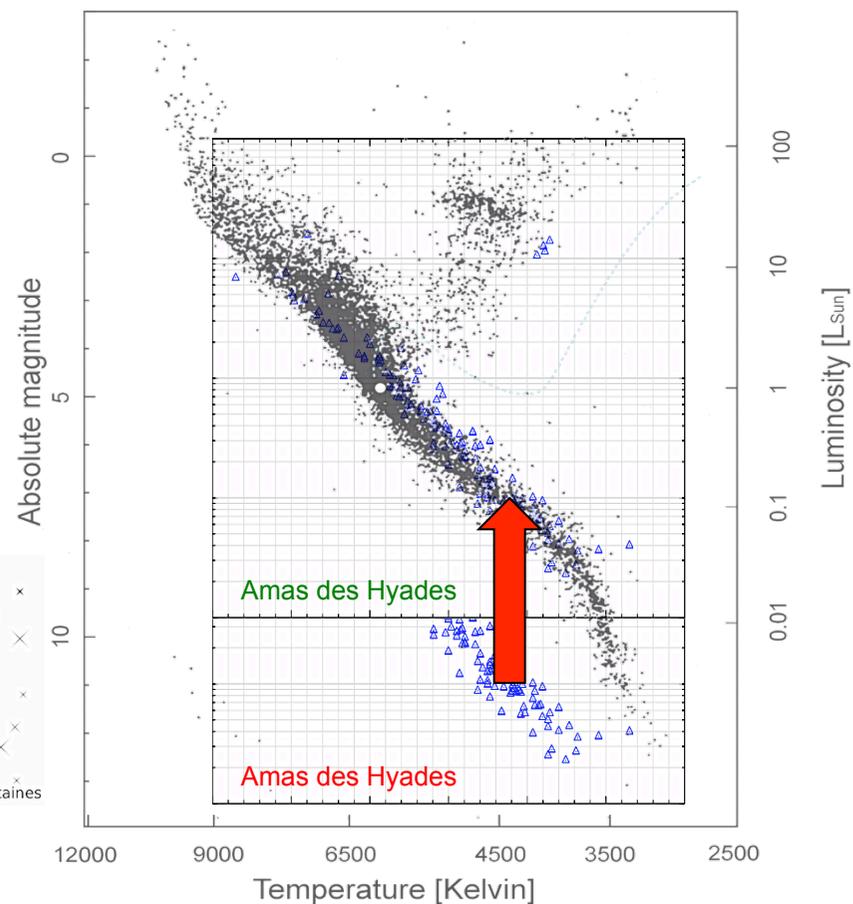
- Parallaxes



- Rayon terrestre → UA → parsec

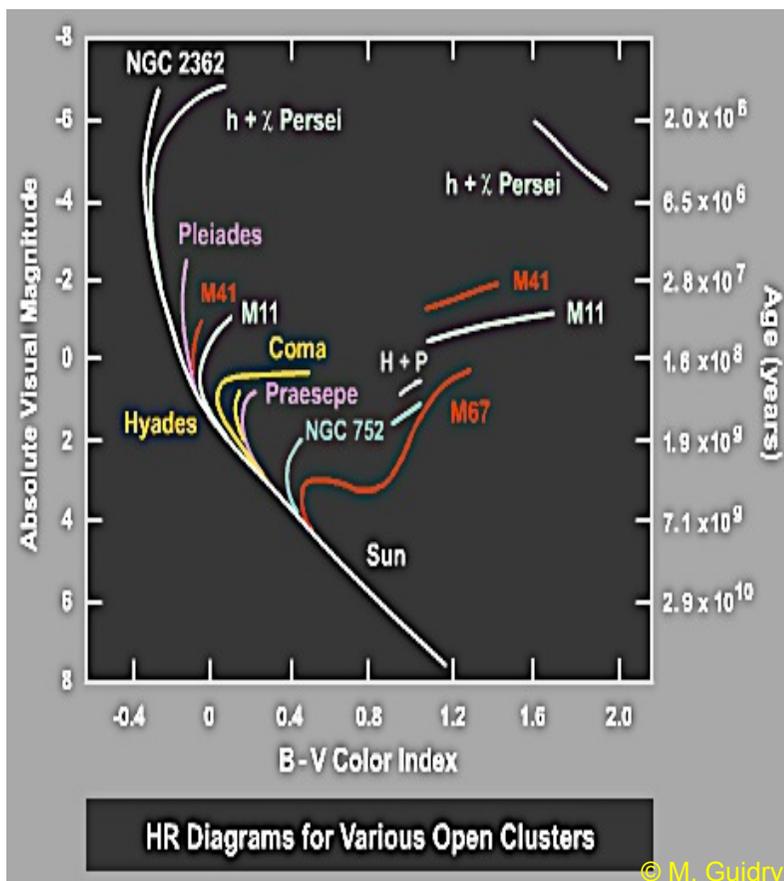


- Ajustement du diagramme de Hertzsprung-Russell → Magnitude absolue → distance



# Dans la Galaxie

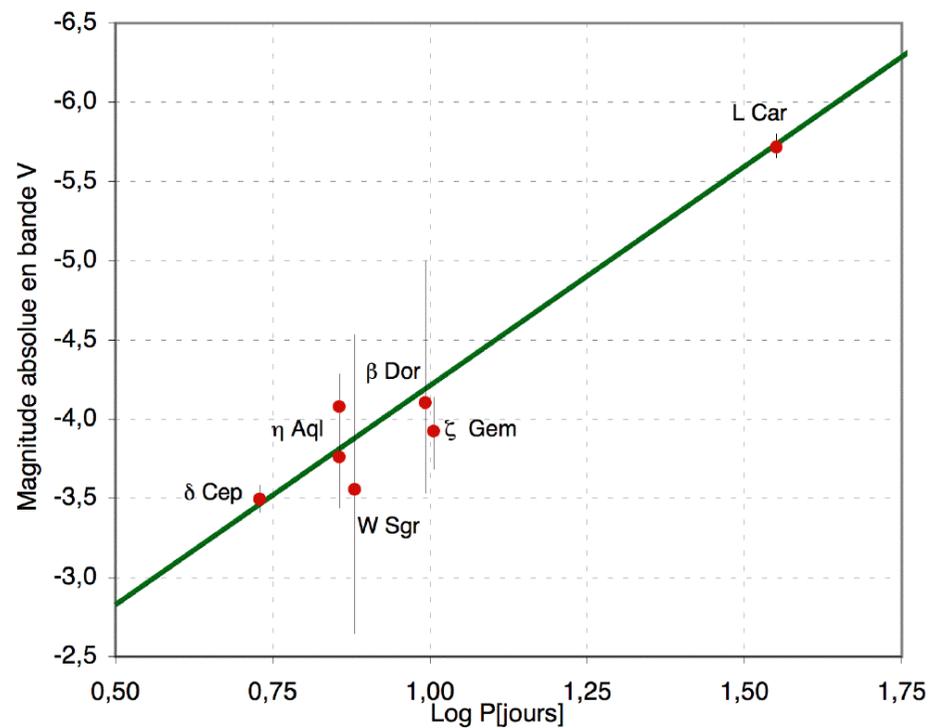
- Ajustement du diagramme de Hertzsprung-Russell



- Céphéides

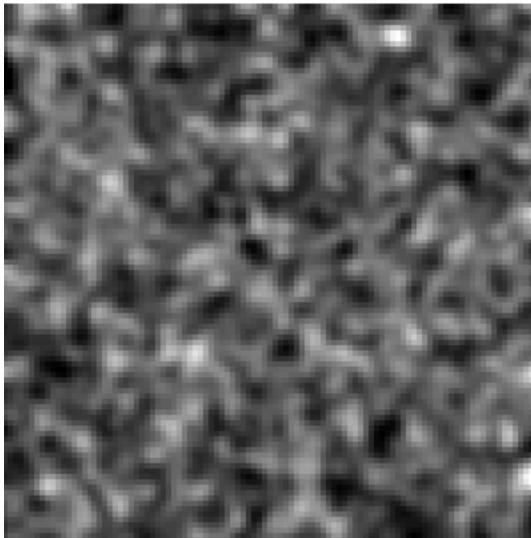
- Période → magnitude absolue  $M$
- Magnitude apparente  $m$  → distance  $D$

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

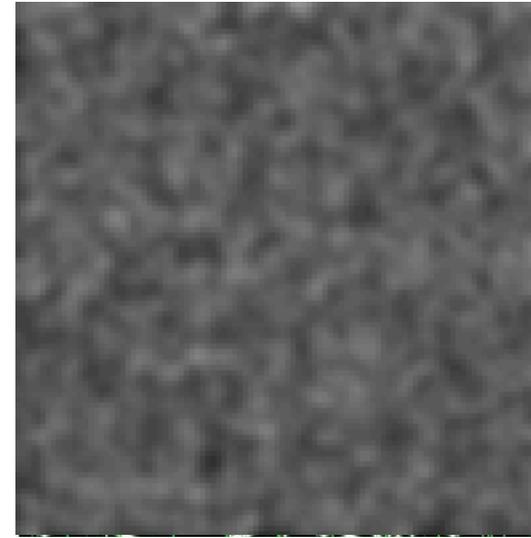


## Fluctuations de brillance de surface

- 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**



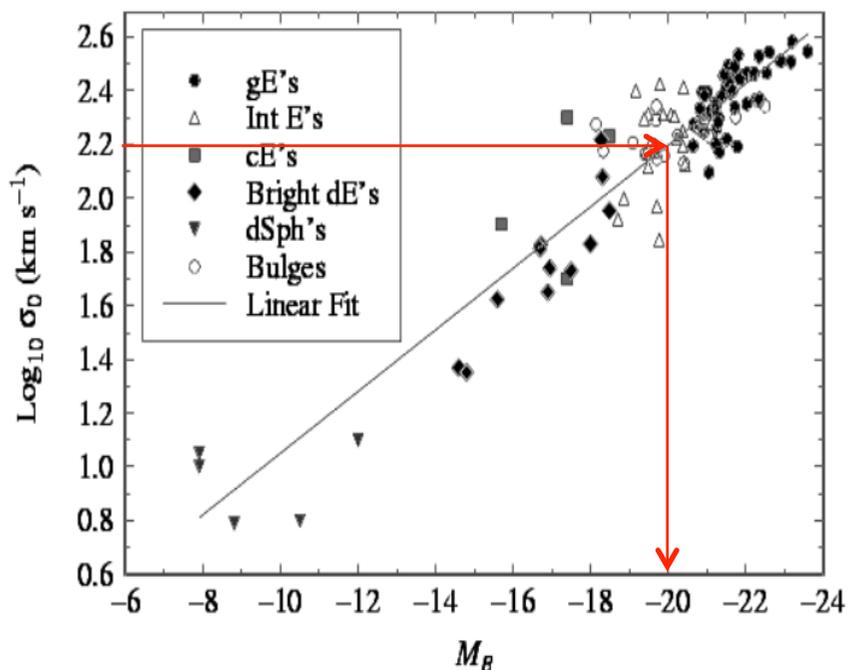
$$\langle L \rangle = \text{constante}$$
$$\langle L^2 \rangle - \langle L \rangle^2 \propto 1/D^2$$



