

# ***L'Univers invisible trahi par les lentilles gravitationnelles***

***Y. Mellier***

**Institut d'Astrophysique de Paris**

**&**

**Observatoire de Paris**

*Fleurance , 13 aout 2006*

# 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

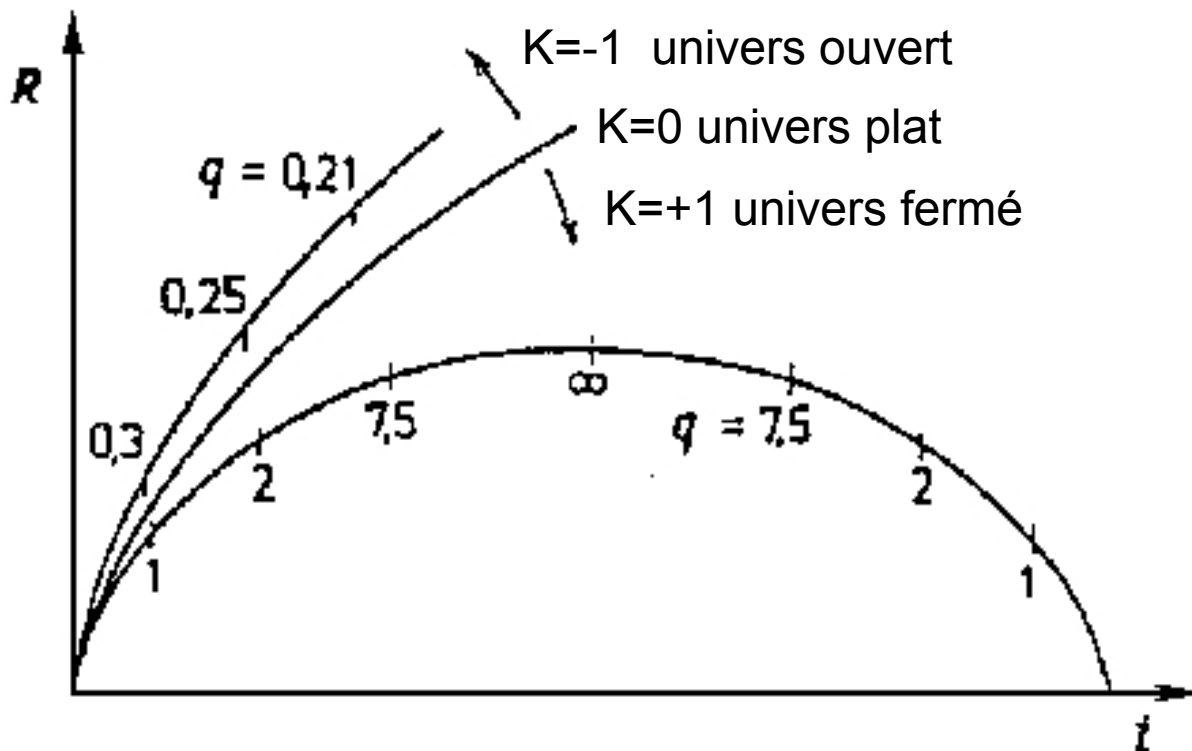
- Théorie de l'inflation et physique de l'Univers primordial

- 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!*

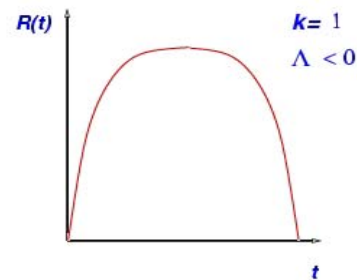
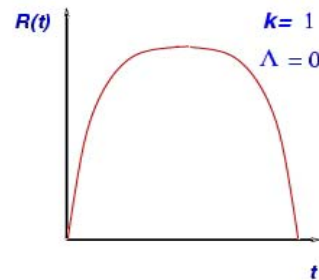
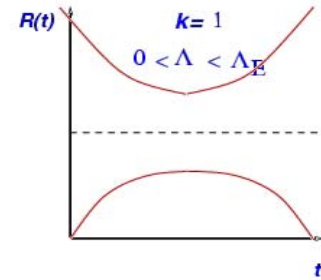
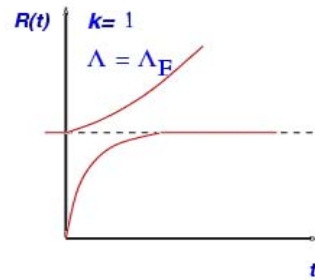
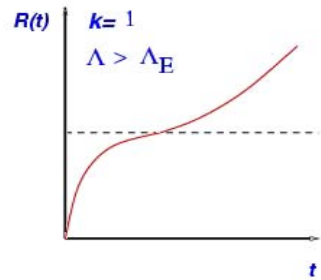
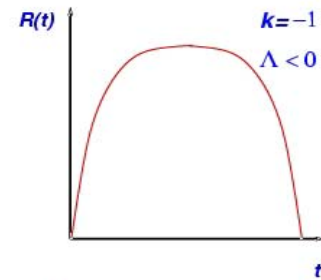
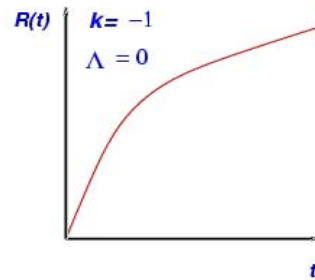
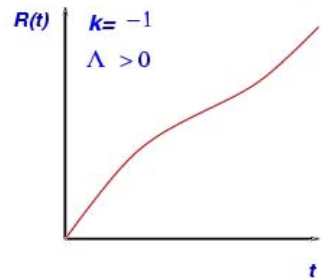
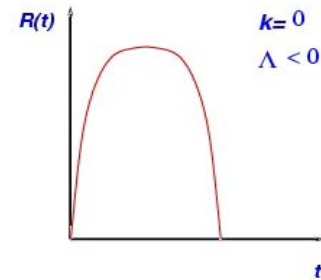
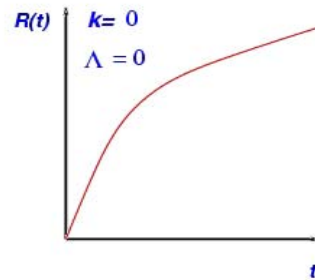
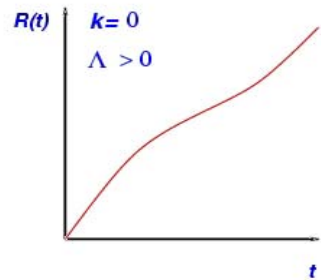
# Les 3 modèles standards

Modèle	Géométrie	$k$	$\Omega$	$q_0$	Age	Destin
Fermé	Sphérique	+1	>1	>1/2	$t_0 < 2/3 t_H$	ré-effondrement
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 théoriques d'Univers... lequel est le bon?



# Ce que pensons connaître de notre univers

- Homogène et isotrope à grande échelle (Principe Cosmologique)
- L'univers est plat (sa courbure est nulle)
- Il est en expansion et cette expansion s'accélère
  
- Composé de 70% d'énergie sombre (de nature inconnue), de 25% de matière noire (de nature inconnue) et de 4% matière ordinaire (baryonique)
  
- Sa structuration actuelle résulte du phénomène d'instabilité gravitationnelle
- L'évolution du taux de croissance des structures au cours du temps dépend à la fois de son contenu en matière noire et de son contenu en énergie sombre
- L'histoire cosmique de l'univers est visible à travers la distribution de la matière: le spectre de puissance de la matière noire
- L'évolution de cette distribution avec le temps peut être retrouvée à partir d'observations astronomiques de l'univers lointains... en remontant le temps

# Ce que pensons connaître de notre univers

- Les cosmologistes caractérisent les différents univers possibles par une série de nombres: les paramètres cosmologiques
  - $H_0$  = expansion  
(constante de Hubble)
  - $\Omega_m$  = quantité de matière
  - $\Omega_\chi$  = quantité d'énergie noire  
(qui pourrait être associée à une constante cosmologique  $\Lambda$ )
  - $w$  = propriété de l'énergie sombre  $P=w \rho$   
(l'équation d'état de l'énergie sombre)
  - $\sigma_8$  = amplitude du spectre de puissance ; initial  
 $P(k) = \sigma_8 k^n$   
( $P(k)$  change au cours du temps;  $n$  est l'indice du spectre)

