

Formation des Structures Cosmologiques

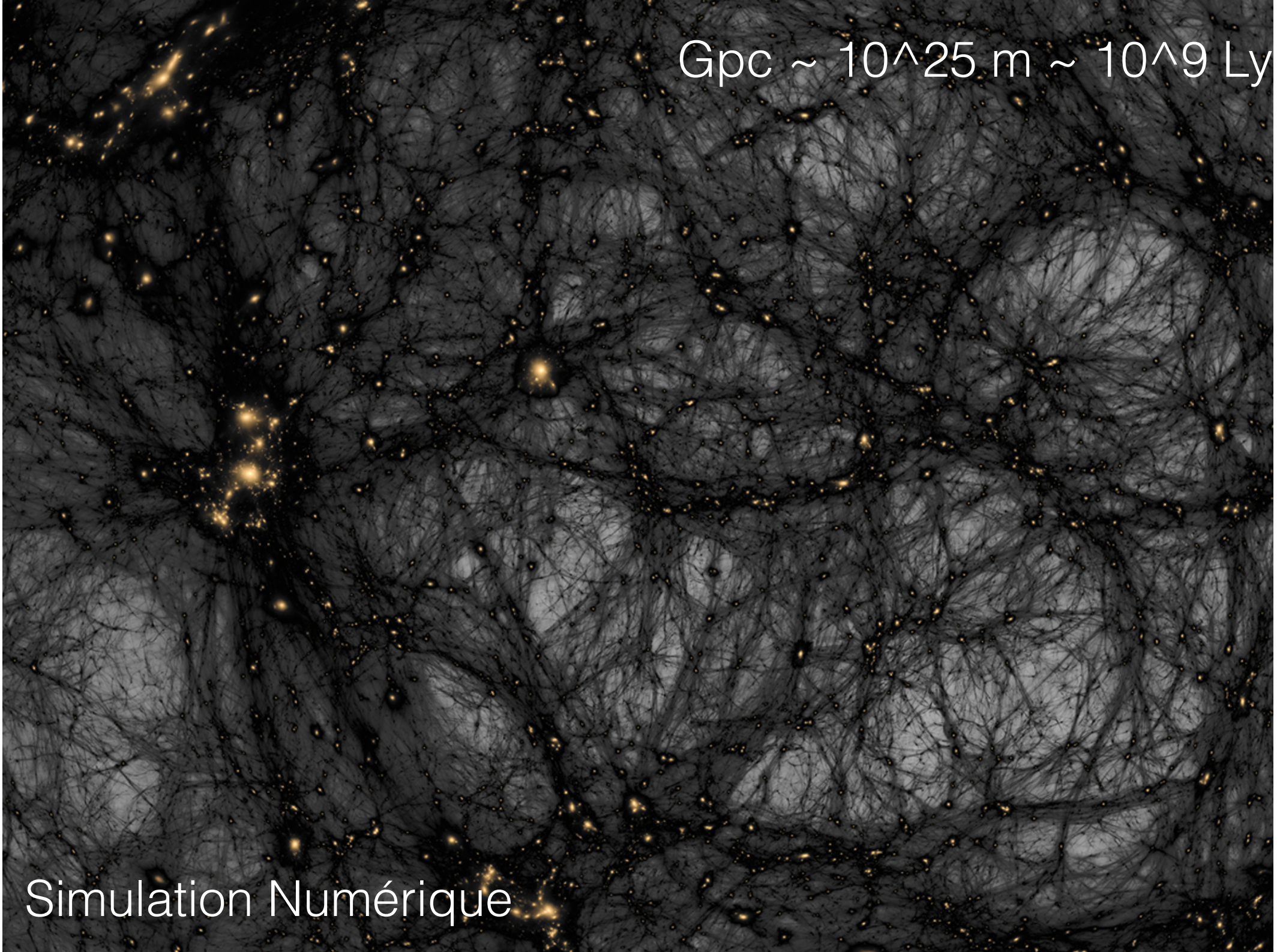
Matière Noire

Lentilles Gravitationnelles

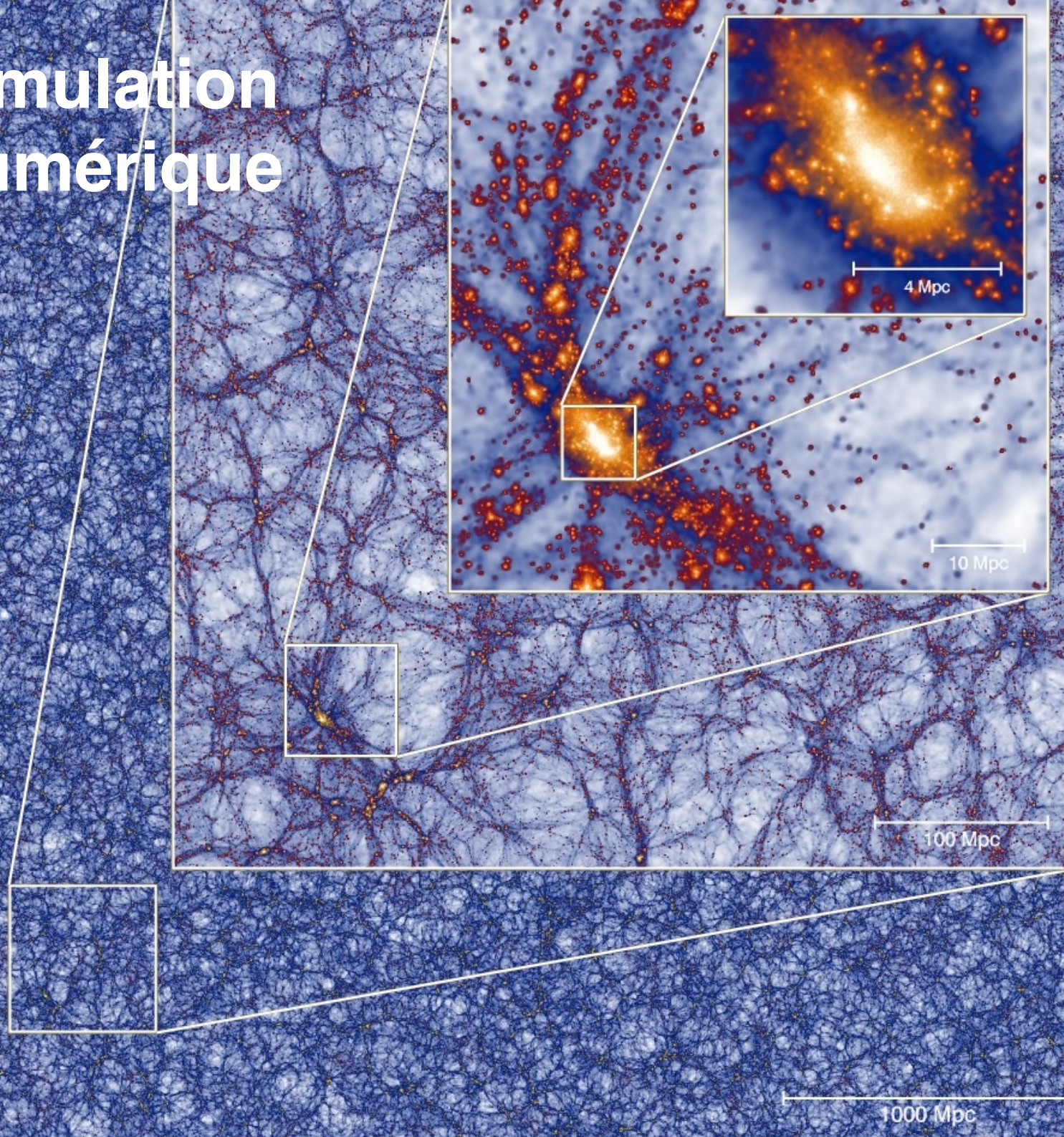
Marceau Limousin
Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
CNRS