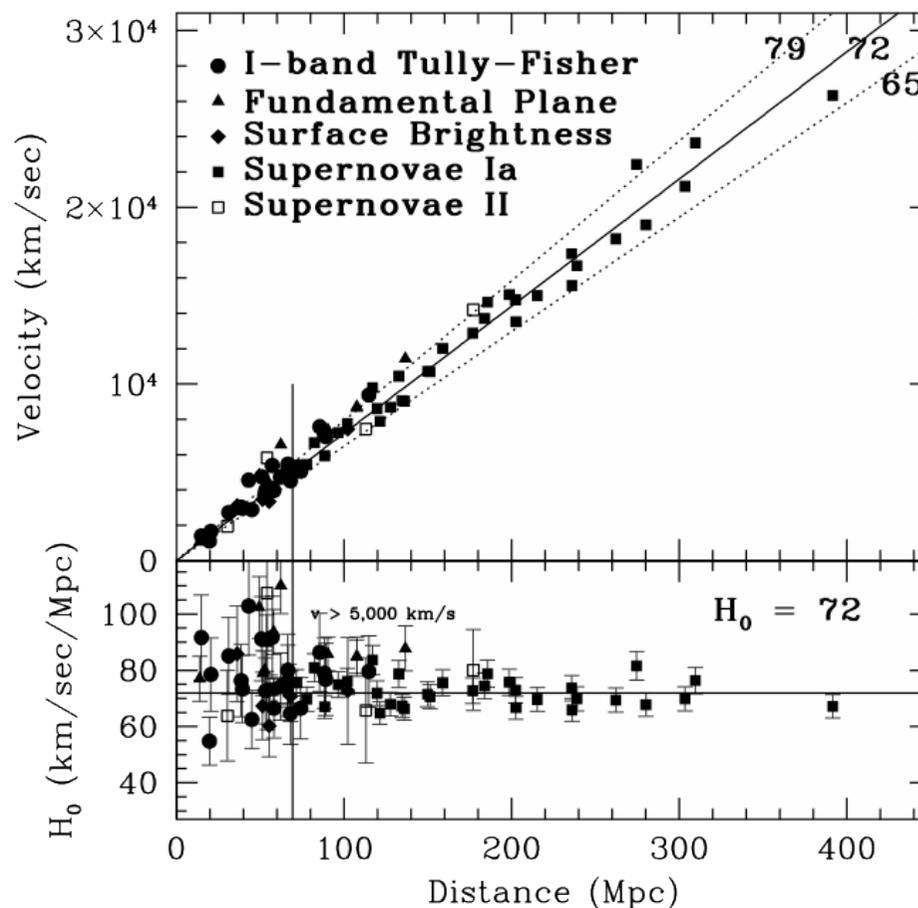
# Galaxies et amas proches

## ■ Tully-Fisher & Faber-Jackson

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

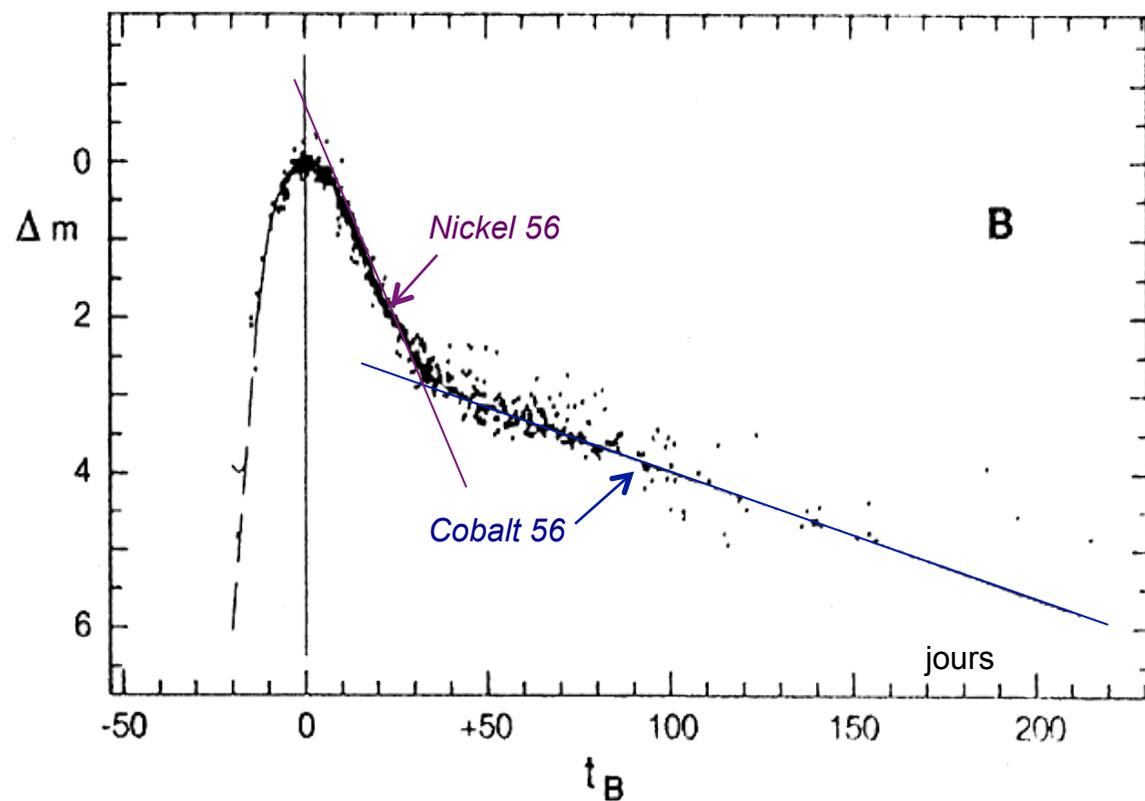


## ■ $\rightarrow$ Loi de Hubble

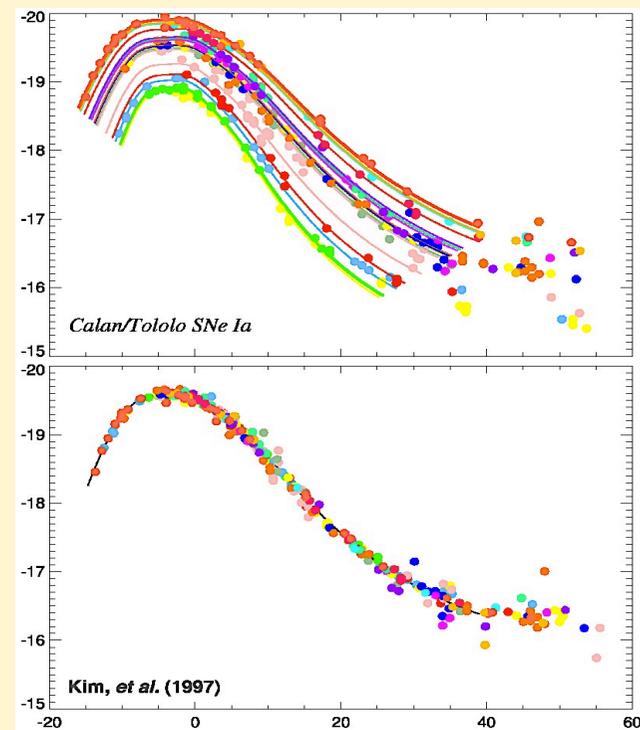


# Supernovae Ia

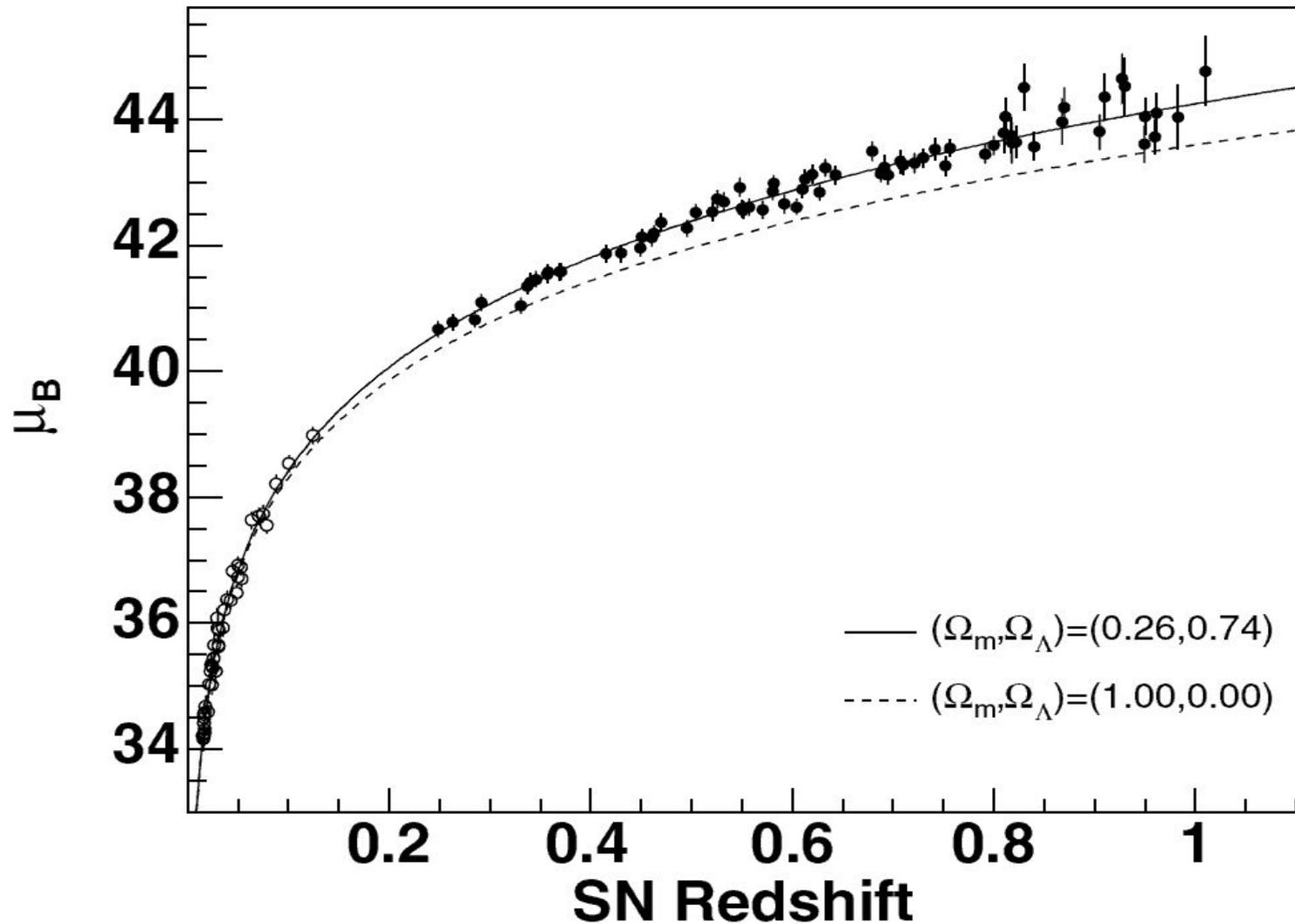
- Explosion d'une naine blanche C-O atteignant la masse de Chandrasekhar  
→ « chandelle standard »

