

# ***Les scénarios cosmologiques à l'épreuve des lentilles gravitationnelles***

***Y. Mellier***

Institut d'Astrophysique de Paris

&

Observatoire de Paris

*24 avril 2004*

# La cosmologie

- Science tentant de rendre compte du contenu de l'univers, de sa structuration, et d'expliquer les étapes de sa formation et de son évolution
- Elle se base sur des observations, des théories de la physique fondamentale et des principes qui lui sont propres (principe cosmologique, postulats sur les relations entre courbure et contenu matière-énergie de l'univers)
- Elle est devenue une science physique au XXIème siècle, depuis qu'elle construit des modèles qui peuvent être confrontés aux faits observationnels.

# Les fondements de la cosmologie

- Relativité Générale
- Principe Cosmologique

- Equations d'Einstein
- Equation d'état: modèles d'Univers

- Paradigme du Big Bang

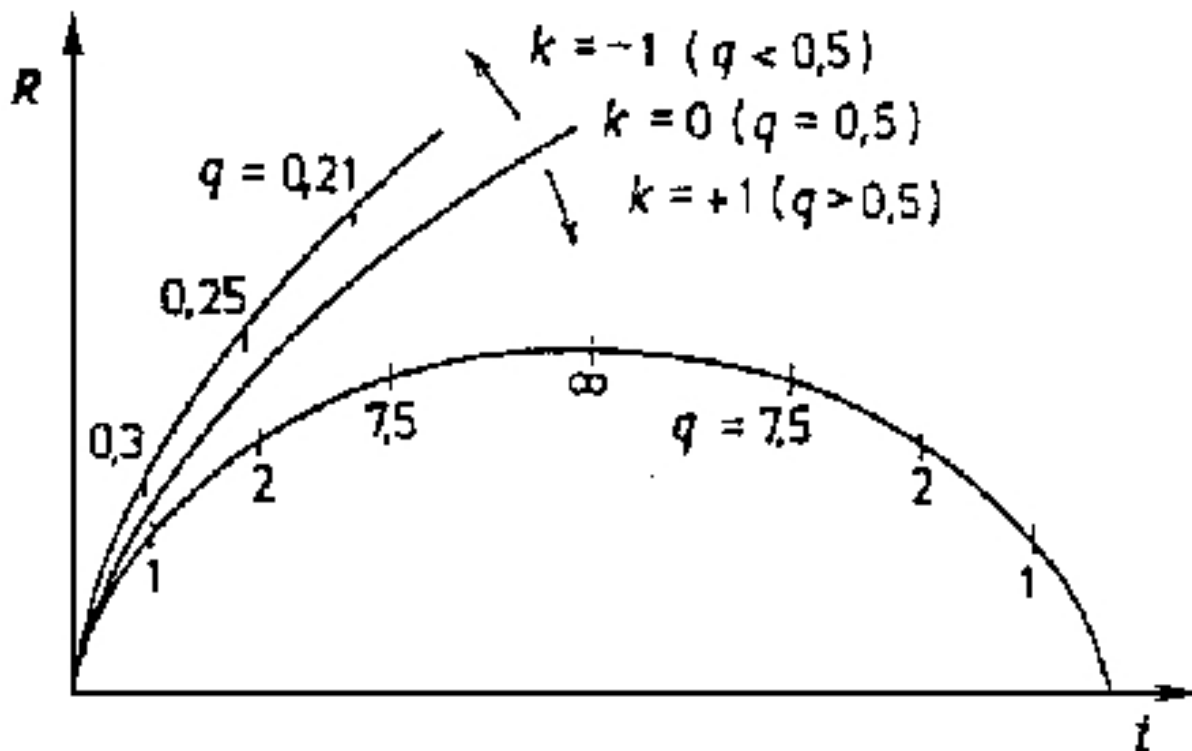
- Théorie de l'inflation et physique de l'Univers primordial

- Expansion de l'Univers
- Abondance des éléments légers
- Fond de rayonnement micro-onde à  $T=2.7K$

Une particularité: la vitesse de la lumière est constante...  
*On peut remonter le temps!*

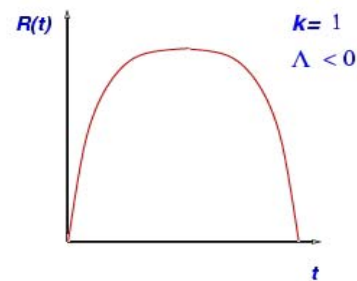
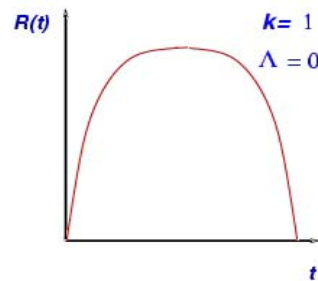
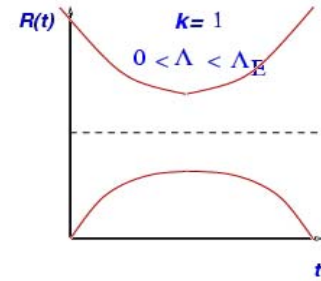
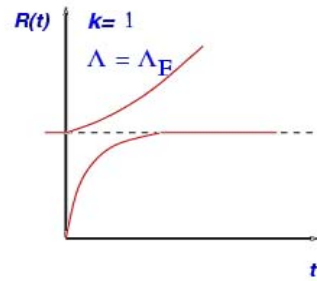
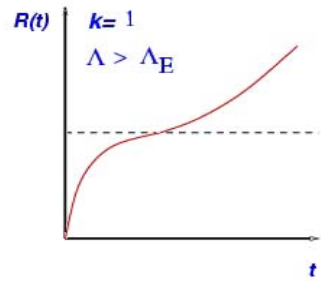
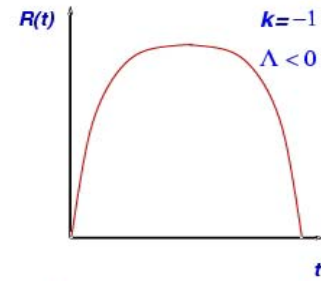
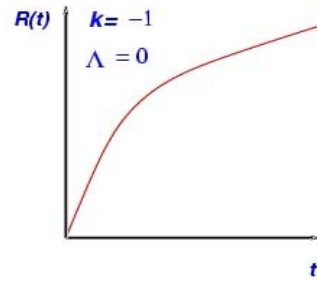
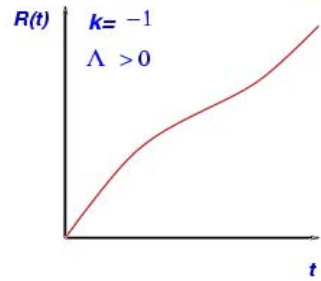
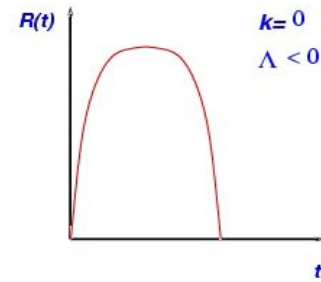
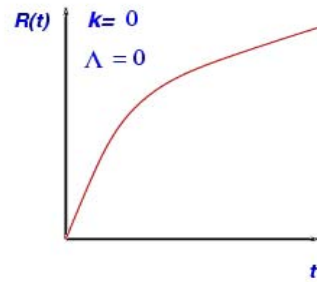
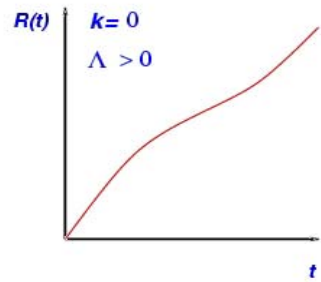
# Les 3 modèles standards

Modèle	Géométrie	$k$	$\Omega$	$q_0$	Age	Destin
Fermé	Sphérique	+1	>1	>1/2	$t_0 < 2/3 t_H$	recollapse
EdS	Plat	0	=1	=1/2	$t_0 = 2/3 t_H$	expansion infinie
Ouvert	Hyperbolique	-1	<1	<1/2	$2/3 t_H < t_0 < t_H$	expansion infinie

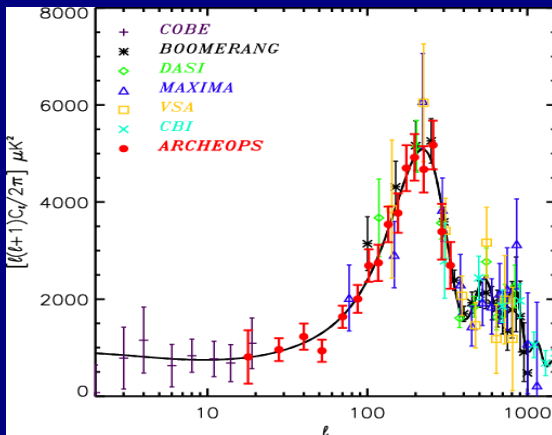
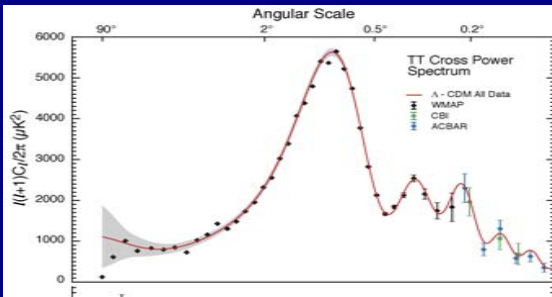
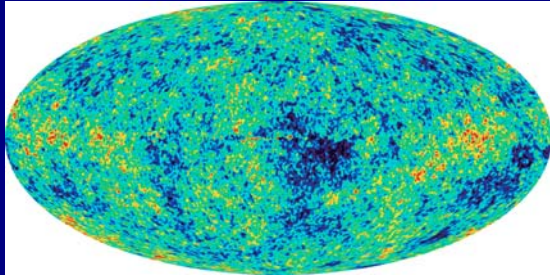


$\Omega$  = densité d'une  
 Composante par  
 rapport à sa valeur  
 pour un Univers  
 critique  $k=0$

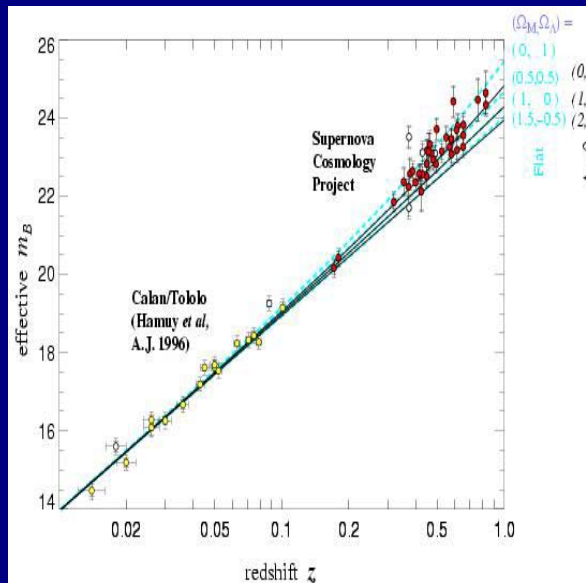
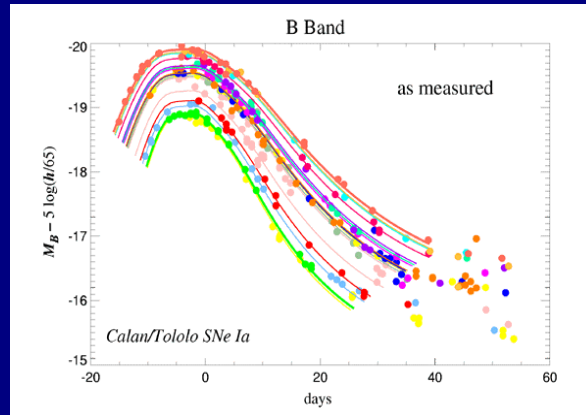
# Modèles mathématiques d'Univers... lequel est le bon?



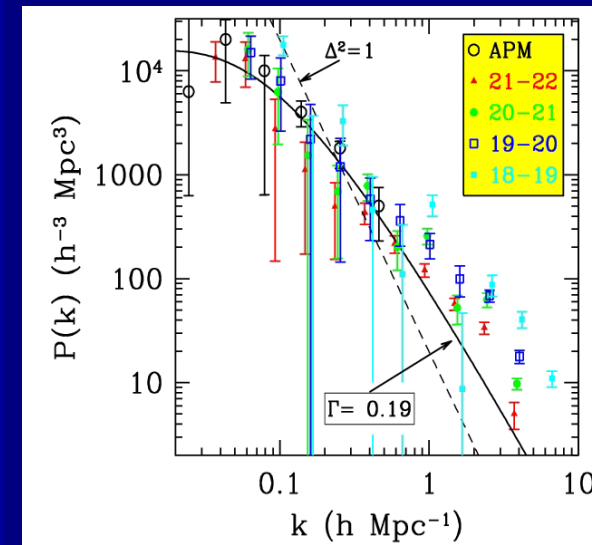
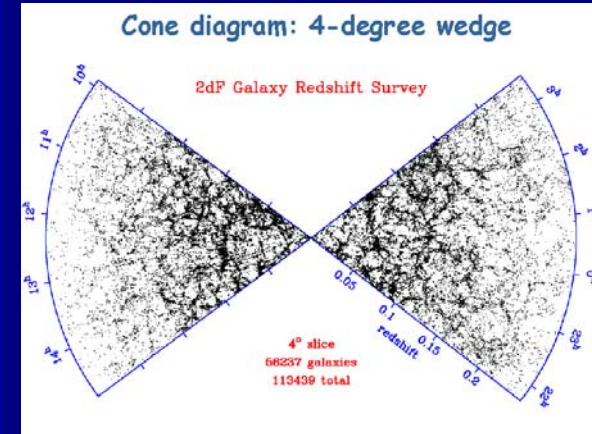
Fluctuations du fond cosmologique:  
géométrie et contenu  
de l'Univers  $z=1100$



Les supernovae  
SNIa sondent la  
géométrie de  
l'univers à  $z < 2$



Les galaxies  
montrent la  
matière à  $z \sim 0$



# Le scenario cosmologique

•Contenu de l'univers

- $\Omega_m$
- $\Omega_\lambda$
- $\Omega_v$
- $\Omega_\gamma$
- $\Omega_b$
- $\eta = n_b/n_\gamma$

Origine, nature et propriétés des fluctuations du vide quantique: vont former les galaxies, les grands filaments de l'univers

DAWN OF TIME

fraction second

inflation

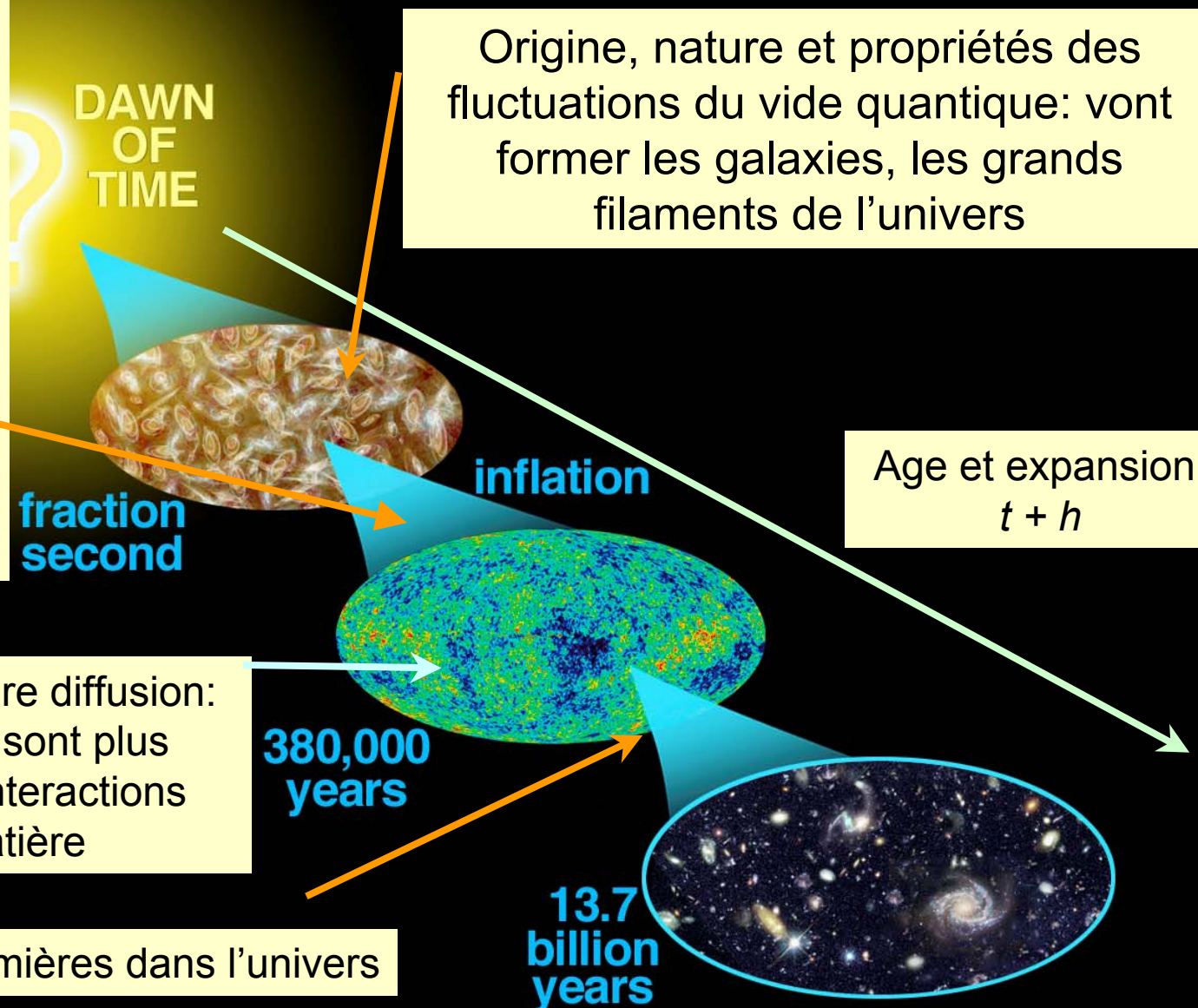
Age et expansion:  
 $t + h$

Surface de dernière diffusion:  
les photons ne sont plus piégés par les interactions avec la matière

380,000 years

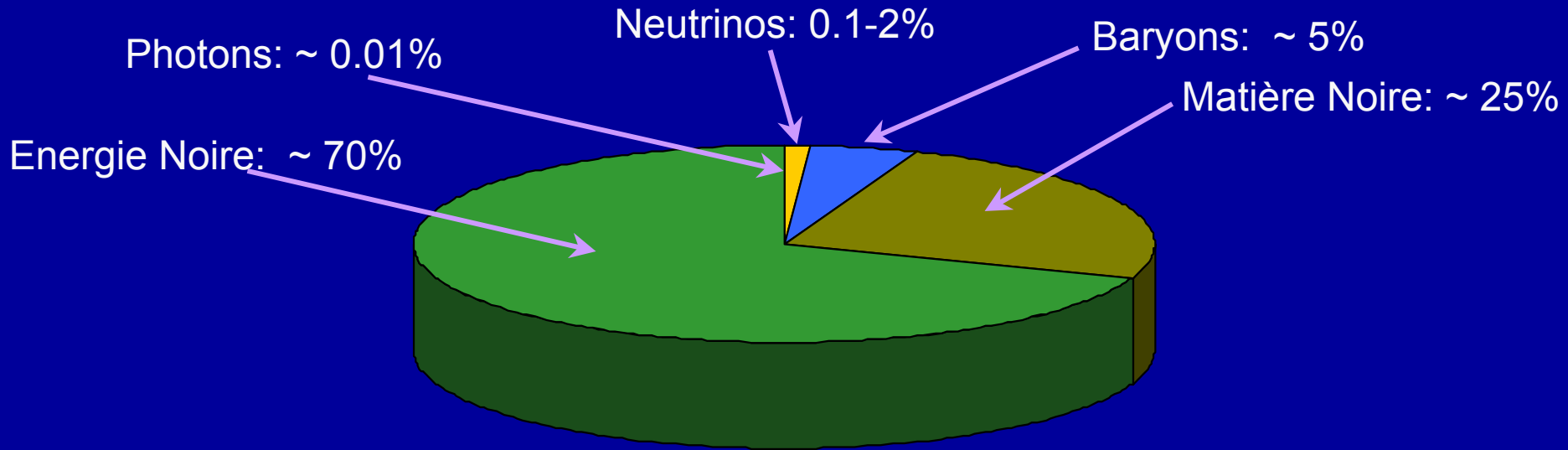
13.7 billion years

Premières lumières dans l'univers



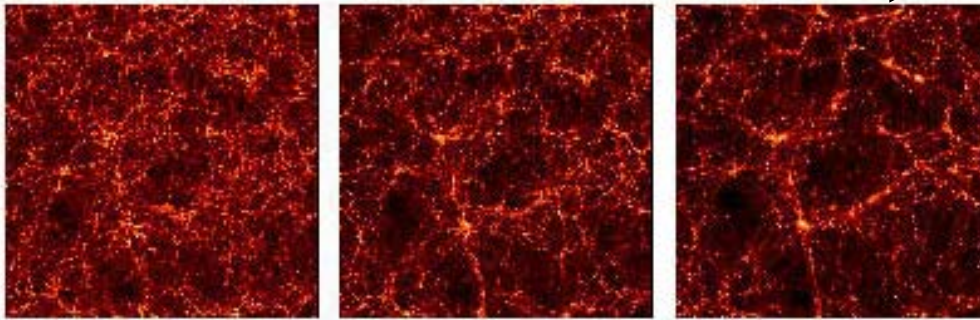
# Le paradigme actuel

- On pense connaître le contenu en énergie/matière

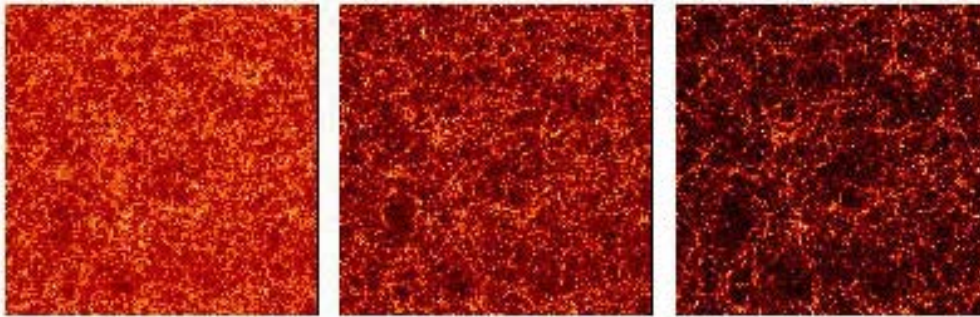
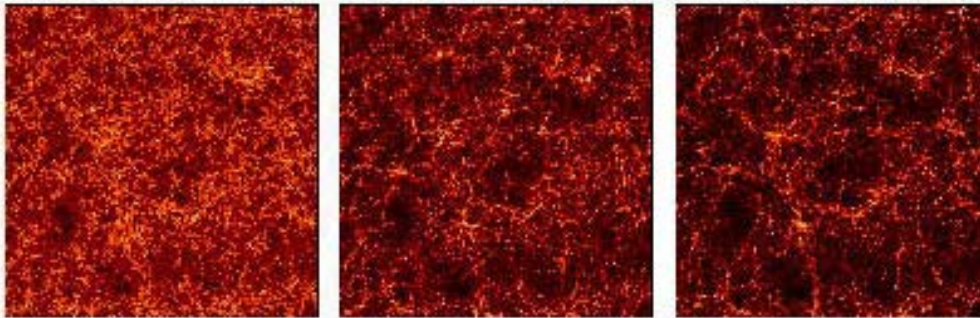


- Mais comment croire ce modèle fondé sur 95% de contenu totalement inconnu???
  - Matière noire : preuves?
  - Constante cosmologique: preuves?
  - Inflation : preuves?