Gpc $\sim 10^{25}$ m $\sim 10^9$ Ly

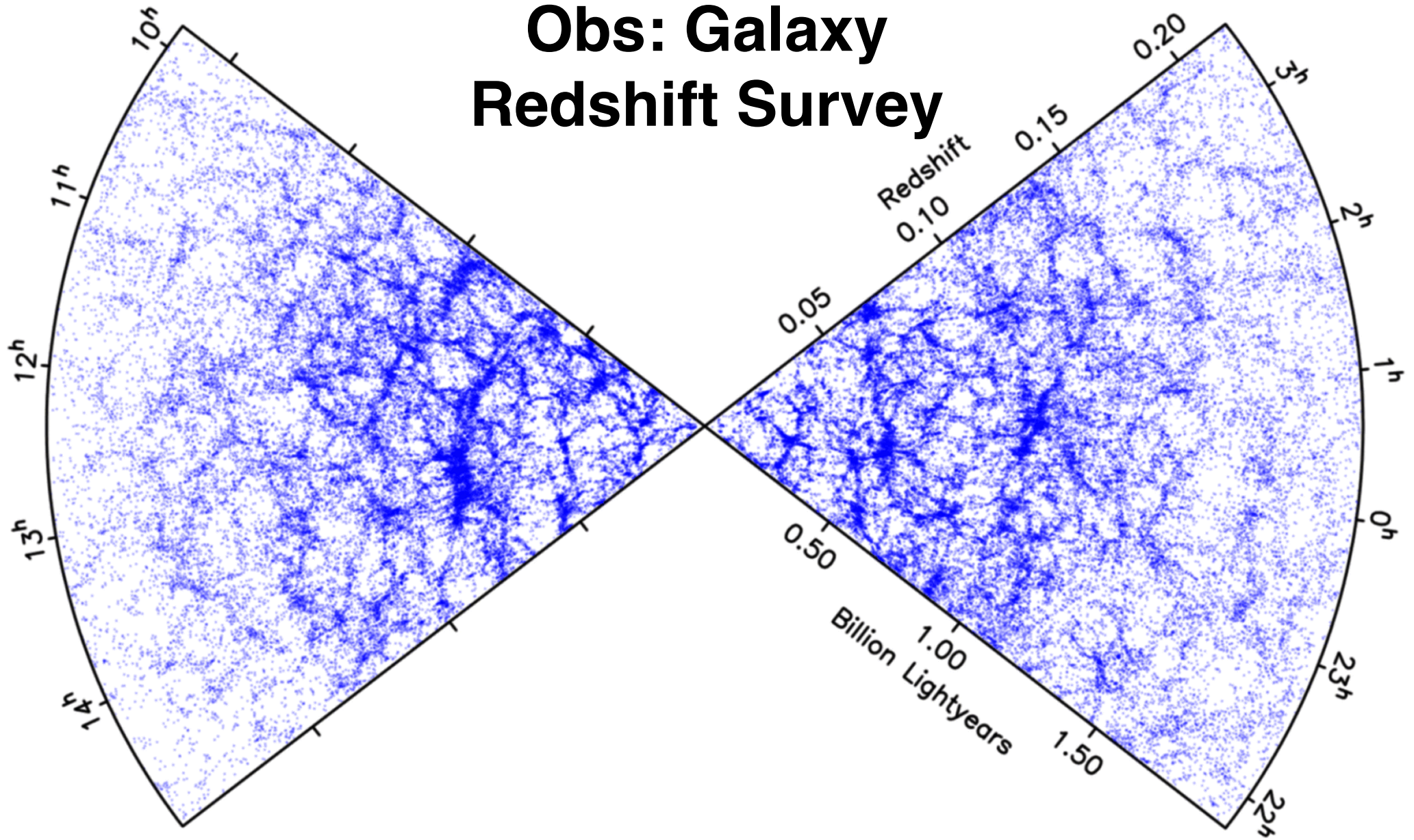
Simulation Numérique

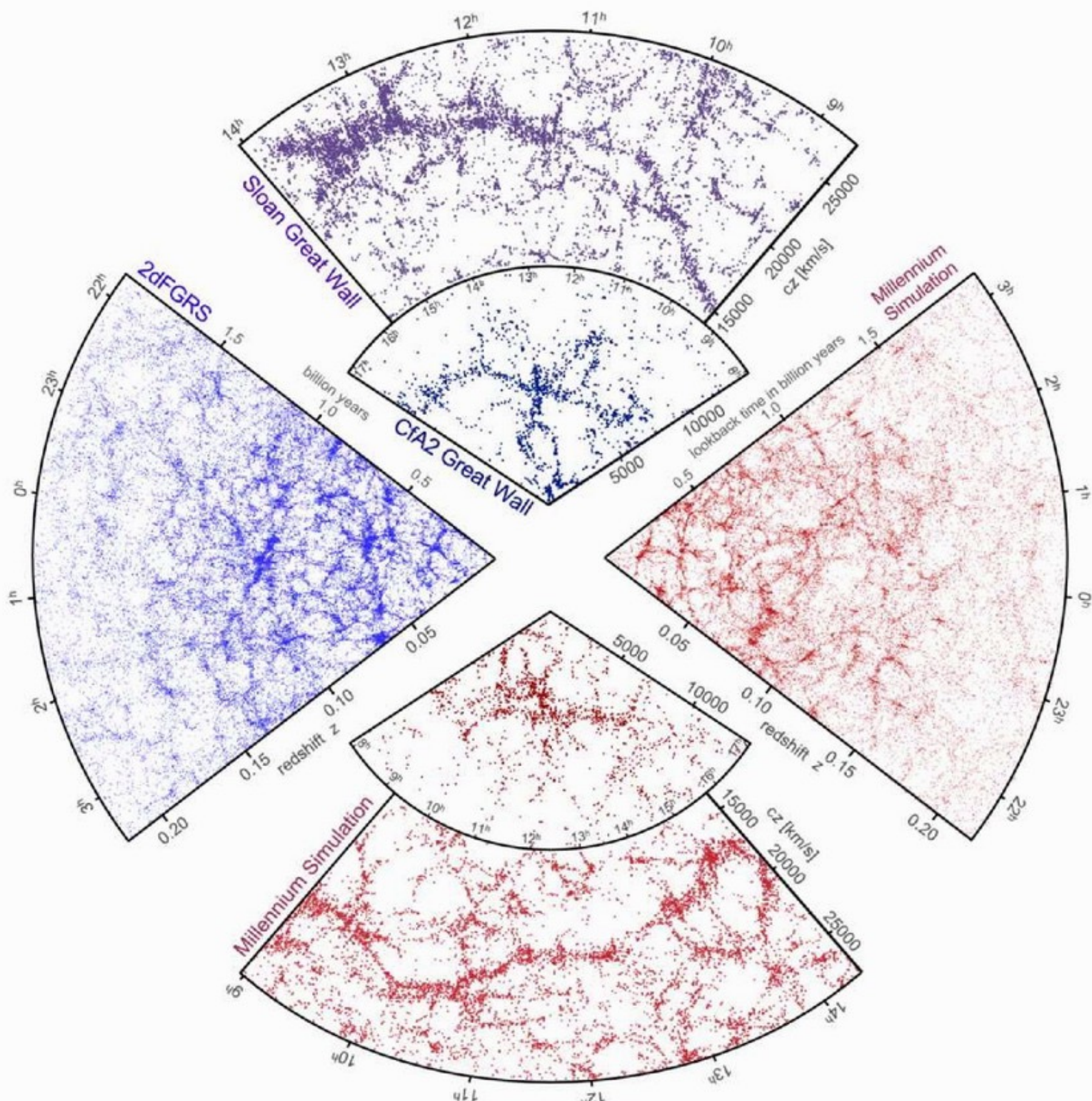


Simulation Numérique



Obs: Galaxy Redshift Survey







Formation des Galaxies (Building Blocks) : Instabilité Gravitationnelle

Bref, tout se passe comme si l'Univers était homogène dans son ensemble, mais avec des sur-densités locales (c'est à dire des endroits de l'Univers où la densité est supérieure à la densité moyenne de l'Univers), et par conséquent des sous-densités locales. Si $\bar{\rho}(t) = 3H^2(t)\Omega(t)/(8\pi G)$ est la densité moyenne de l'Univers à l'instant t , on définit le contraste de densité afin de décrire ces fluctuations par :

$$\delta(\vec{x}, t) = \frac{\rho(\vec{x}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)} \quad (4.1)$$

Considérons l'évolution d'une sur-densité au cours du temps. Les régions sur-denses ($\delta > 0$) accrètent la matière de leur environnement, et ainsi deviennent de plus en plus sur-dense, c'est à dire que δ augmente. Tant que les fluctuations restent faibles ($|\delta| \ll 1$), la croissance des régions sur-denses peut être décrite par une théorie linéaire. Une fois que δ s'approche de l'unité, les effets non-linéaires ne sont plus négligeables, l'expansion de la région sur-dense s'arrête et celle-ci commence à s'effondrer sur elle même. Par des processus de relaxation violente et de mélange de phases, les particules se virialisent et atteignent une configuration d'équilibre stable que l'on identifie comme les lieux de formation des galaxies. On dit alors que le halo s'est découplé de l'expansion de l'Univers.

Fluctuations Primordiales ? Graines à galaxie

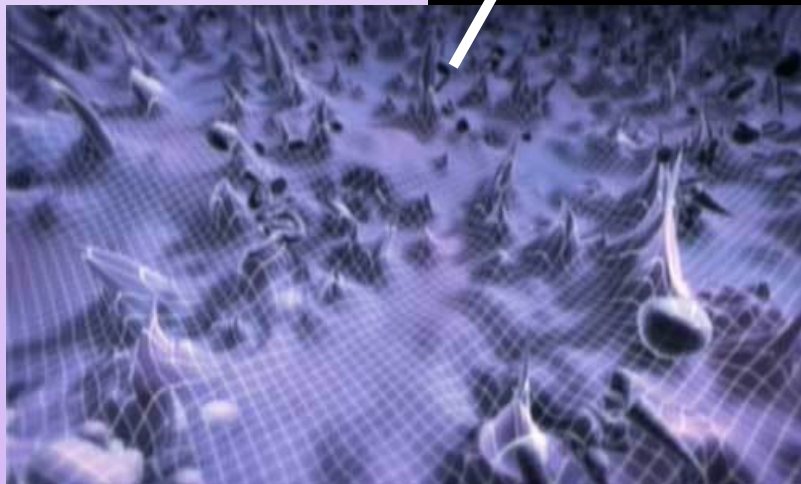
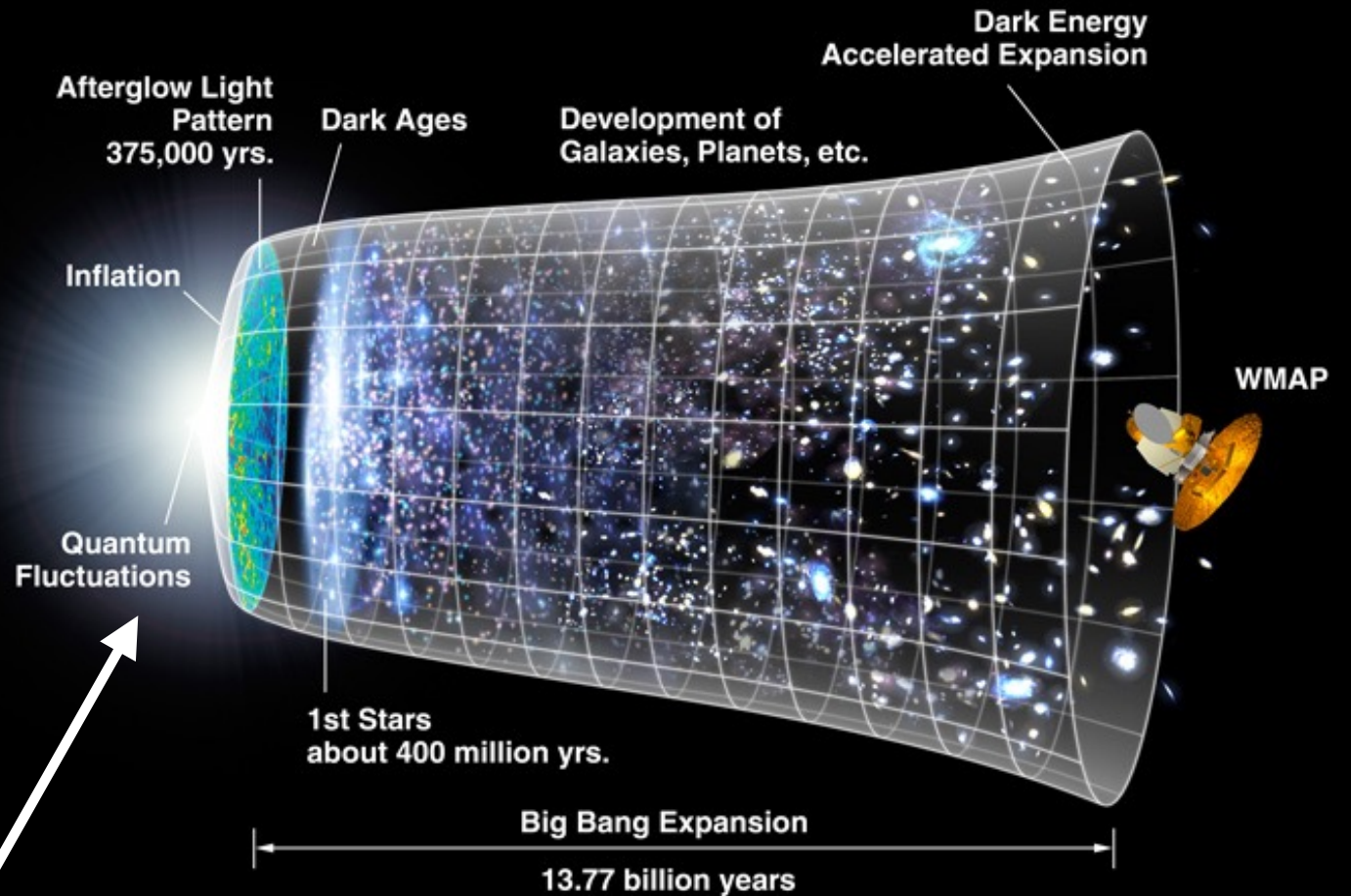
$t \leq 0 : ???$
métaphysique

Aire de Planck:
 $\log(t) \sim -44$ s
 $\log(l) \sim -35$ m

Heisenberg Uncertainty Relationships

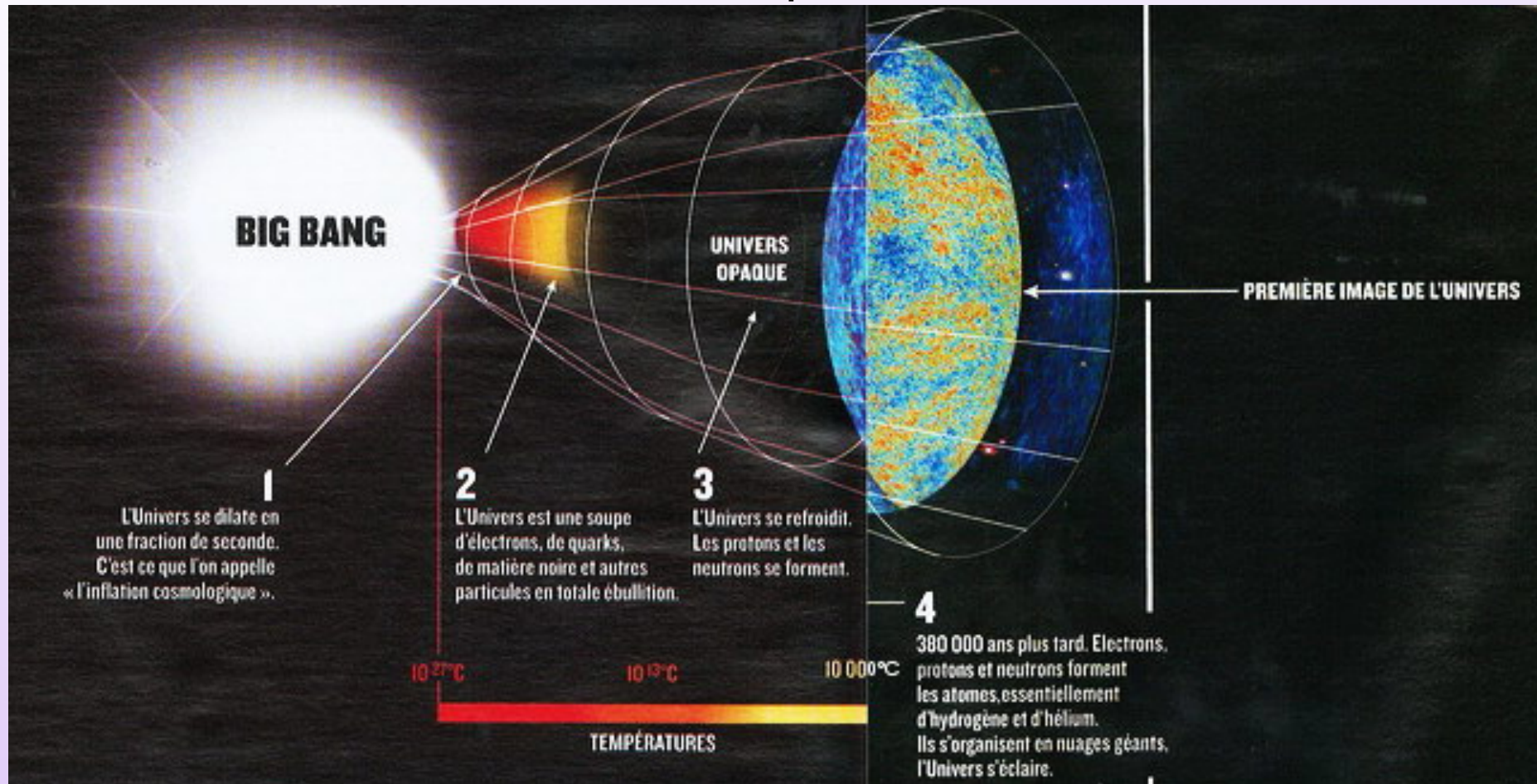
$$\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$$



Inflation: Volume $\times 10^{78}$!
Evidences Observationnelles ?