# Le scenario cosmologique

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

Aube des temps

Contenu de l'univers

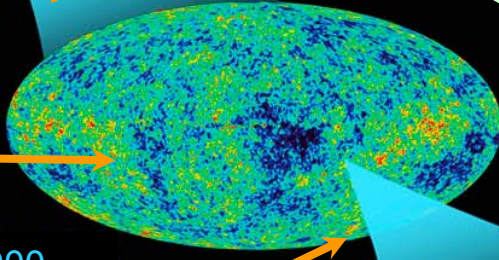
- $\Omega_m$
- $\Omega_\lambda$
- $\Omega_v$
- $\Omega_\gamma$
- $\Omega_b$
- $\eta = n_b/n_\gamma$



inflation

Age et expansion:  $t + h$

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



380000 ans

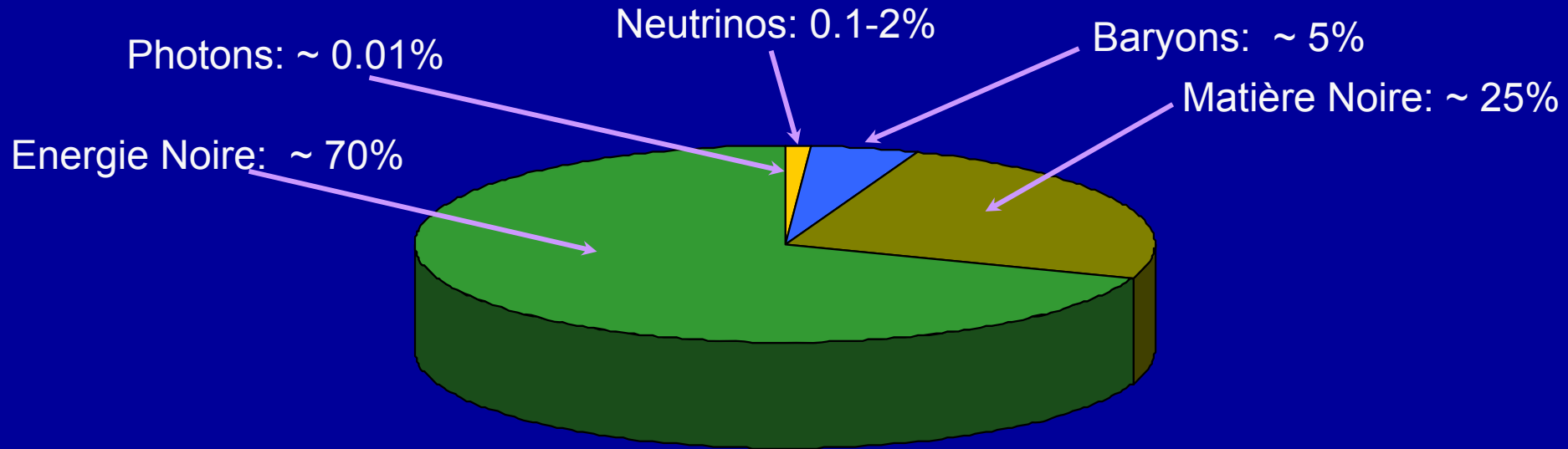
Premières lumières dans l'univers

13.7 milliards d'années





# Le contenu de l'Univers

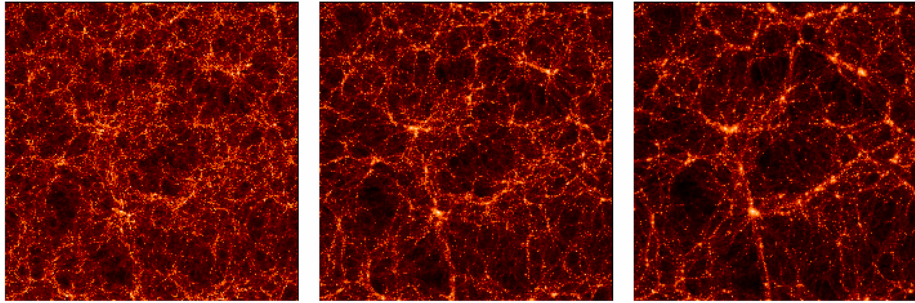


- Mais comment croire ce modèle fondé sur 95% de contenu totalement inconnu???
  - Matière noire : preuves?
  - Constante cosmologique: preuves?
  - Inflation : preuves?

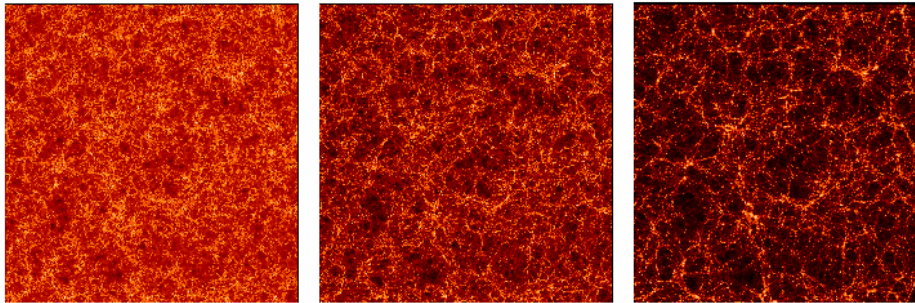
# On remonte le temps (décalage spectral)

←  $z=3$   $z=1$   $z=0$  (today)

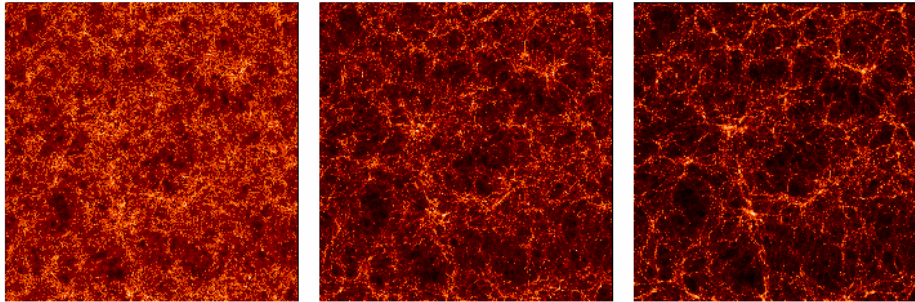
$H_0 = 70$   
 $\Omega_m = 0.3, \Omega_x = 0.7$   
 $W = -1 (\Lambda)$ ,  $\Lambda$ CDM  
 $\sigma_8 = 0.9$



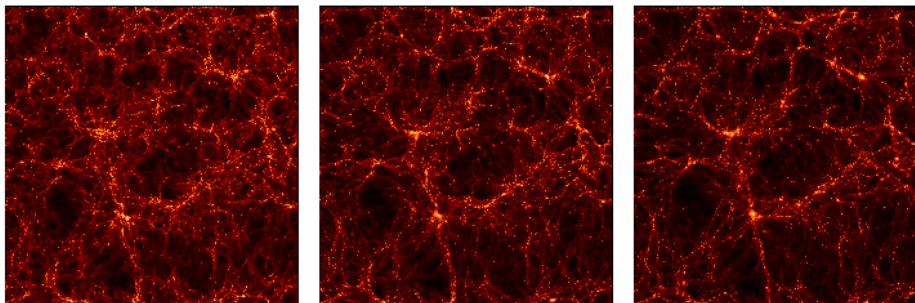
$H_0 = 50$   
 $\Omega_m = 1.0, \Omega_x = 0.0$   
 $W = 0$ , SCDM  
 $\sigma_8 = 0.51$



$H_0 = 70$   
 $\Omega_m = 1.0, \Omega_x = 0.0$   
 $W = 0$ ,  $\tau$ CDM  
 $\sigma_8 = 0.51$



$H_0 = 70$   
 $\Omega_m = 0.3, \Omega_x = 0.7$   
 $W = 0$ , OCDM  
 $\sigma_8 = 0.85$



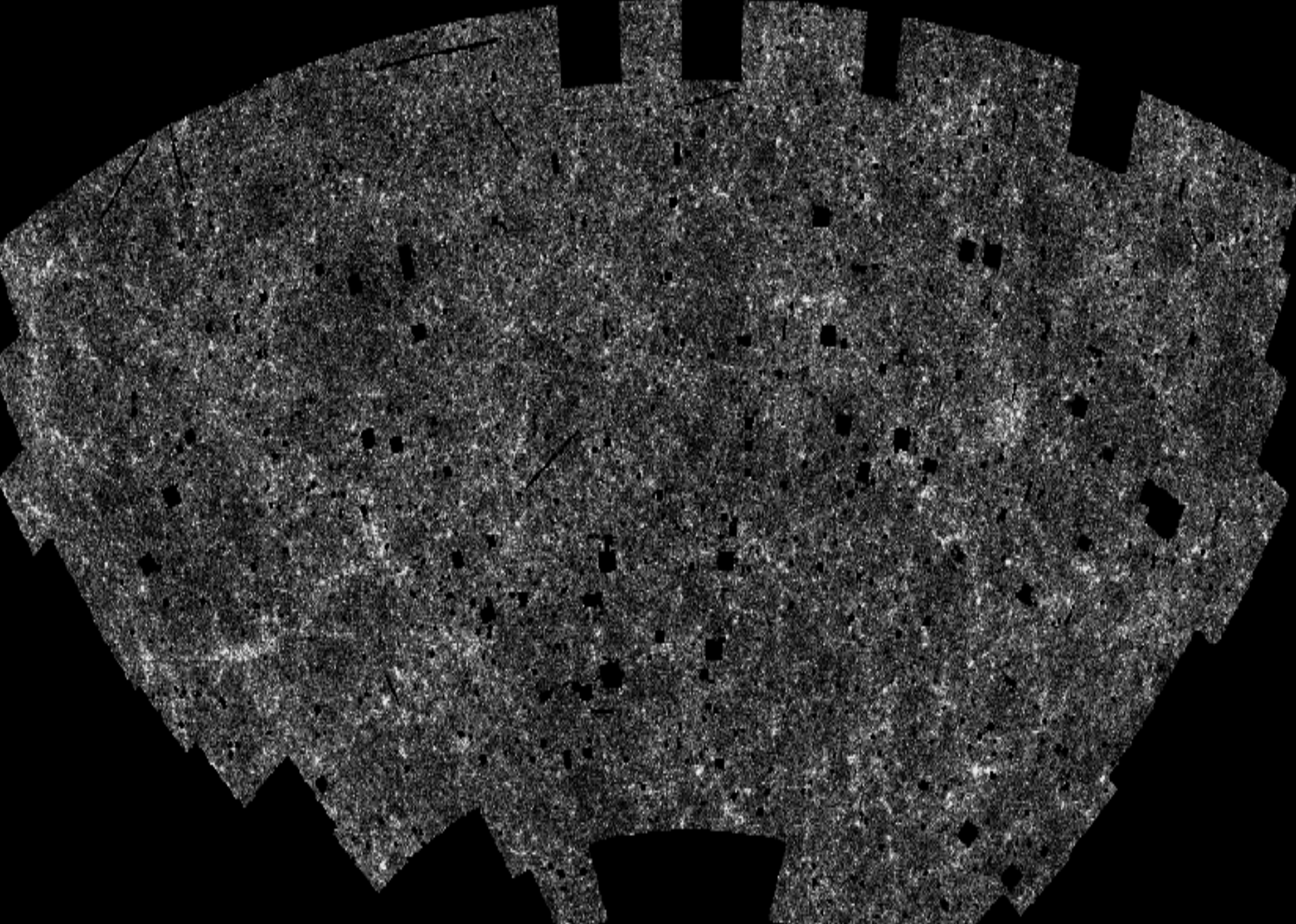
L'histoire de la formation des structures de l'Univers dépend de son contenu en matière et en énergie