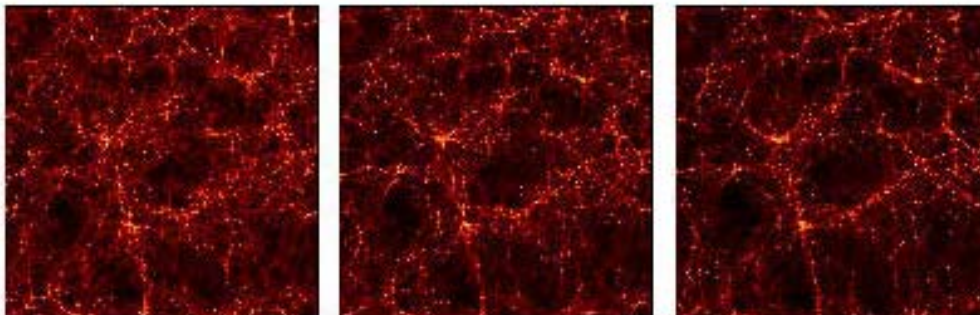


$z=3$  $z=1$  $z=0$ Temps  
→ $\Lambda$ CDM

SCDM

 $\tau$ CDM

OCDM

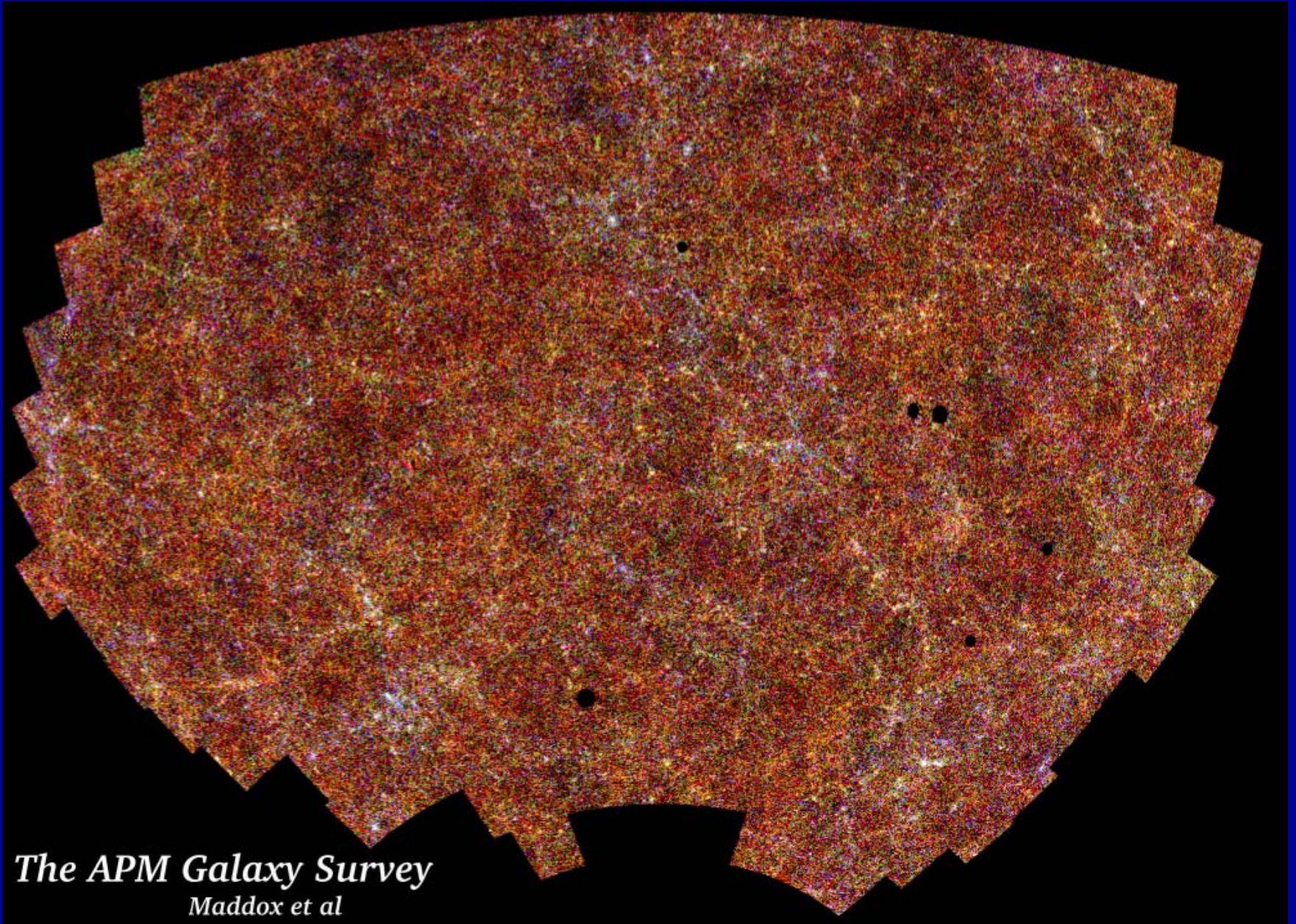


La formation des  
grandes structures  
dans l'univers:

la structuration et l'état  
d'évolution de l'univers  
dépendent de  $\Omega$  et  $\Lambda$ .

Voir les structures et  
analyser leurs propriétés  
permet donc de  
déterminer ces deux  
paramètres  
fondamentaux.

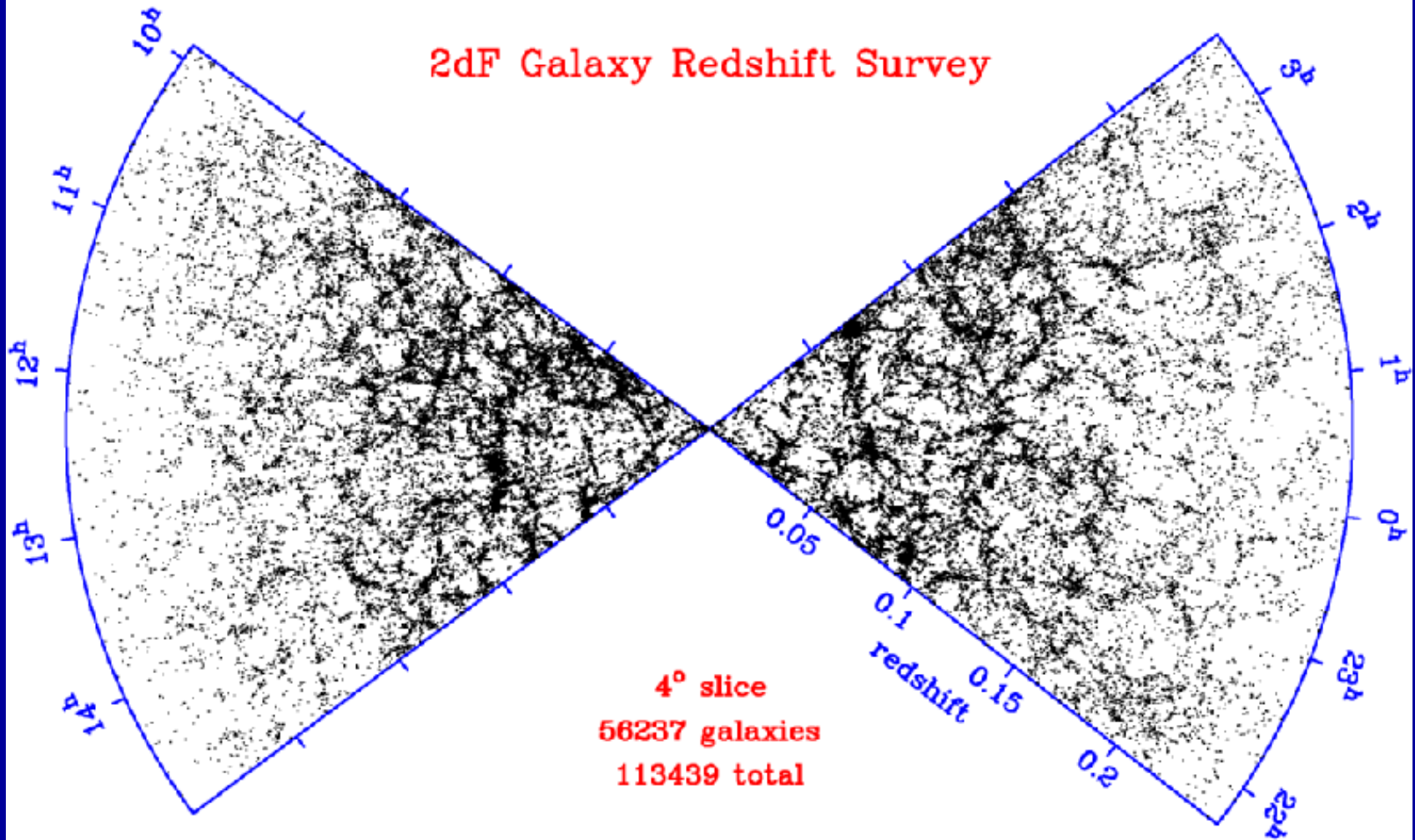
# Les galaxies pour tester la formation des grandes structures?



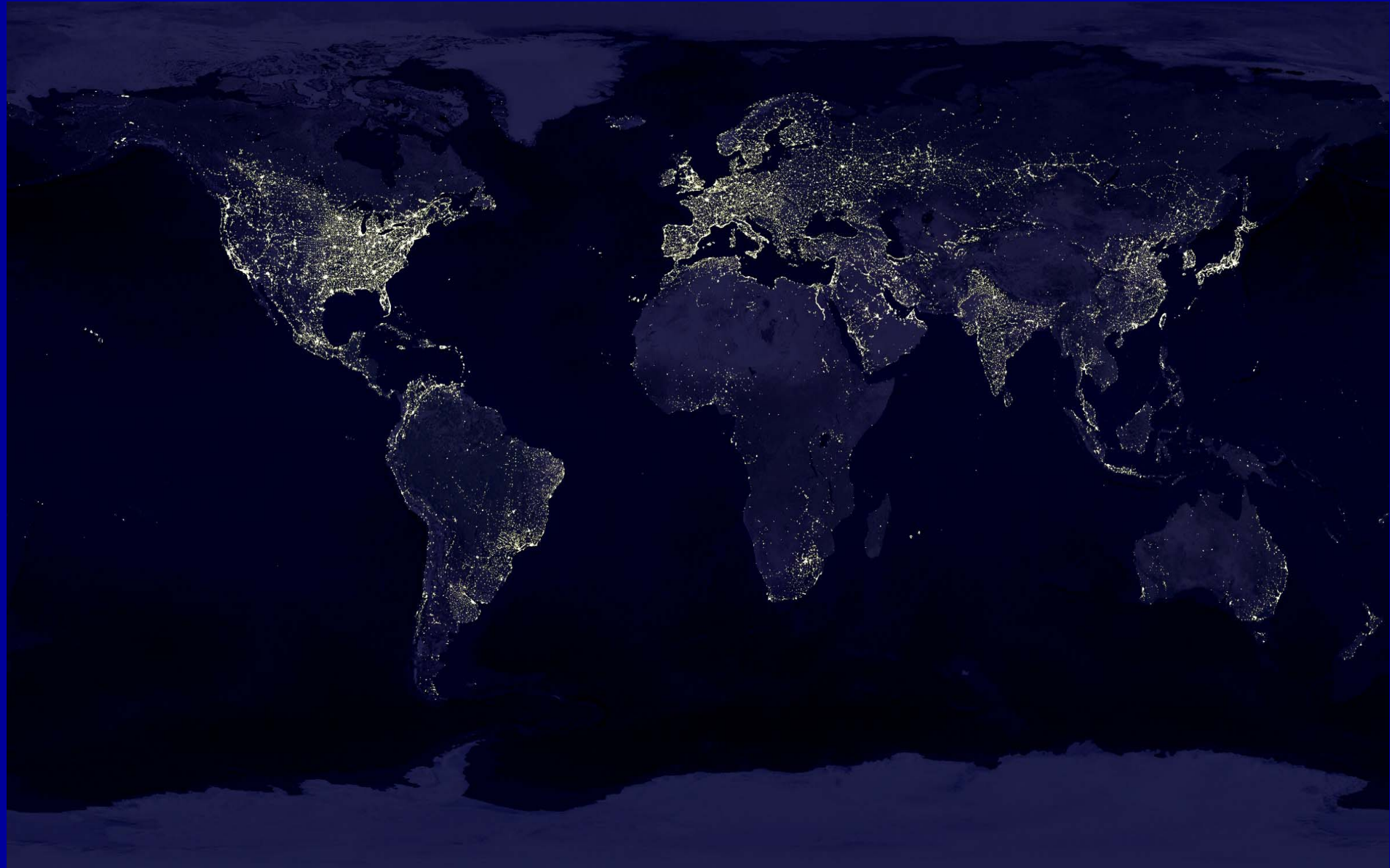
*The APM Galaxy Survey*  
*Maddox et al*

# Les galaxies pour tester la formation des grandes structures?

## Cone diagram: 4-degree wedge



La lumière ne montre pas toute la matière



- Est-ce que les galaxies nous montre tout le contenu de l'univers et révèlent exactement toute sa structuration?

Si non.... Comment comprendre l'univers?

- Est-ce que la relation matière-lumière varie avec le temps? Avec son contenu local ? Avec le type de galaxie observé?

Si oui... comment l'exploiter pour interpréter l'évolution de l'Univers ?

- Enfin...y a t-il de la matière « invisible » (sans lumière de galaxies associée) et comment la détecter? ....

Si oui .... Sommes nous totalement aveugle?

# A la recherche de la matière dans l'univers: peser les objets de l'univers à distance....

- Courbe de rotation des galaxies (galaxies spirales)
- Dynamique des galaxies et Théorème du viriel (galaxies elliptiques, groupes et amas de galaxies)
- Dynamique du gaz X (elliptiques très massives, groupes et amas de galaxies)
- Lentilles gravitationnelles (galaxies spirales, amas de galaxies)

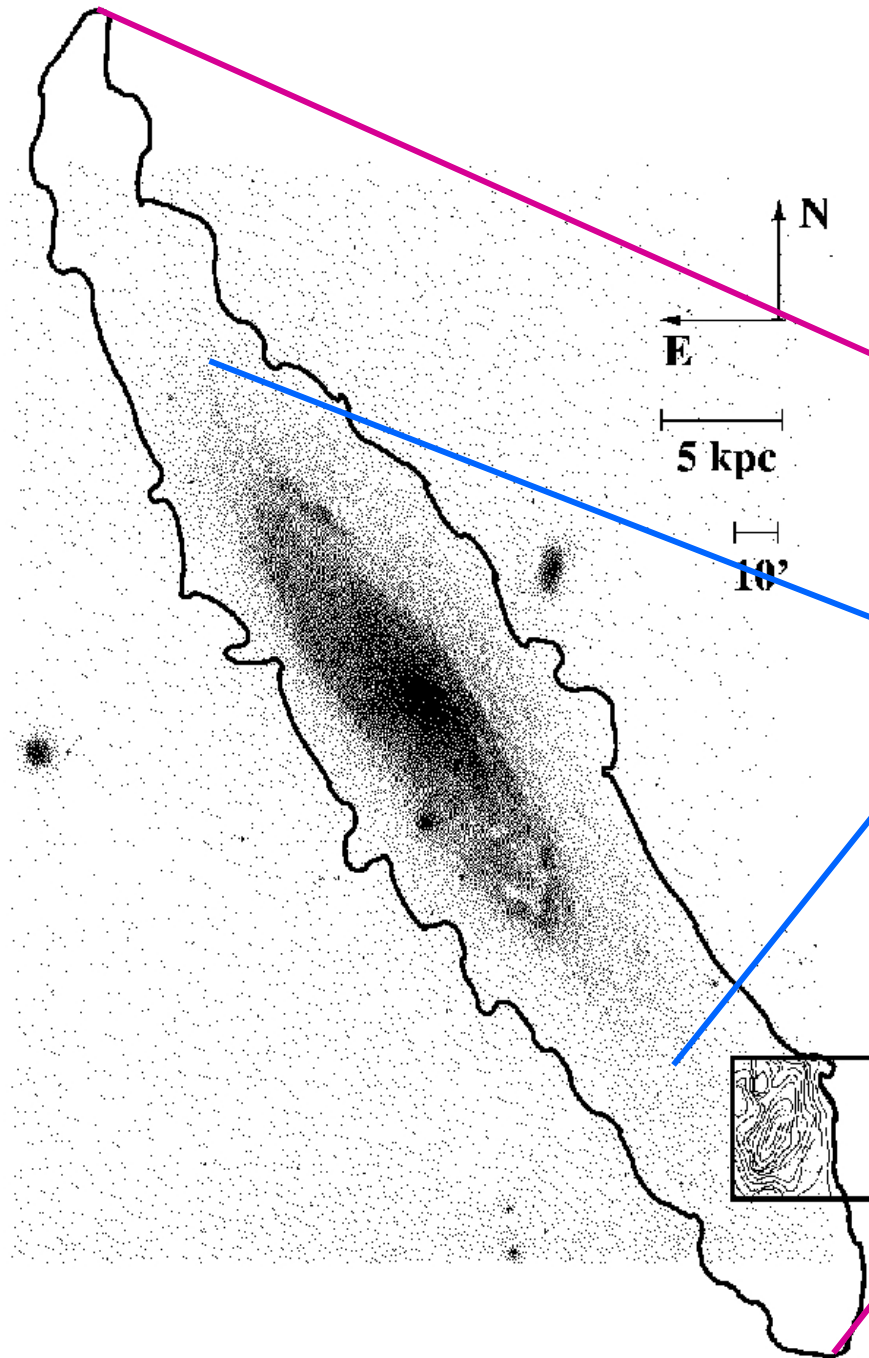


NGC 891 - Galaxie spirale vue par la tranche  
Télescope Canada-France-Hawaii

J.-C. Cullandre (CFHT), © 1999 CFHT



# La galaxie d'Andromède M31



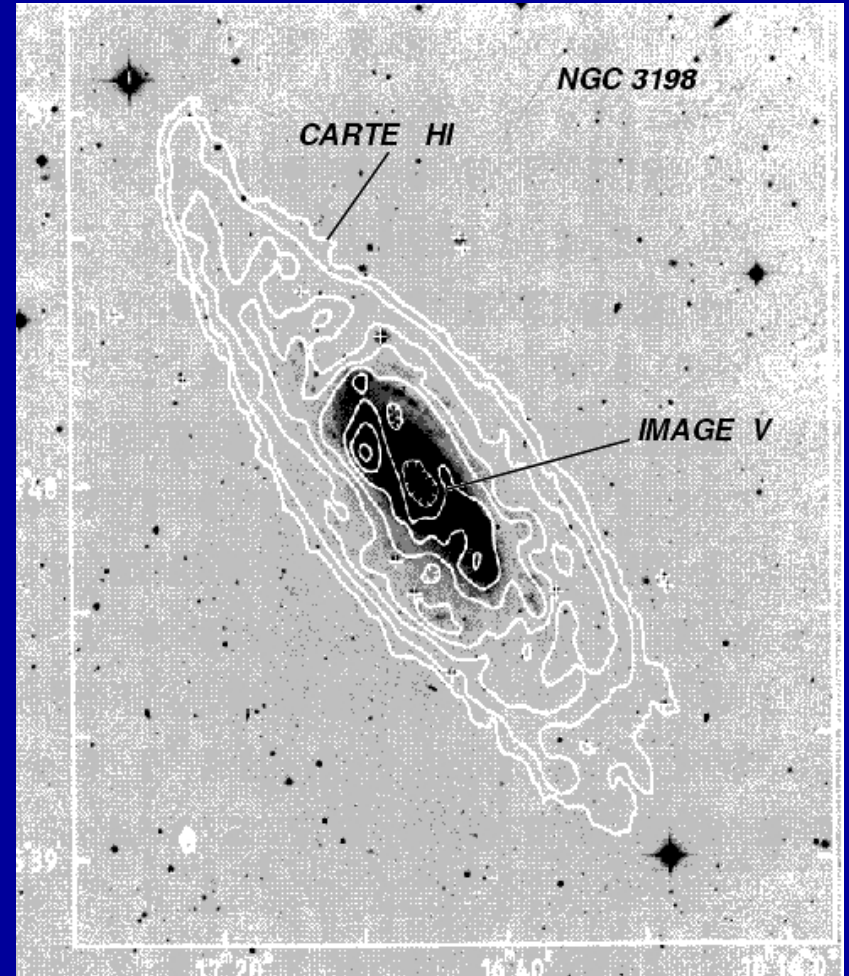
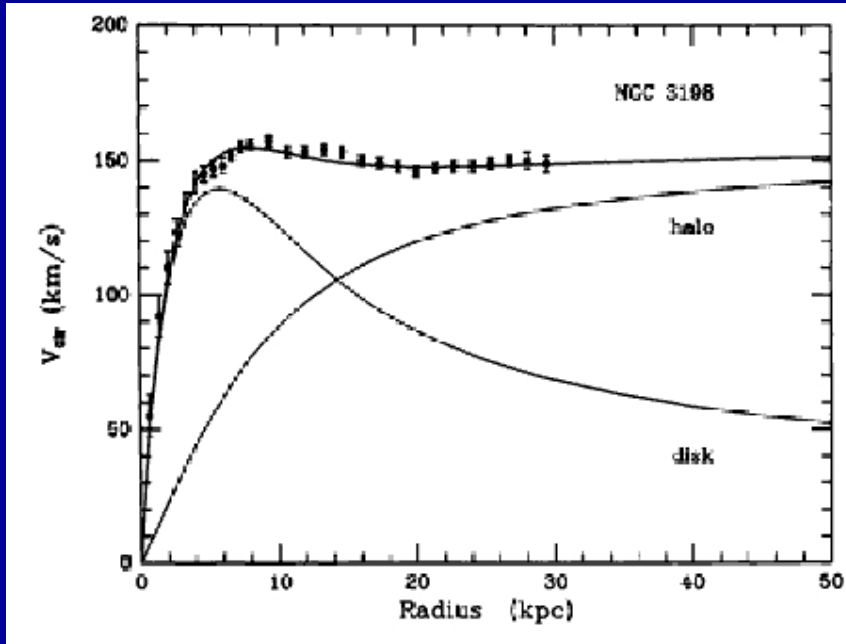
Domaine  
visible:  
étoiles

Domaine  
Radio:  
Gaz d'hydrogène

La partie non-optique du spectre  
electromagnétique montre  
d'autres composantes de la  
matière mais de peut pas rendre  
compte des propriétés  
dynamiques des structures.