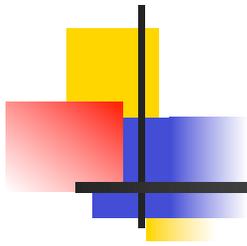


- Variations  $\sim 10\%$   
■ → corrigées via corrélation hauteur-largeur

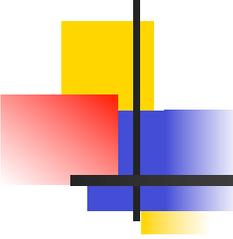


## Plus loin encore : supernovae et loi de Hubble





# DES GALAXIES PROCHES AUX AMAS LOINTAINS



## Groupes, amas, superamas de galaxies...

---

### Groupes

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

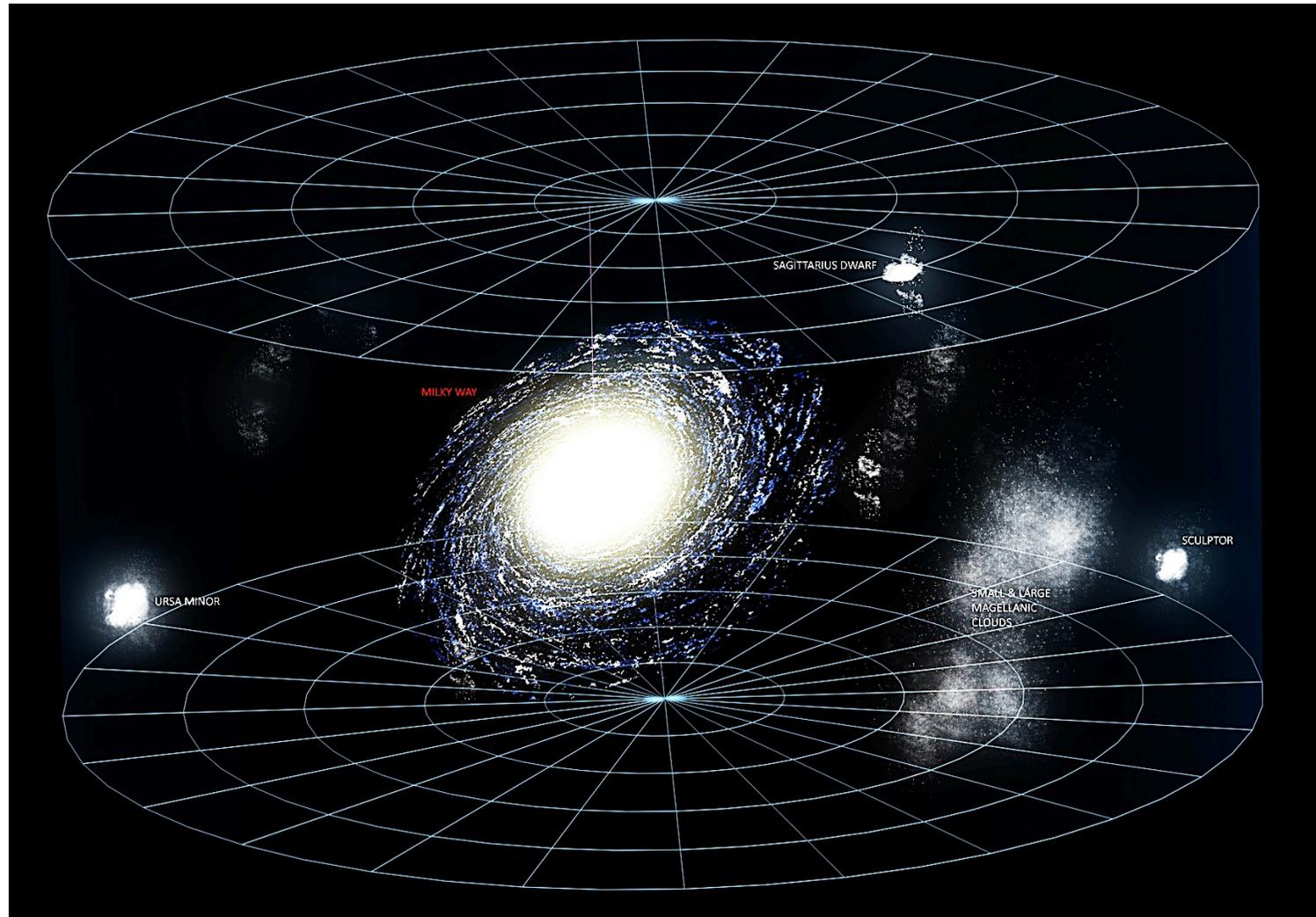
### Amas

- 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 ~  $10^{16} M_{\odot}$

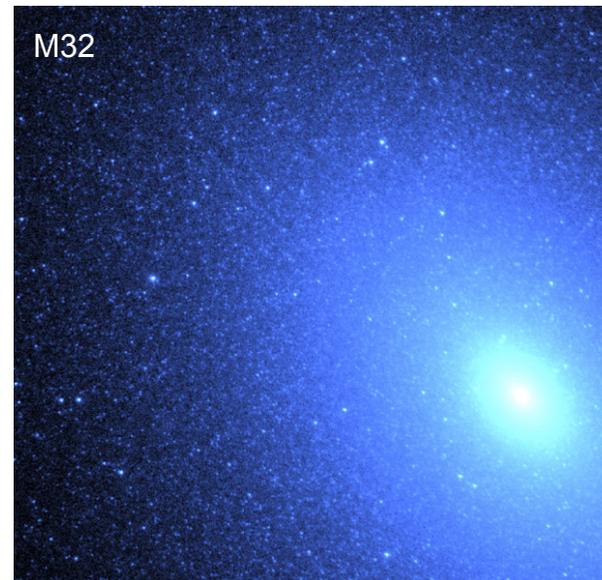
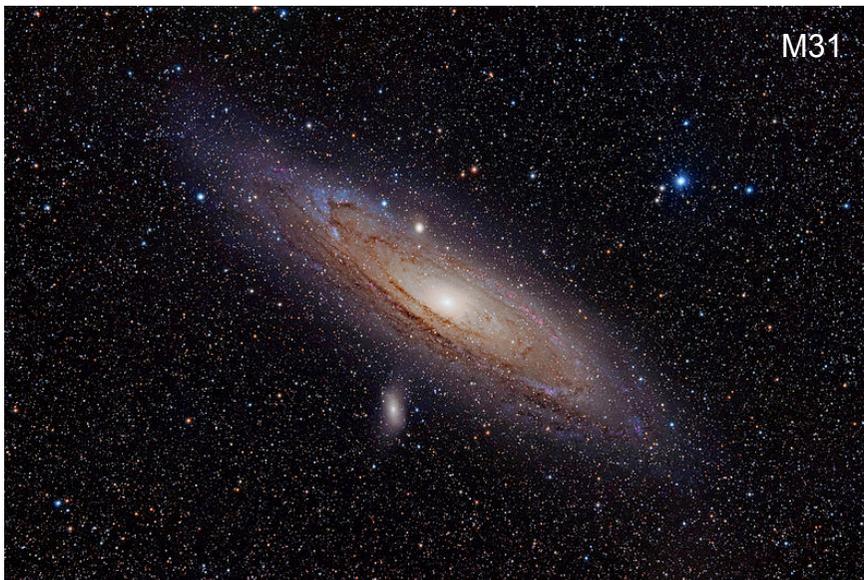
# La Voie lactée et ses satellites



# 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**  $\sim 10^{13} M_{\odot}$

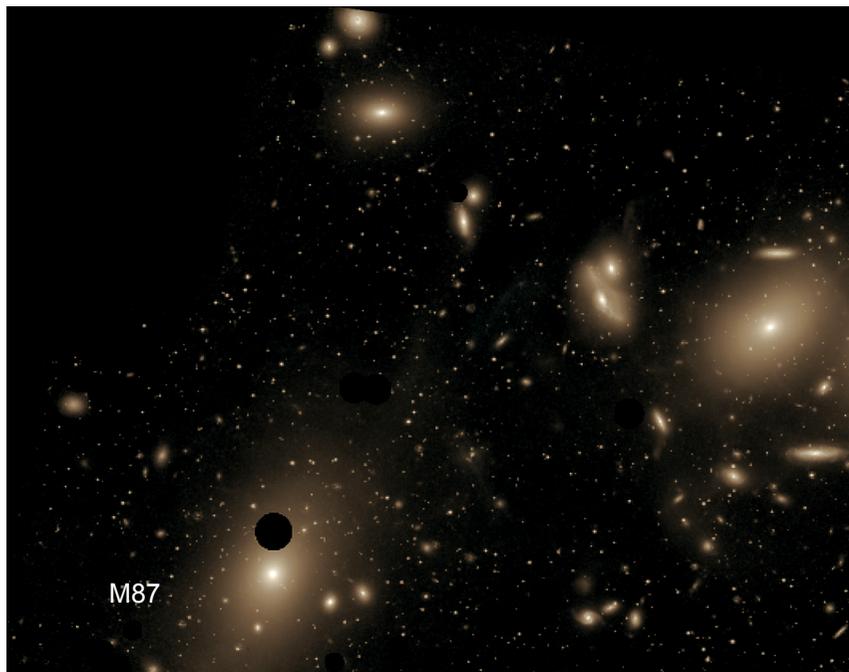
	Rayon (kpc)	Masse ( $M_{\odot}$ )	Luminosité ( $L_{\odot}$ )	Distance (kpc)
Voie lactée	15	$2 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{10}$	
M31	25	$3 \times 10^{11}$	$3 \times 10^{10}$	760
M32	1	$1,2 \times 10^9$	$4 \times 10^8$	760
M33	15	$1,1 \times 10^{10}$	$3 \times 10^9$	830



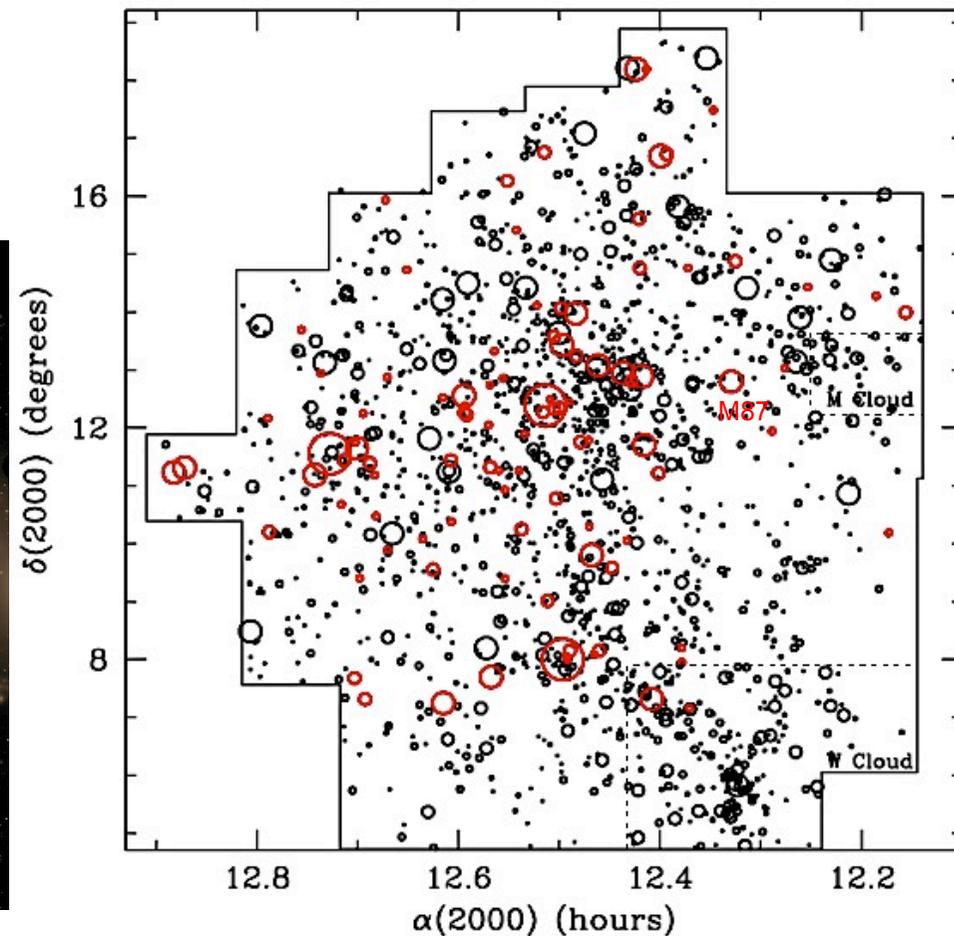


# L'amas de la Vierge (*Virgo*)

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



- Virgo (*Côté et al. ApJ2004*)



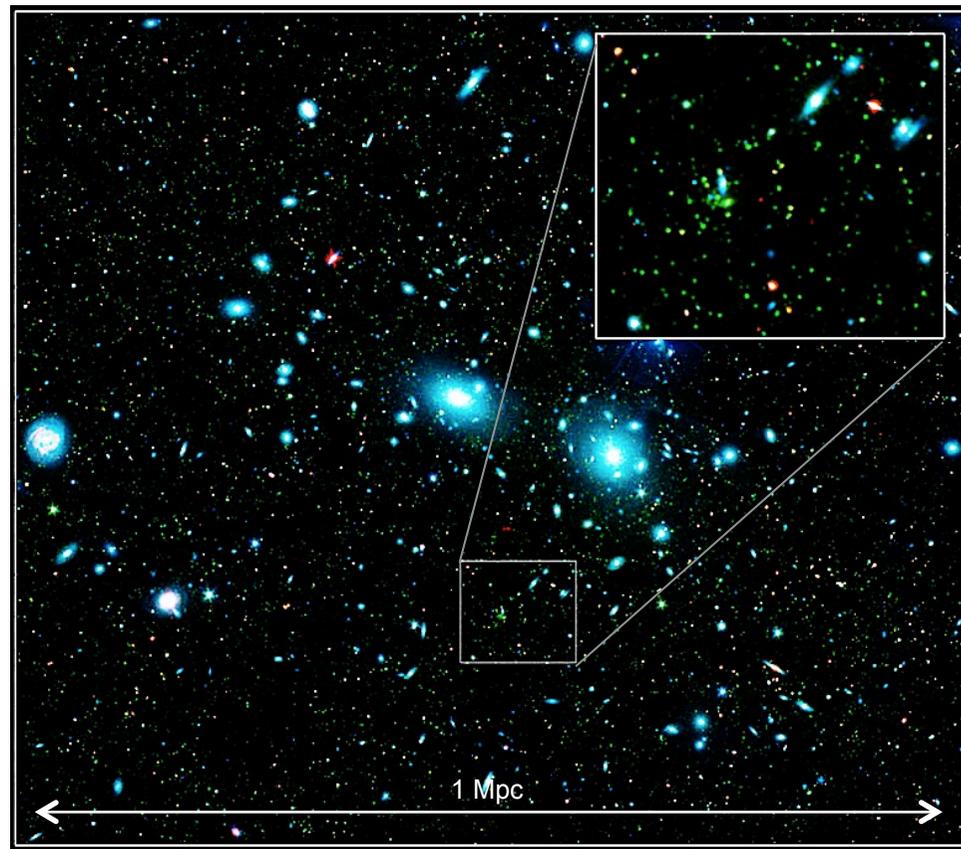
# Le superamas de Coma

- Coma (*Abell 1656*)
  - distance  $\sim 100$  Mpc
  - $> 800$  galaxies elliptiques massives
  - $> 30\,000$  galaxies naines
  - rayon  $\sim 5$  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