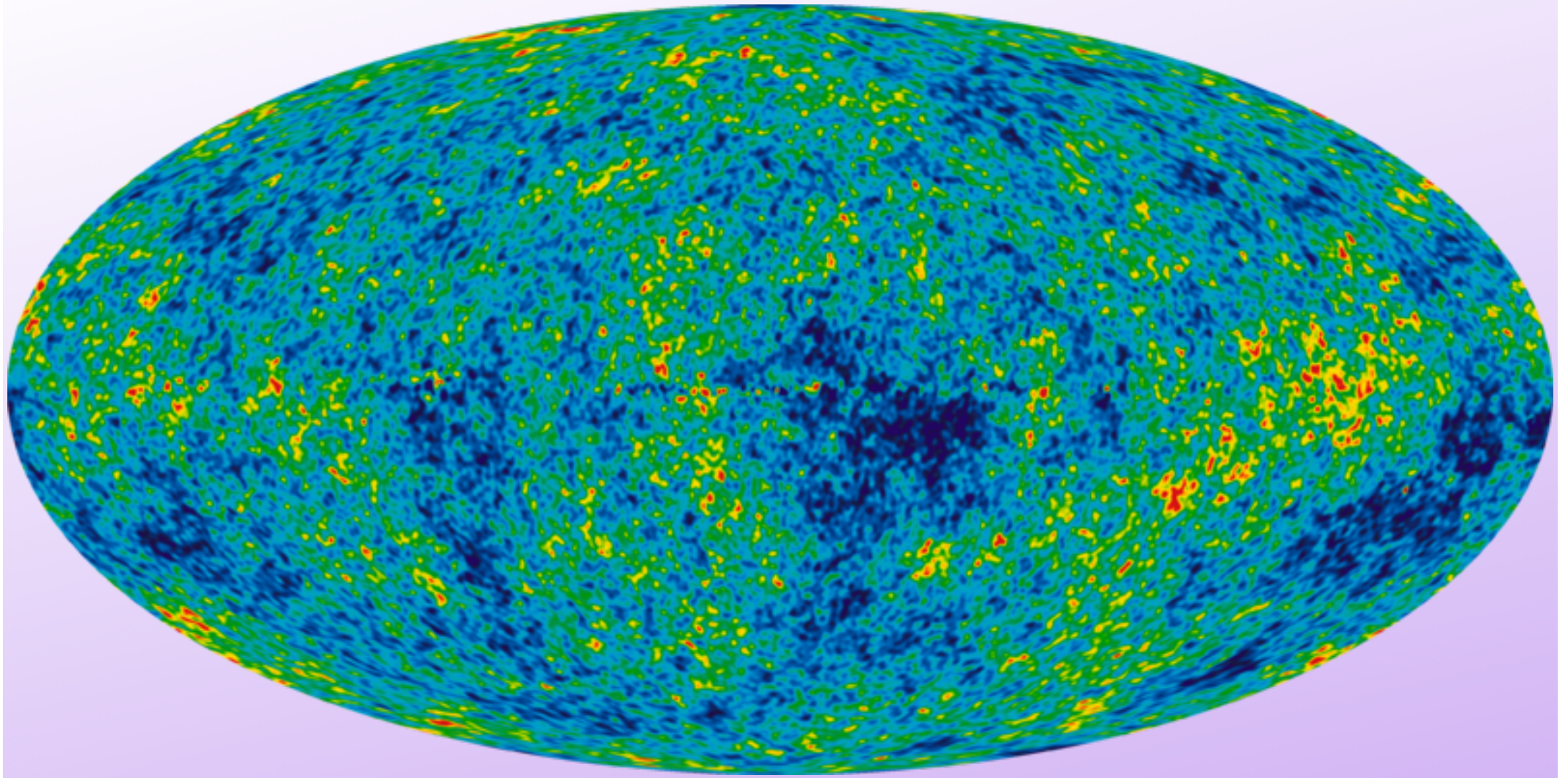
Histoire Thermique de l'Univers



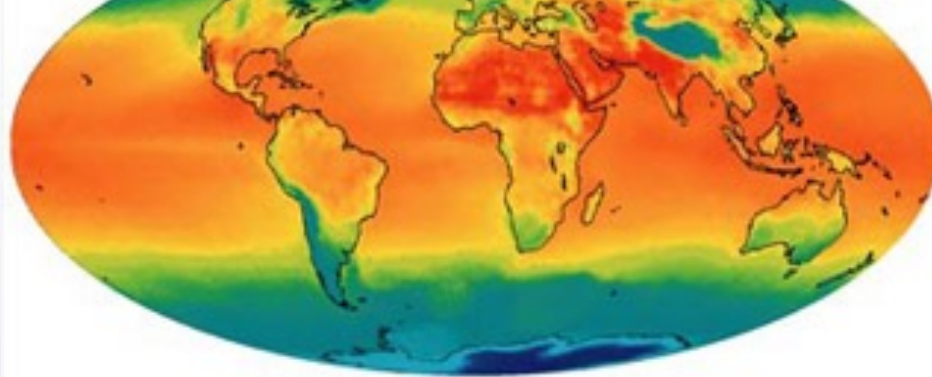
Recombinaison: découplage photon/matière:

Univers transparent: observons ces photons qui portent l'info sur les fluctuations de densité de matière: Anisotropies du Fond Diffus Cosmologique (conditions initiales de la Simulation)

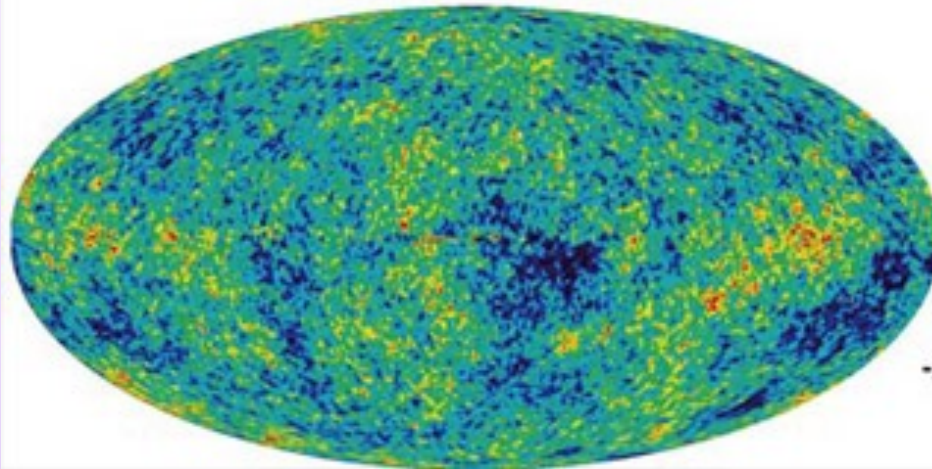
CMB = vestiges des fluctuations qui ont donné naissance aux galaxies. Ces photons ont voyagé quasiment sans perturbations depuis la recombinaison