L'énergie sombre de la matière noire peuvent donc être révélés par la forme de la distribution de la matière aujourd'hui et dans le passé

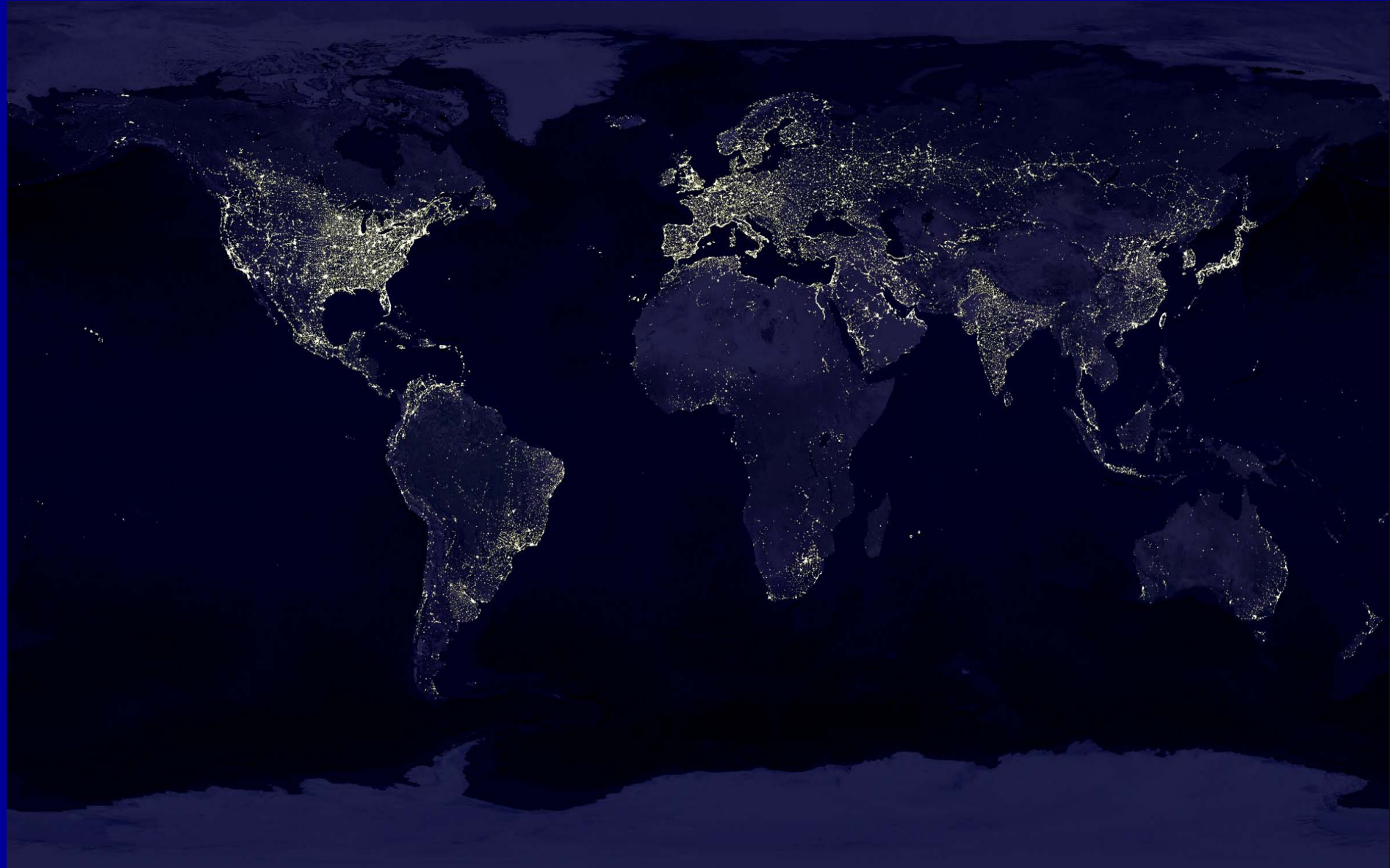
Simulation numérique de 4 univers différents

Voir la conférence d'Etienne Parizot



La distribution des galaxies... Mais les galaxies avant tout montrent la lumière...

La lumière ne montre pas toute la matière

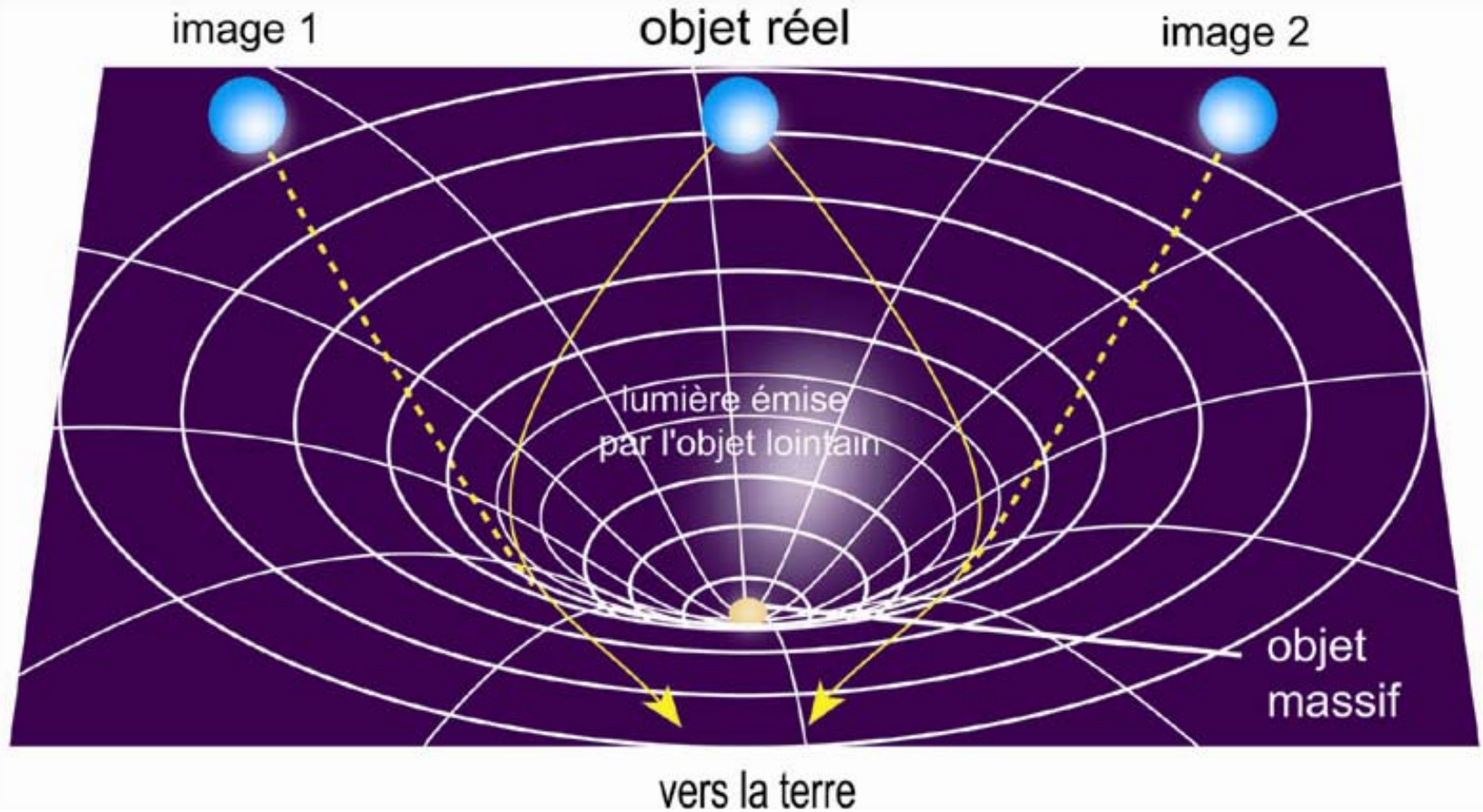


... donc... comment observer la vraie distribution de la matière et ce spectre de puissance de la matière noire ?