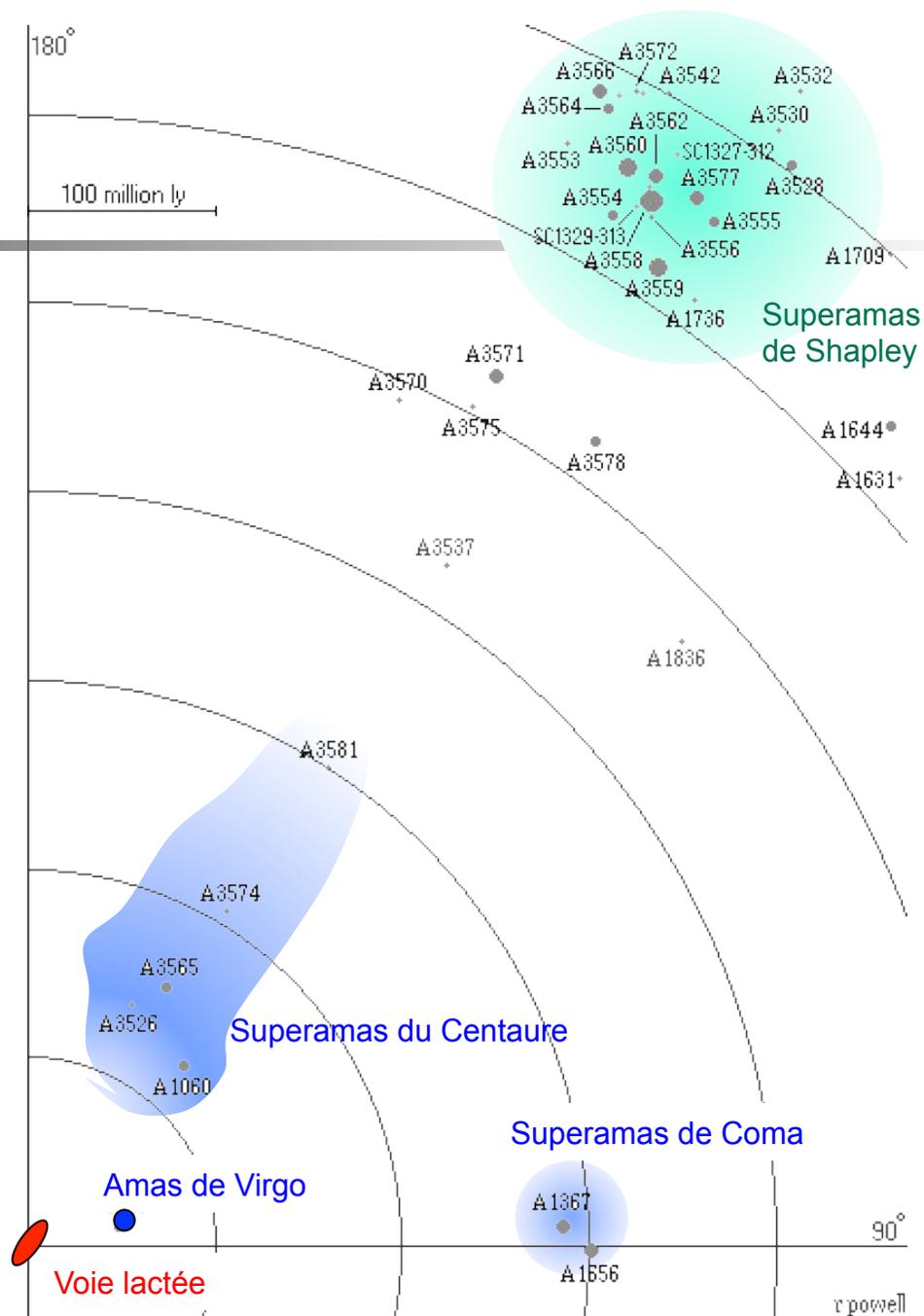


- Région **centrale** de l'amas de Coma (SDSS [bleu] & Spitzer [vert] 2007)



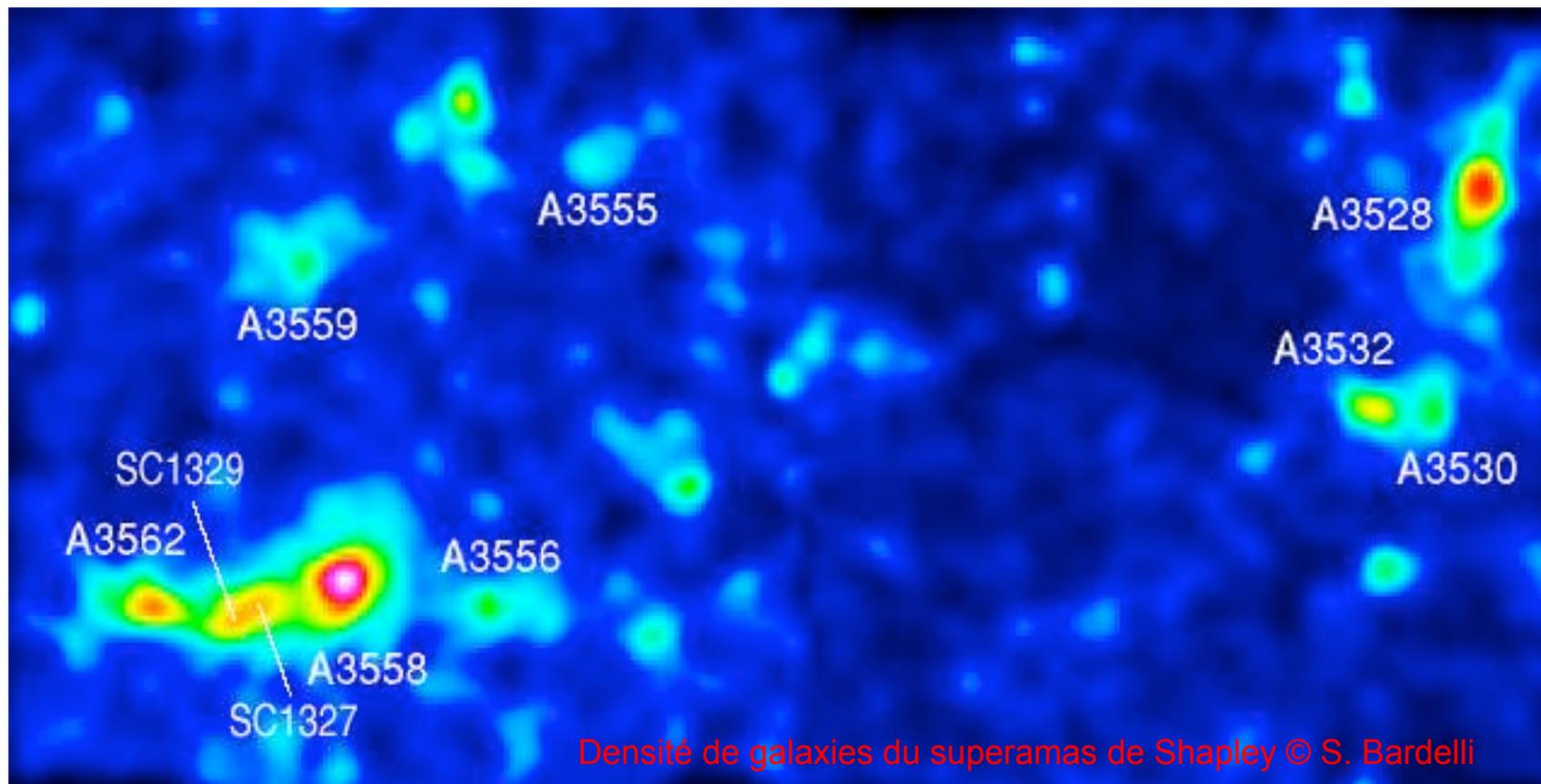
# Notre voisinage

- 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



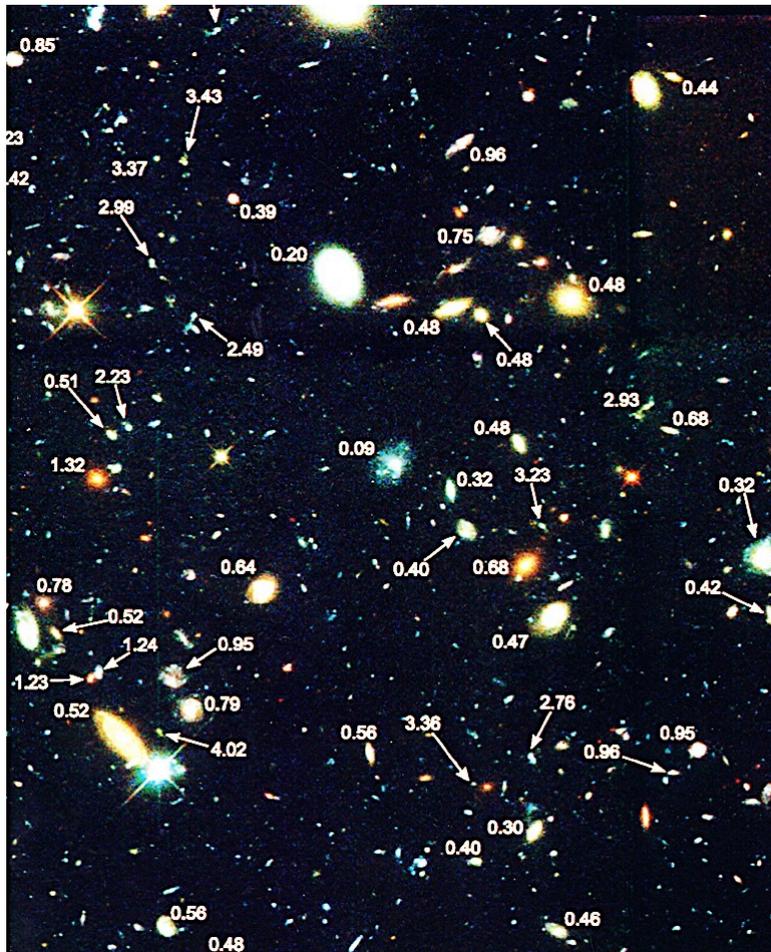
## Le superamas de Shapley

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



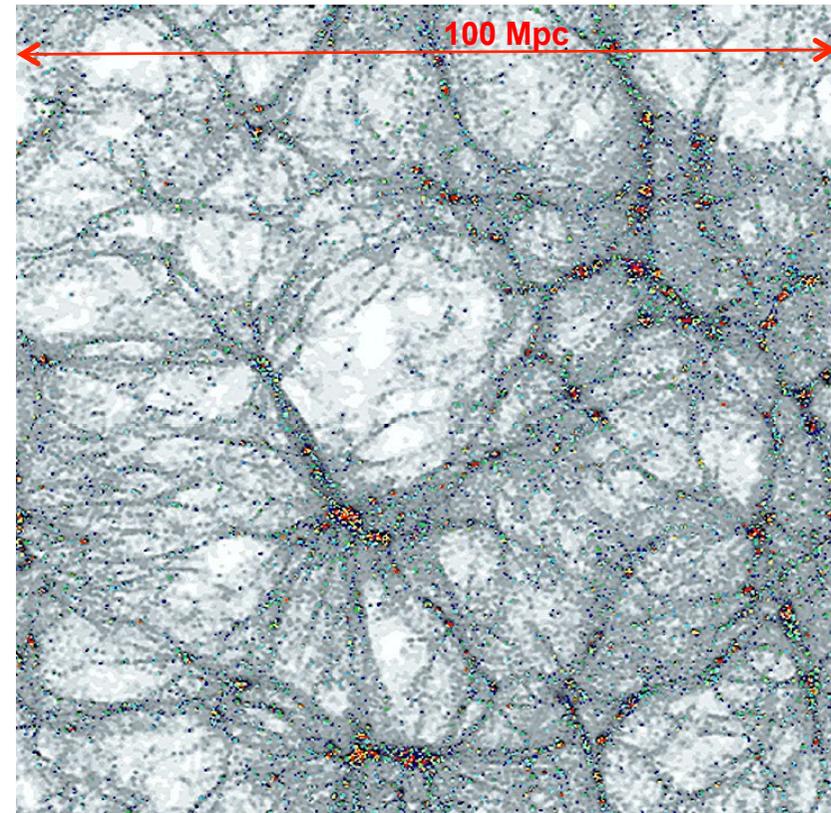
# L'univers à grande échelle

- Hubble Deep Field



- Comparaison avec les simulations

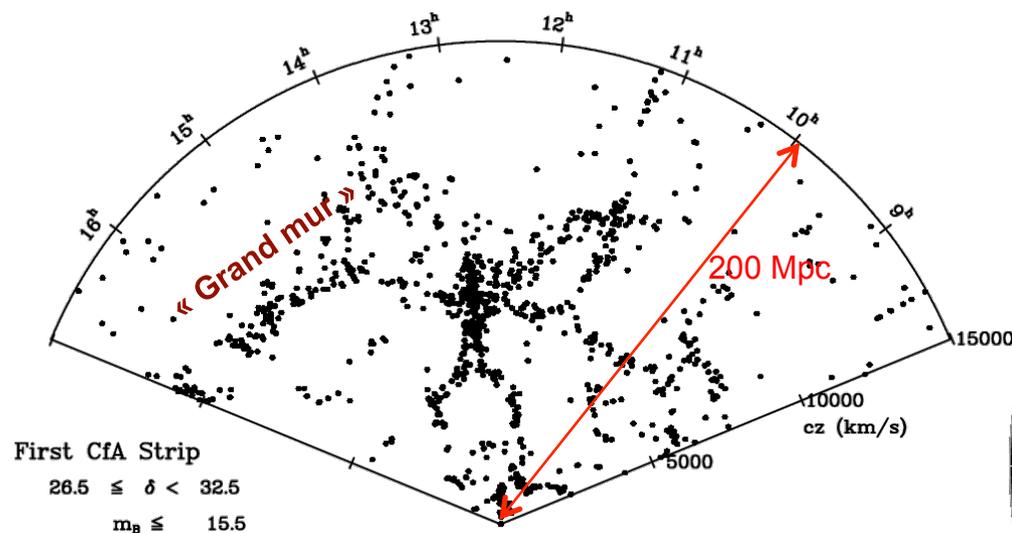
- matière noire en gris
- galaxies elliptiques en rouge, spirales en vert, irrégulières en bleu