# Les courbes de rotation des galaxies



Courbes de rotation des galaxies spirales: il existe de la matière invisible dans les galaxies....

Idem  
pour le  
plasma  
chaud....

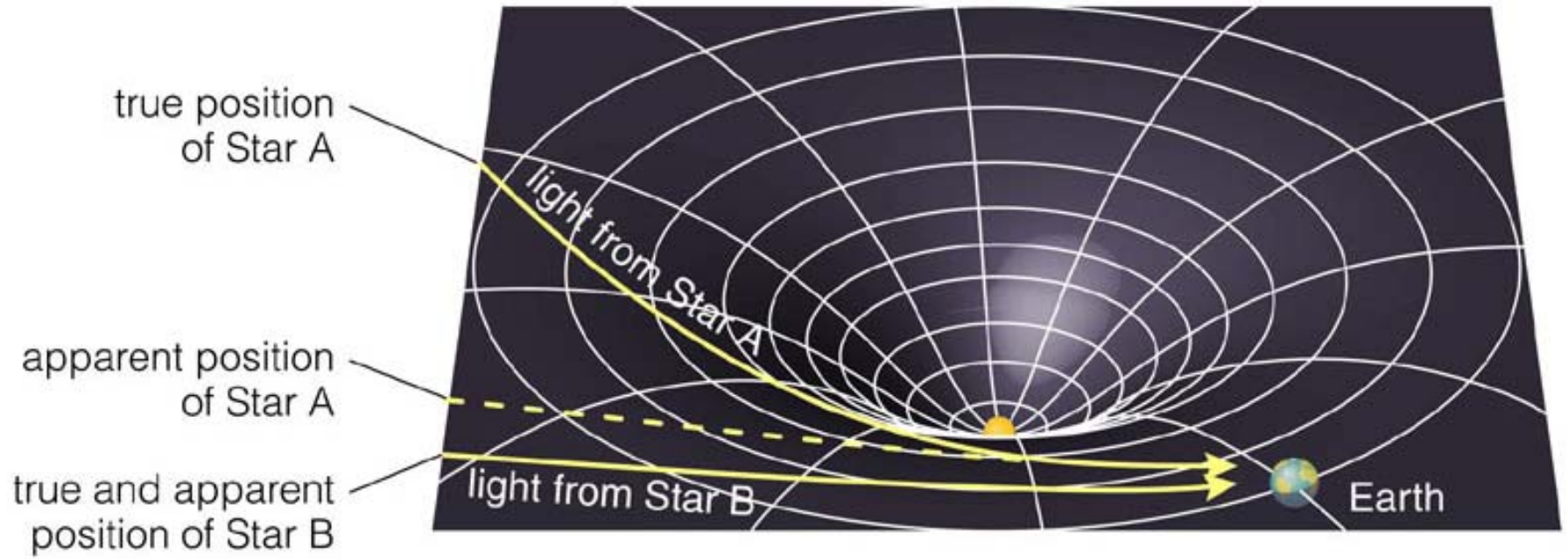
MS1358+6245

contours,  
 $\gamma / 0.49^2$  arcsec:  
10 5 2 1 0.5 0.2 0.1 0.05

Image X Chandra

# Doute: après tout... est-ce que nos analyses sont correctes?

- Nos mesure à distance utilisent des hypothèses difficiles à vérifier;
- Il faudrait une mesure directe qui « voit » la matière sans utiliser la lumière

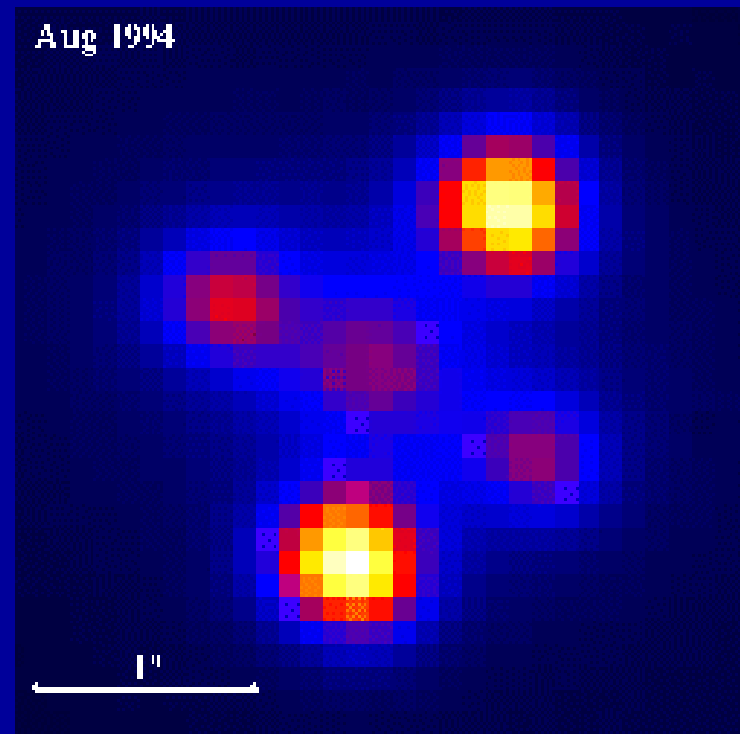
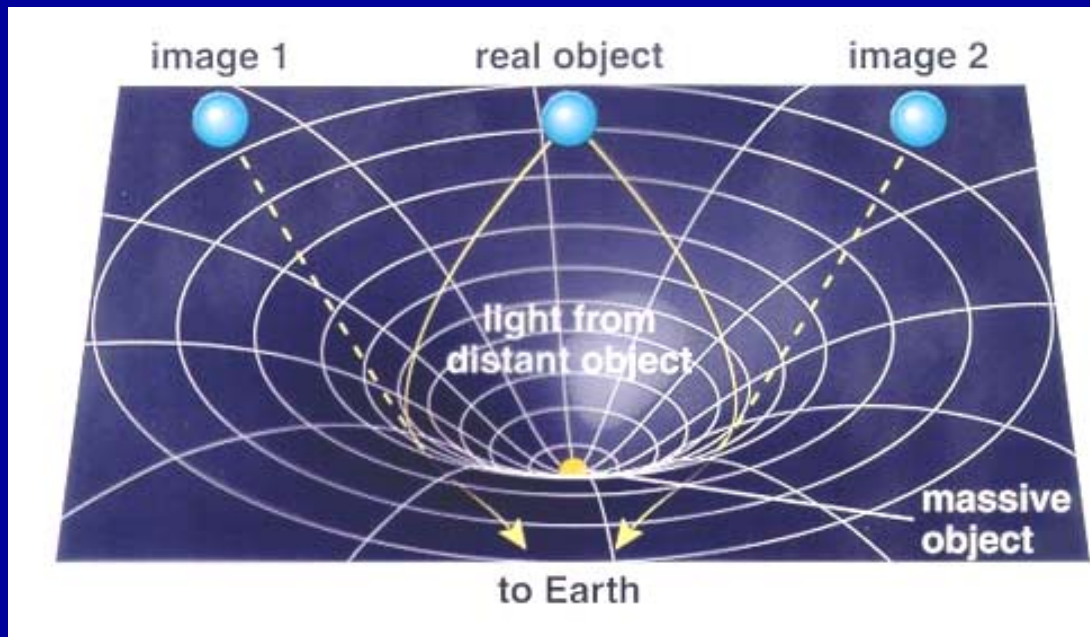


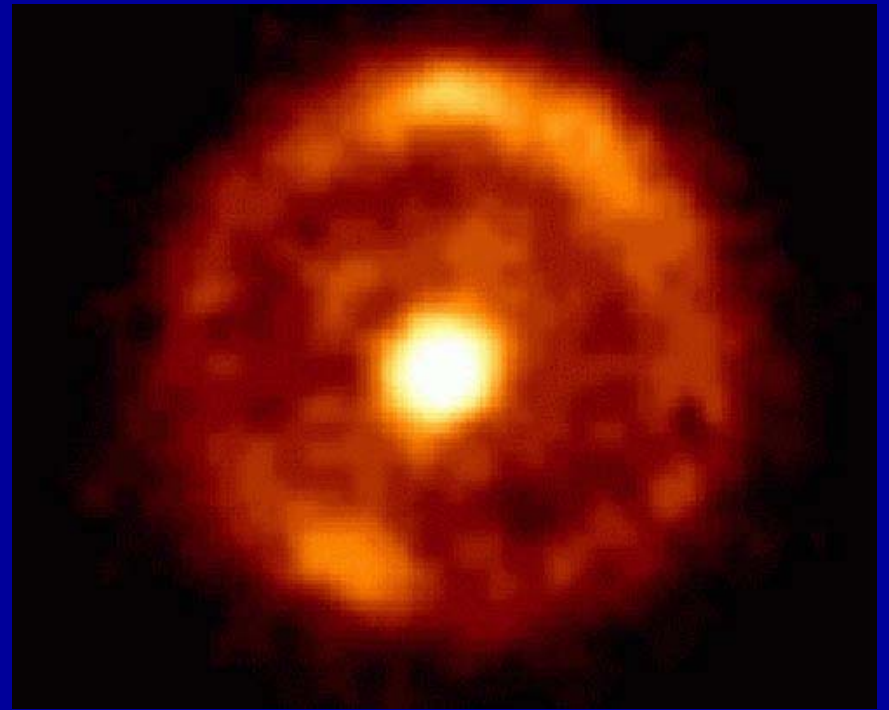
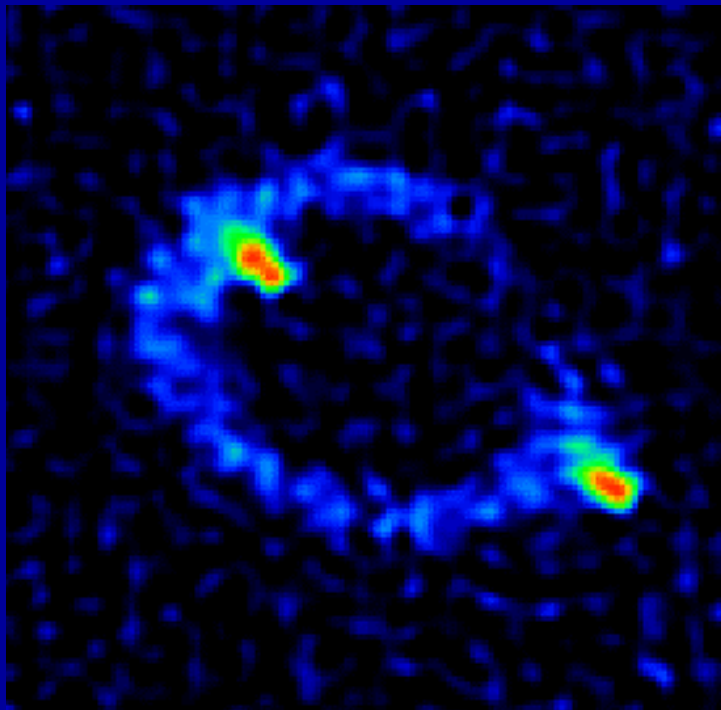
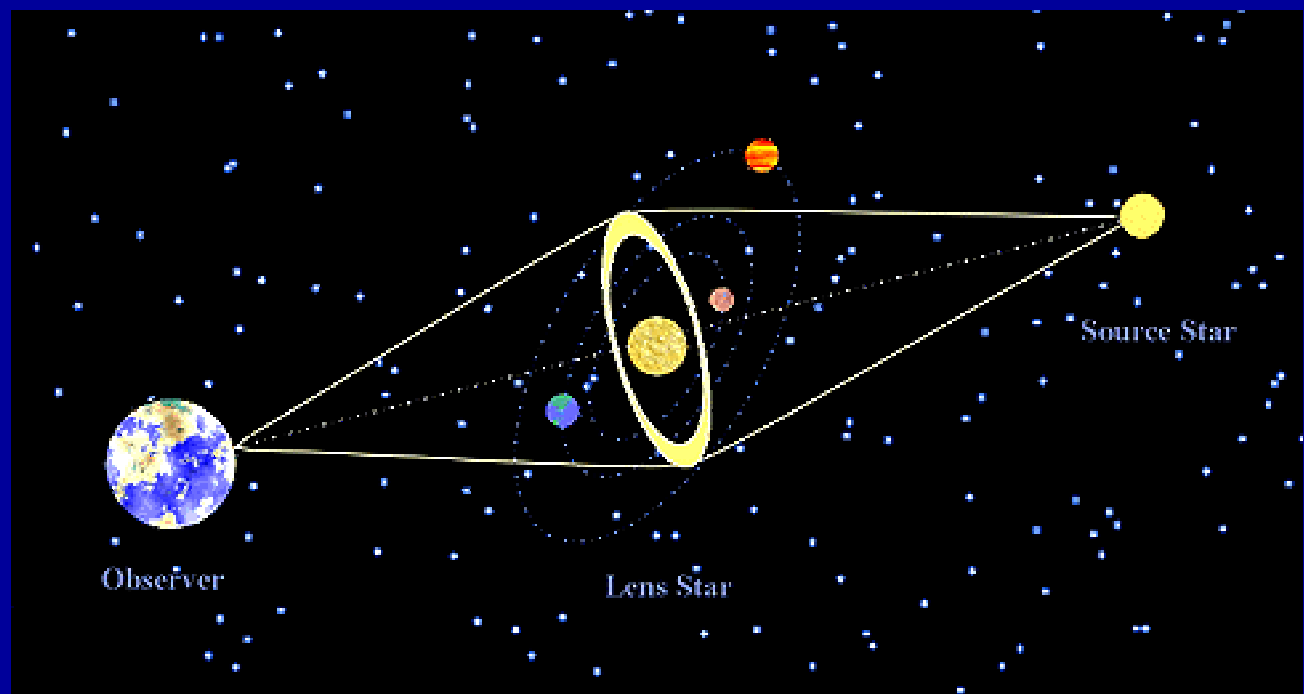
La déflexion de la lumière, un phénomène  
que tout le monde connaît!



# L'effet de lentille gravitationnelle

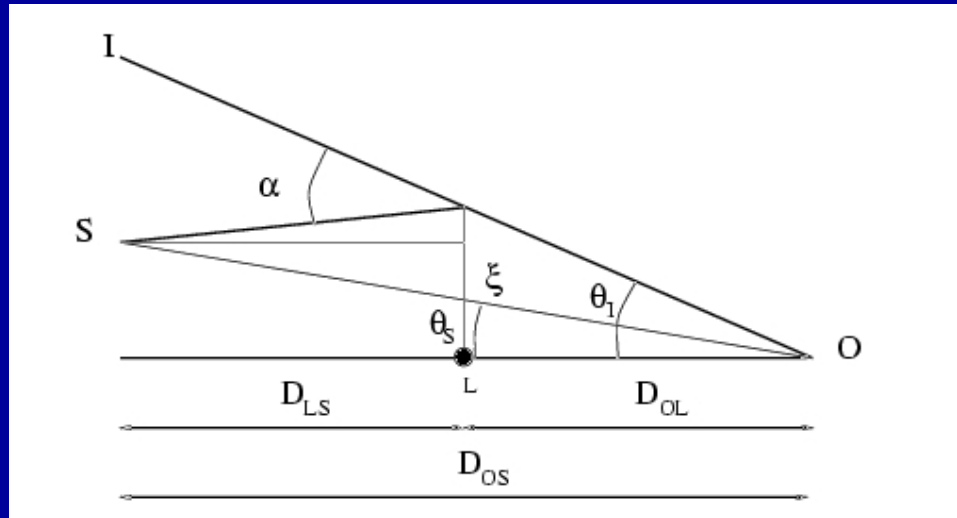
- Est produit par toute matière, quelle que soit sa nature,
- Defléchit les rayons lumineux,
- Amplifie / agrandit les images,
- Multiplie les images,
- Déforme les images,
- Les propriétés des effets dépendent de la quantité totale de matière, de sa densité et de sa distribution dans la lentille gravitationnelle.







# Les lentilles gravitationnelles



« Equation des lentilles »

$$\theta_s D_{os} + \alpha D_{ls} = \theta_l D_{os} ,$$

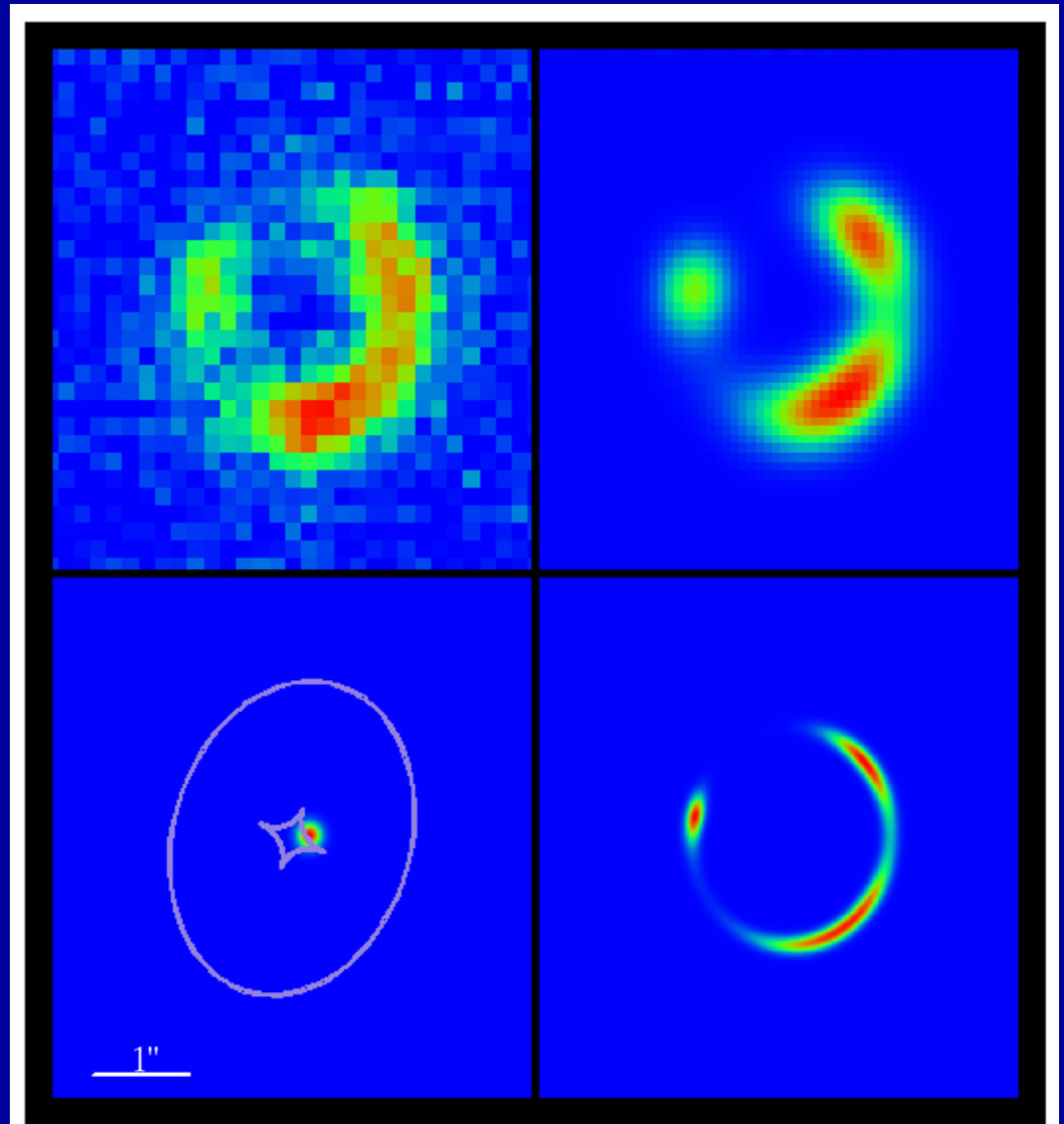
Angle de déflexion

$$\alpha = (4G/c^2)(M/D_{ol}\theta)$$

- Etoile à 1 kpc: 0.001''
- Galaxie à 1 Gpc: 1''
- Amas de galaxies à  $z=0.3$ : 30 ''

On sait déterminer la quantité et la distribution de la matière grâce aux effets de lentille gravitationnelle