Nous avons besoin de « voir » la matière noire

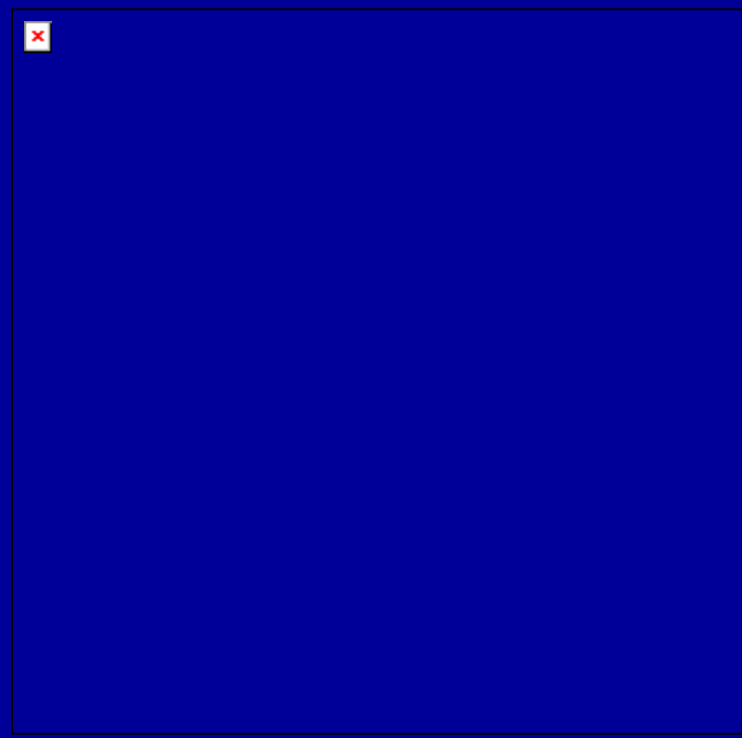
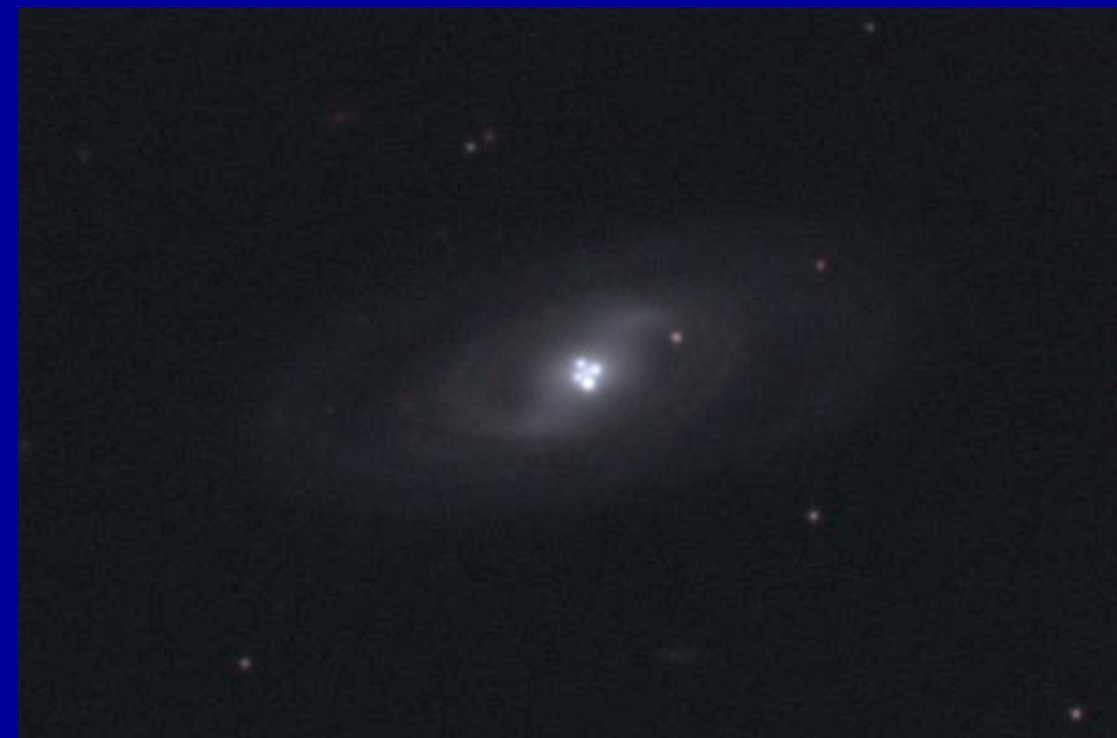
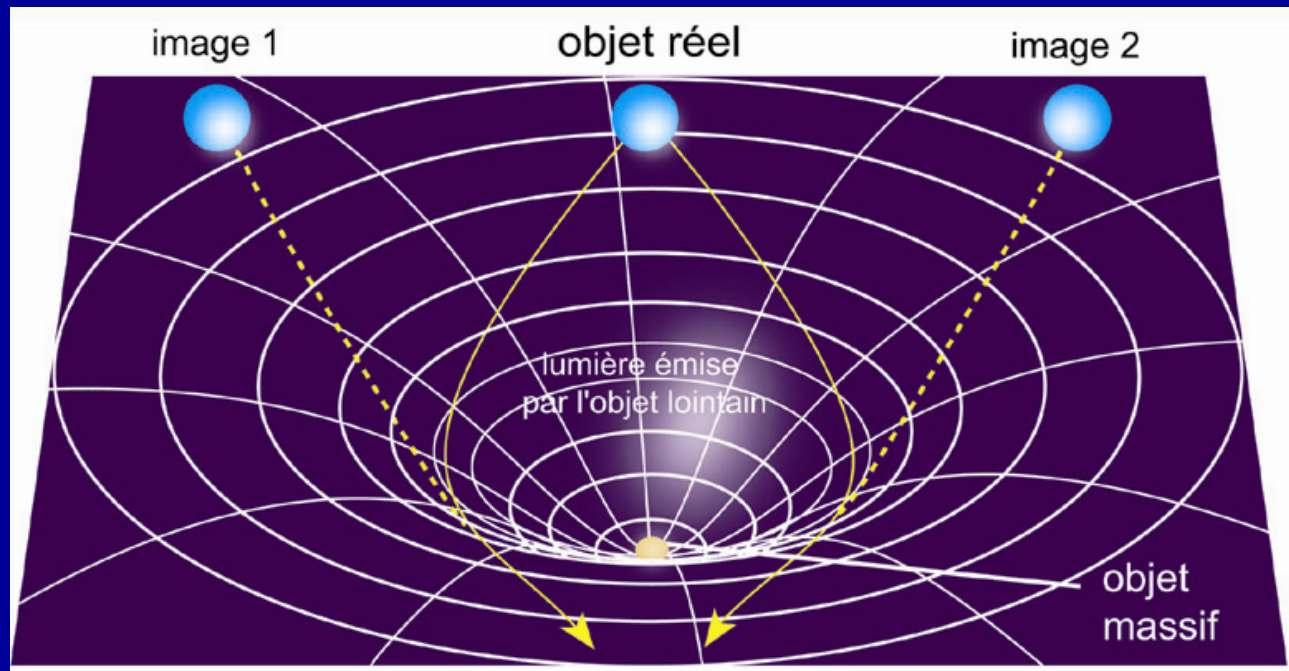
# La Relativité Générale:

la courbure de l'espace-temps est modifiée localement par la présence de condensations de matière (blanche, bleue, verte, noire, ...)