# Sondages 3D

- CfA (1978)

- 20 000 galaxies à  $z < 0,05$



- Las Campanas redshift survey (1996)

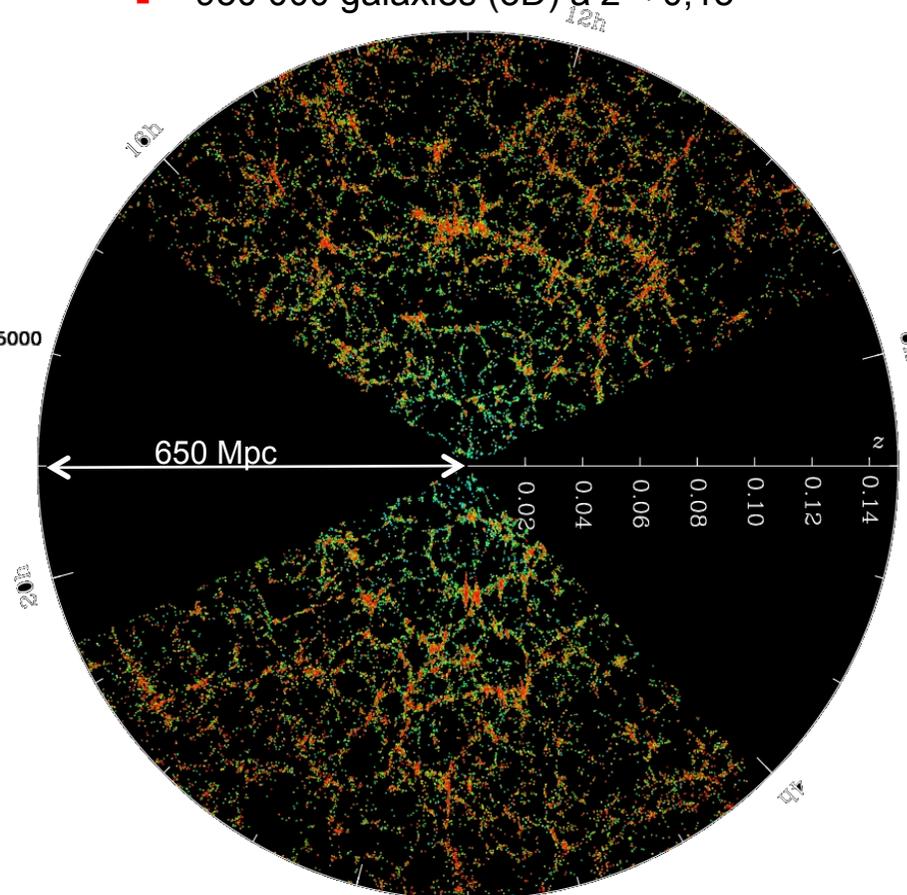
- 25 000 galaxies à  $z < 0,2$

- 2dF (2 degrees field) 2003

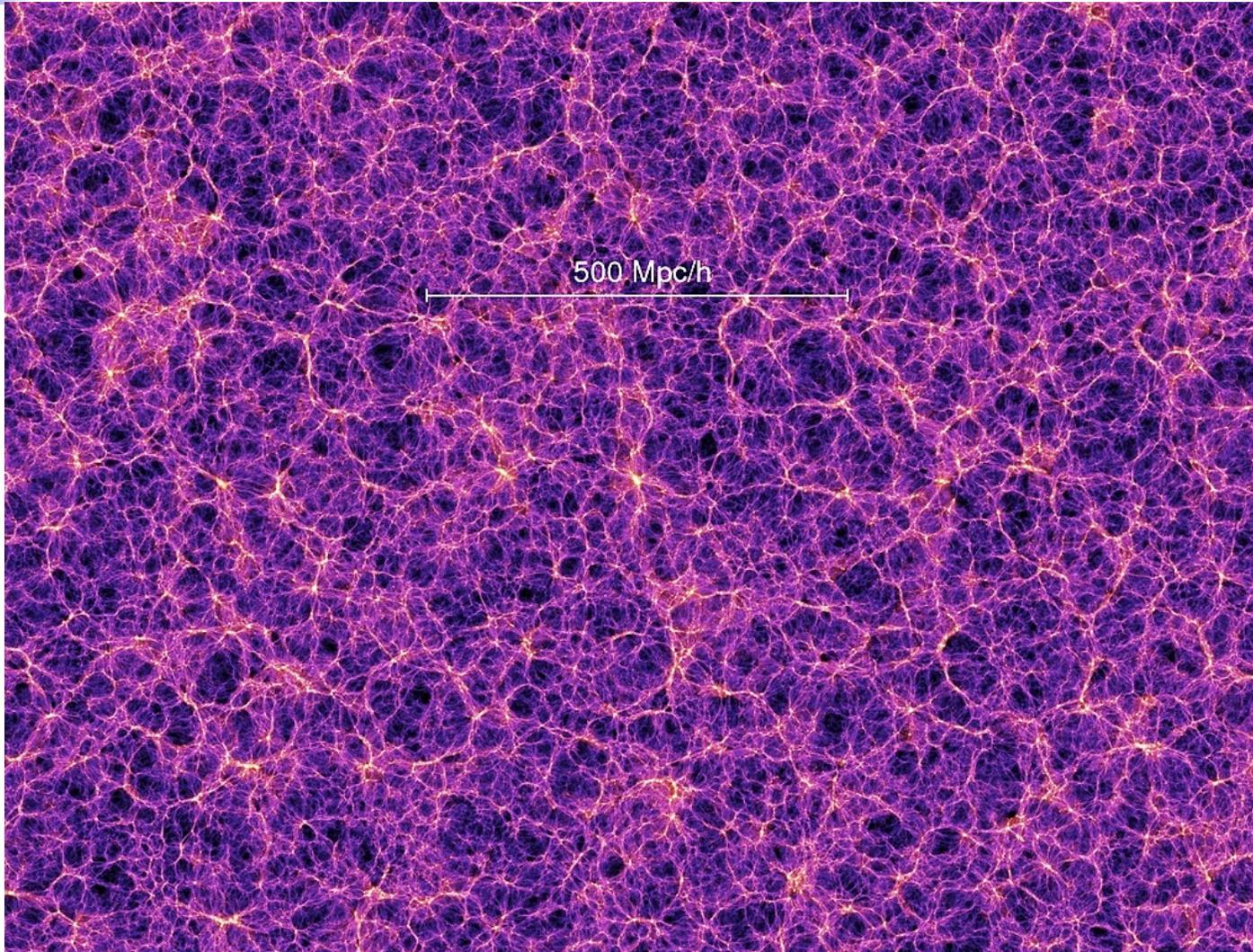
- 250 000 galaxies à  $z < 0,3$

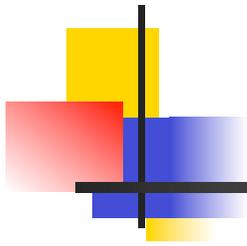
- SDSS (2000-2008)