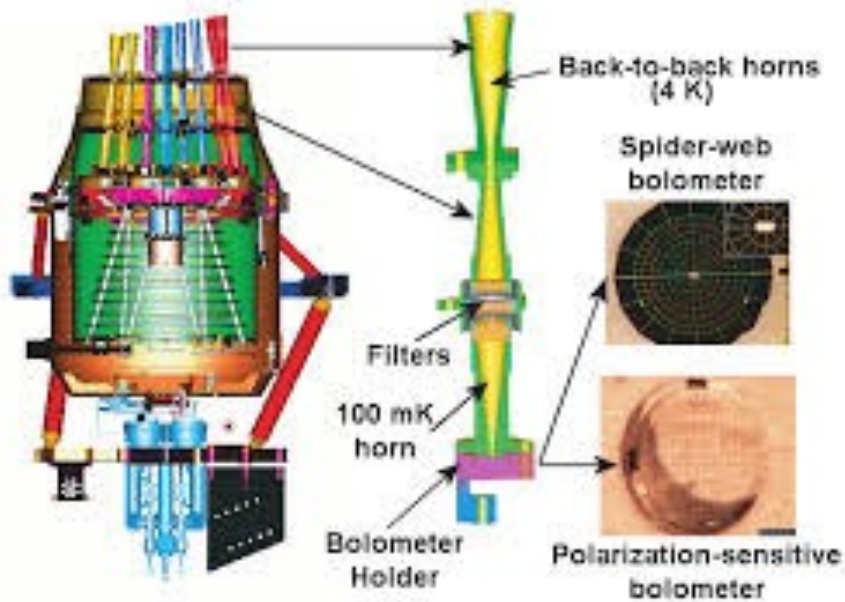
Corps Noir a 3K + Fluctuations



Earth
Temperatures

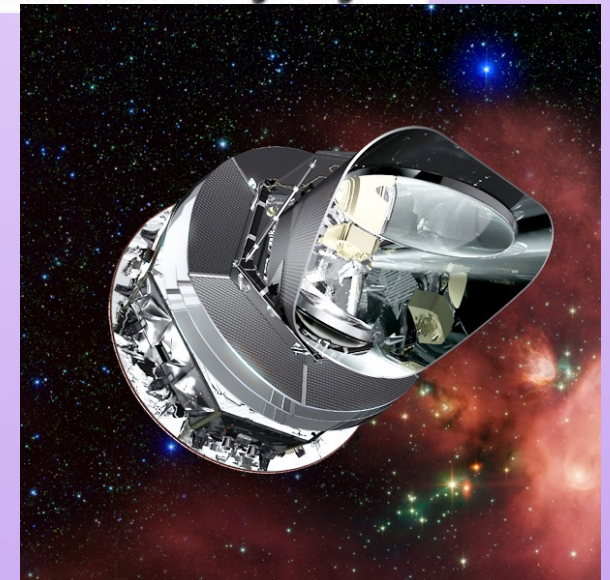


Microwave Sky
Temperatures



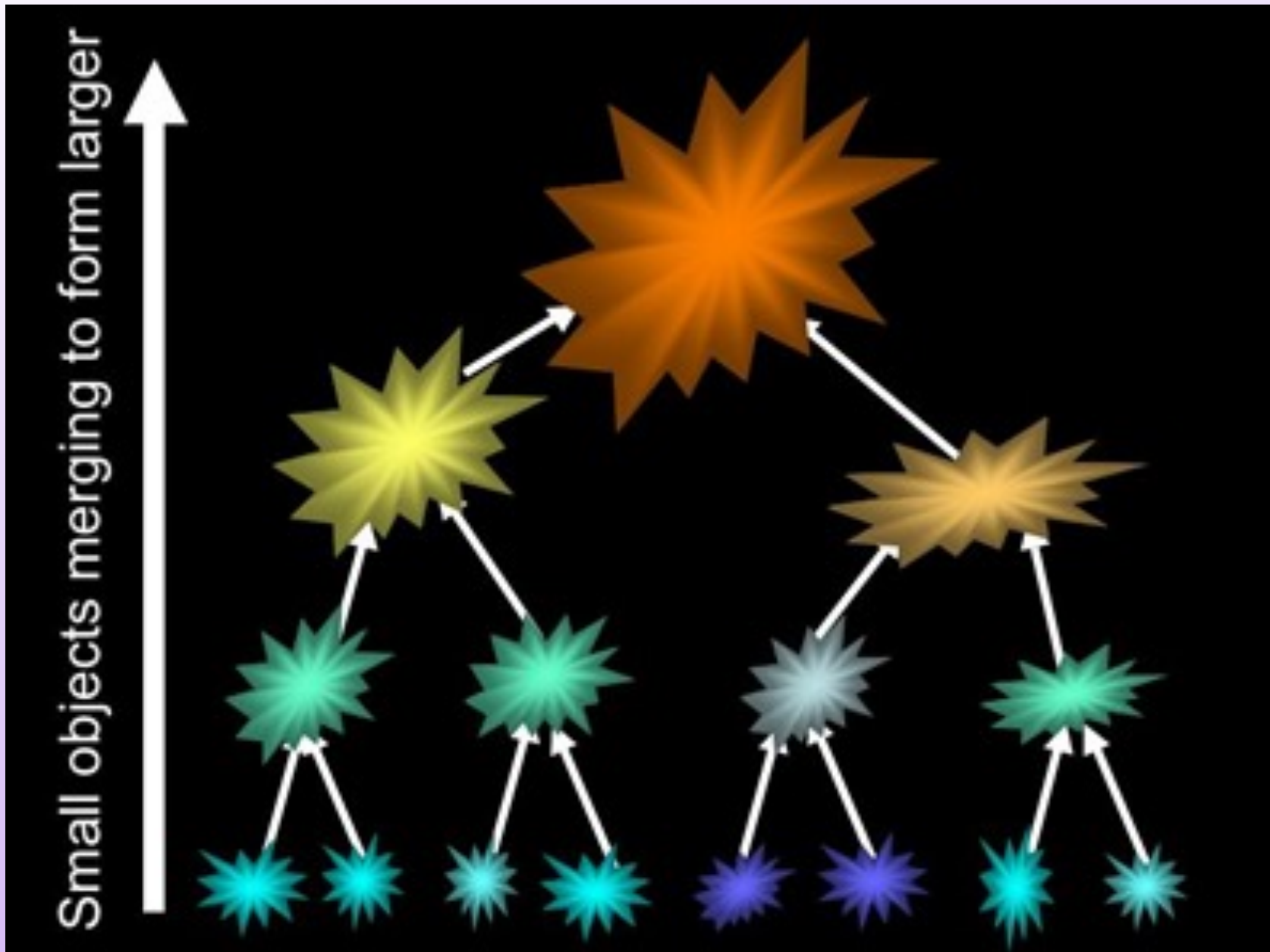
$\Delta T \sim 10^{-5}$!

Detector at
100 mK !



Planck Satellite

Formation Hiérarchique des Structures



Matière ? Which one ???

Most of it is non baryonic (Galaxy Cluster Scale)

Dark Matter

1933 !



Abell 2744

Virial Theorem:

$$2K = -U$$

↑ kinetic energy ↓ potential energy

average galaxy speed

cluster radius

$$M \sim \frac{r \langle v^2 \rangle}{G}$$

↑ cluster mass ↑ Newton's gravitational constant



Fritz Zwicky

10x more
matter than
we can see!!

Etudes en rayons X

Emission en Rayons X en Provenance des Amas/Groupes Observée

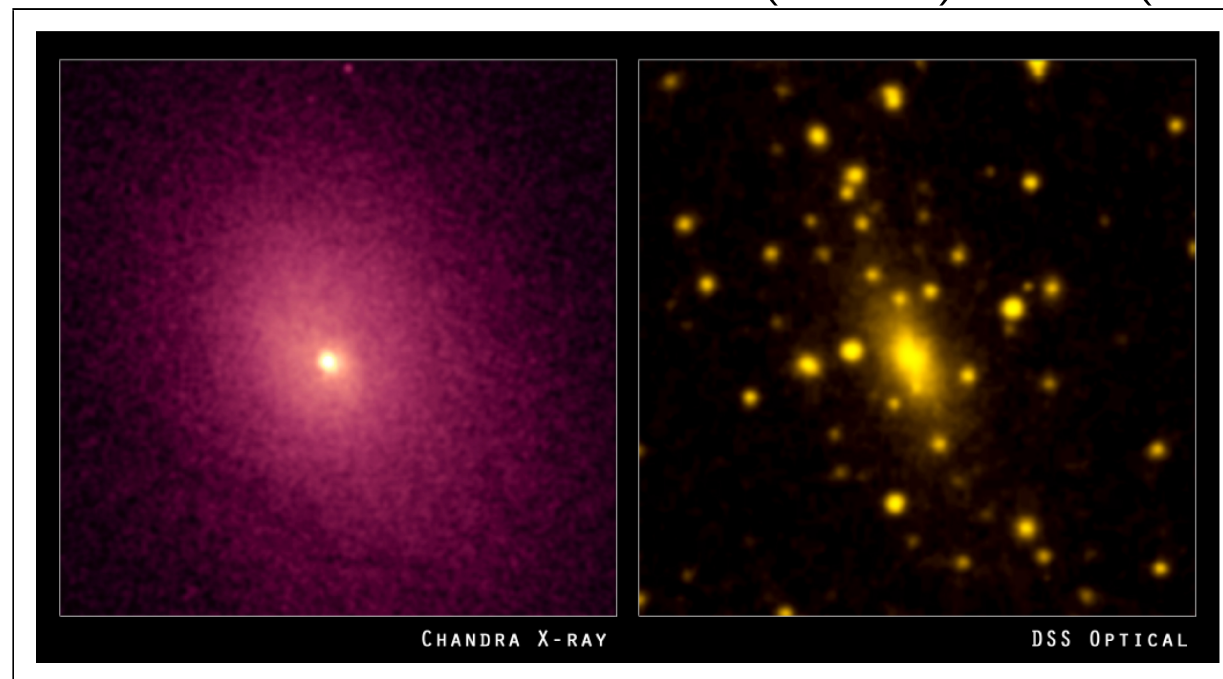
Gaz Ionisé (H - e⁺) Chauffé (10 - 100 10⁶ K)

e⁺ → γ_x (Bremsstrahlung)

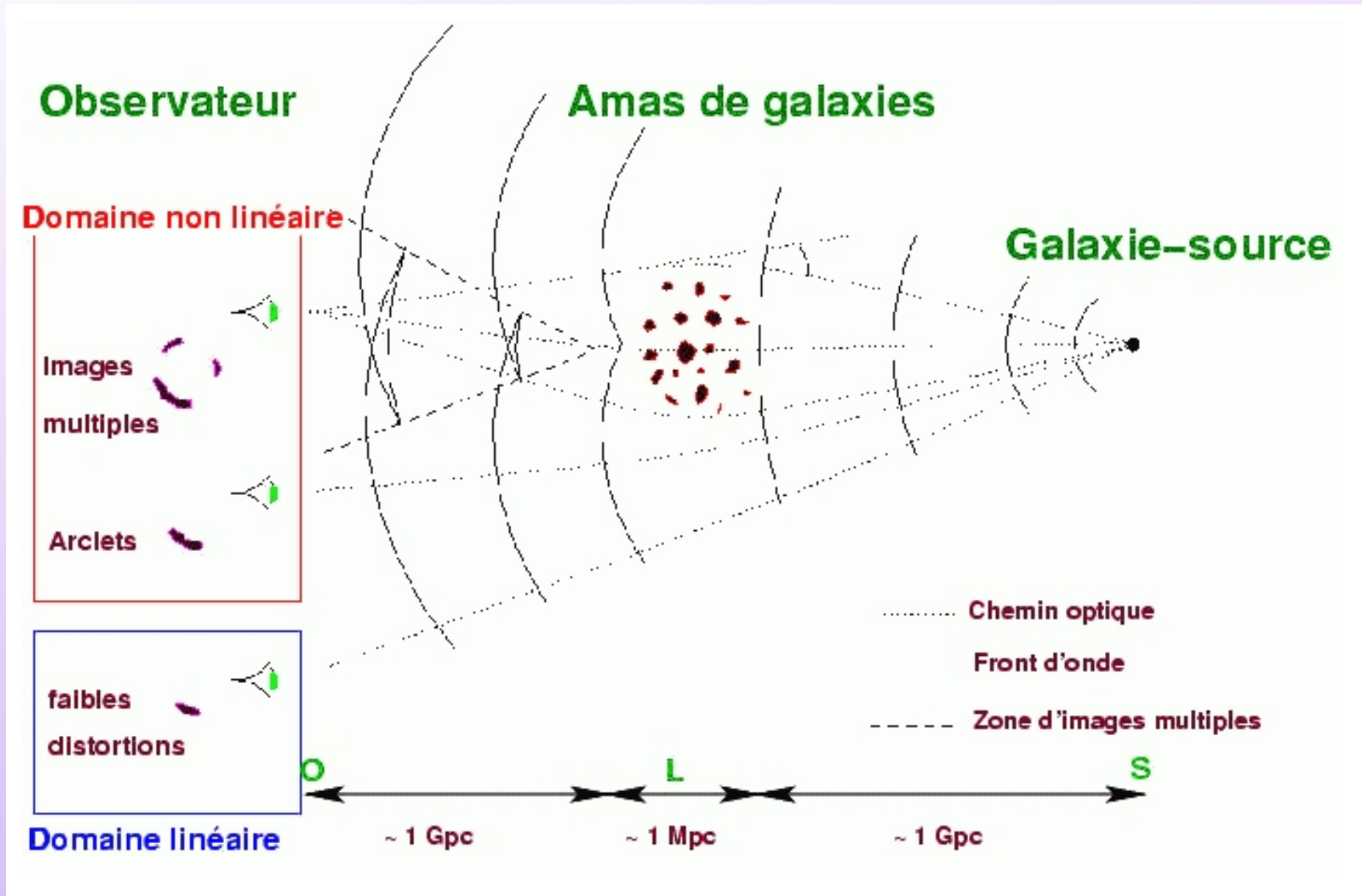
Deux Observables : le Nombre de γ_x relié à la Quantité de Gaz (M_{gaz})
et la Température ou Energie de ces γ_x , Reliée à leur Vitesse

Plus les Photons sont Rapides, plus le Potentiel est Profond (plus la Structure est Massive) pour Empêcher ces Particules de s'Échapper → M_{tot}
(Hypothèse : équilibre Hydrostatique)

⇒ Amas de Galaxies : Matière Noire (~ 80%) + Gaz (~ 20%)