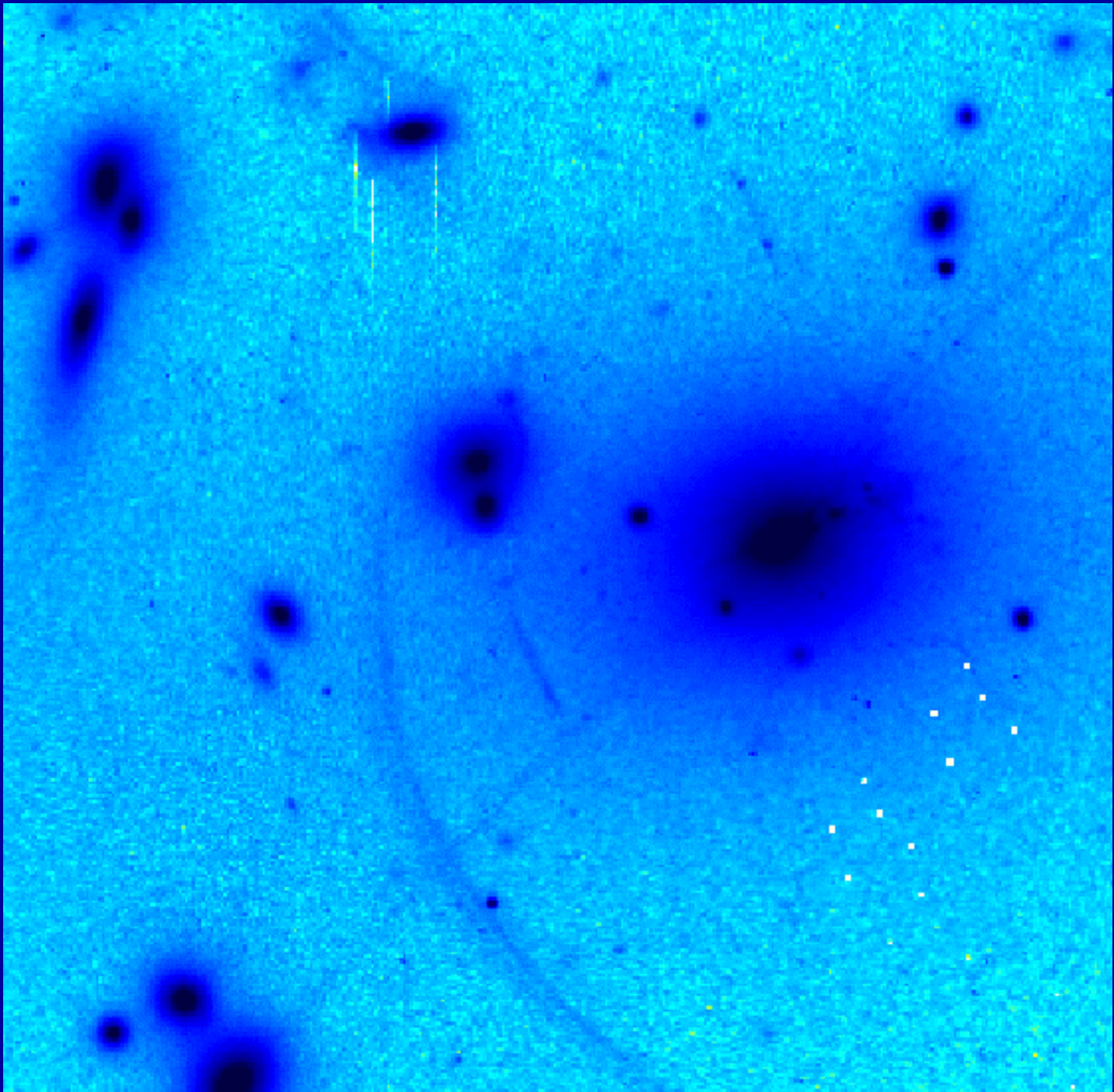
Observation

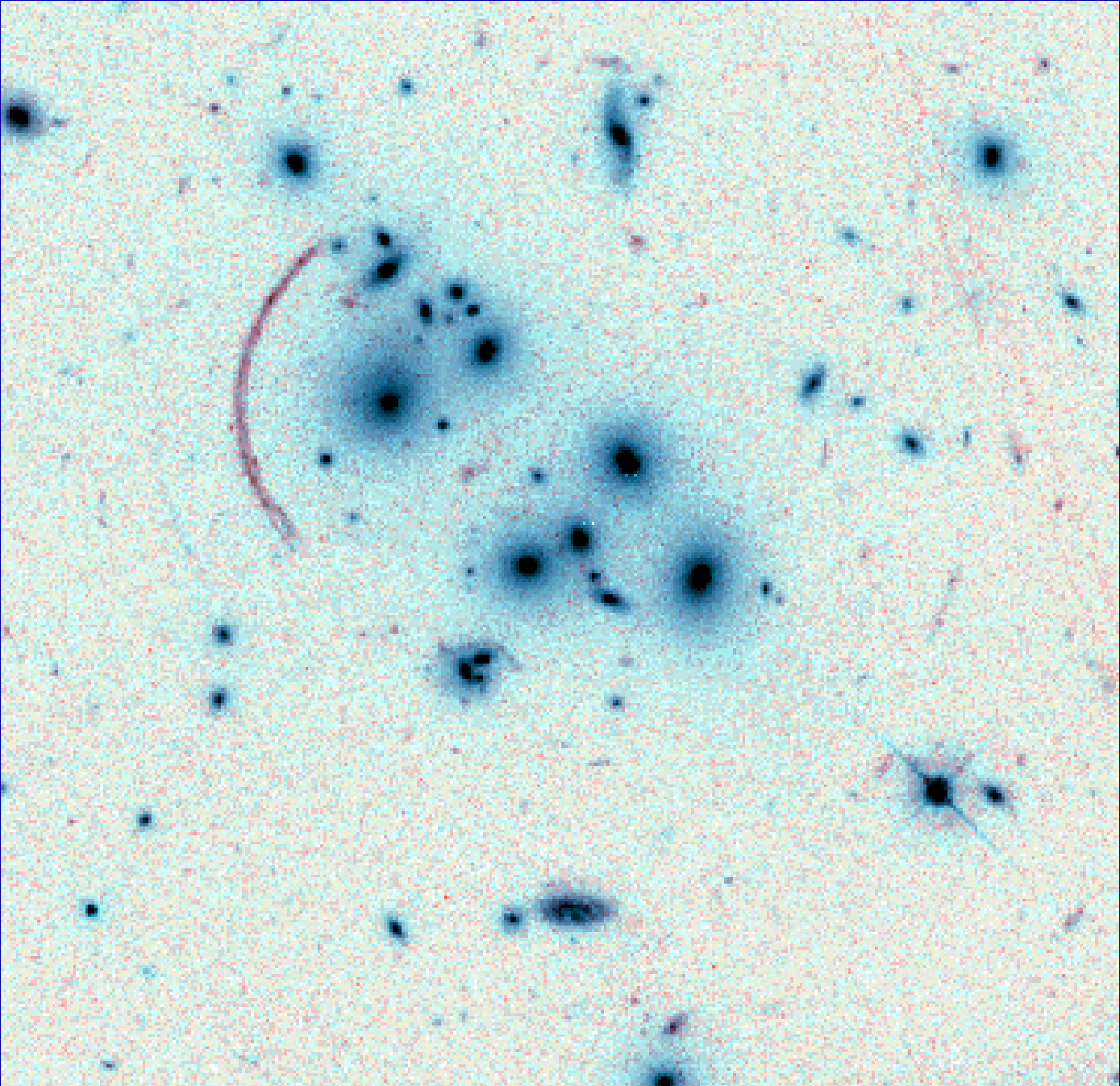


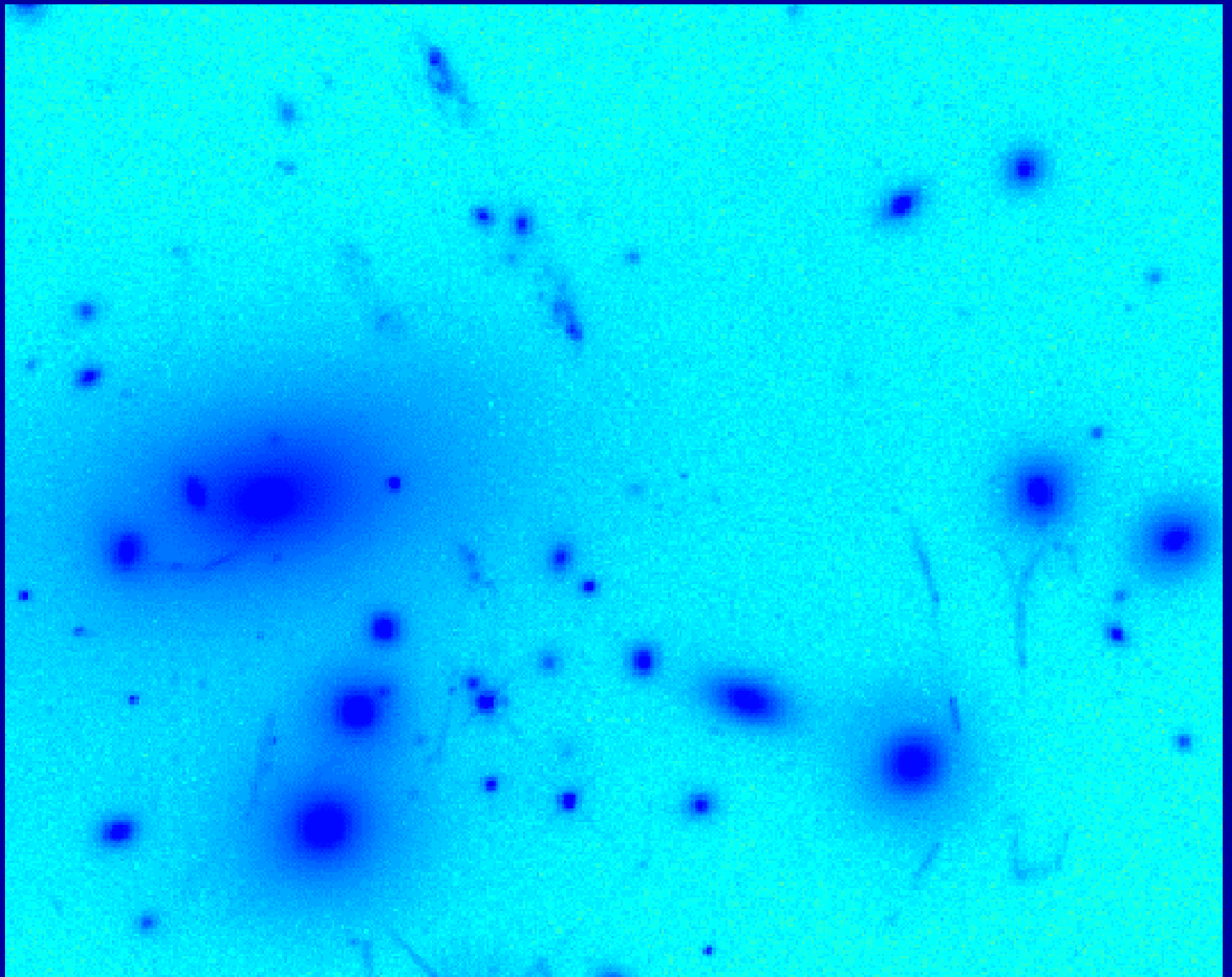
Interprétation  
et modélisation

Convergence et cisaillement

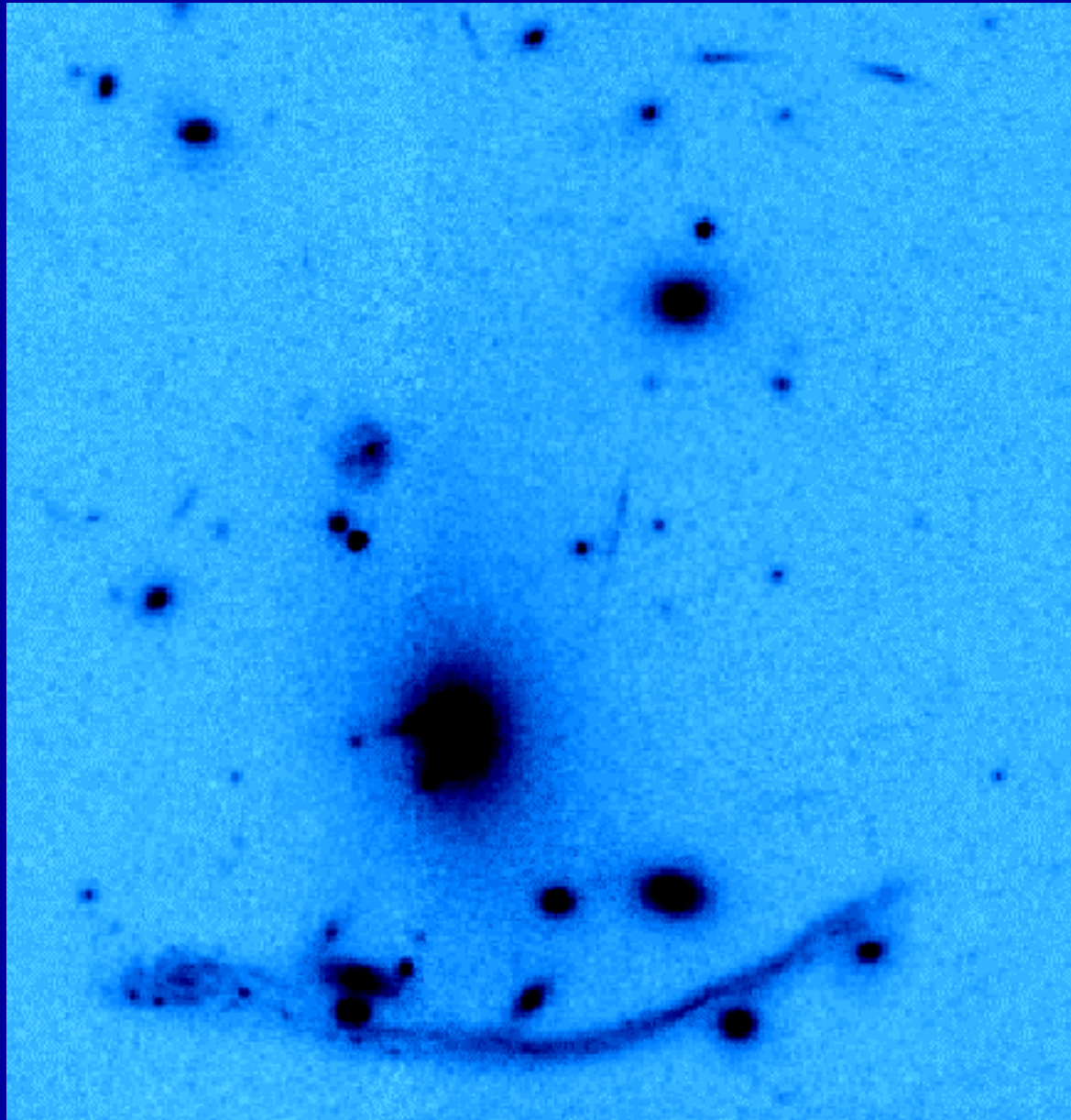






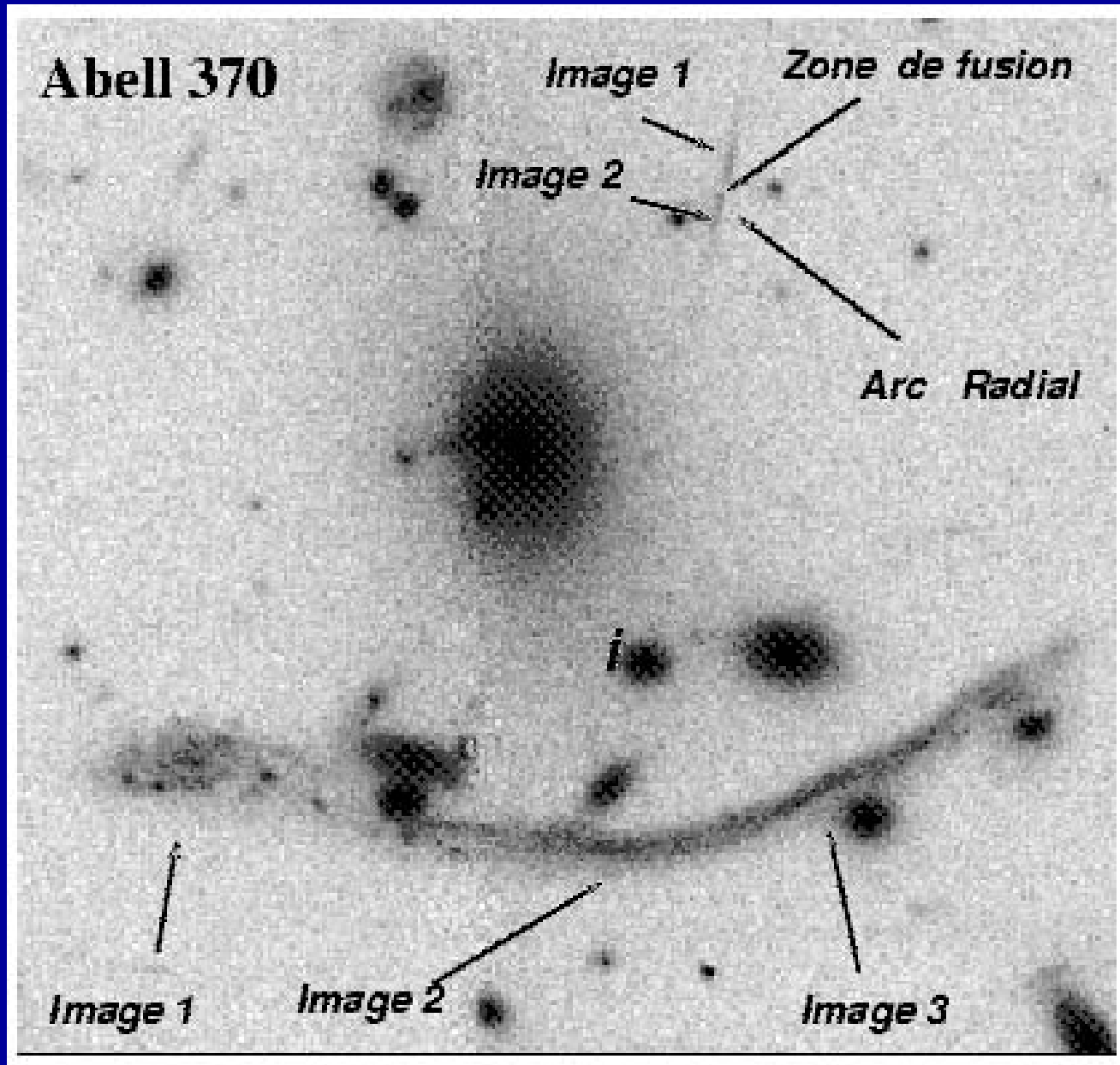




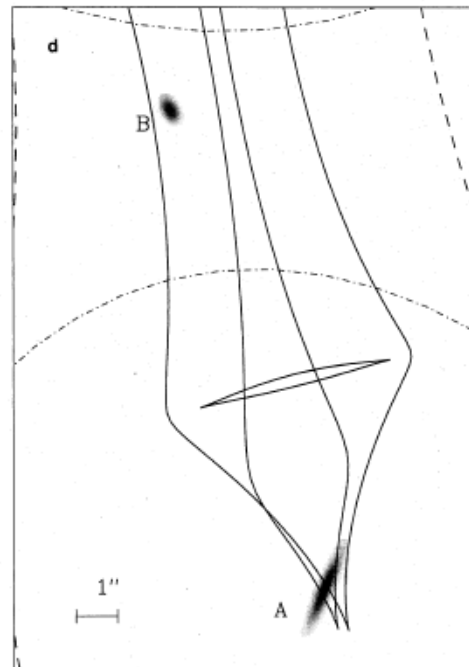
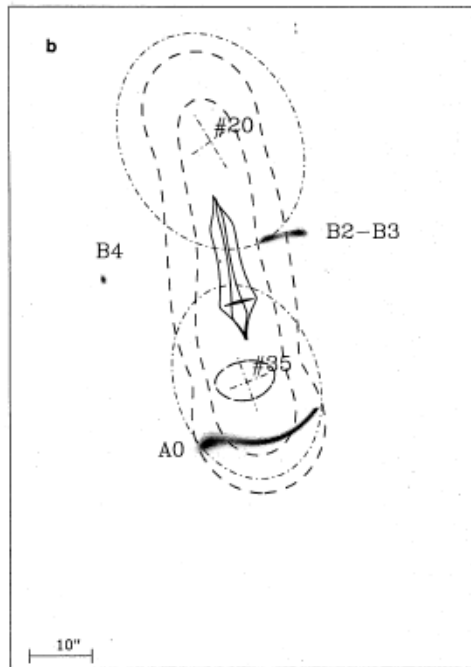
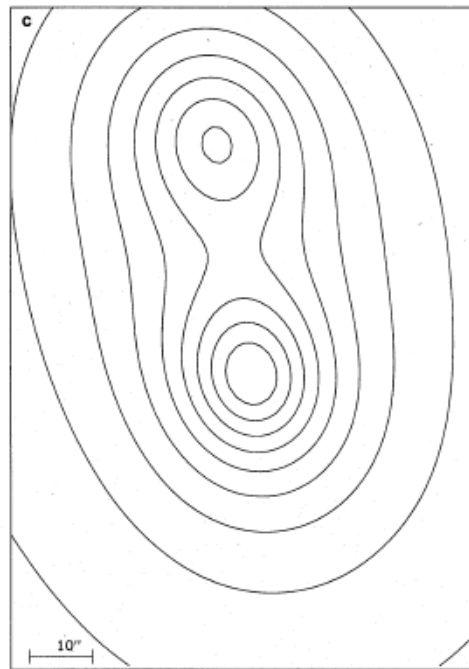
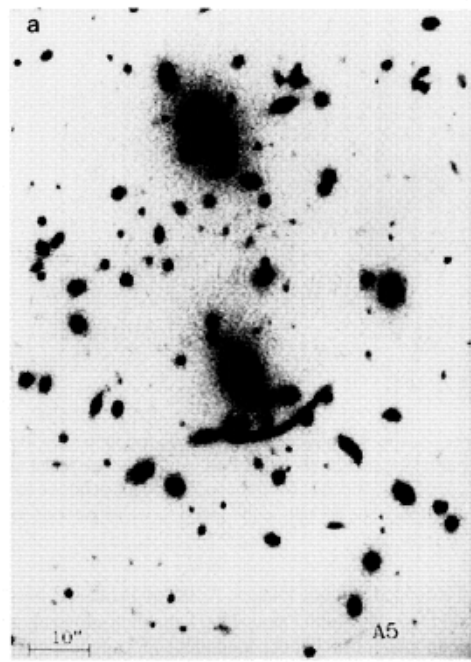




# Arcs gravitationnels



# Modéliser la distribution de la matière noire



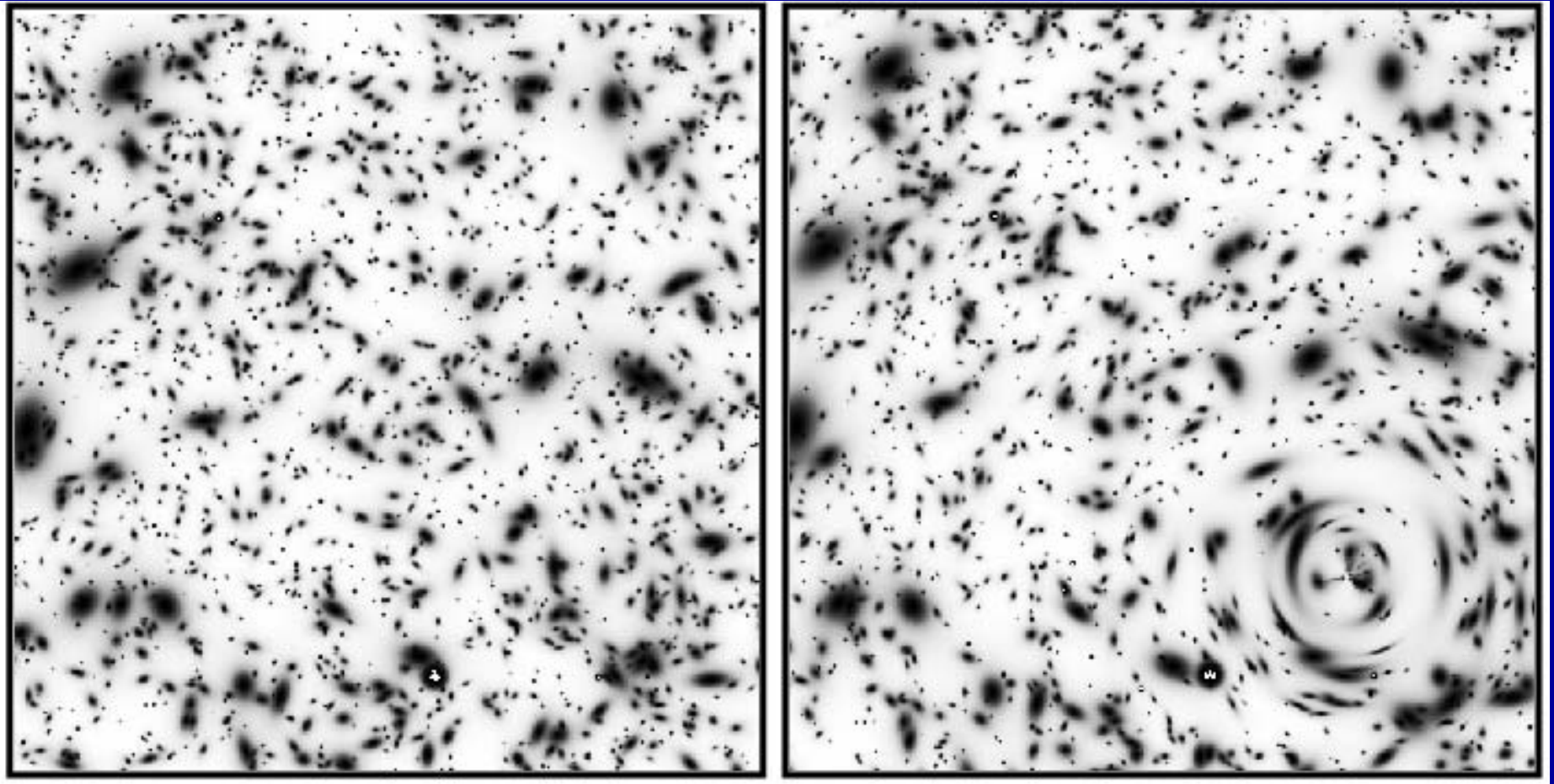
Reconstruction des images

Déduction du potentiel défecteur

# Arcs et distribution de la matière noire

- La forme et la taille des arcs gravitationnels sont les éléments observationnels les plus solides en faveur de l'existence de matière invisible.
- La matière composant les amas de galaxies est composée d'environ 90% de matière noire.
- La matière noire doit être plus concentrée que la distribution des galaxies
- La distribution de la lumière des étoiles des galaxies brillantes centrales des amas de galaxies suit celle de la matière noire