➤ Déflexion de la lumière, amplification, démultiplication des images, déformation des objets célestes : tous ces phénomènes **dépendent directement de la quantité de matière**

➤ Important: l'effet de lentille gravitationnelle est **achromatique** (les photons suivent des géodésiques qui ne dépendent pas de leur énergie propre)

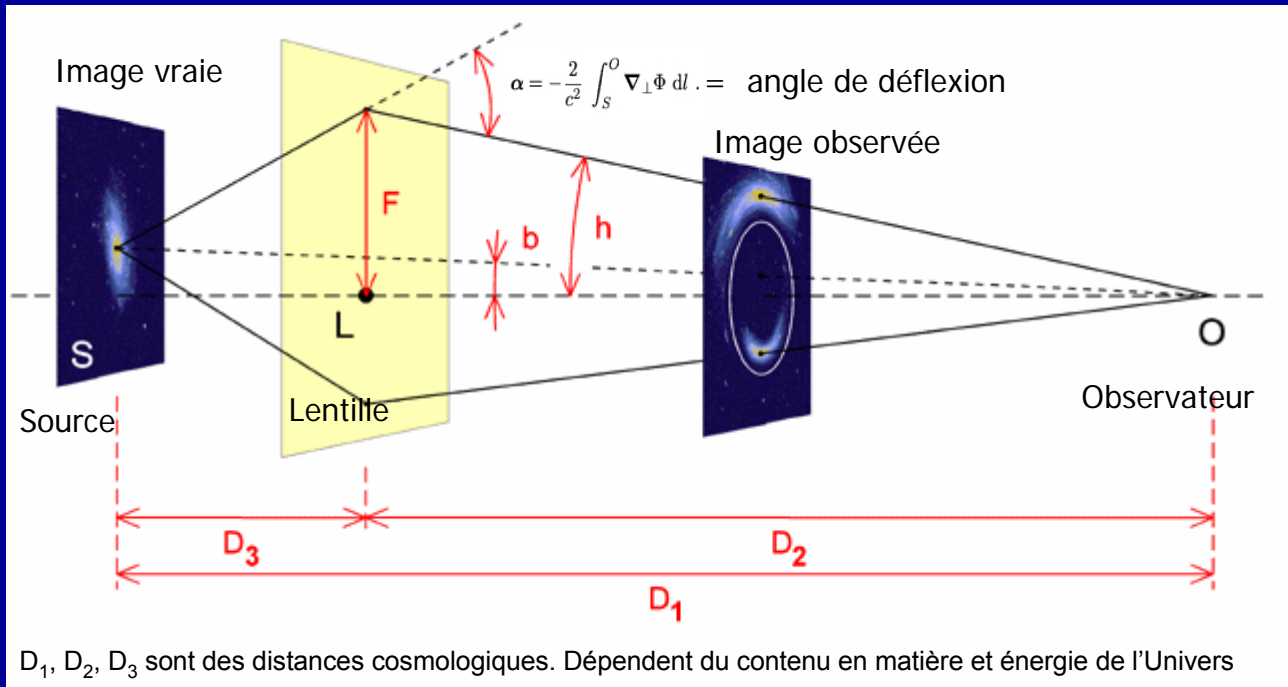


La déflexion de la lumière, un phénomène  
que tout le monde connaît!