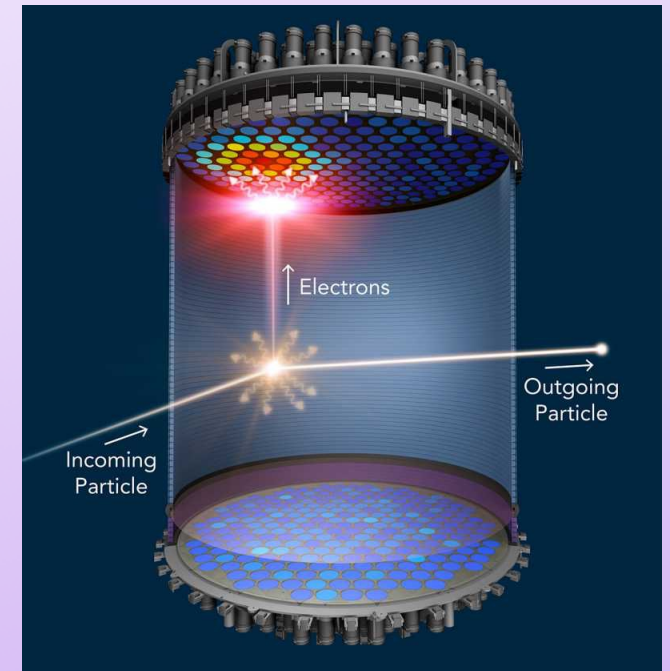
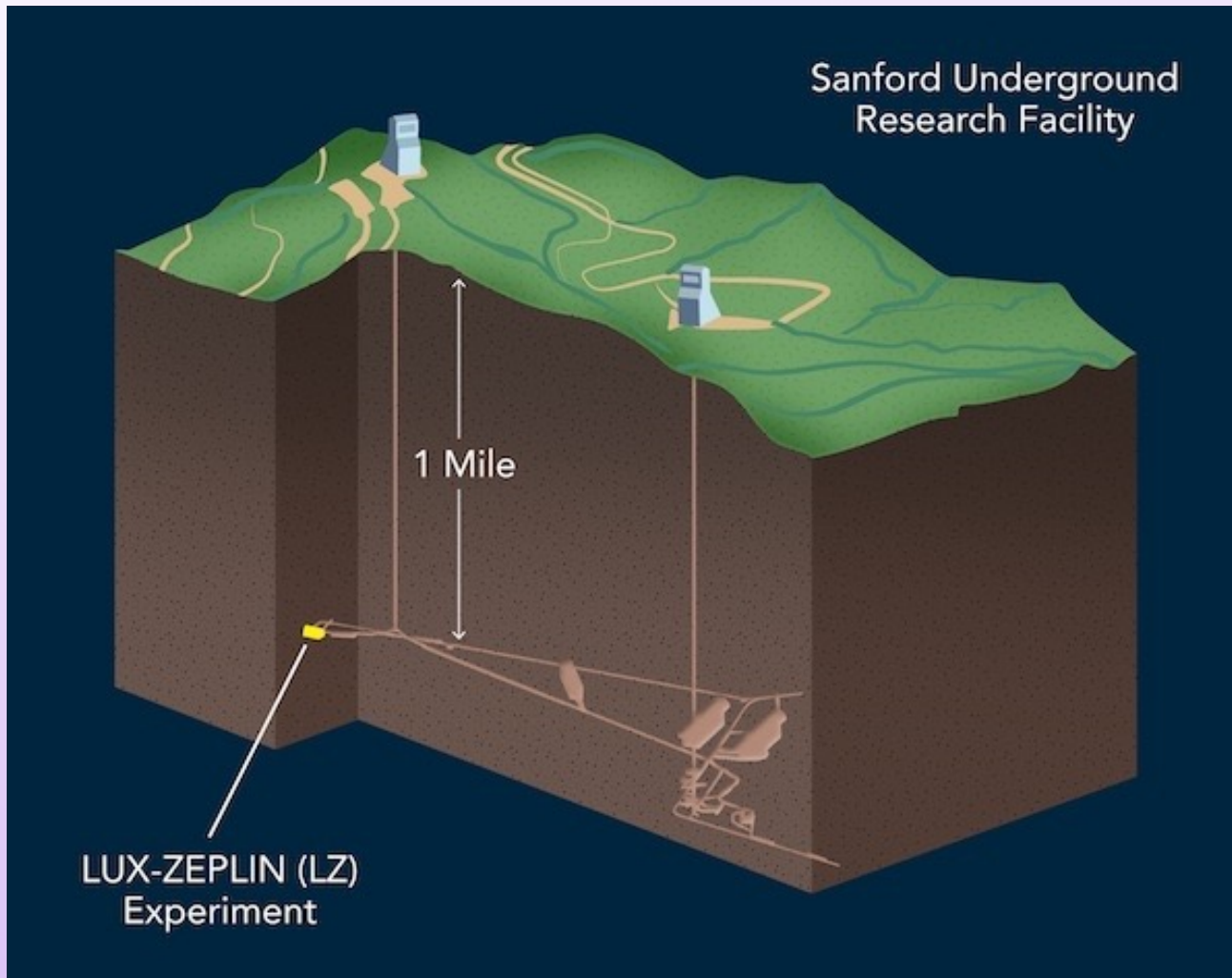


Lentilles Gravitationnelles



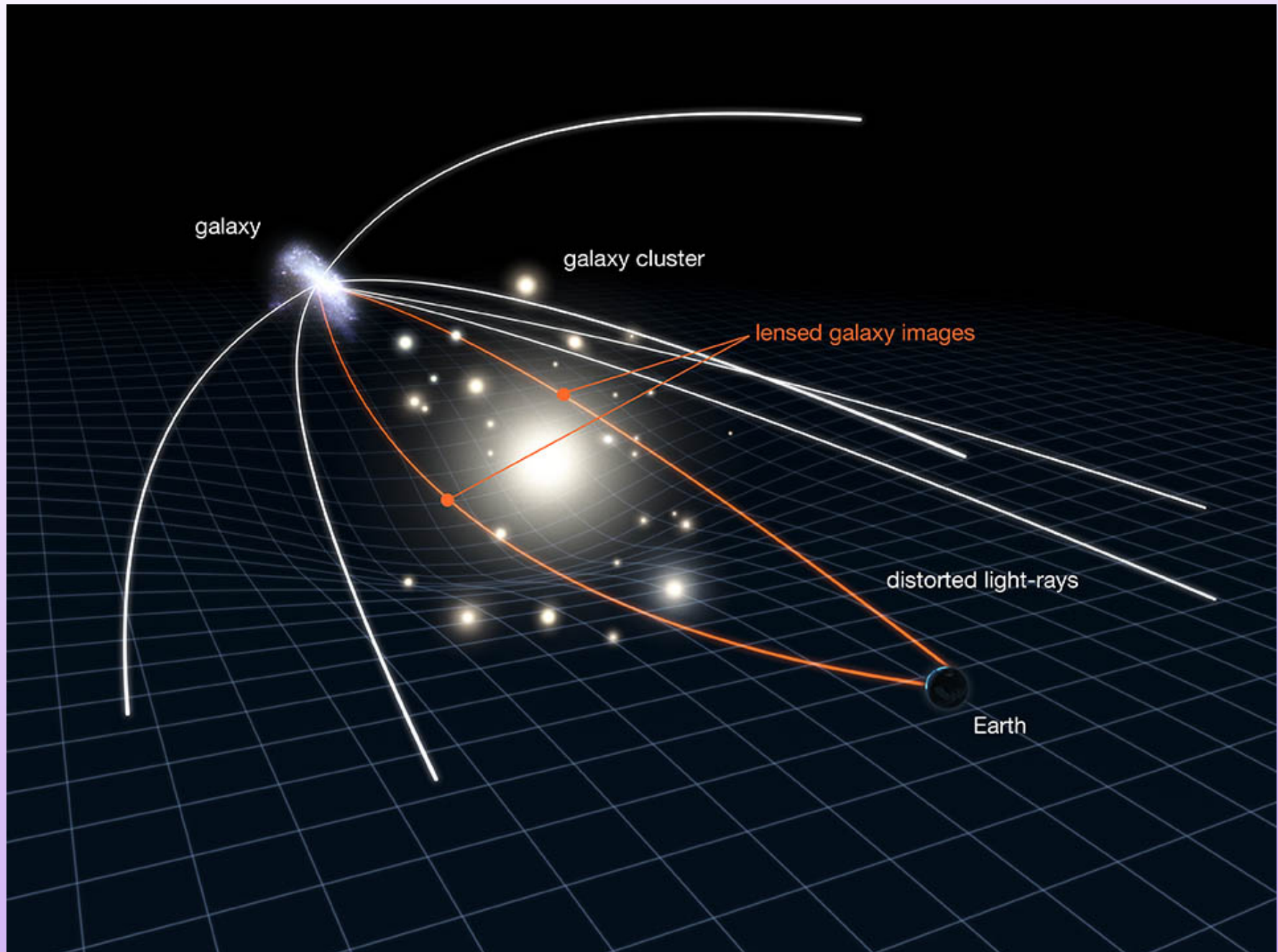
Matière Noire Nécessaire pour expliquer ces “mirages gravitationnels” -> *Evidences Indirectes*

Direct Dark Matter Searches (Astro Particle Physics)

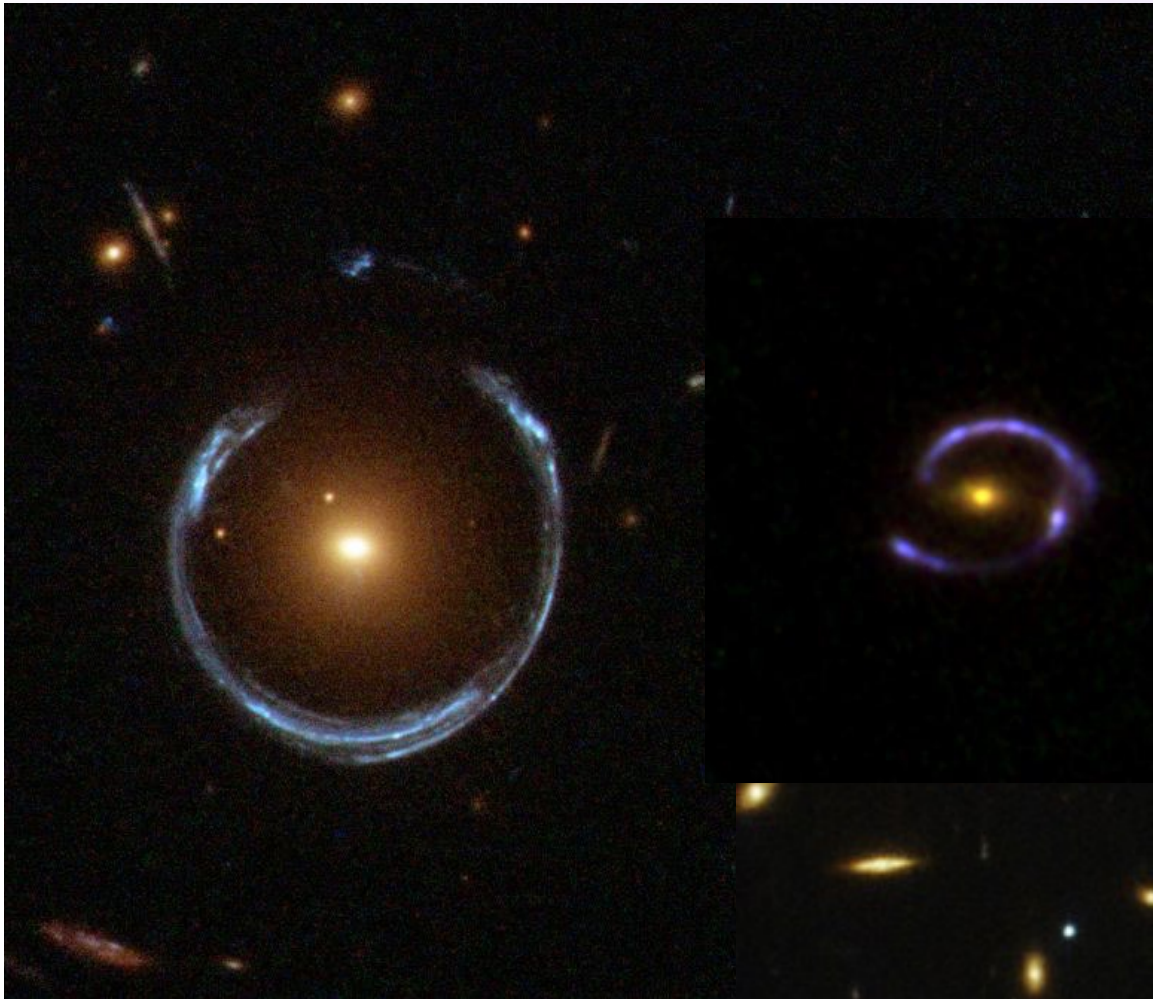


Aucune Détection So Far ... Alternative : Modified Gravity ?