# Distorsion gravitationnelle



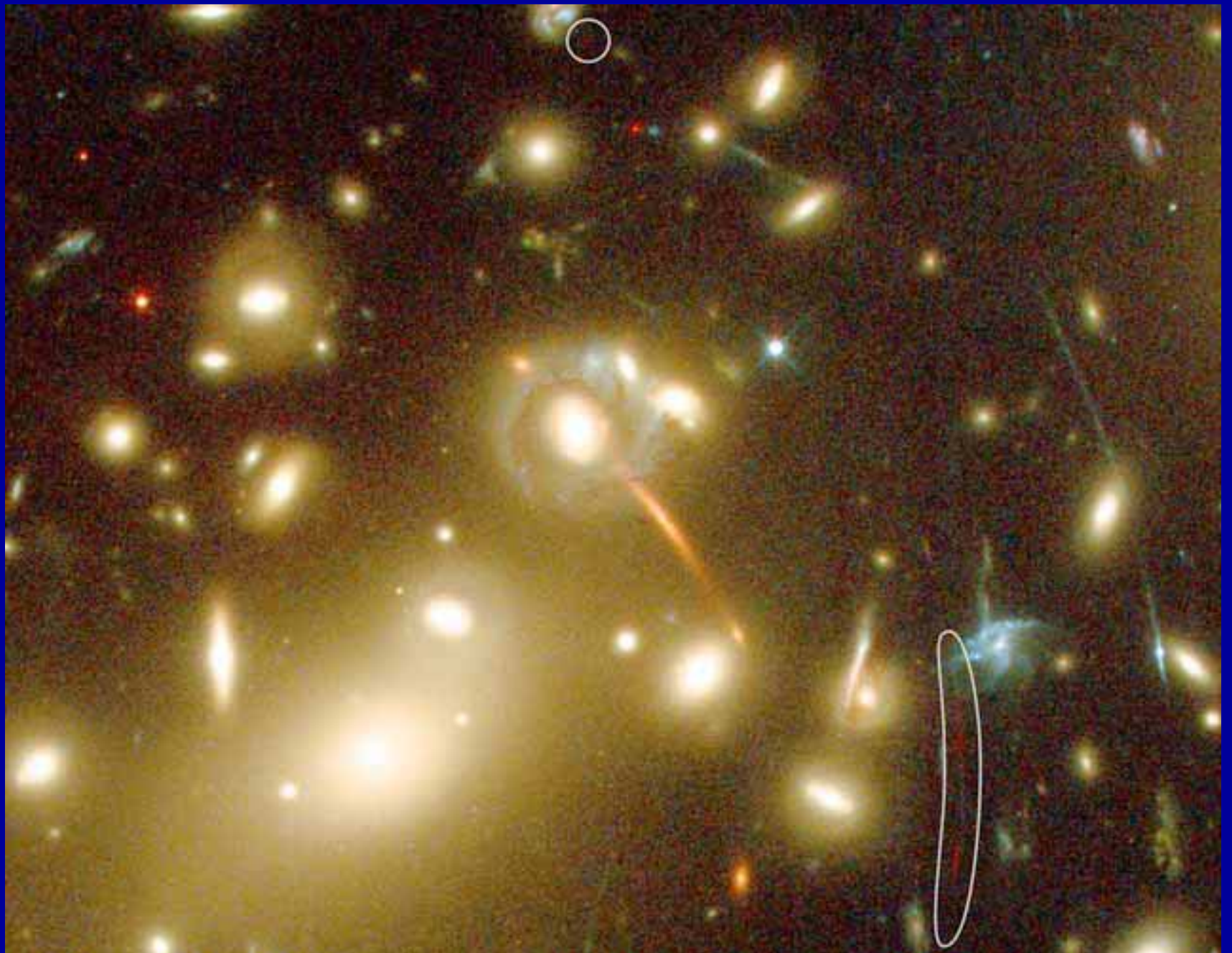
Sphère isotherme: 800 km/sec,  $z=0.3$

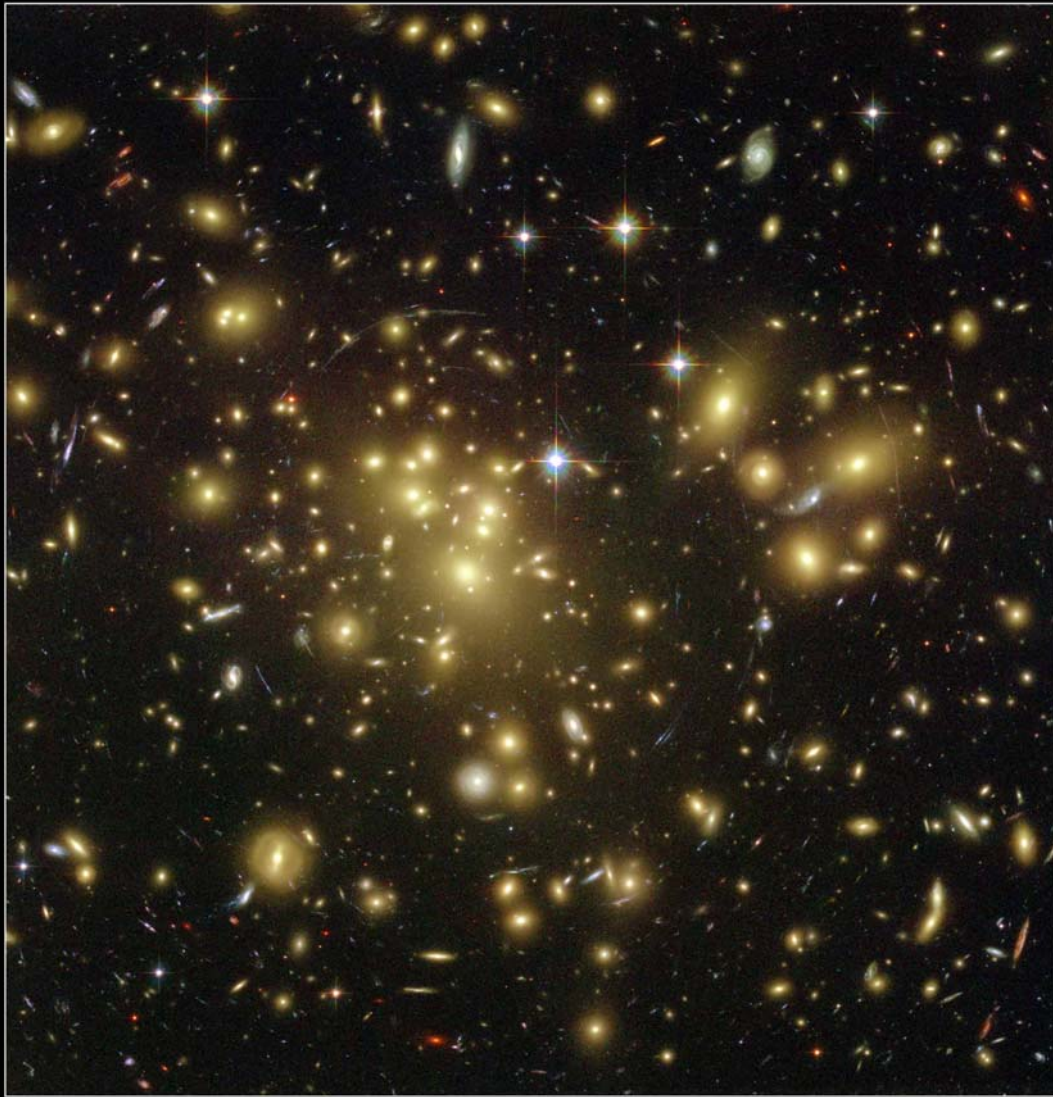


**Galaxy Cluster Abell 2218**

**HST • WFPC2**

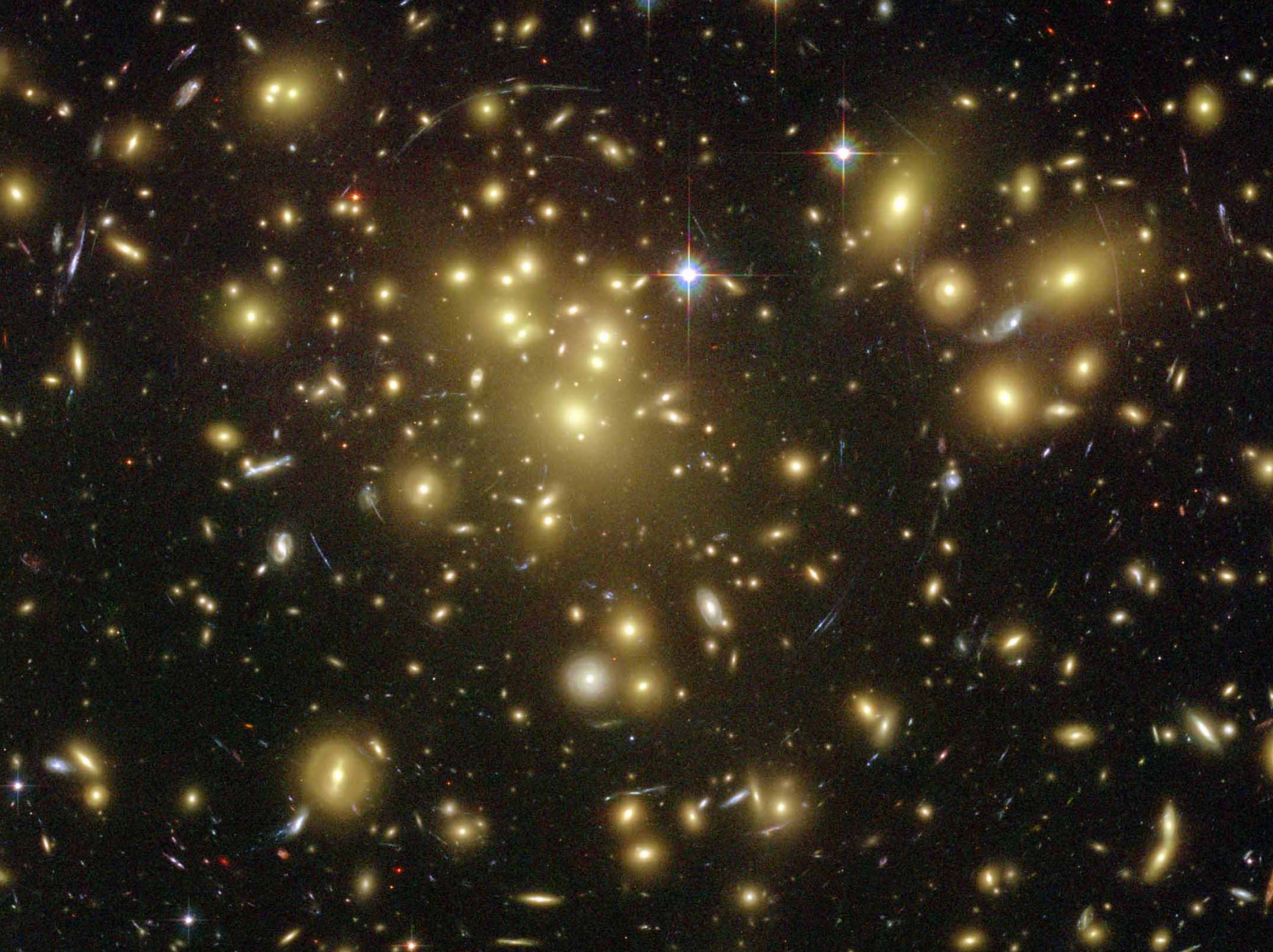
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08



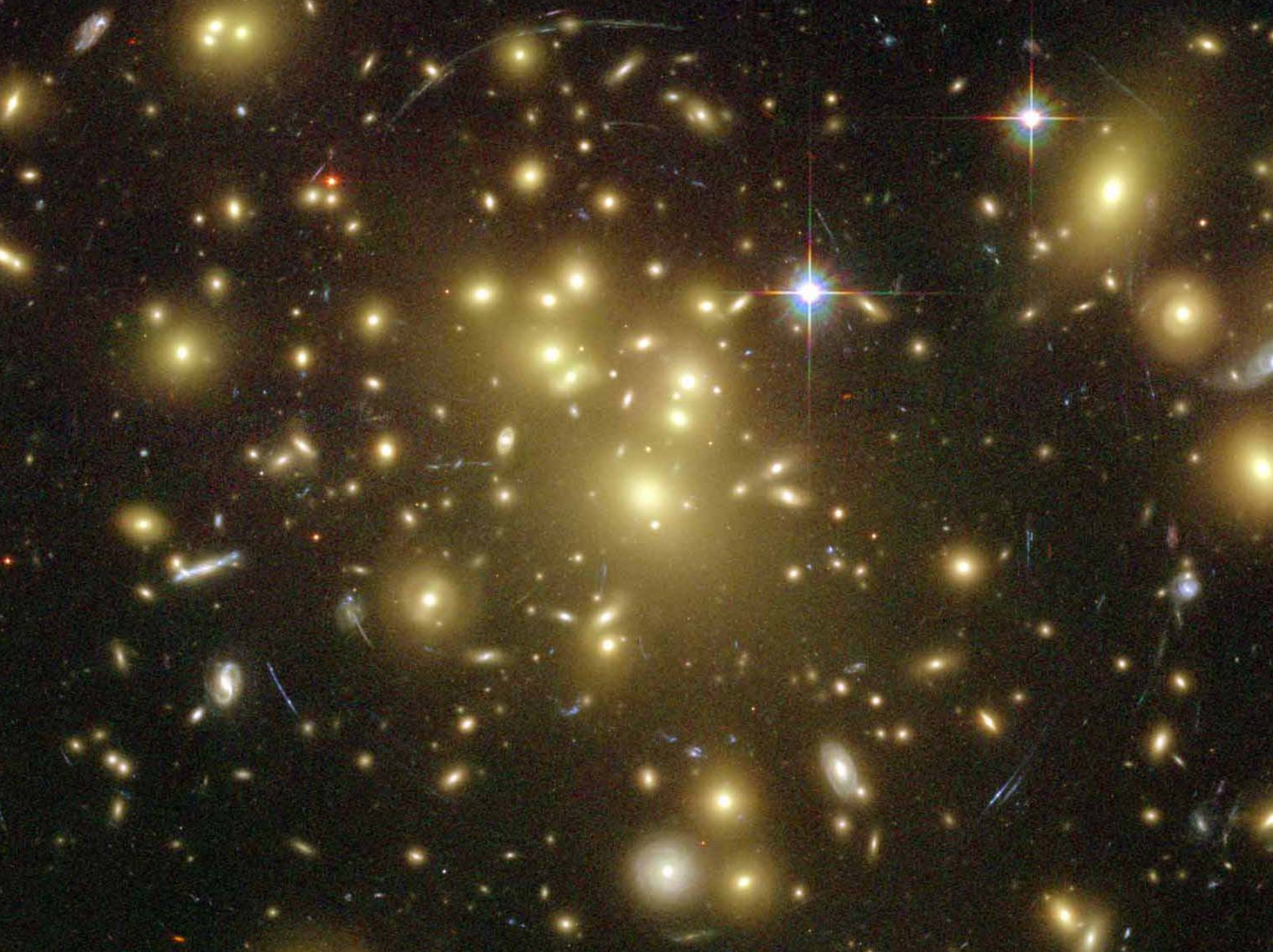


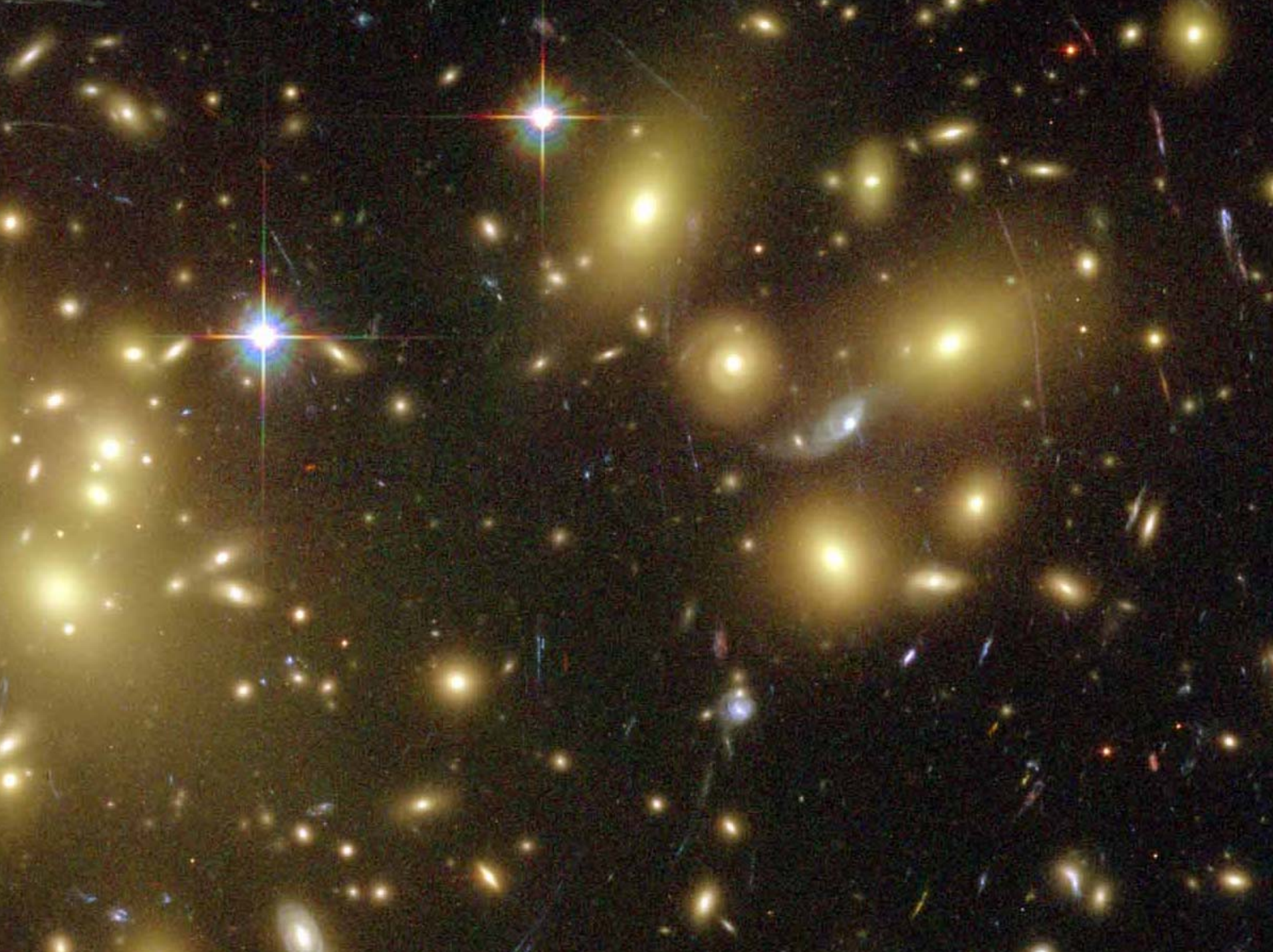
**Galaxy Cluster Abell 1689**  
**Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys**

NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA  
STScI-PRC03-01a

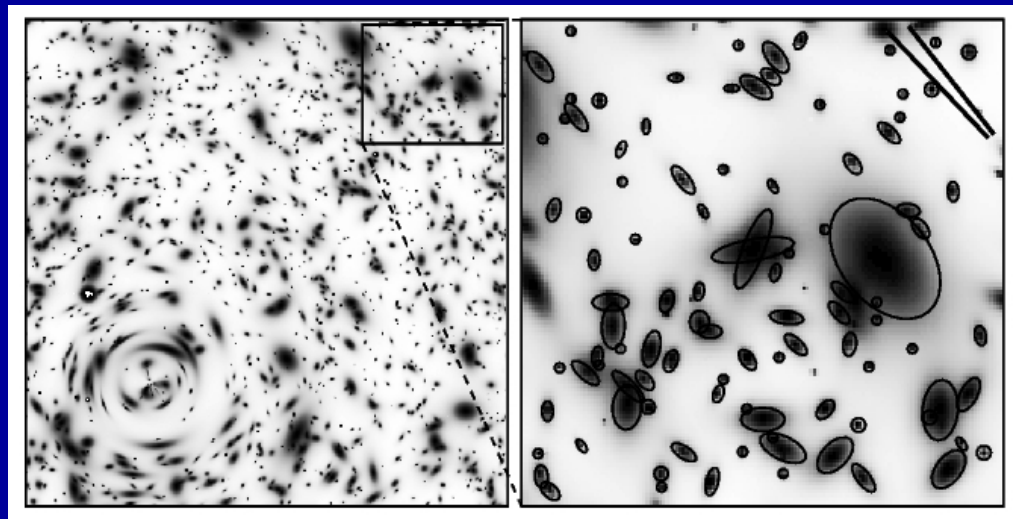








# Analyse statistique de la distribution des formes des galaxies



Distorsion gravitationnelle:  
une galaxie ronde devient  
elliptique

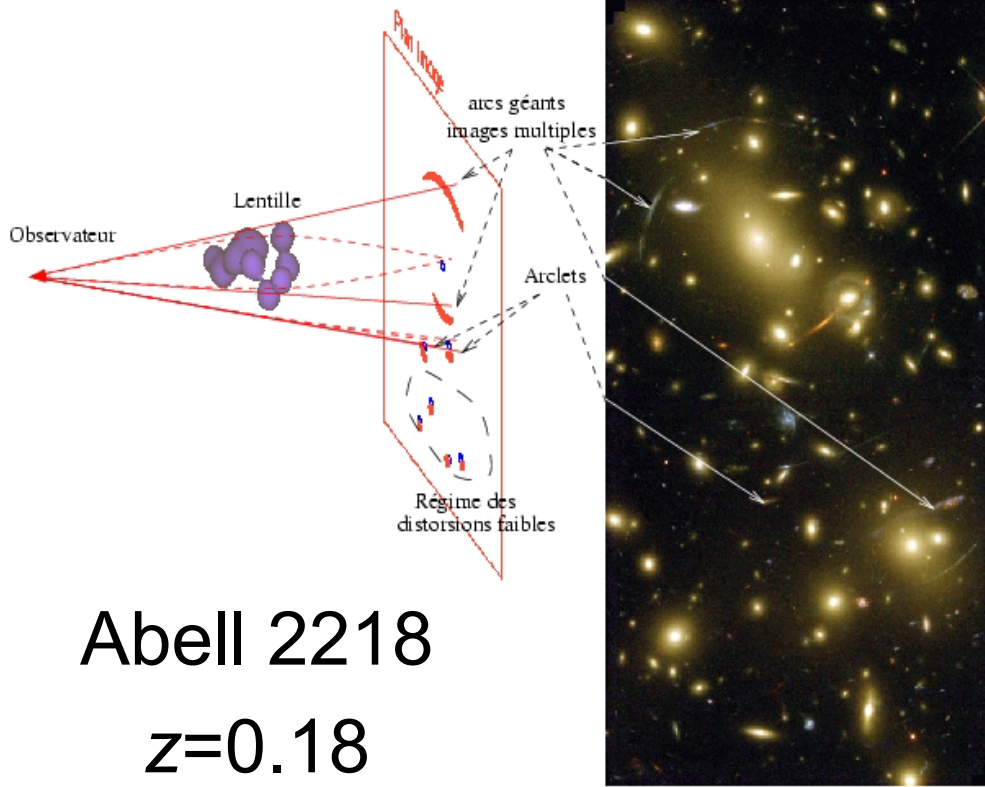


Mesure des formes des  
objets par les observations  
astronomiques



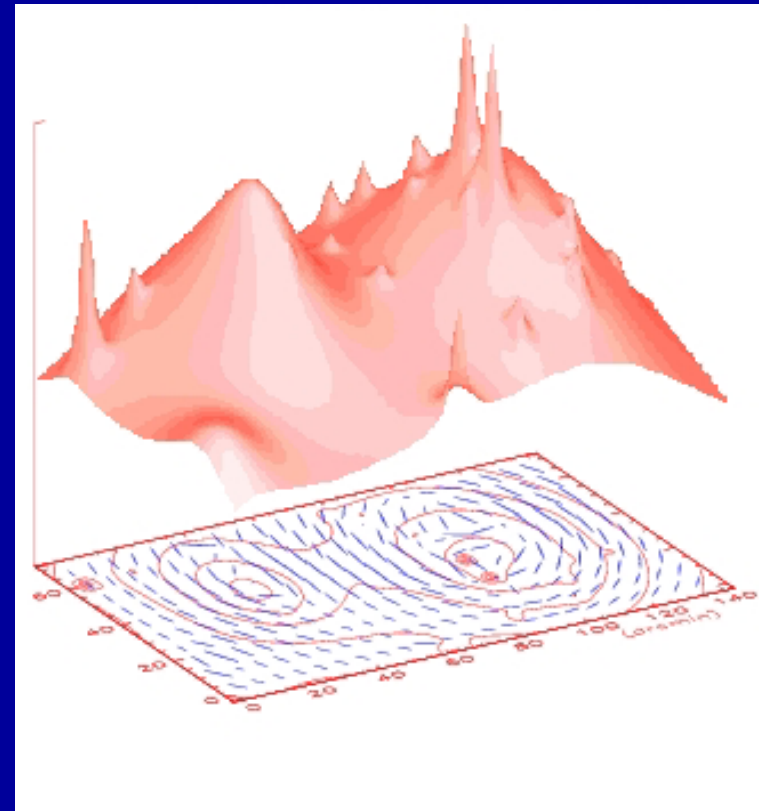
*Hypothèse:* l'orientation des galaxies est aléatoire: une moyenne de 1000 galaxies est un objet rond.... SAUF si une lentille gravitationnelle le déforme!

**Le champ de déformation=champ de matière**

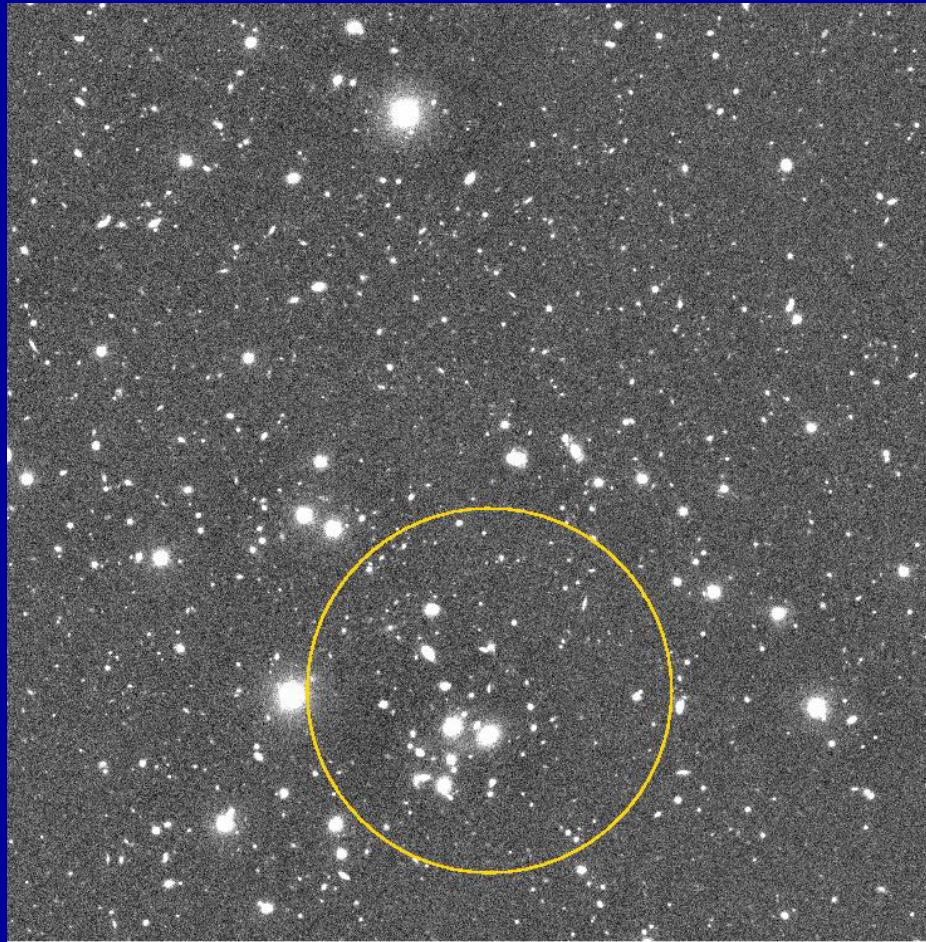


Abell 2218  
 $z=0.18$

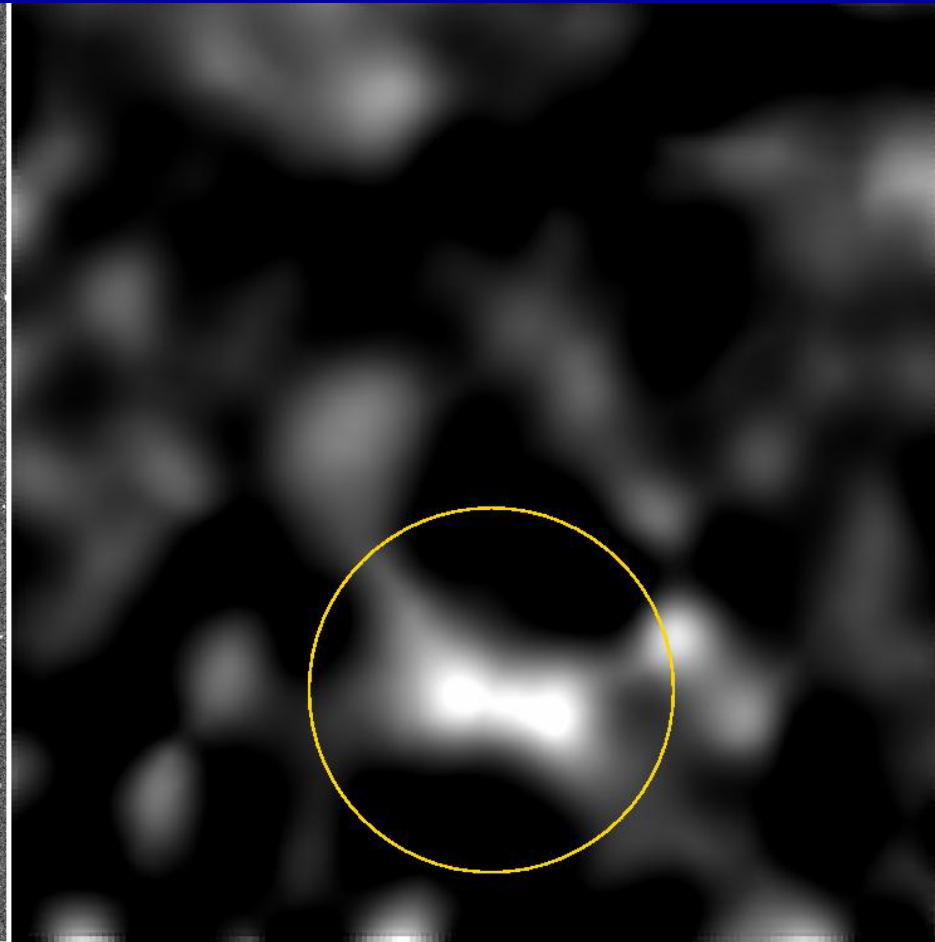
Distorsion gravitationnelle et reconstruction de la carte de densité de matière.



# Reconstruction du champ de densité de matière noire



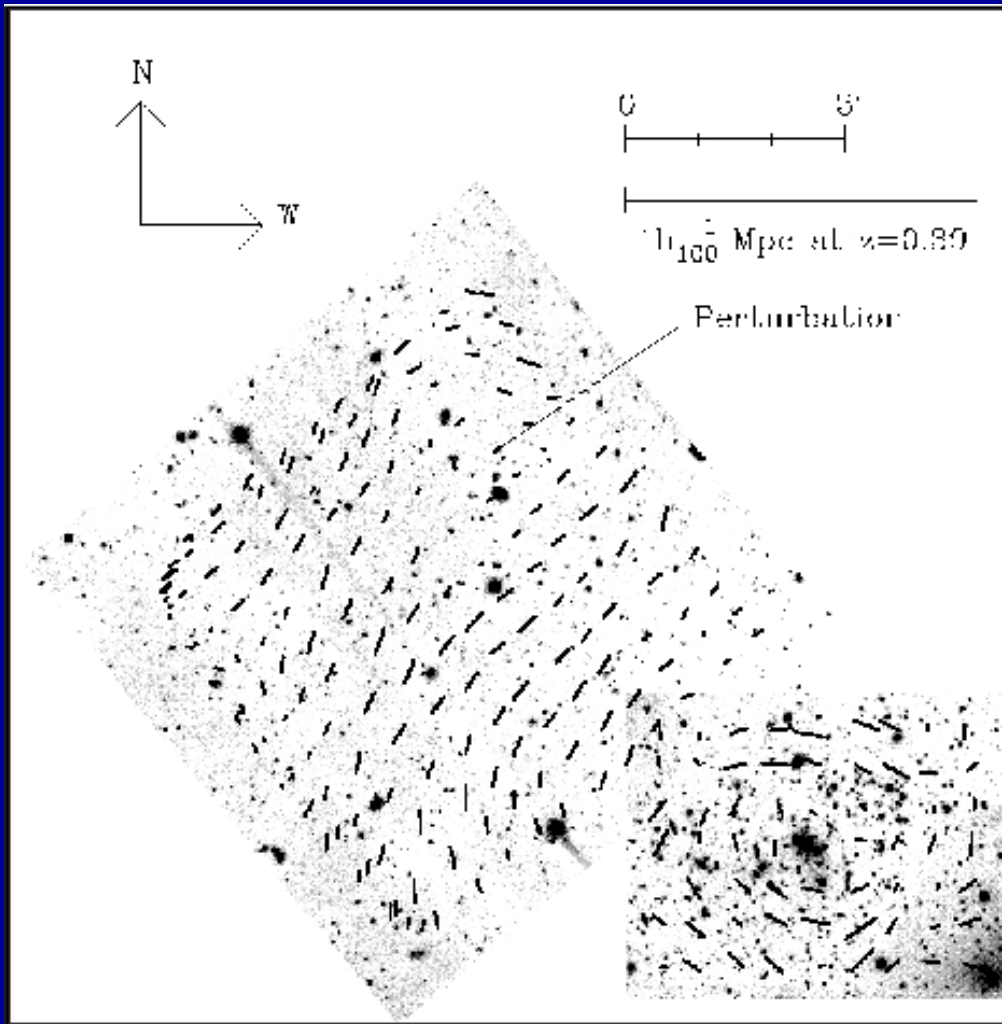
*VLT I-band Image: 36 mn exposure*



*Dark Matter reconstruction*



Exemple:  
CI0024+1654  
 $z=0.55$

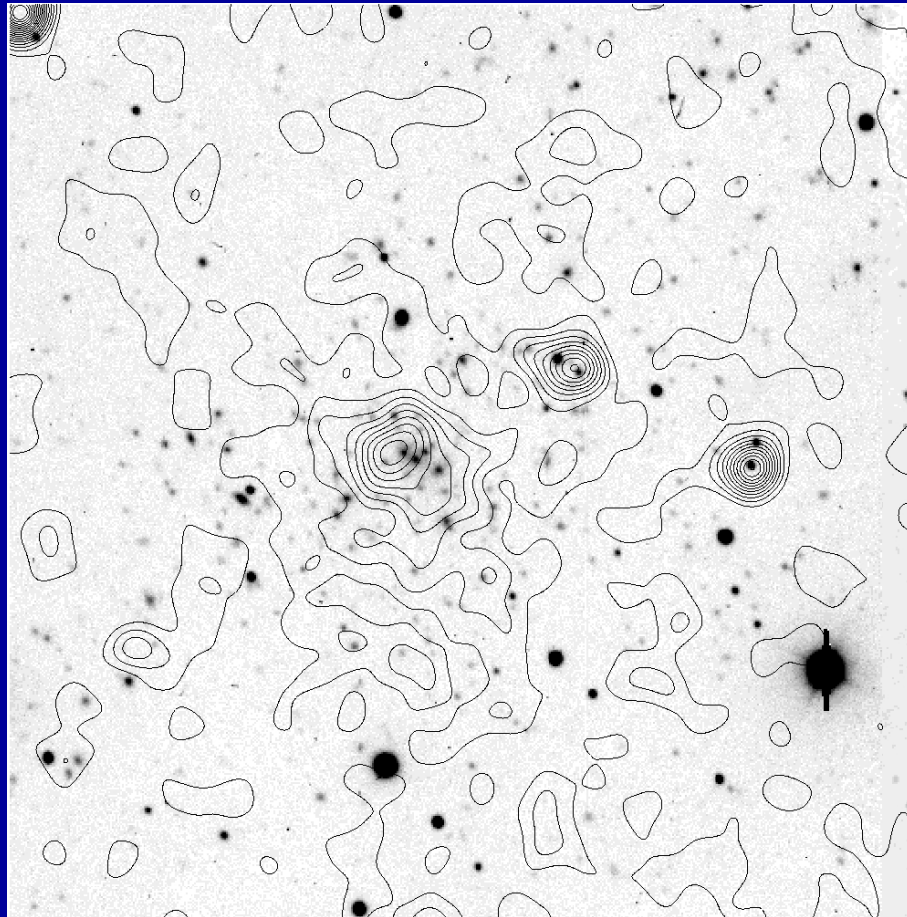


Carte de  
distorsion  
gravitationnelle

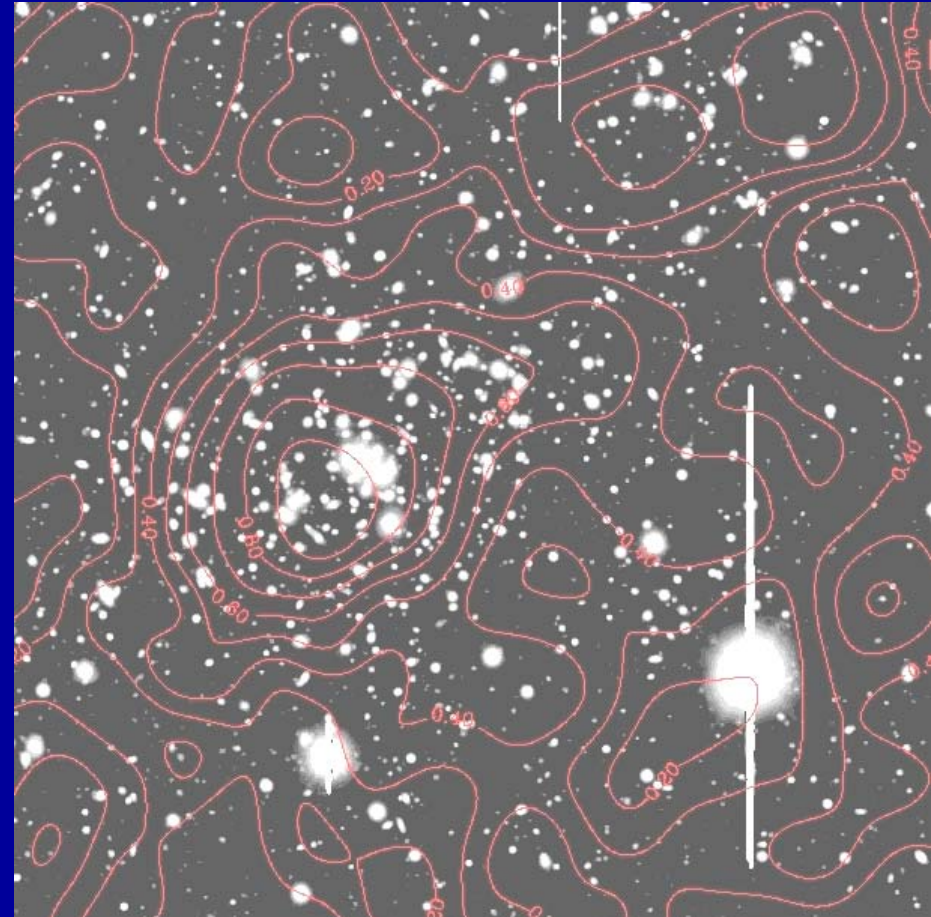
# L'amas de galaxies Cl0024+1654

$z=0.55$

Gaz chaud X



Matière noire

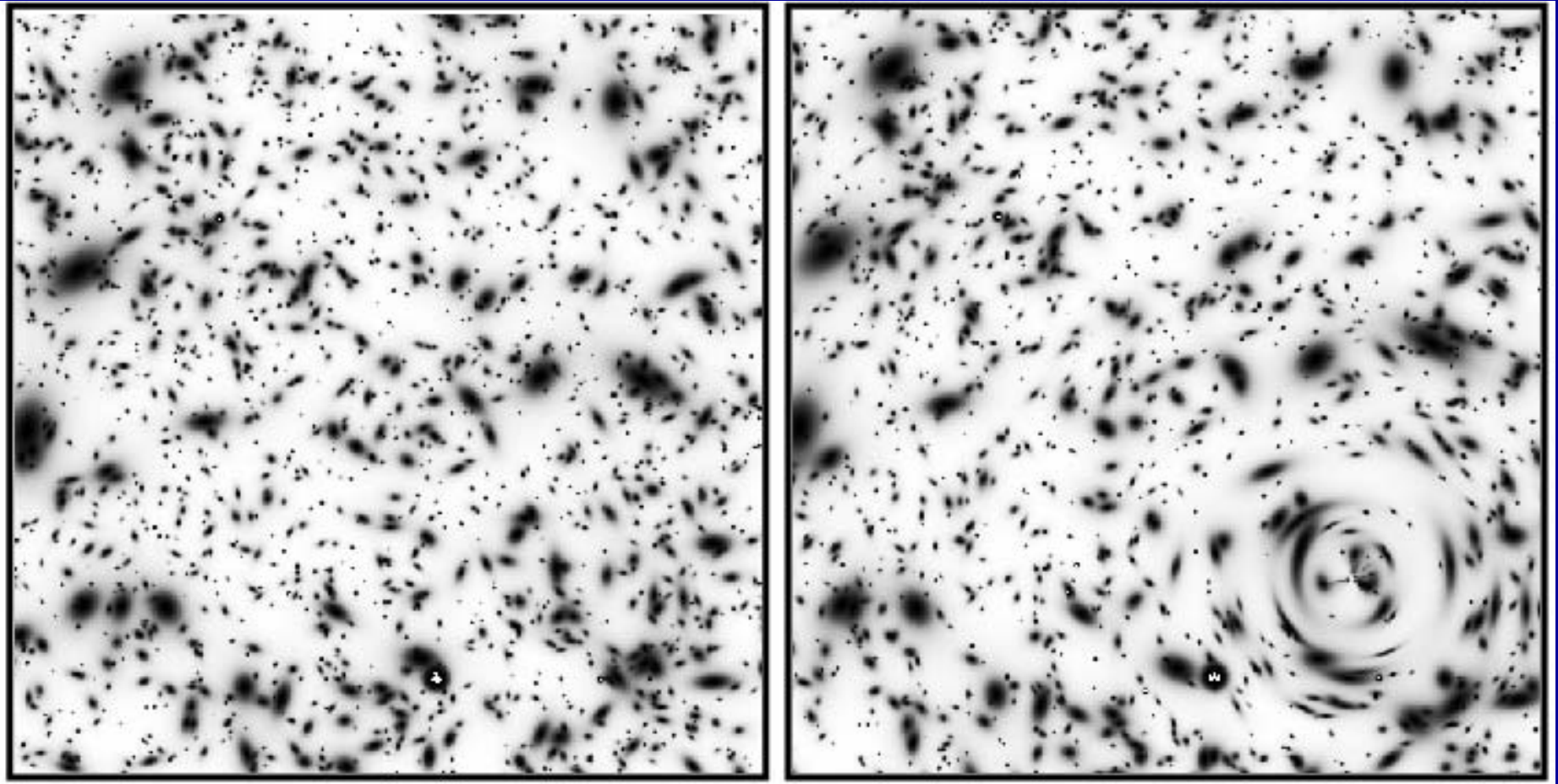




# Les distorsions gravitationnelles dans les amas de galaxies

- Confirment sans aucun doute que la matière noire est présente, même au-delà des échelles vues par les grands arcs gravitationnels
- Confirment que cette matière invisible représente 70 à 95% de la matière
- Montrent que les galaxies les plus vieilles et massives suivent la distribution de matière: au moins une partie de la lumière trace la matière fidèlement...
- Des candidats « amas-noirs » ont été détectés mais aucun n'est fermement confirmé.
- Nous n'avons pas été totalement aveugle par le passé!