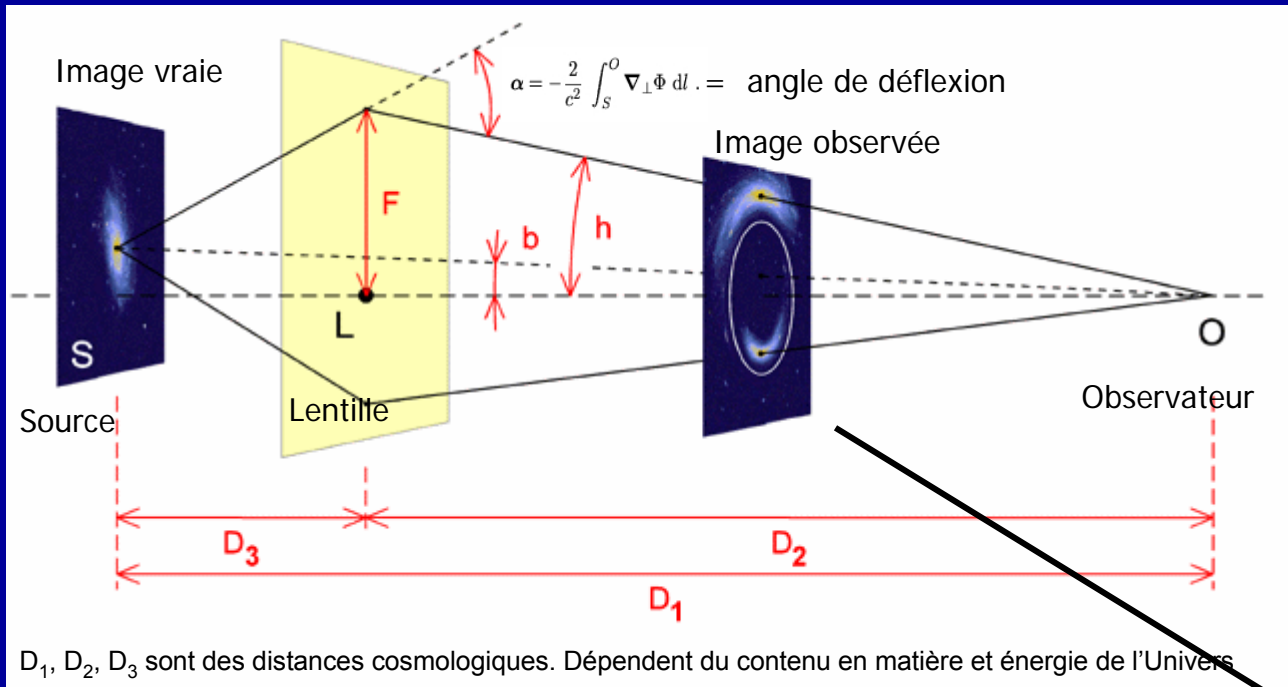


# Configuration de lentille gravitationnelle parfaite

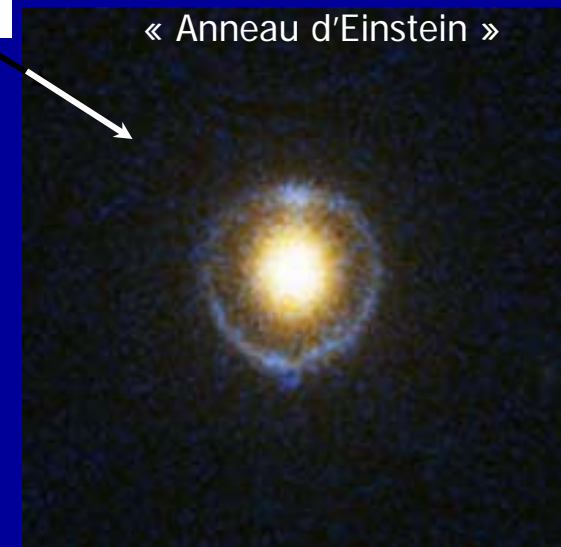


Source-Lentille-Observateur  
parfaitement alignés

# Configuration de lentille gravitationnelle parfaite



Source-Lentille-Observateur  
parfaitement alignés

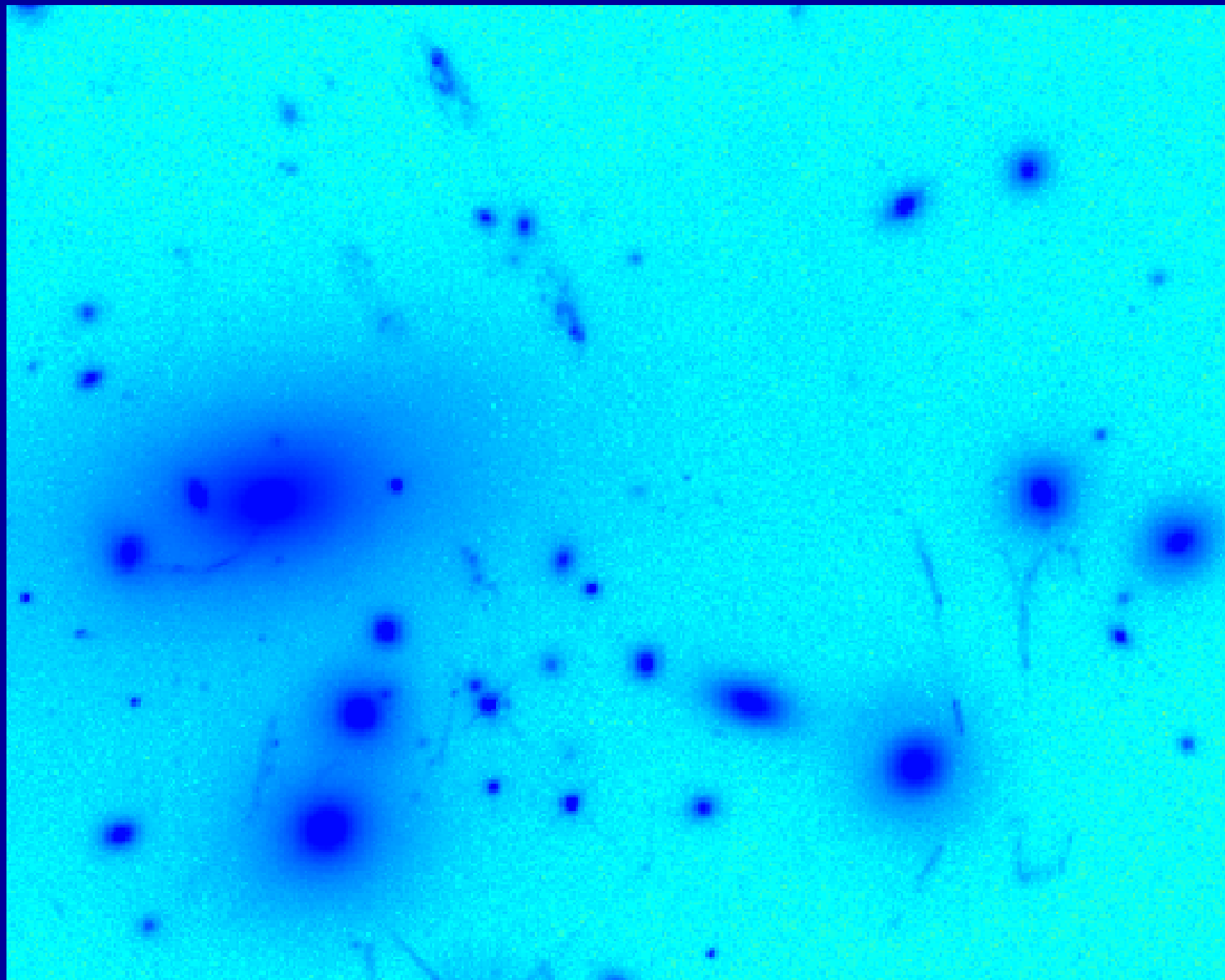


# L'effet de lentille gravitationnelle

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

# Convergence et cisaillement

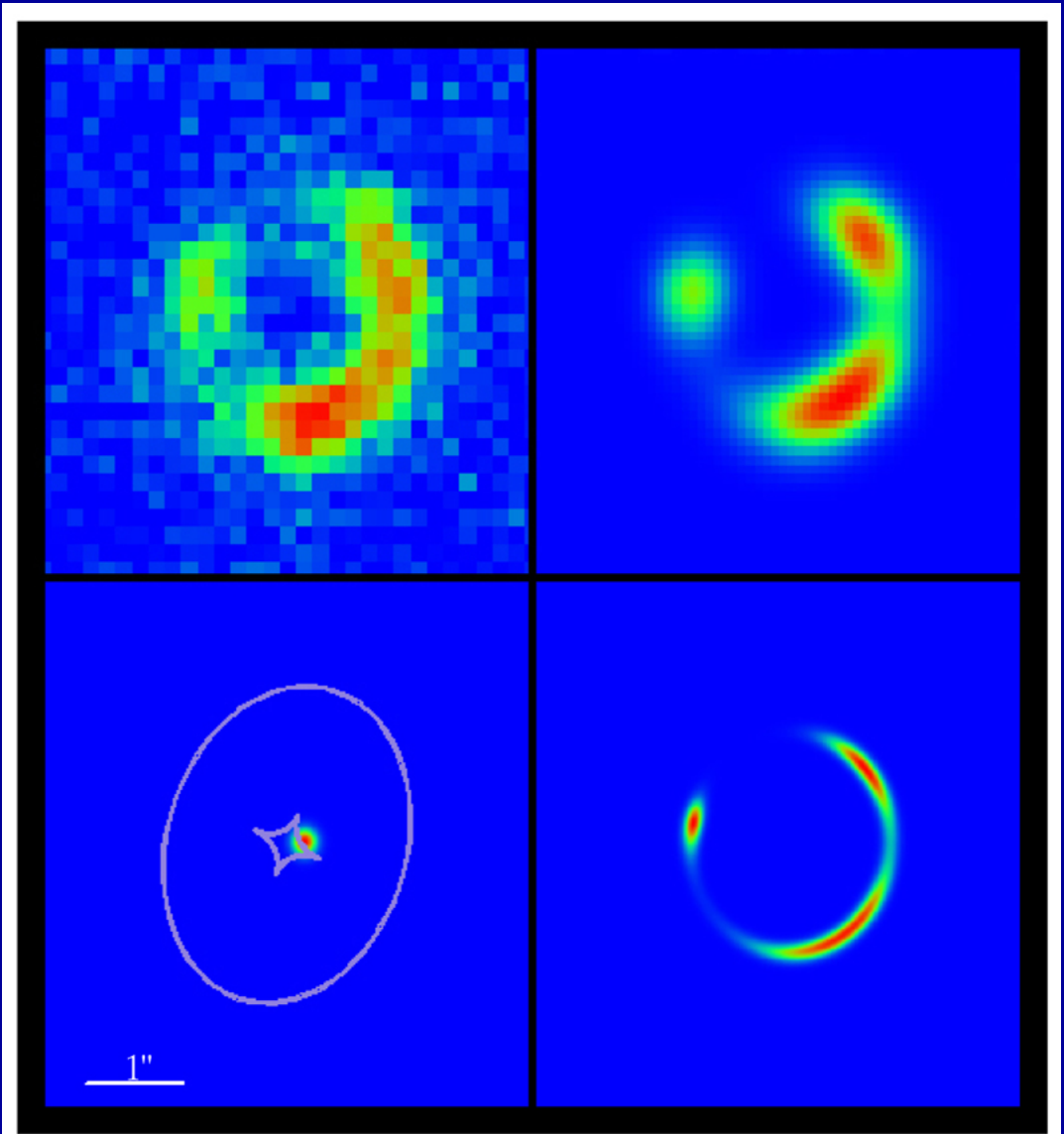






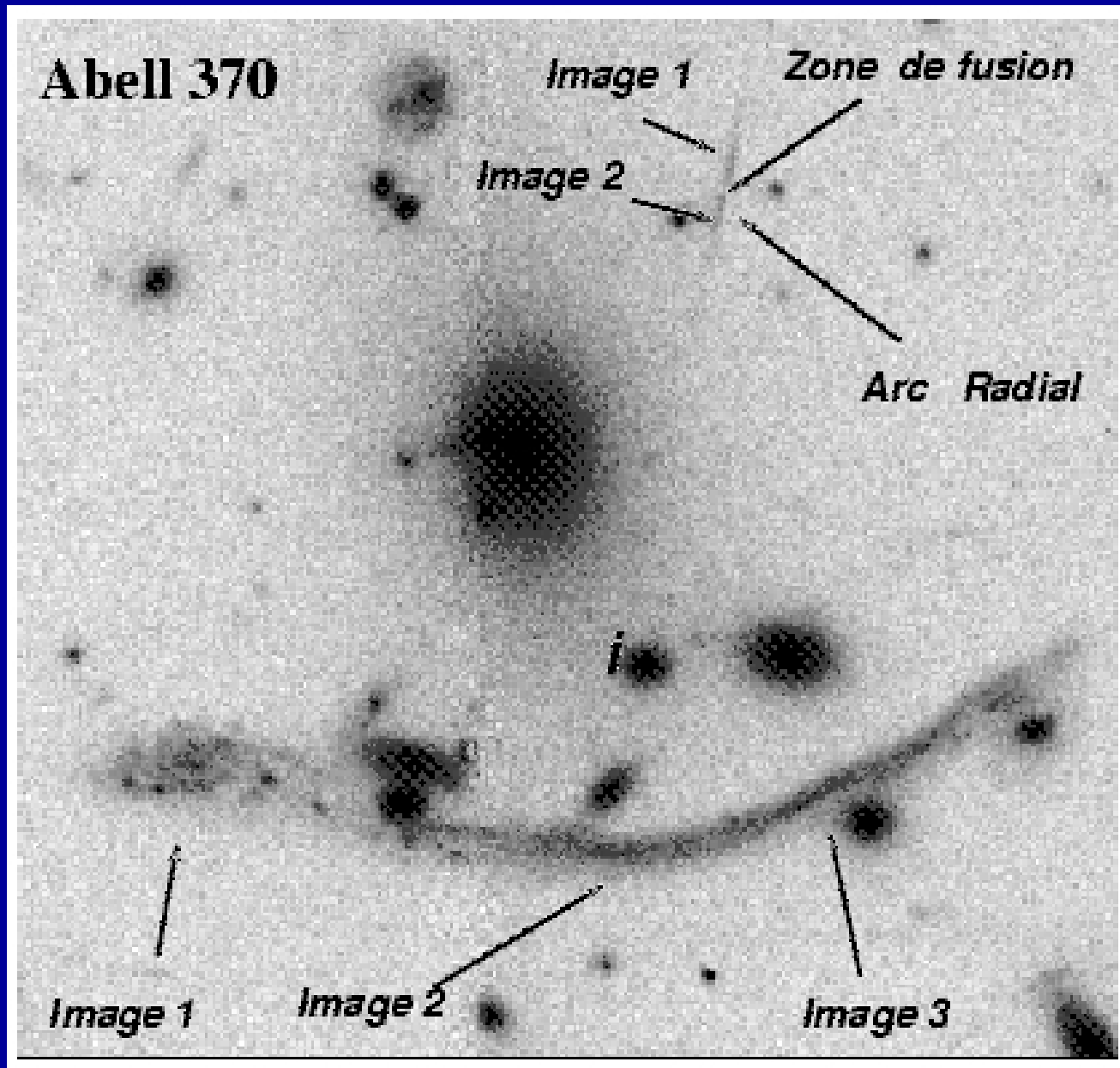
# On sait déterminer la quantité et la distribution de la matière grâce aux effets de lentille gravitationnelle