Mass concentration (Galaxy / Galaxy Cluster): Locally deforms Space Time \rightarrow Light is Bent



Galaxy : $Re \sim 2''$



Galaxy Group
 $Re \sim 5''$

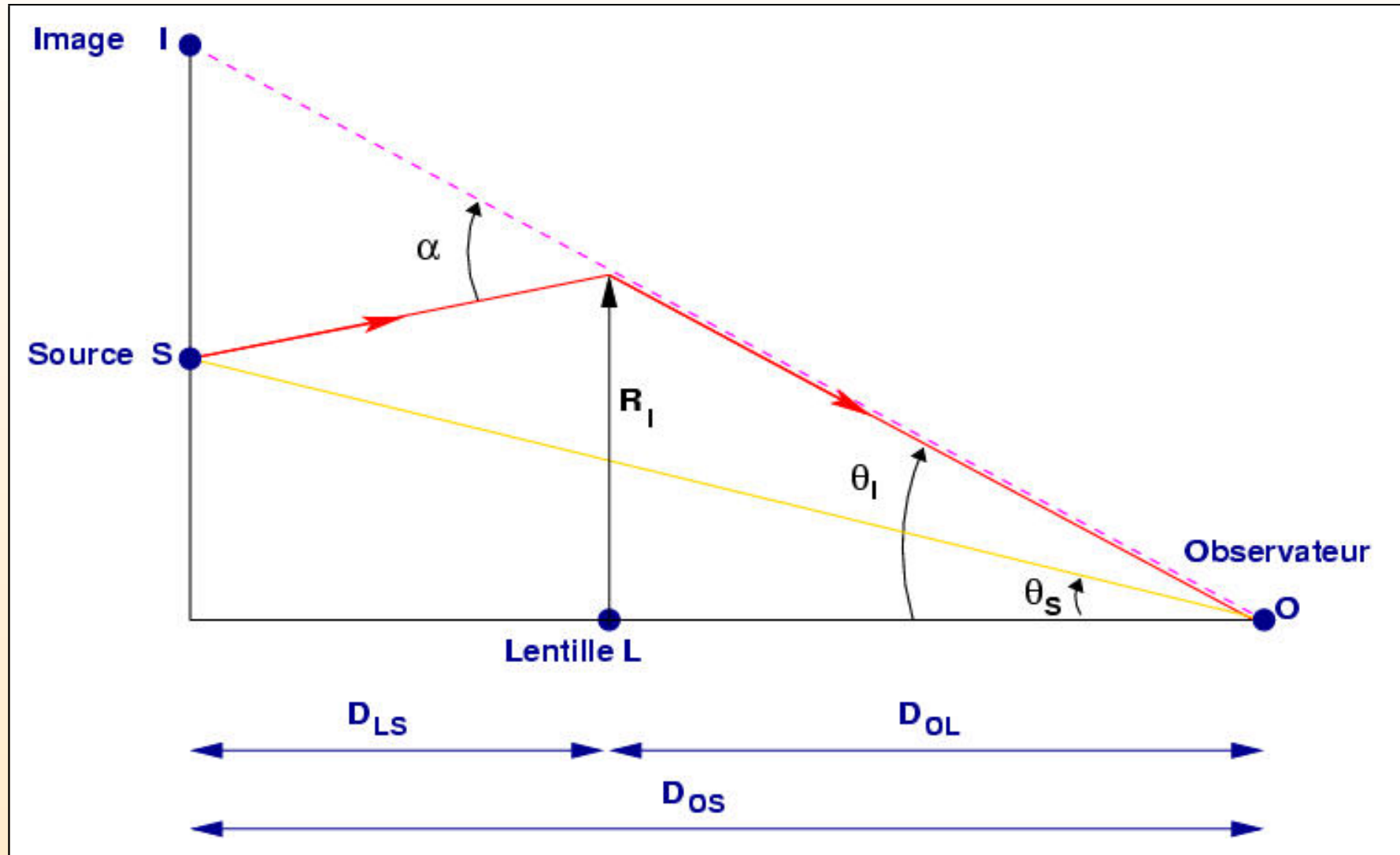


Galaxy Clusters : $R_e > 10''$





Optic Configuration



$$\text{Equation : } \vec{\theta}_S = \vec{\theta}_I - \frac{2}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_{OS} D_{OL}} \vec{\nabla}_{\vec{\theta}} \phi(\vec{\theta}_I)$$

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial \vec{u}_I}{\partial \vec{u}_S} \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad a^{-1} = J$$

Amplification Matrix :

$$a^{-1} = \begin{pmatrix} 1 - \partial_{xx}\varphi & -\partial_{yx}\varphi \\ \partial_{xy}\varphi & 1 - \partial_{yy}\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix}$$

with :

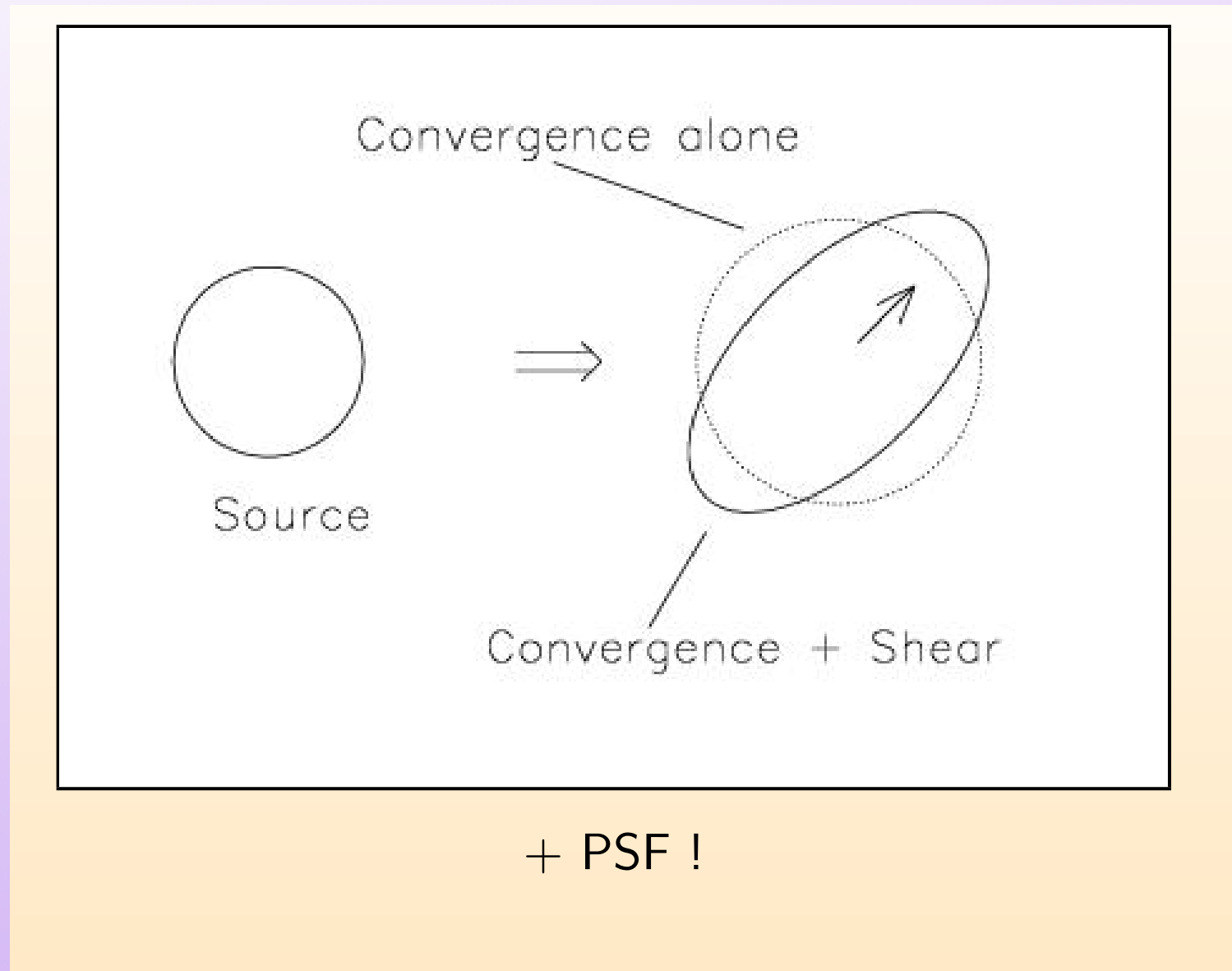
$$2\kappa = \frac{\Sigma}{\Sigma_{\text{crit}}}$$

the isotropic *convergence* and :

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1 + \gamma_2}$$

the *shear* which quantify the stretching induced by the lens

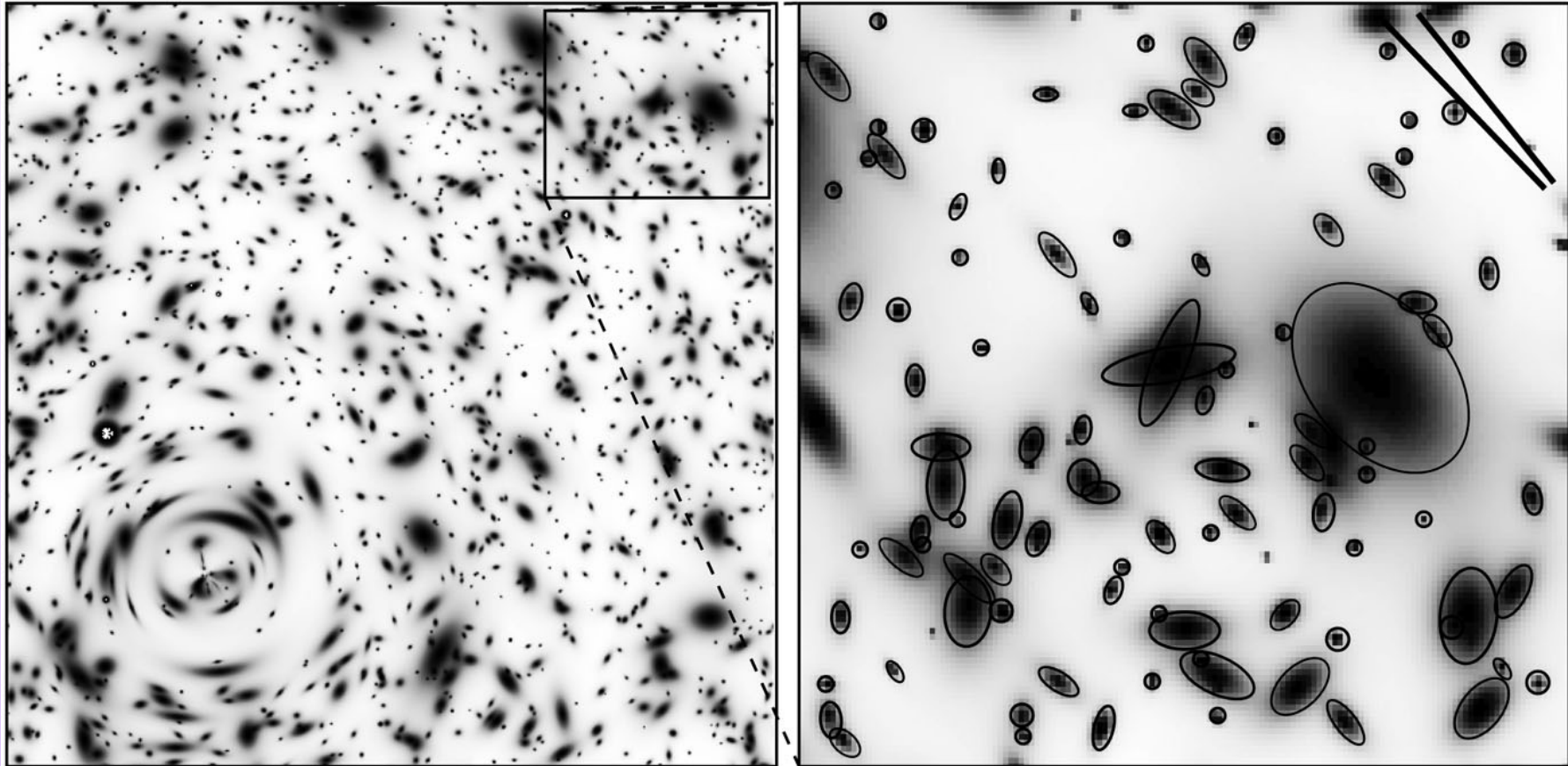
Transformation d'une source circulaire via lensing



Weak or Strong Lensing ?

$$\Sigma_{\text{crit}} = \frac{cH_0}{2\pi G} \frac{D_{\text{OS}}}{D_{\text{LS}}D_{\text{OL}}} \Rightarrow \rho \sim 1000 \times \rho_{\text{crit}} \sim 10^{-25} \text{g cm}^{-3}$$

$\sim 40''$



SL : multiple images, giant arcs — WL : statistically
—> **Mesurer la Masse des Amas de Galaxies**

Produire des Cartes de Masse: **why** ?