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



## Simulation « Millenium » (Virgo consortium)

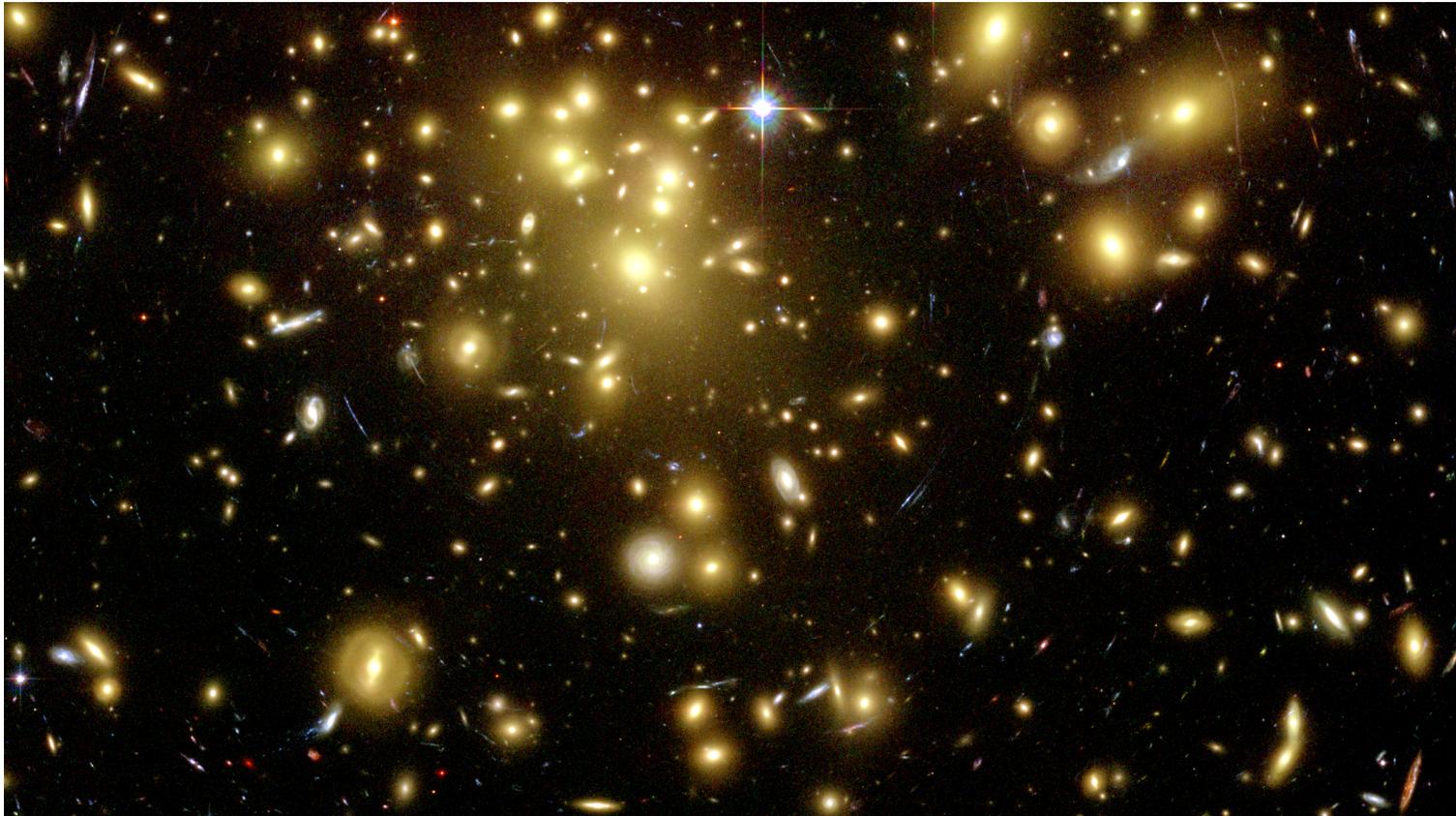




# LES AMAS

# Amas

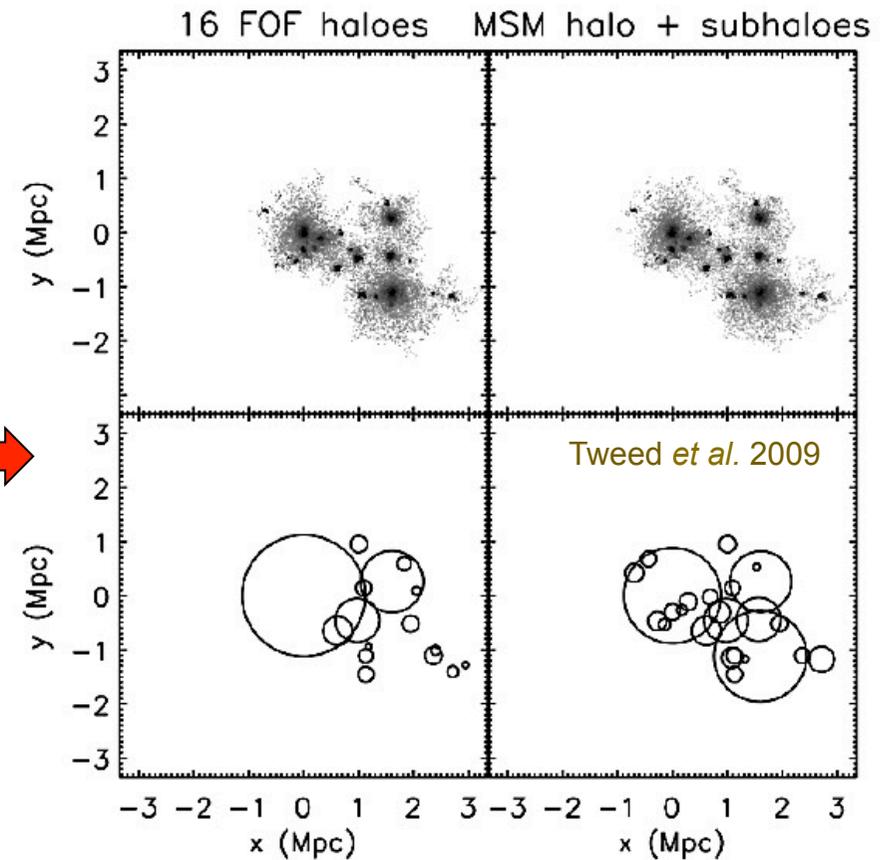
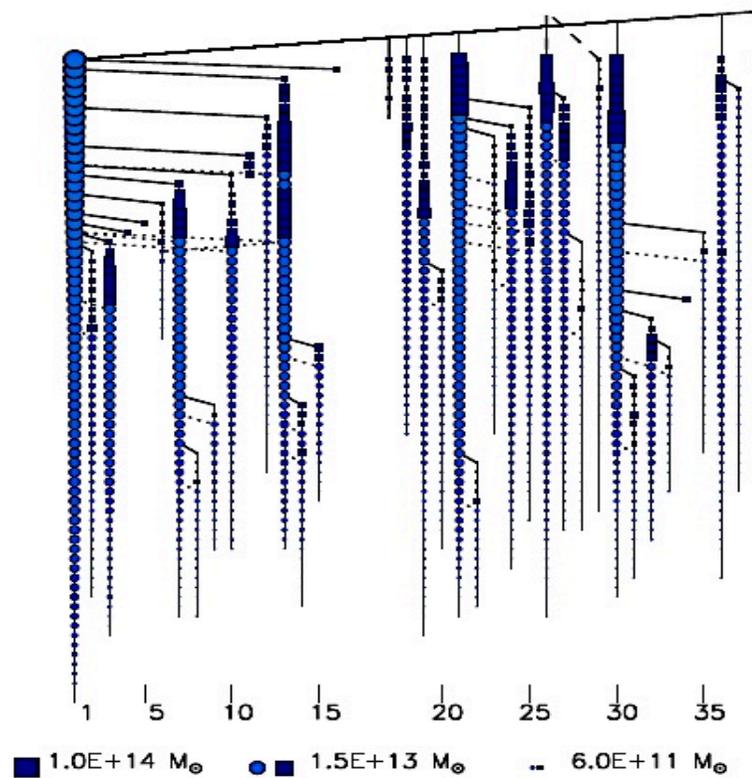
- Abell 1689 (distance 670 Mpc) → où s'arrête l'amas ?



# 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

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

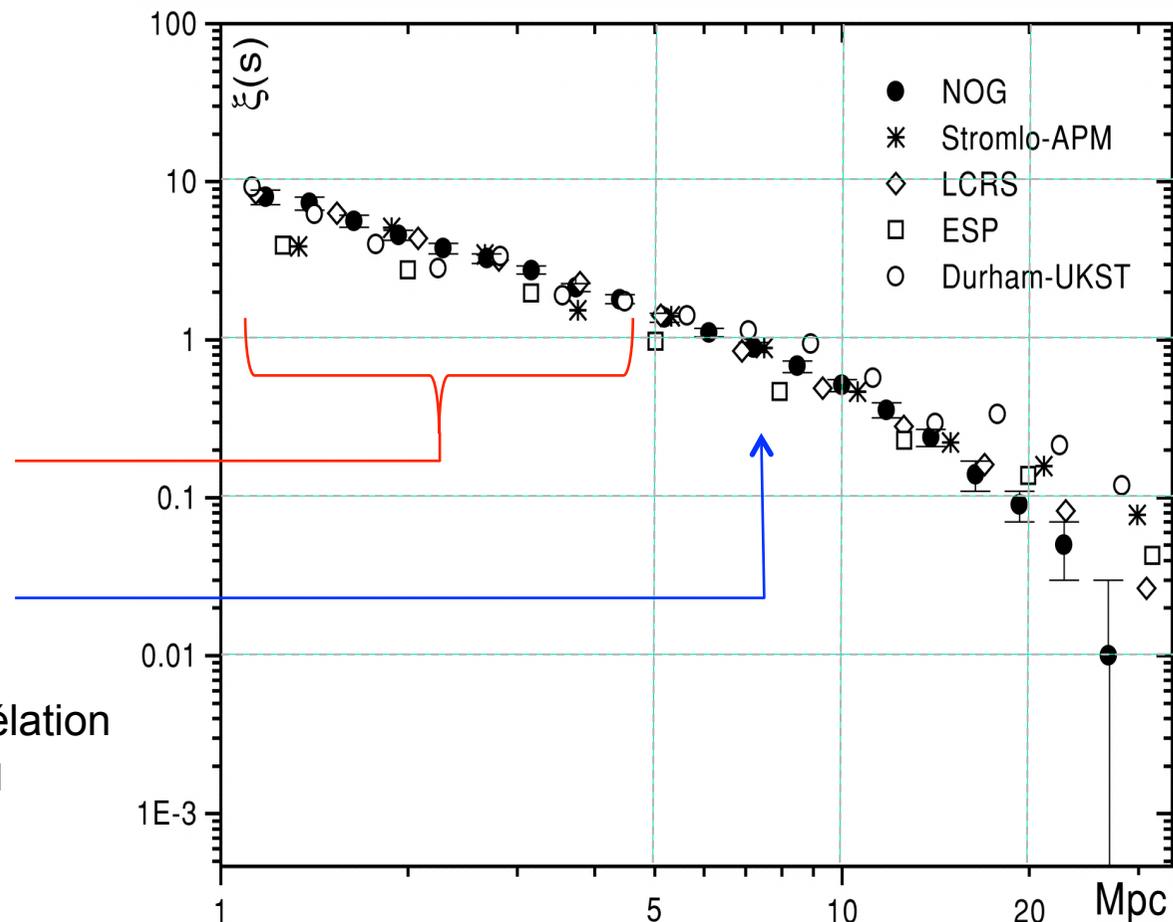
- $s_0 \approx 8$  Mpc
- $\gamma \approx -1,8$