Observation



Interprétation  
et modélisation

# Description préliminaire de la « configuration »

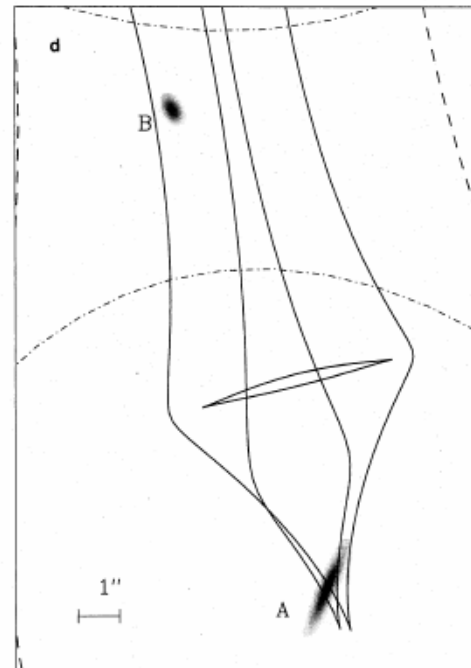
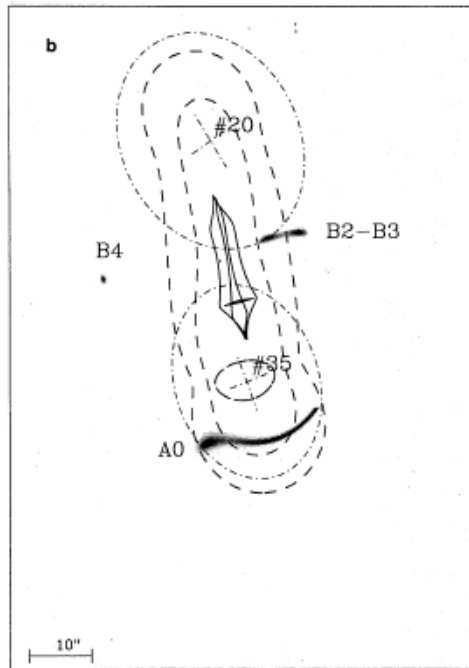
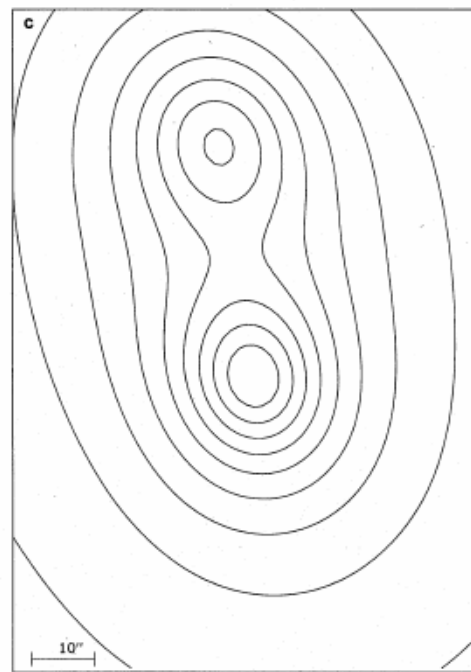
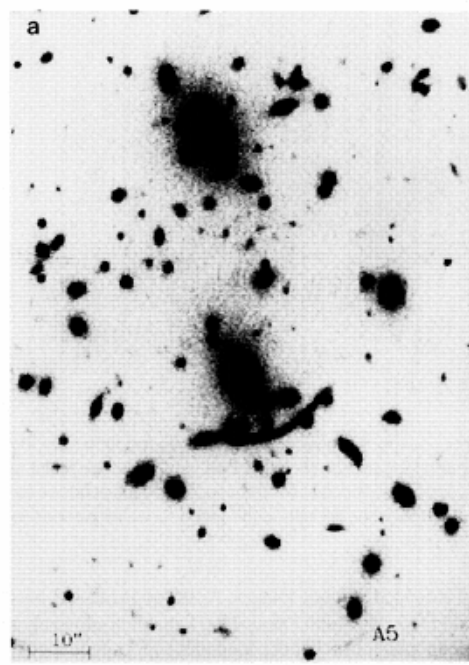




# Modéliser la distribution de la matière noire

Reconstruction des images

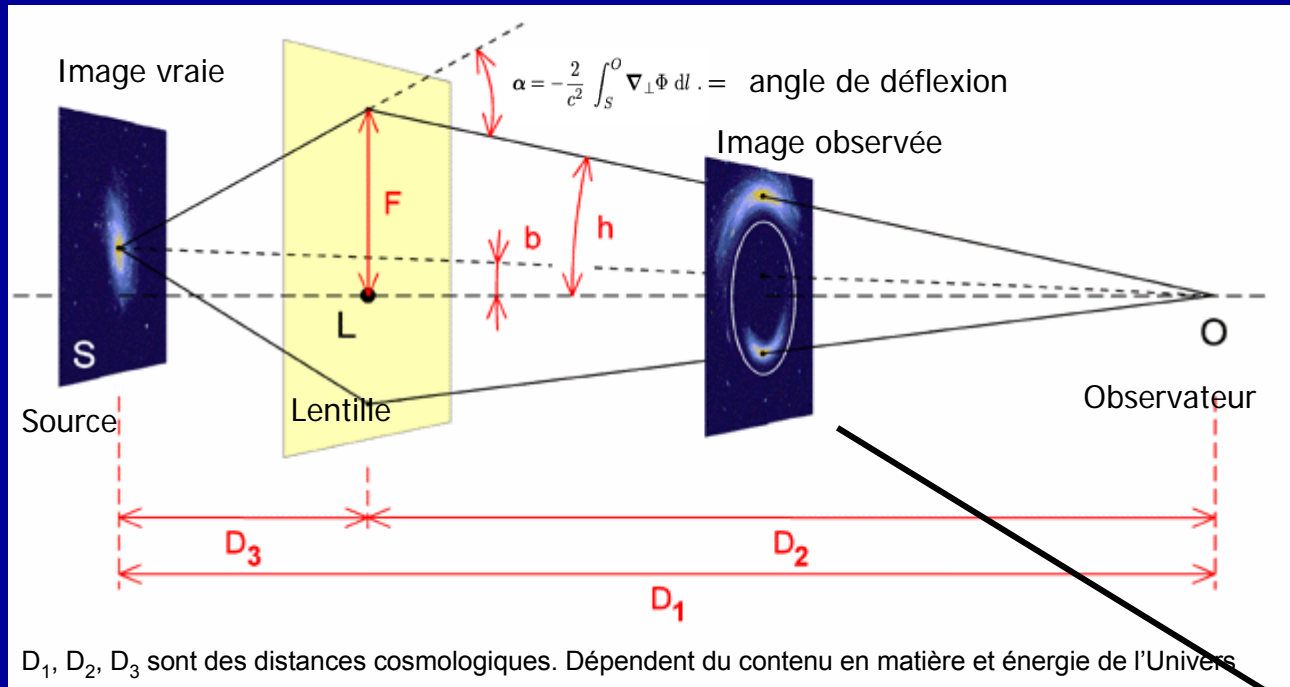
Déduction du potentiel déflecteur



# Arcs et distribution de la matière noire

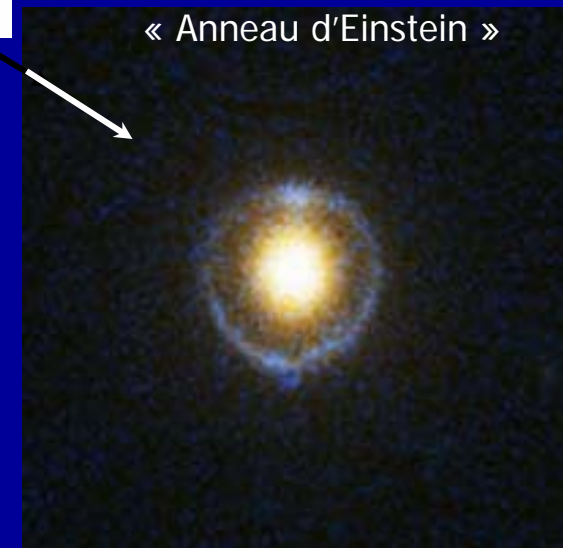
- La forme et la taille des arcs gravitationnels sont les éléments observationnels les plus solides en faveur de l'existence de matière invisible.
- La matière composant les amas de galaxies est composée d'environ 90% de matière noire.
- La matière noire doit être plus concentrée que la distribution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

# Configuration de lentille gravitationnelle parfaite



Source-Lentille-Observateur  
parfaitement alignés

Mais configuration exceptionnelle.  
Événement très rare dans la nature.