# Distorsion gravitationnelle... Au-delà des amas des galaxies...



DEFLECTION OF LIGHT RAYS CROSSING THE UNIVERSE, EMITTED BY DISTANT GALAXIES

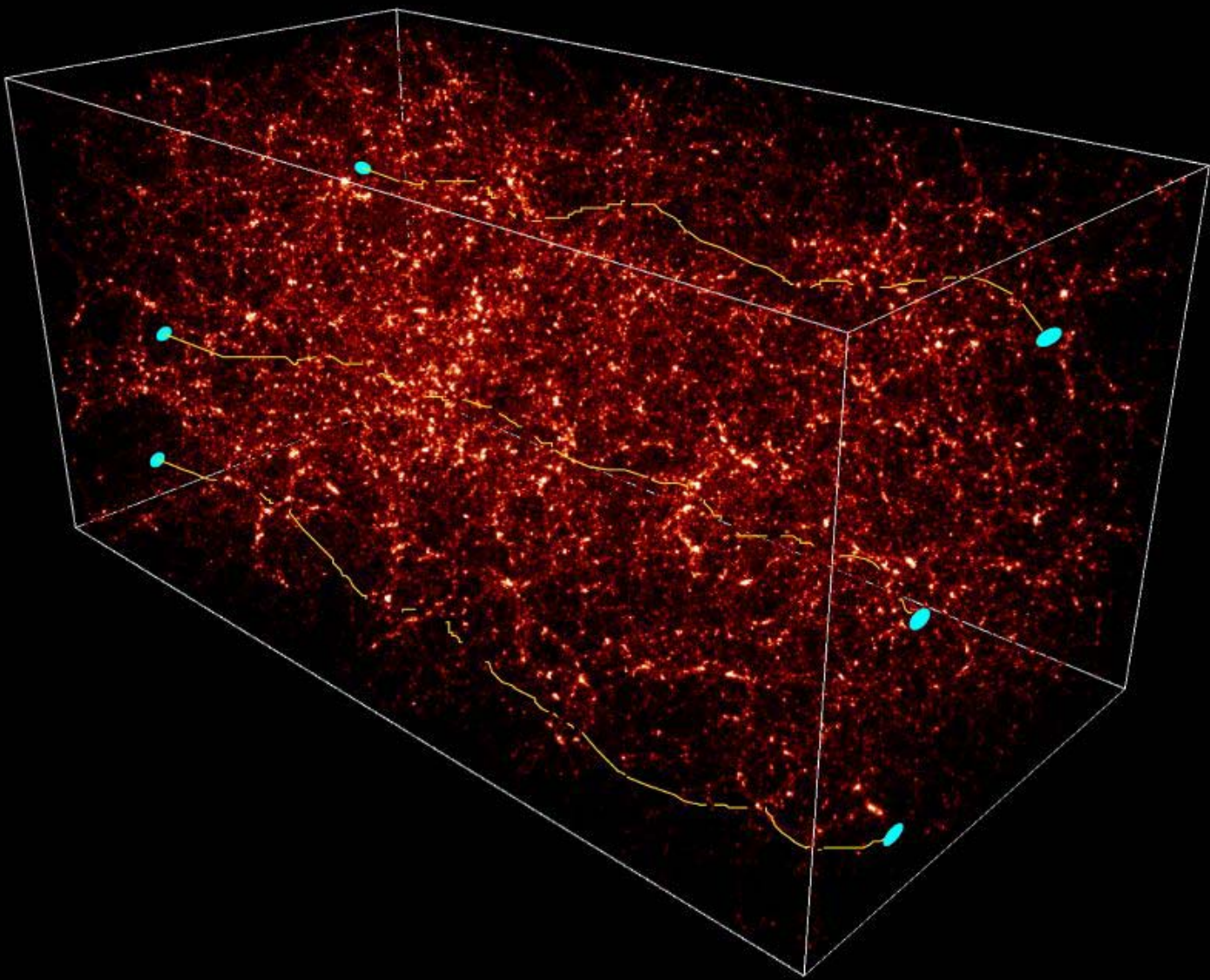
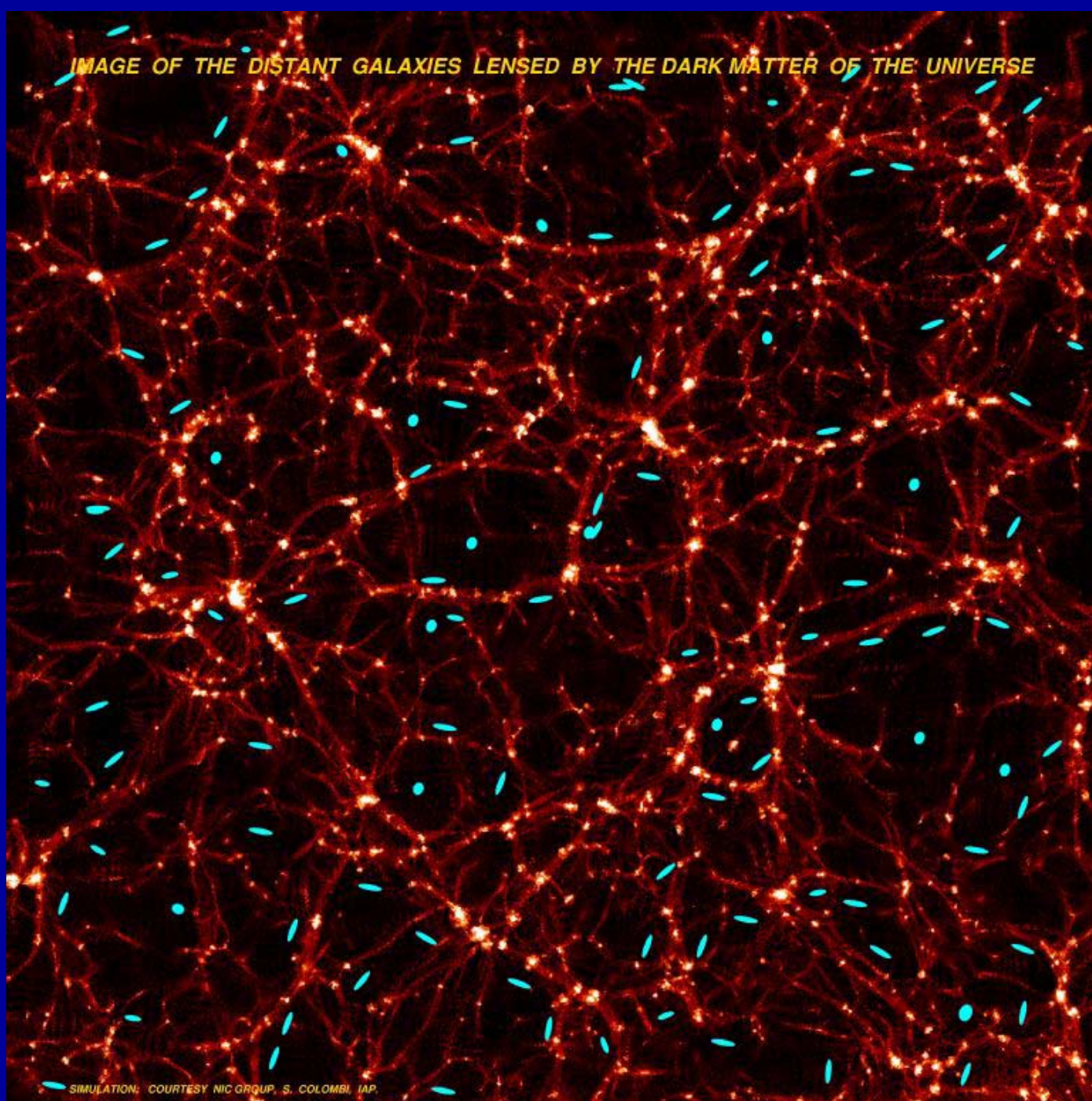


IMAGE OF THE DISTANT GALAXIES LENSED BY THE DARK MATTER OF THE UNIVERSE



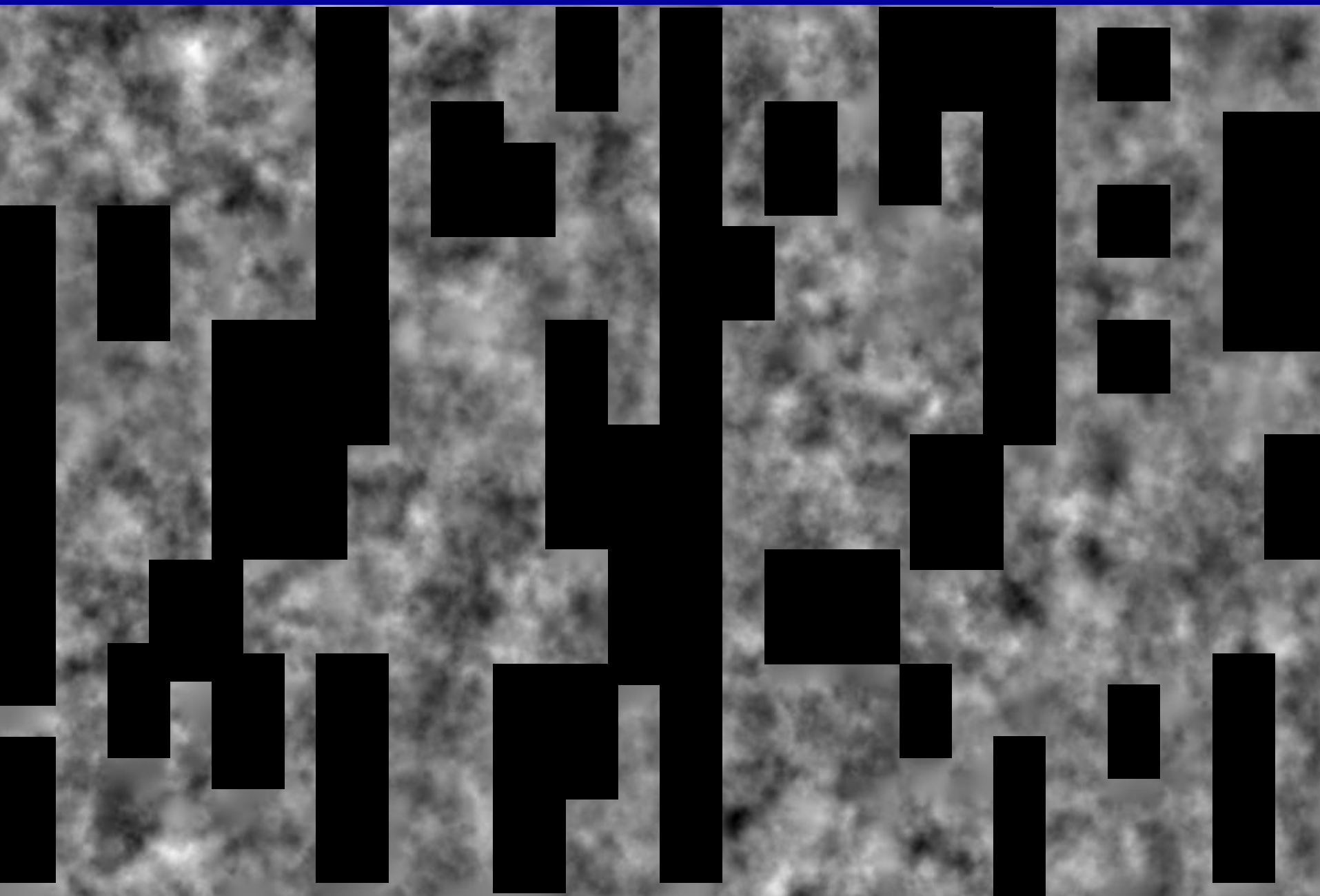
SIMULATION: COURTESY NIC GROUP, S. COLOMBI, IAP.

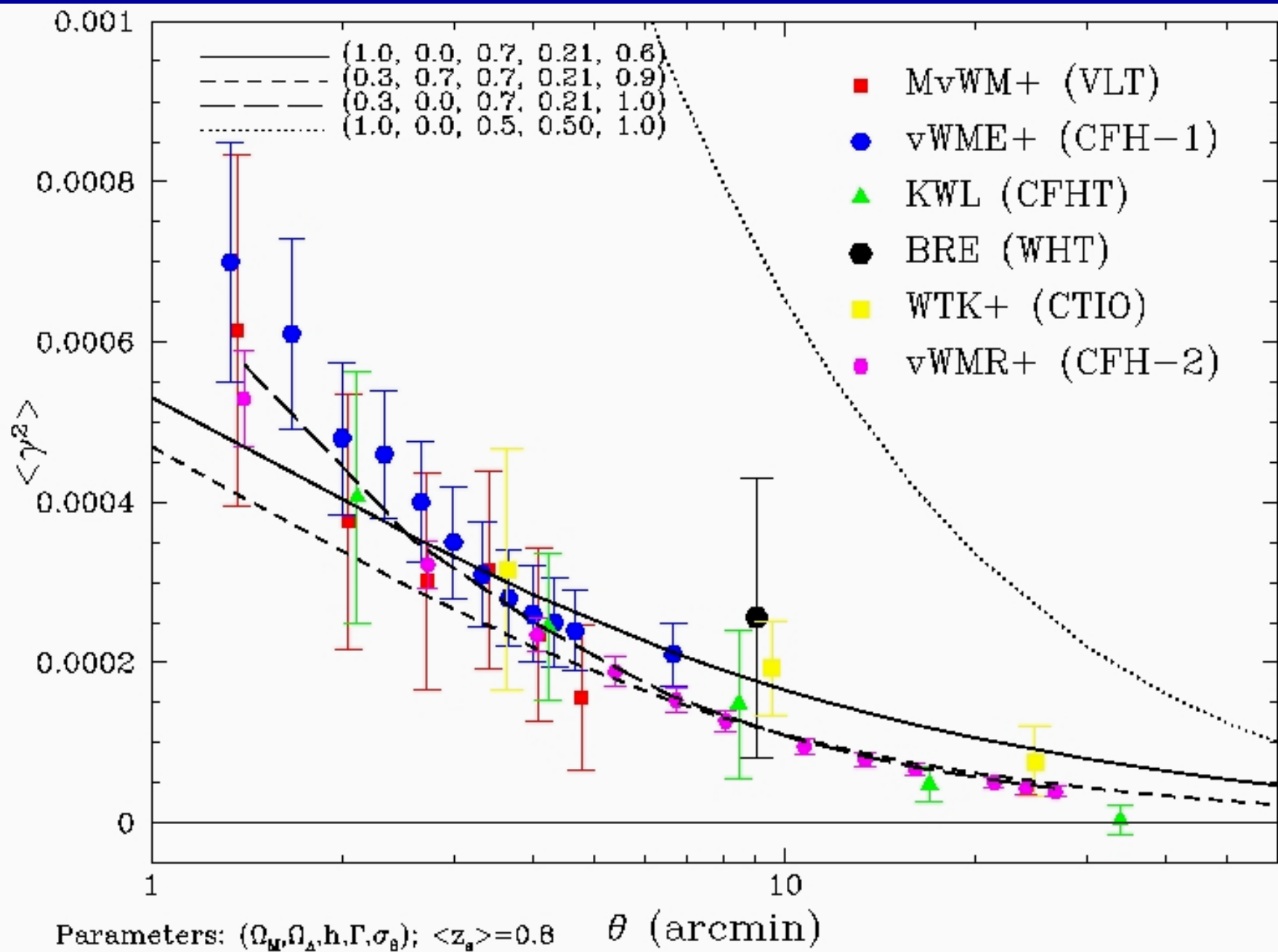
The image shows a circular field of view filled with a dense, grainy texture of light and dark pixels. The overall appearance is that of a map or a data visualization, possibly representing the distribution of matter in the universe. The field is framed by a thick black border. In the top-left corner, there is white text, and in the bottom-right corner, there is more white text.

Vers une cartographie de la matière.....

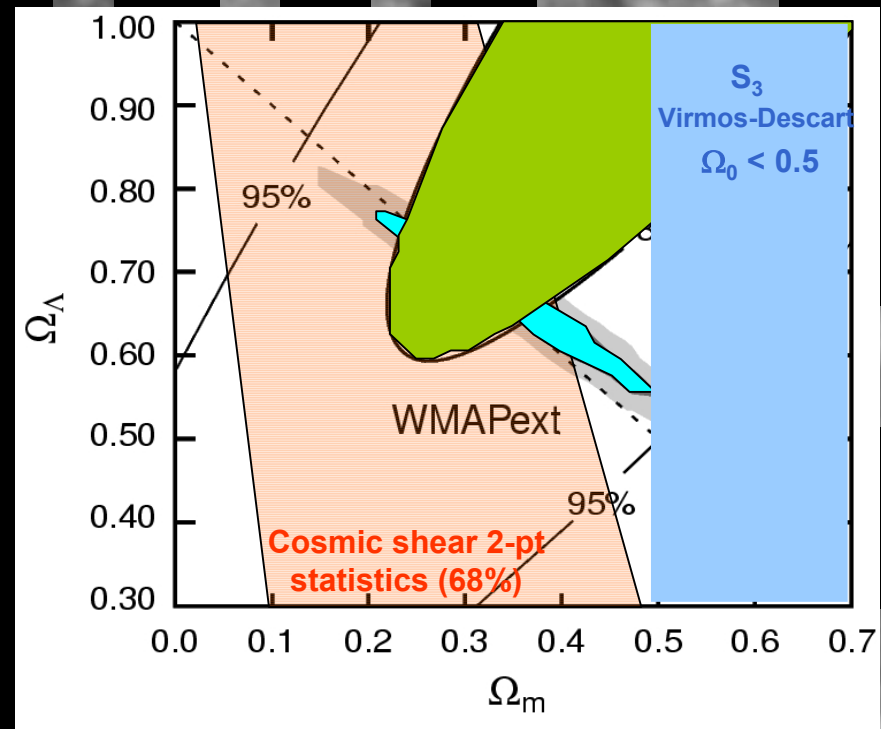
... comme la cartographie des galaxies.

# Une carte de la matière noire projetée sur le ciel



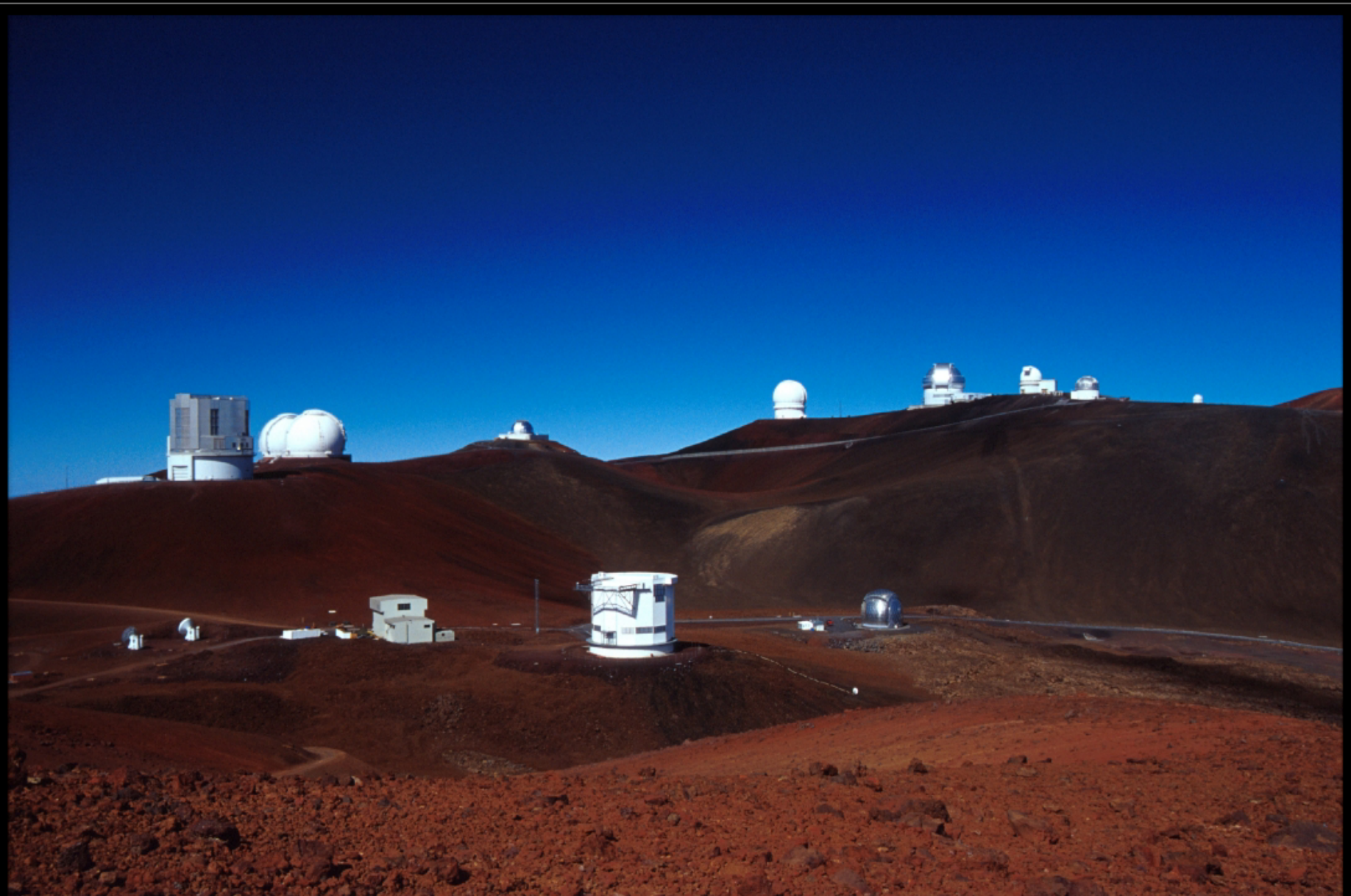


# Analyse statistique des déformations gravitationnelles cosmologiques





# Le Canada-France-Hawaii Legacy Survey



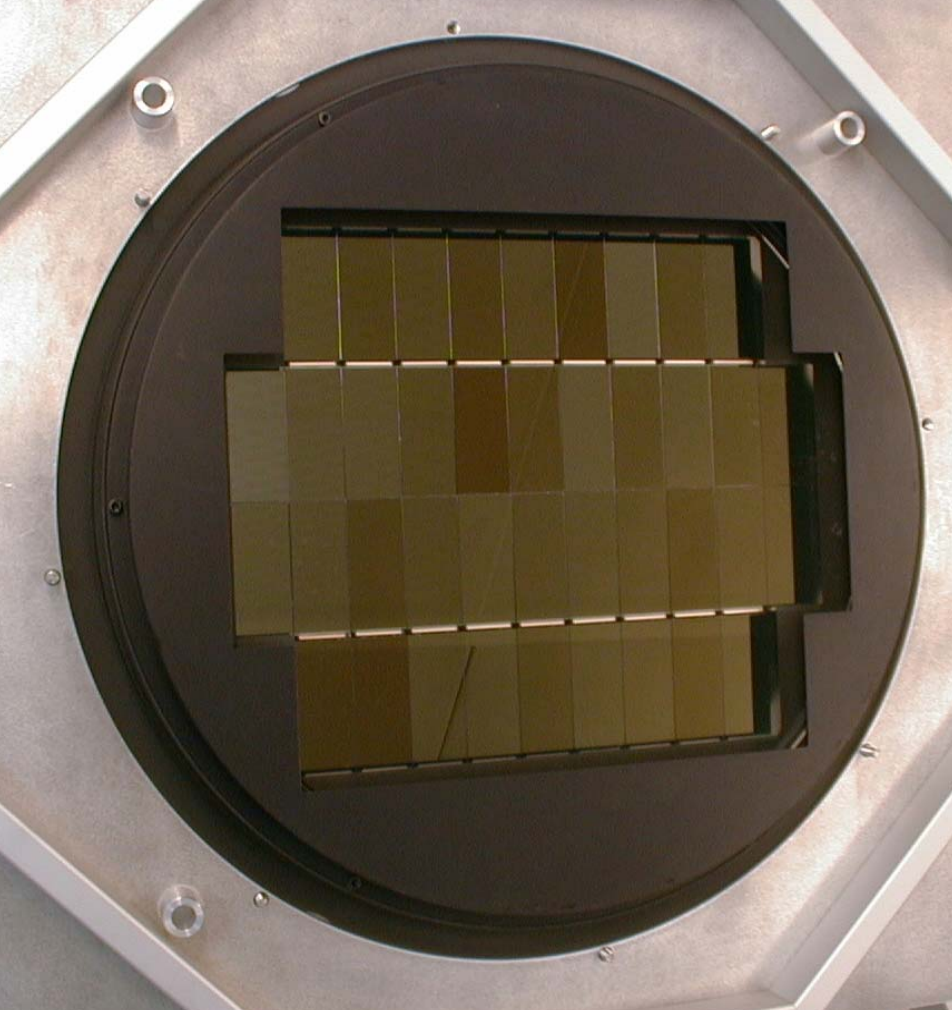
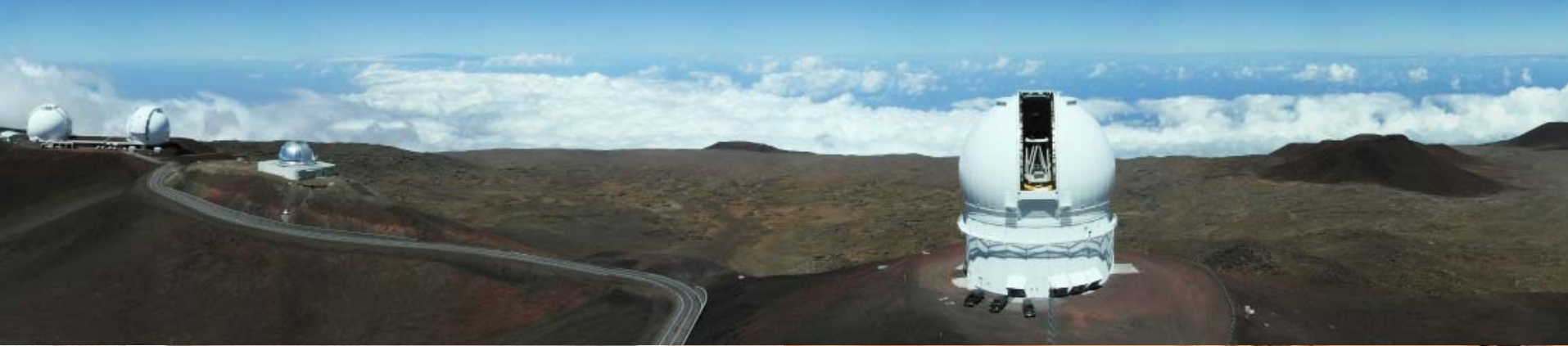
L'Observatoire du Mauna Kea, Mauna Kea, Hawaï, Altitude 4200m