- $\Rightarrow$  existence des amas

- $\Rightarrow$  taille  $\sim 5$  à  $10$  Mpc

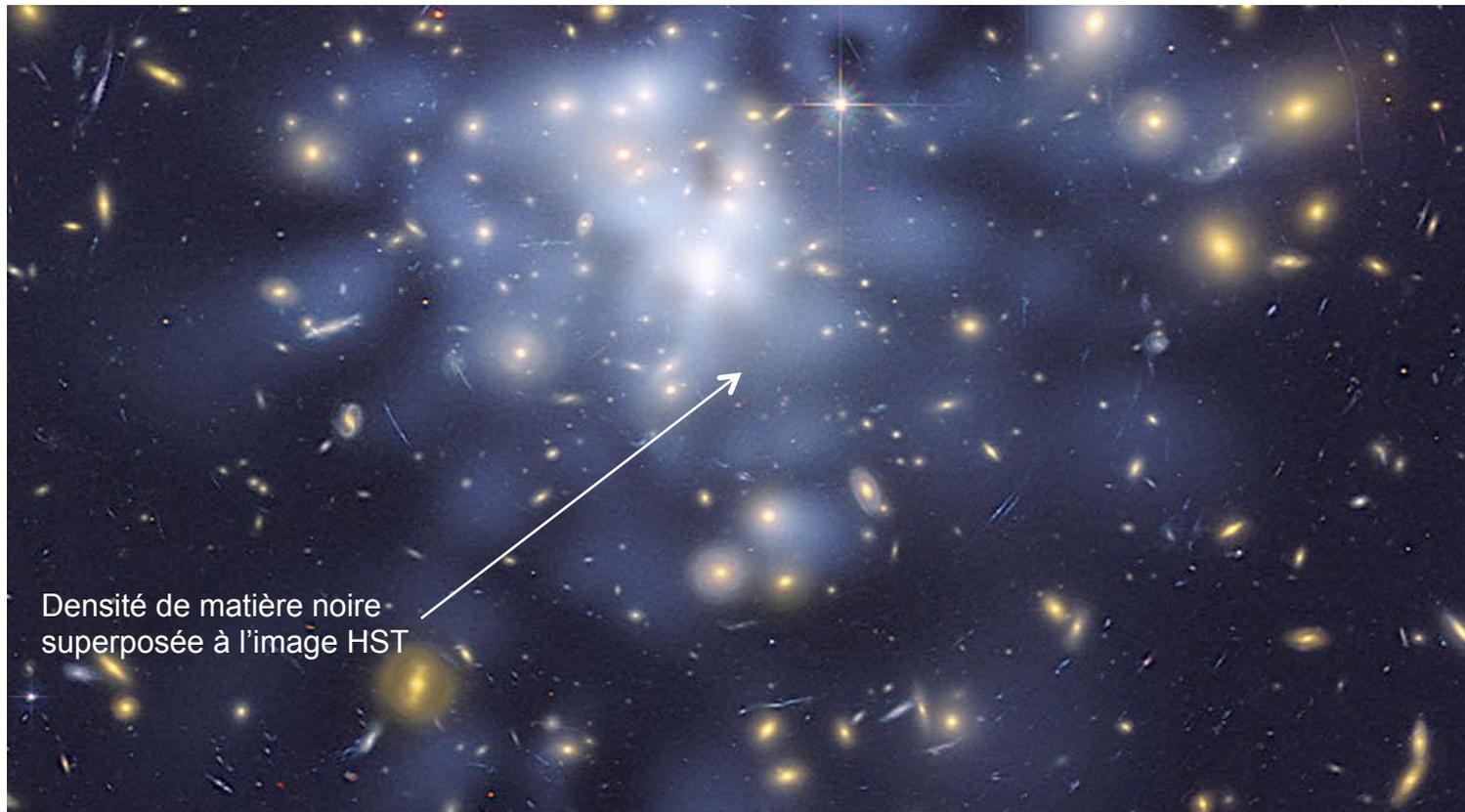
- Autres fonctions de corrélation

- Spirales-spirales, ell-ell
- Amas



## Amas et matière noire

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



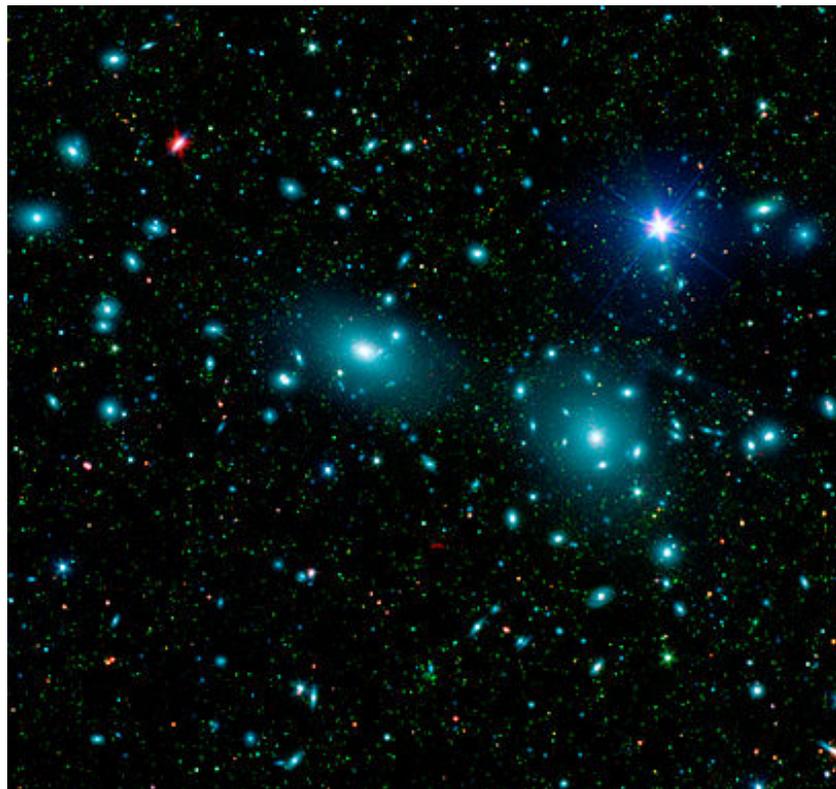
# Cinématique des amas de galaxies

- 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

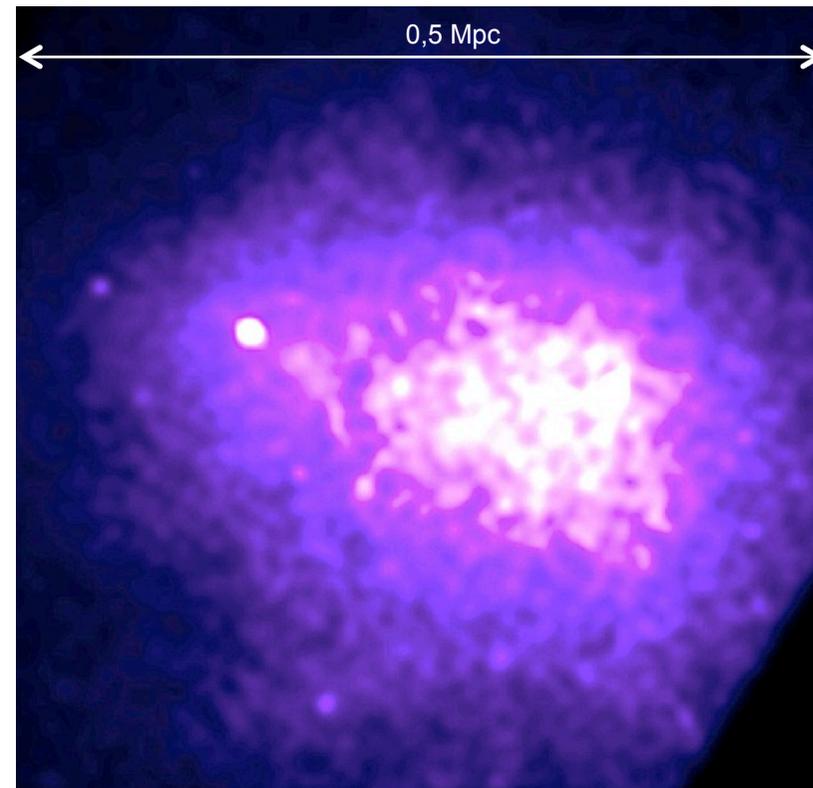


# Émission X

- Amas de Coma

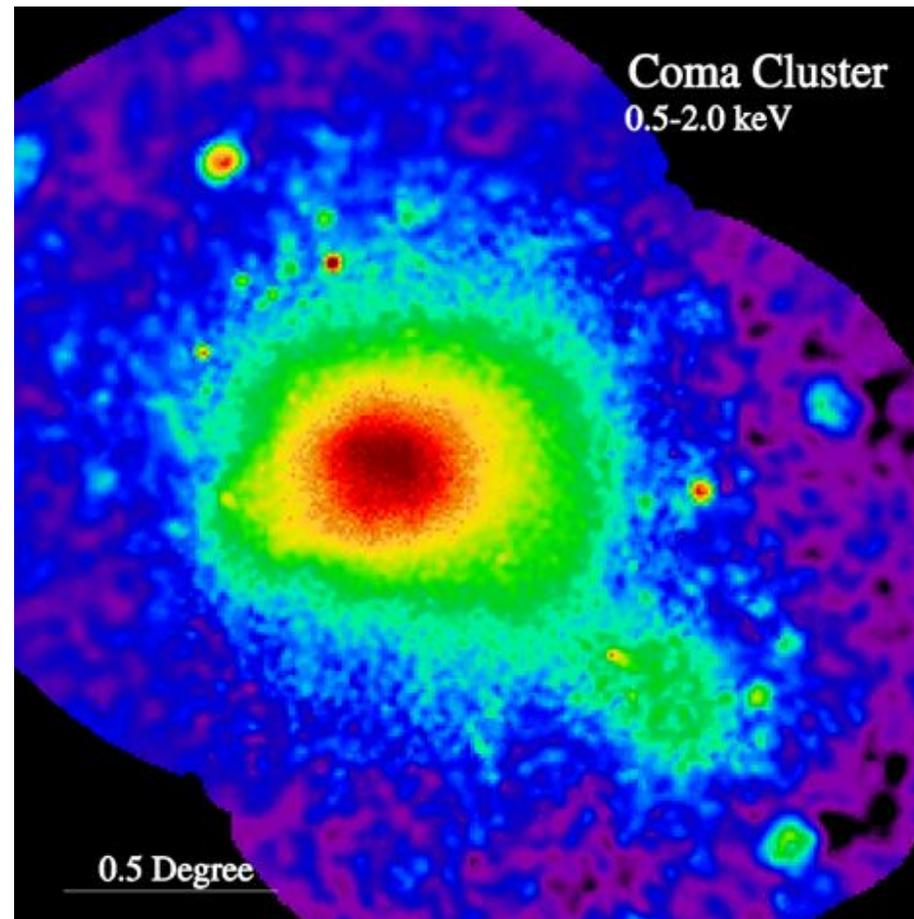


- Gaz chaud **intergalactique** à 10 MK



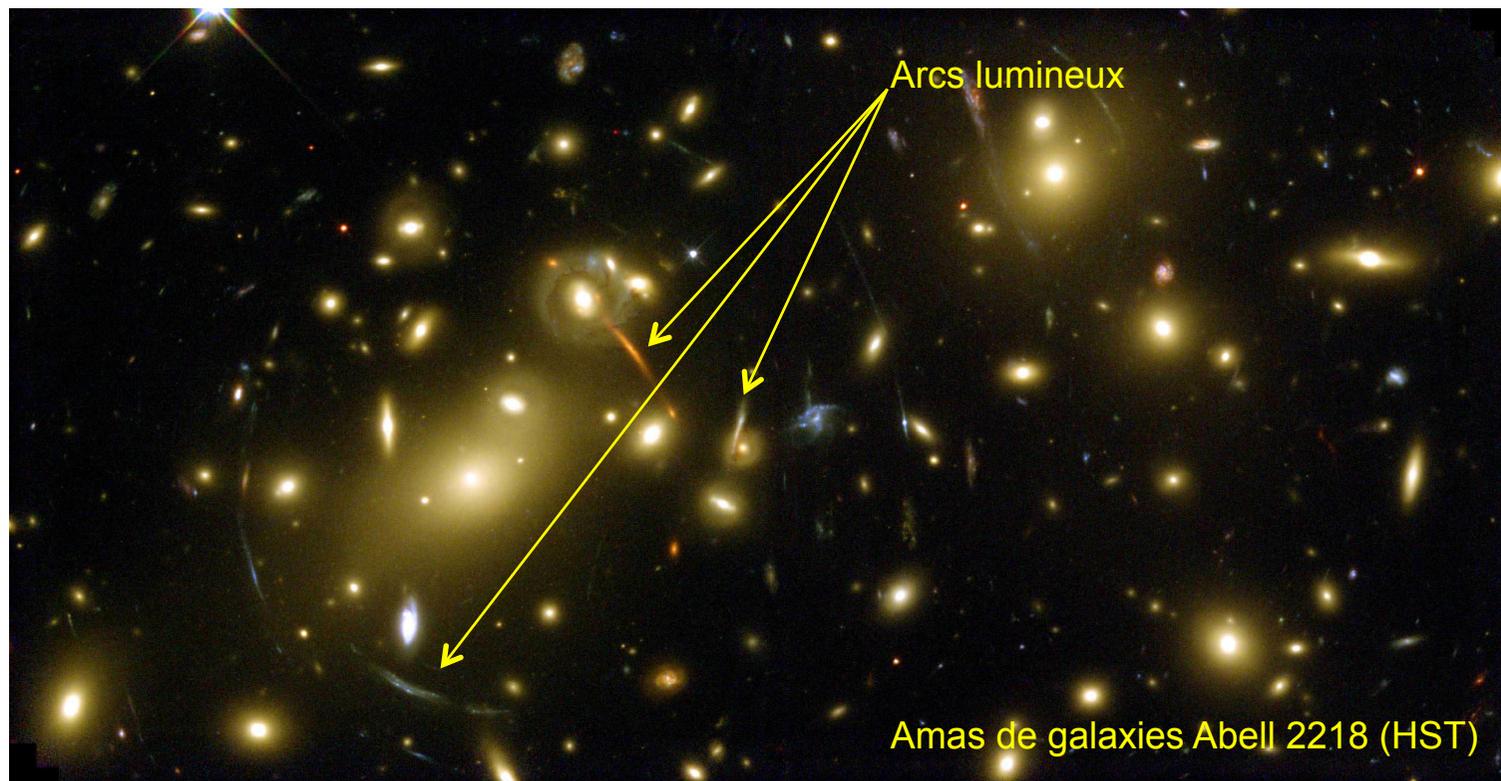
## Amas de galaxies : émission en rayons X

- 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

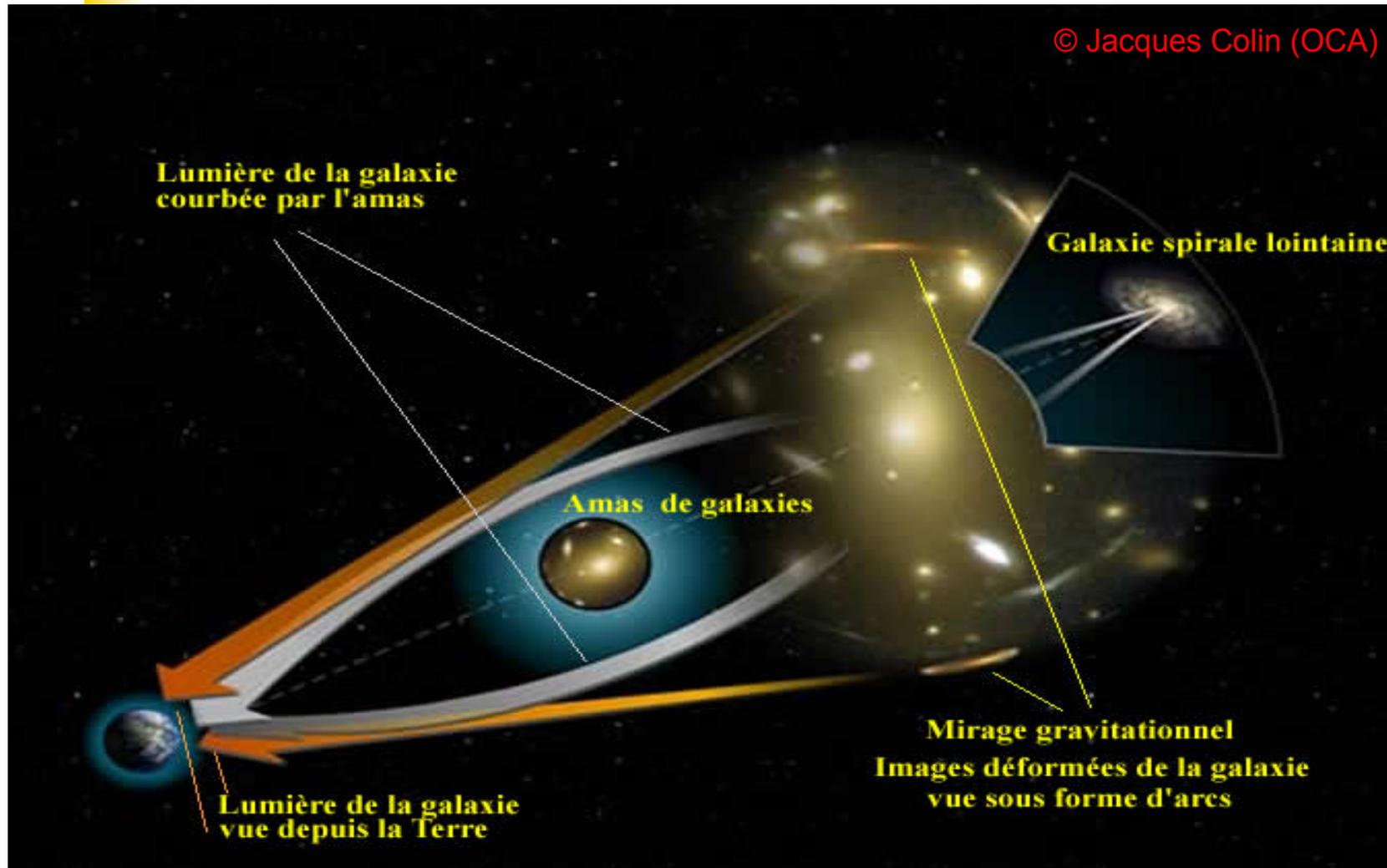


## Amas de galaxies : distorsions gravitationnelles

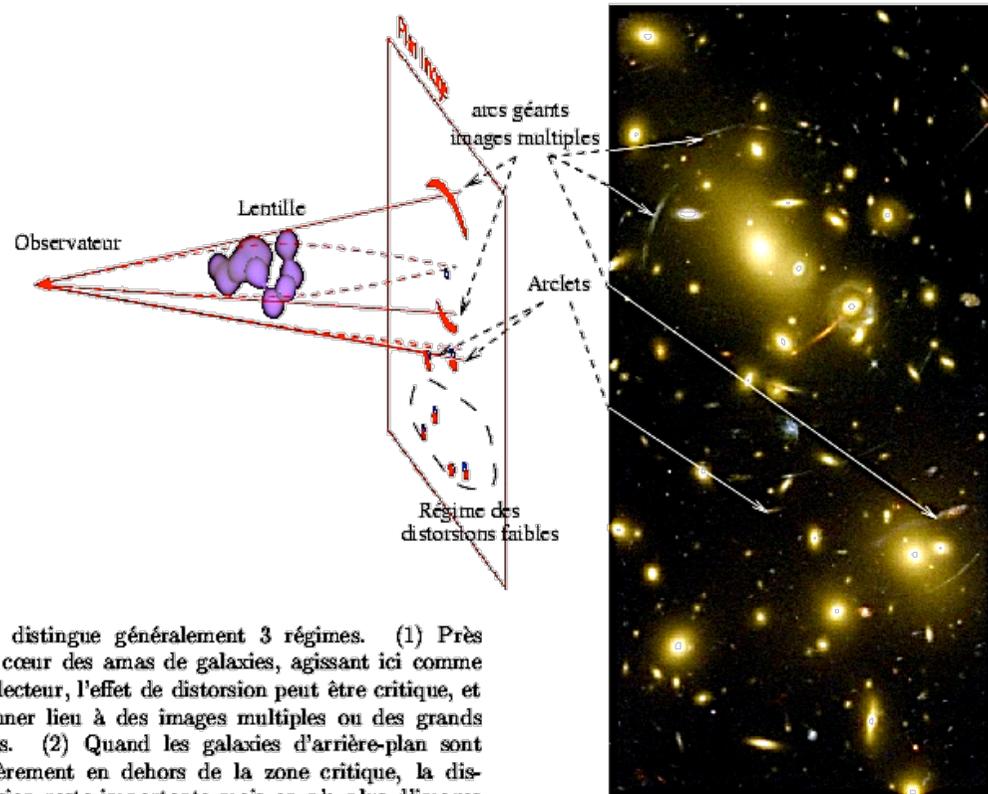
- Les masses dévient les rayons lumineux, déformant l'image des galaxies situées beaucoup plus loin → arcs lumineux