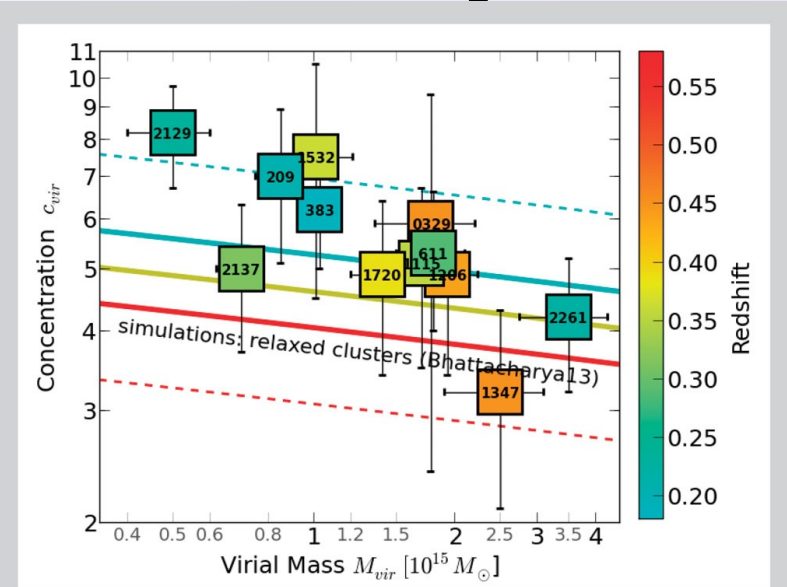
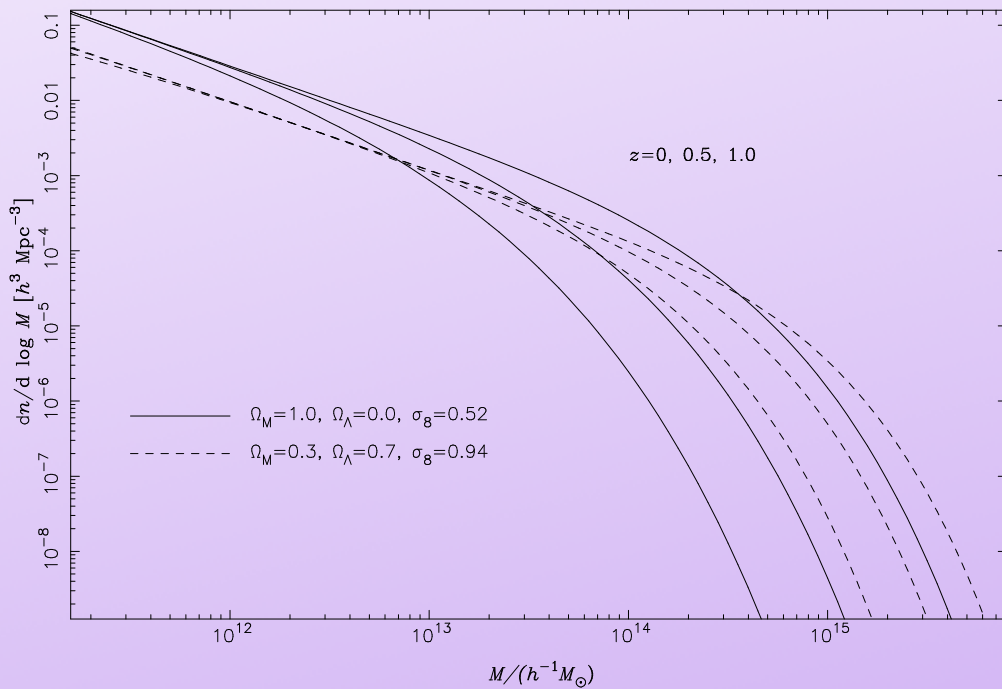
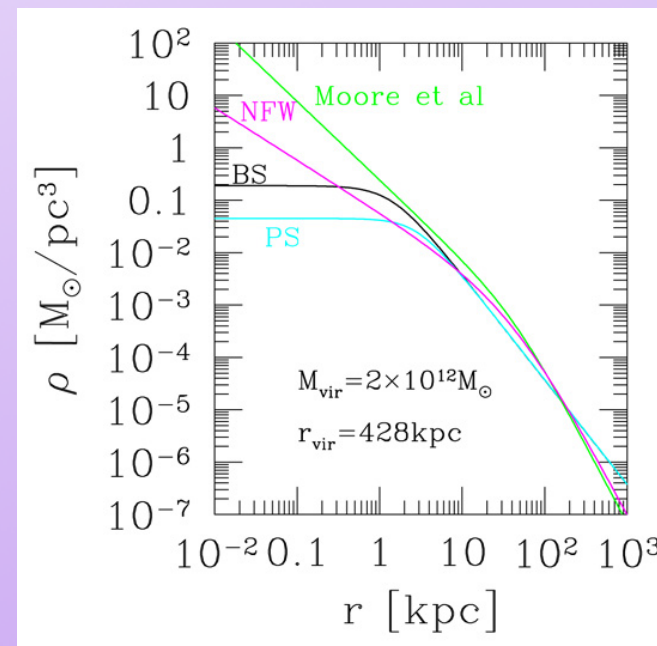


Figure 3: The relation between cluster mass and concentration for 12 of the 20 CLASH clusters selected by X-ray (Merten et al. 2014). Data points and predictions from N -body simulations (Bhattacharya et al. 2013) are color-coded by redshift. The numbers inside data points identify the cluster (e.g., 2129 = MACSJ2129.4-0741).



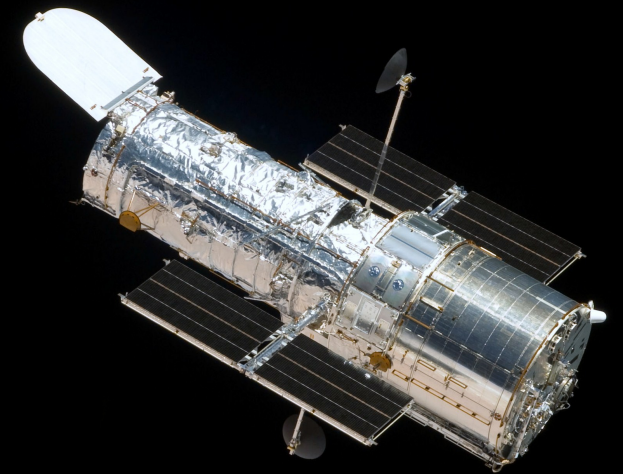
How ? Different Methods

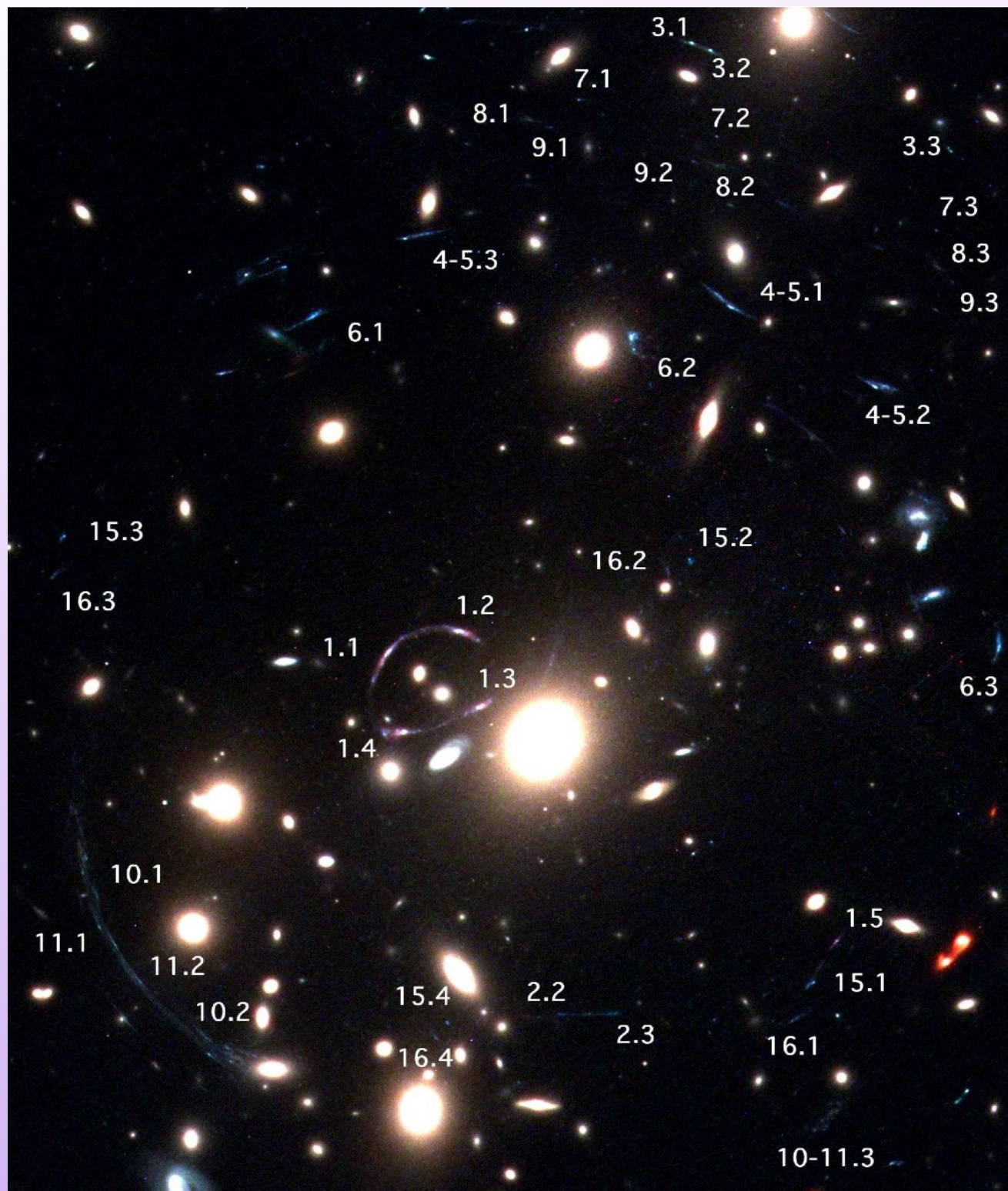
A partir d'observation d'images multiples dans les amas de galaxies