Crête (haut, de gauche à droite): Subaru (8m), Keck I&II (2x10m), IRTF (3m), CFHT (3.6m), Gemini (8m), UH88 (2.2m), UKIRT (4m) et UH (0.6m)

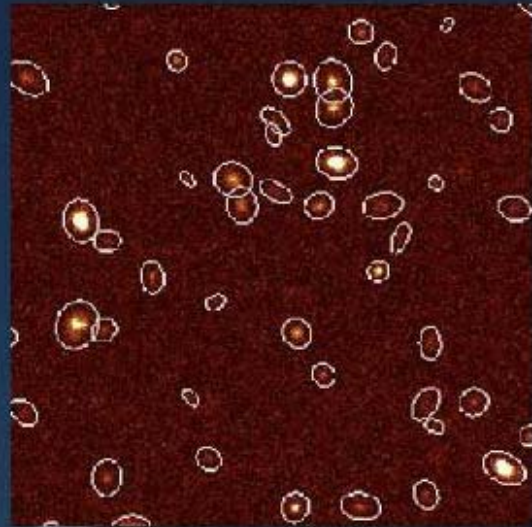
Les antennes millimétriques (bas, de gauche à droite): SMA (8 x 6m), JCMT (15m) et CSO (10 m)

J.-C. Cuillandre (CFHT), © 2000



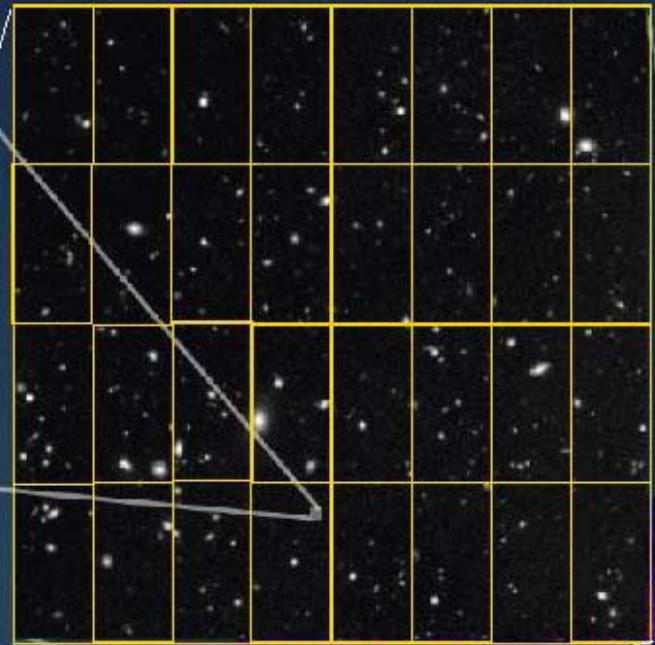


# HIGH-LEVEL PROCESSING

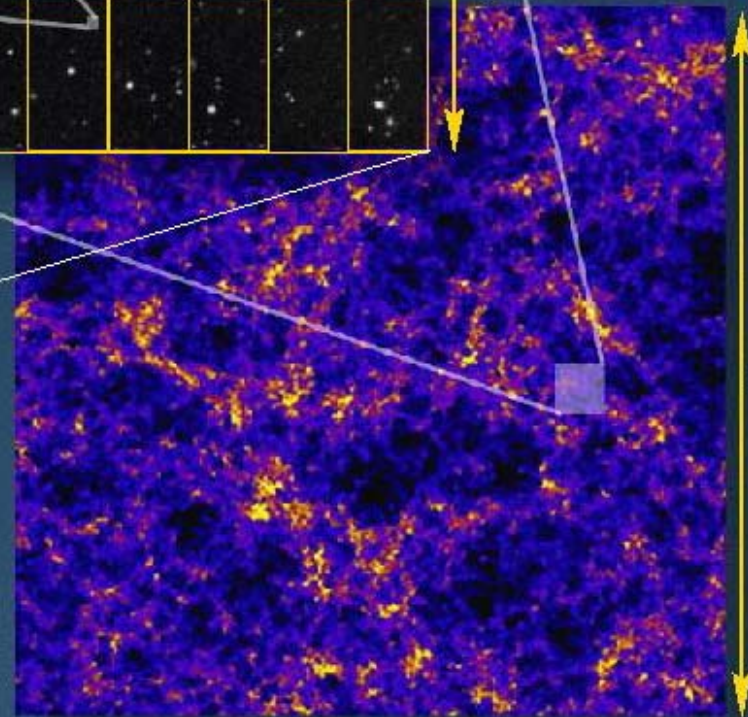


TERAPIX Data-Center

# MEGACAM FIELD



1.2 degrees



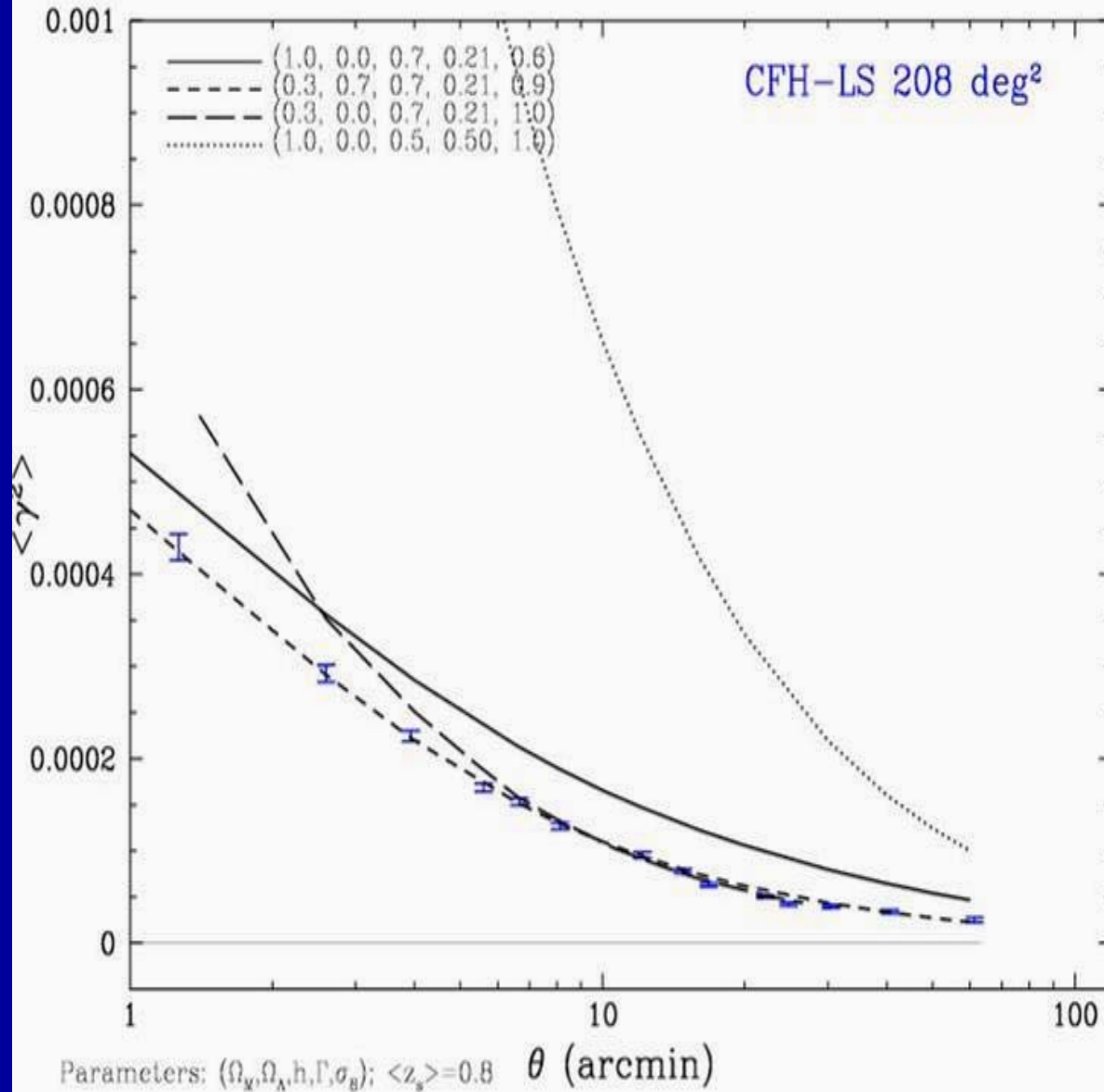
15 degrees



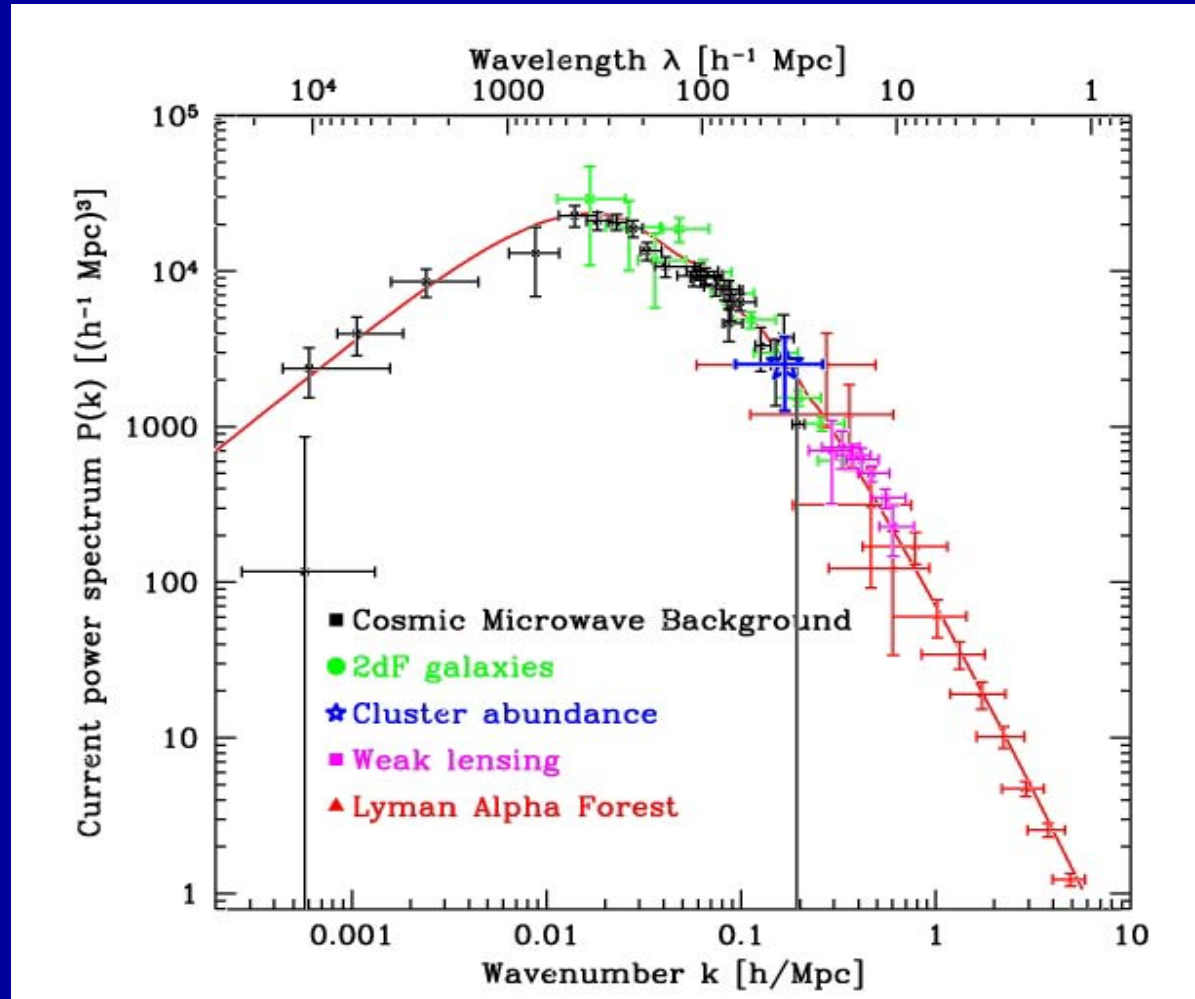
Canada-France-Hawaii-Telescope

LARGE-SCALE STRUCTURES 100Mpc

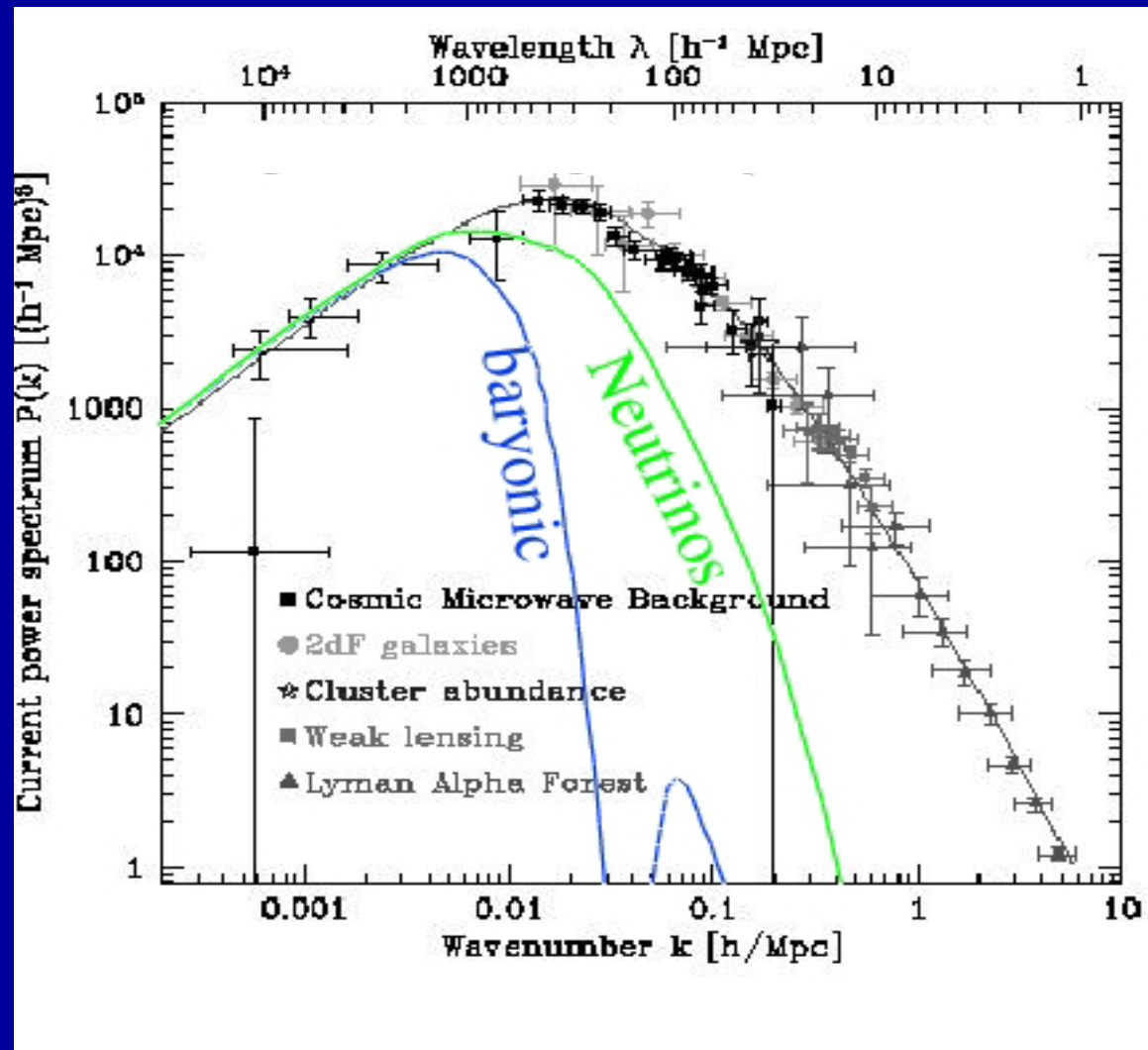
# Le Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey

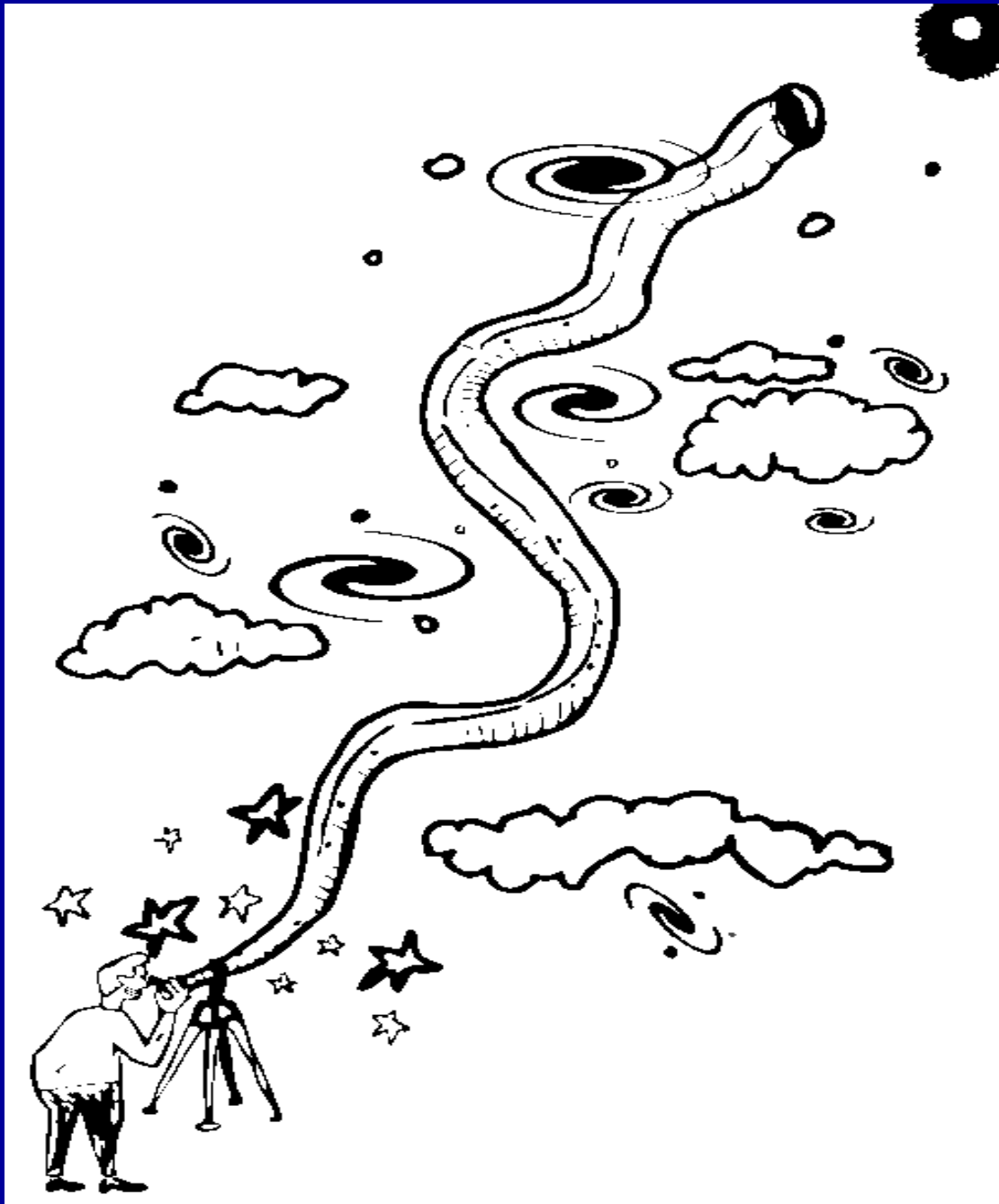


# Spectre de puissance des fluctuations de densité et scénario cosmologique...



# Nature de la matière noire





Des mirages pour  
voir le réel...