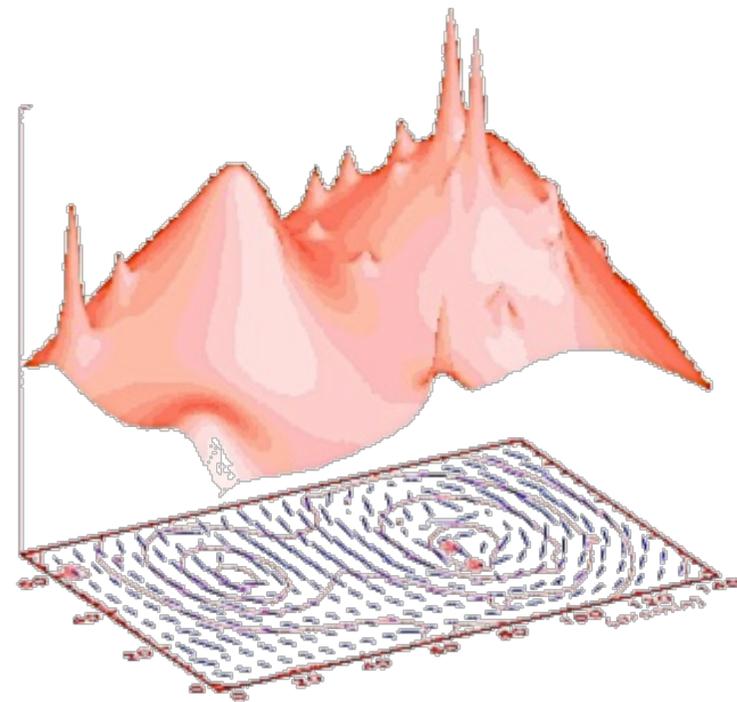
# Les lentilles gravitationnelles



# Reconstruction



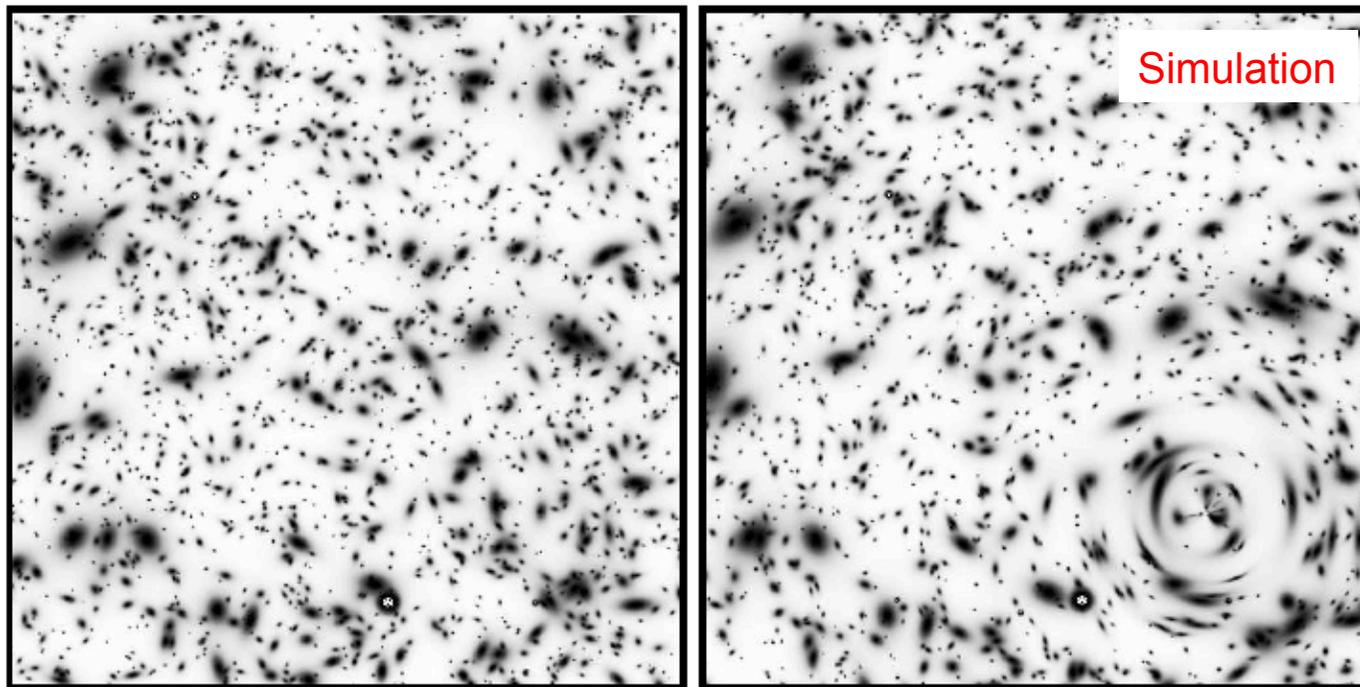
On distingue généralement 3 régimes. (1) Près du cœur des amas de galaxies, agissant ici comme déflecteur, l'effet de distorsion peut être critique, et donner lieu à des images multiples ou des grands arcs. (2) Quand les galaxies d'arrière-plan sont légèrement en dehors de la zone critique, la distorsion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



© Yannick Mellier (IAP)

## A très grande échelle : le cisaillement

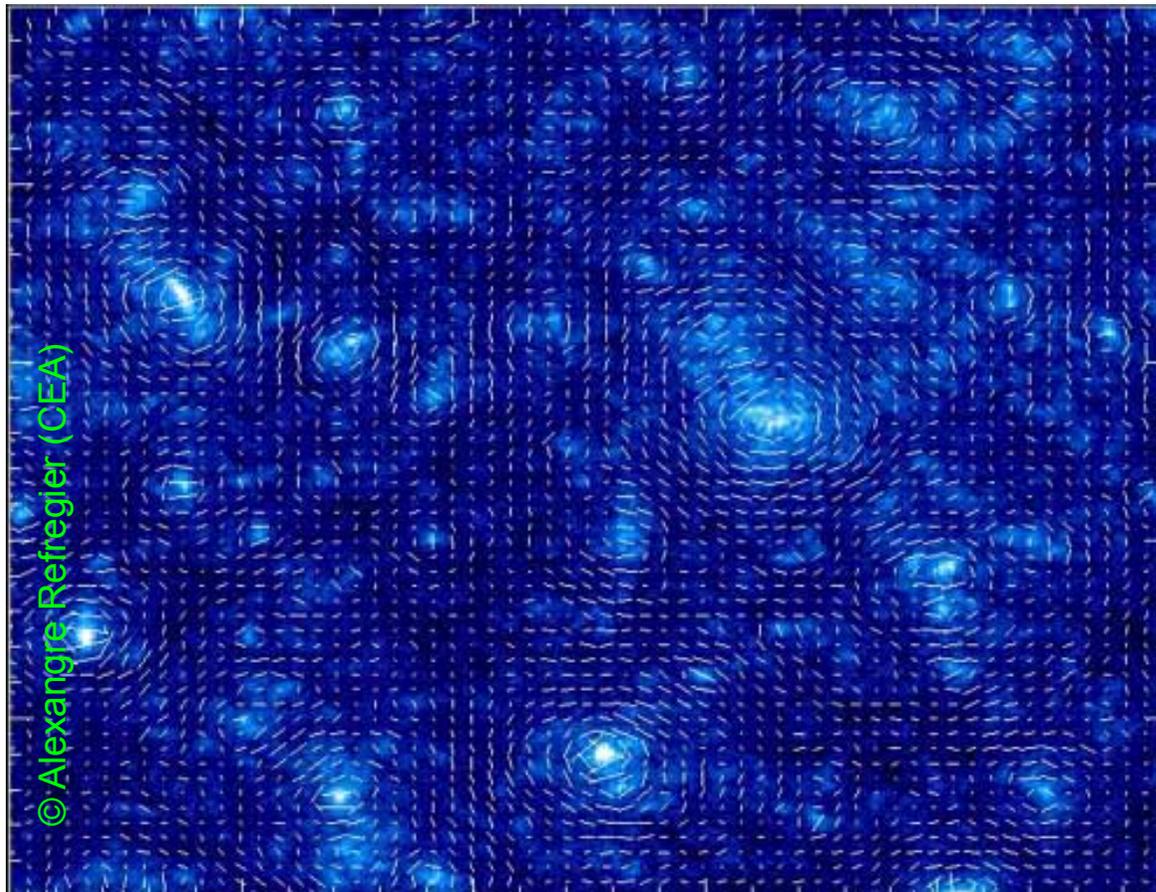
- Les rayons lumineux passant assez loin d'une concentration de masse comme un amas de galaxies déforment légèrement les images des objets en arrière-plan
- On parle de cisaillement gravitationnel (ou weak lensing)



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

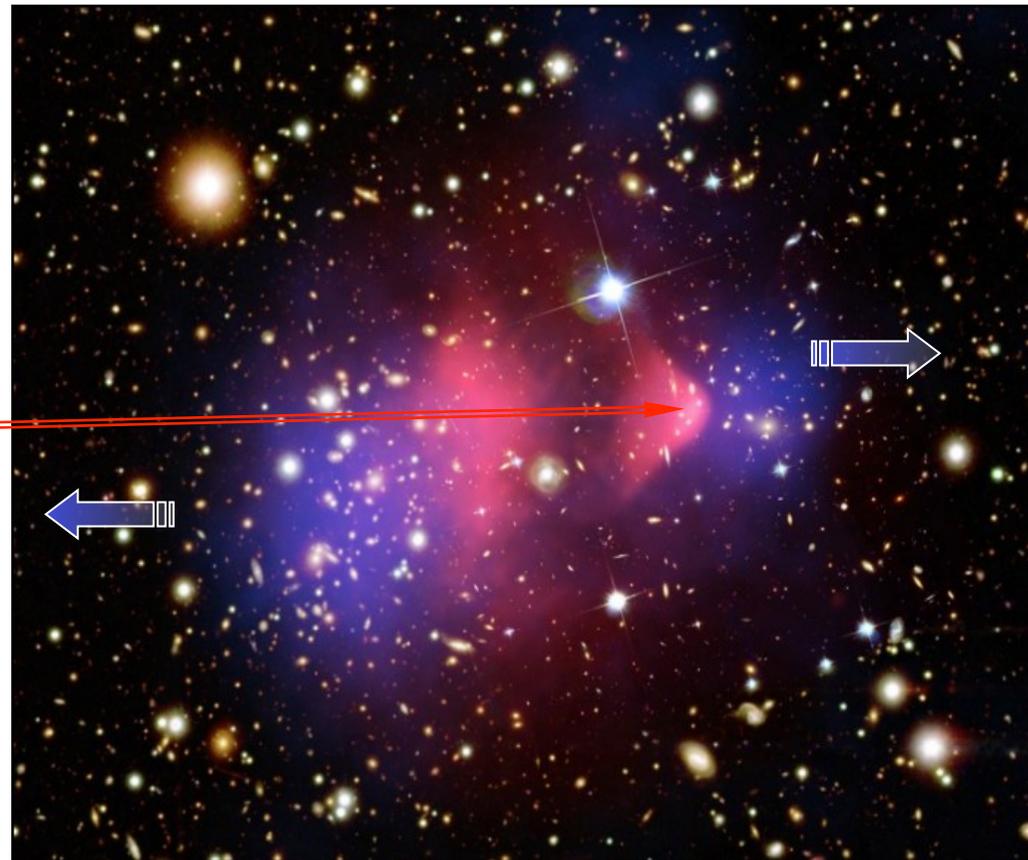
## Le cisaillement trace la matière noire

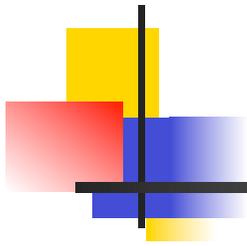
- L'analyse statistique de la **forme** et de l'**orientation** des galaxies permet de reconstituer la carte de la matière noire sous-jacente



## 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 !