Regrouper les images en systèmes
correspondant à une même source d'arrière-plan

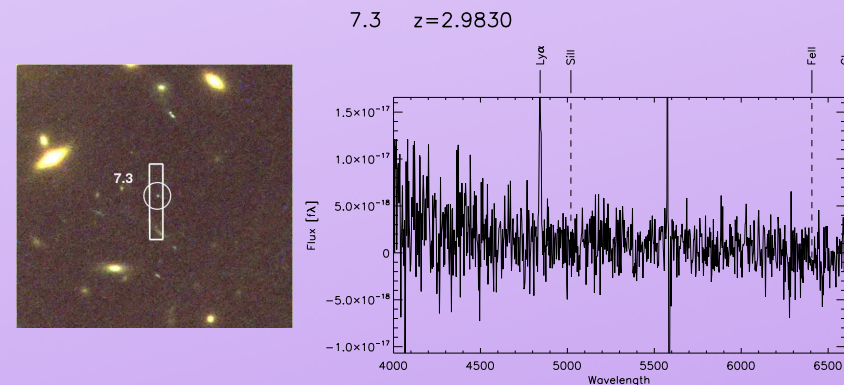
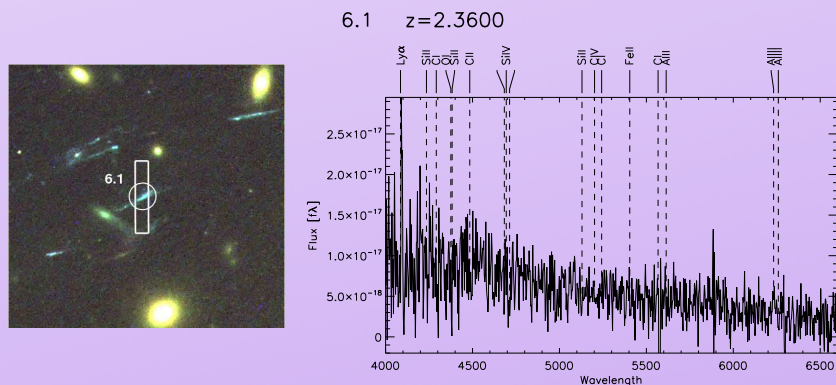
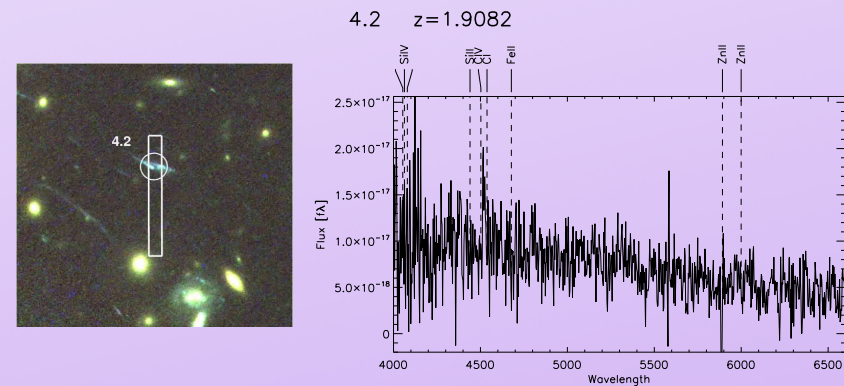
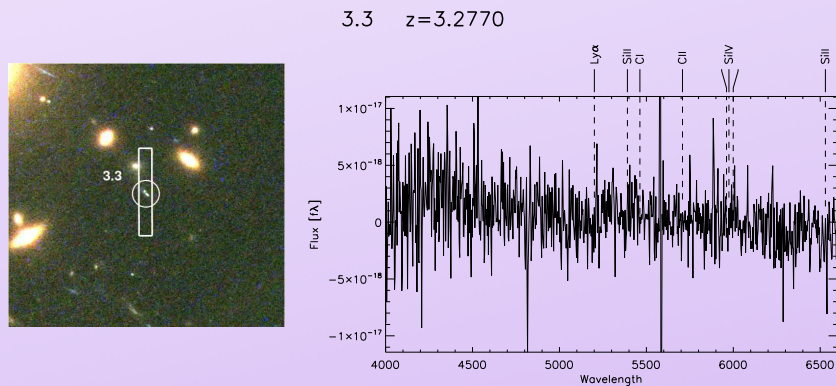
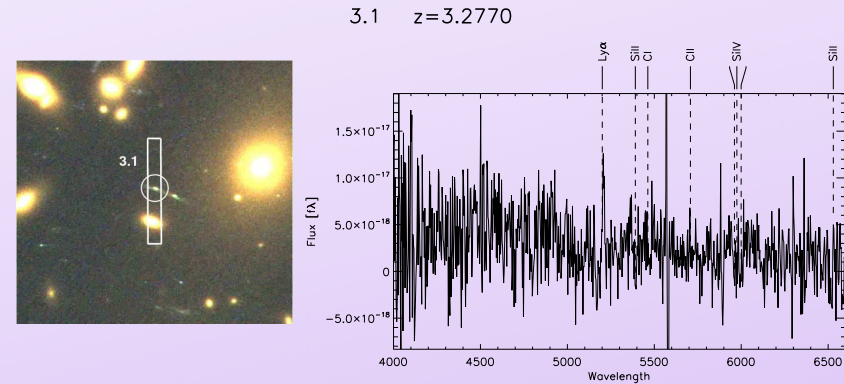
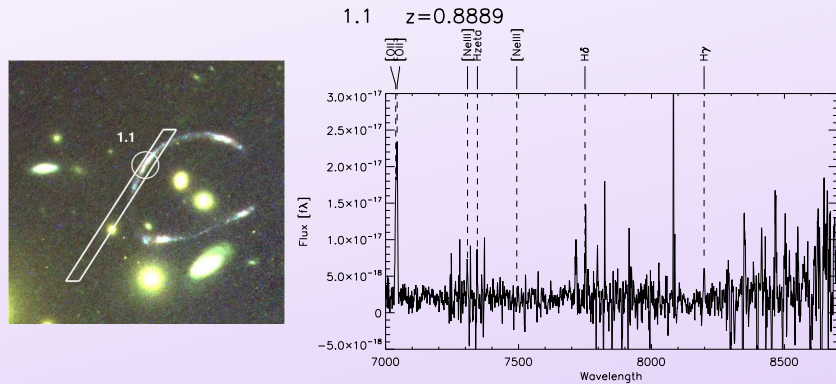


Qui va avec Qui?

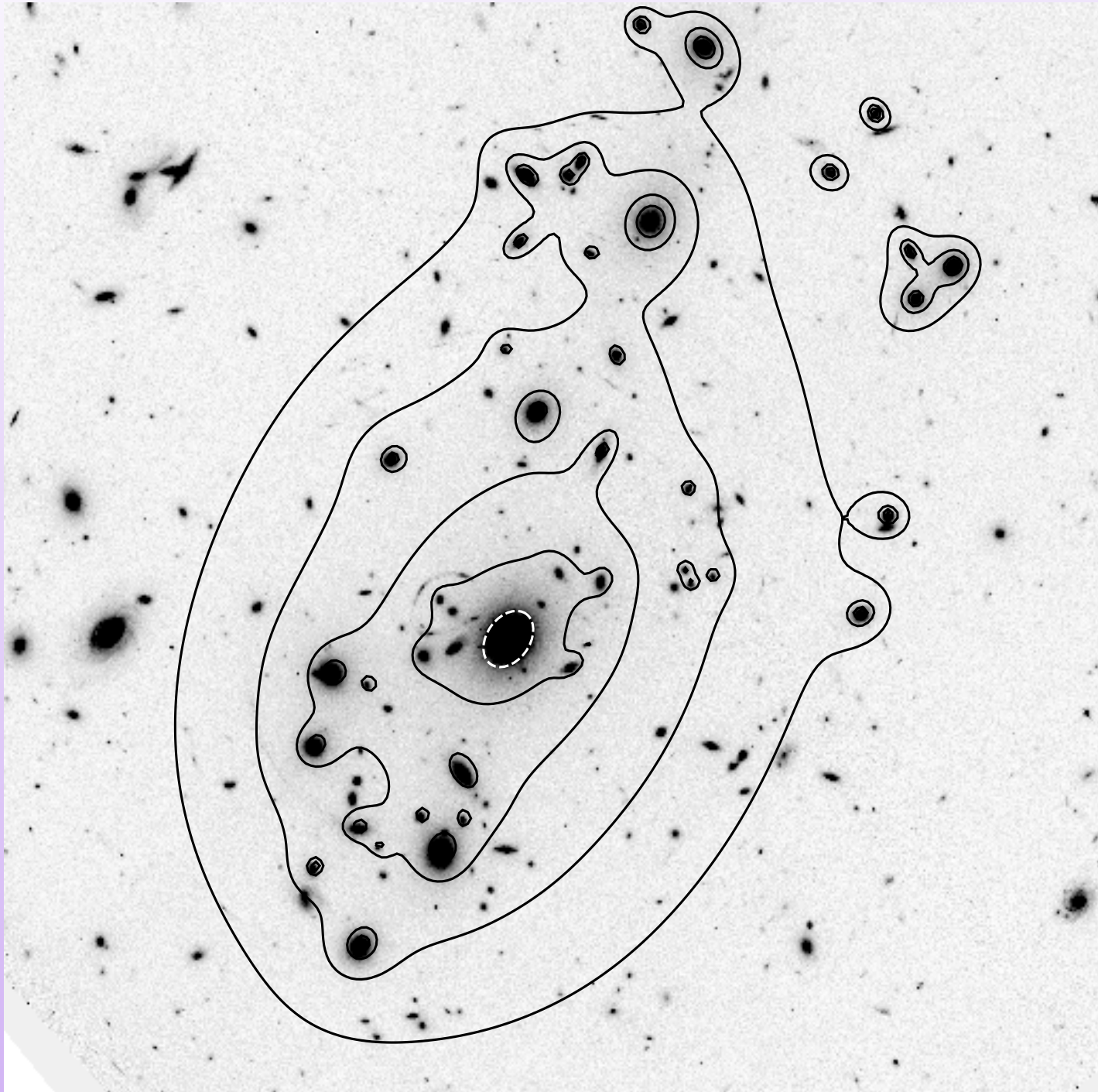




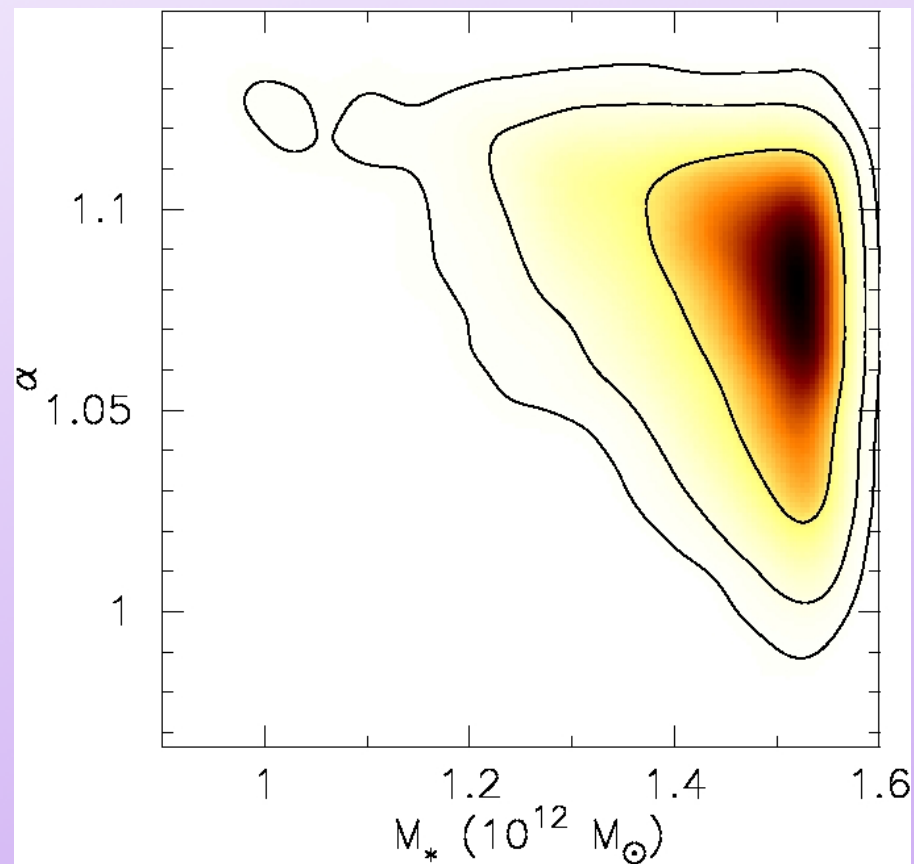
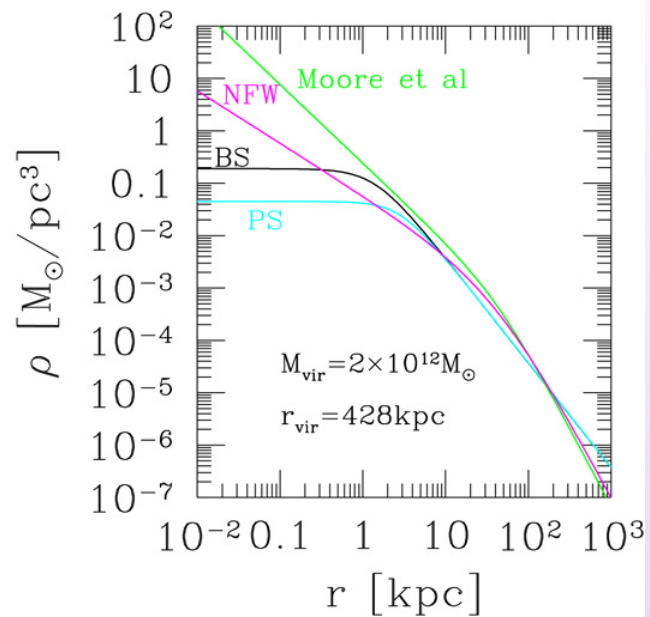
Mesure de Distance (Redshift): Calibrer le modèle de masse



Carte de Masse (2D)



Contraintes très centrales: pente du profil au centre ?



Télescope Gravitationnel ! Mass Model is Crucial