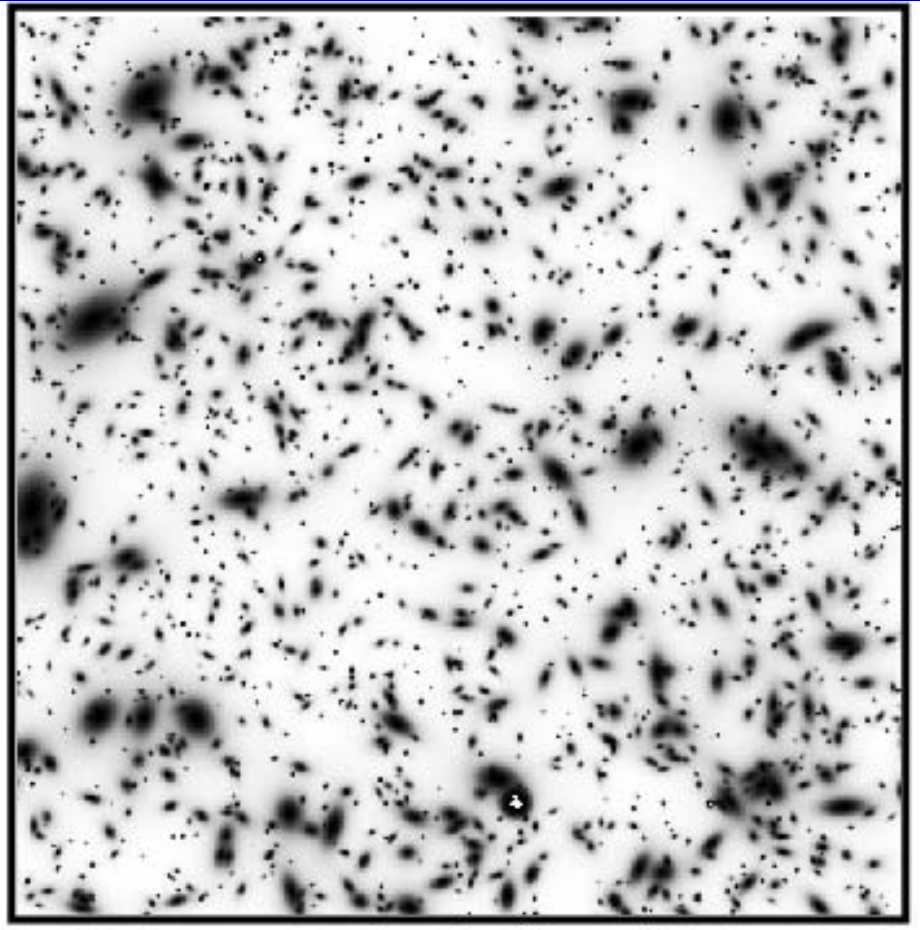
# Heureusement, il y a des milliards de galaxies dans l'Univers



Le champ Ultra-profond du télescope spatial Hubble.

- 1 million de secondes
- Magnitude limite: 29
- 10000 galaxies/quasars
- 900000 galaxies/surface Lune
- 100 milliards dans le ciel

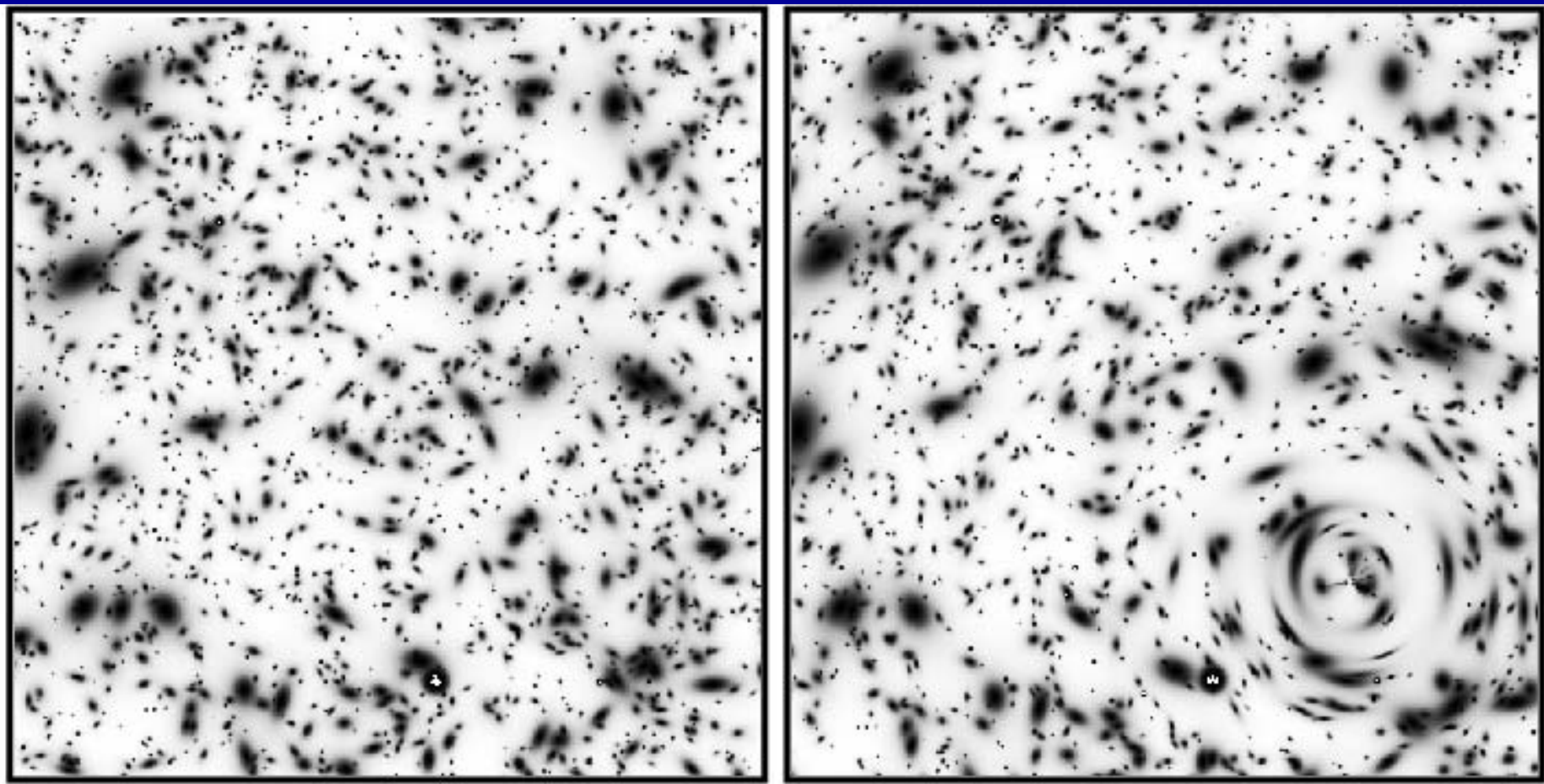
# Des milliards de galaxies lointaines



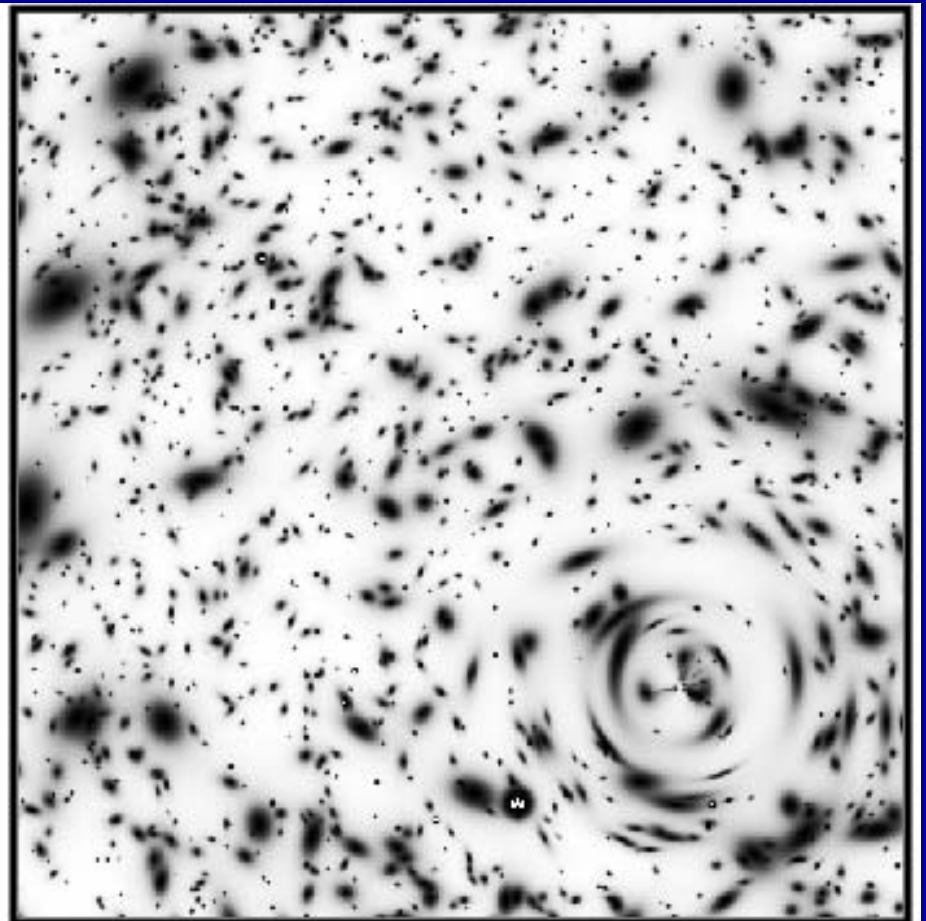
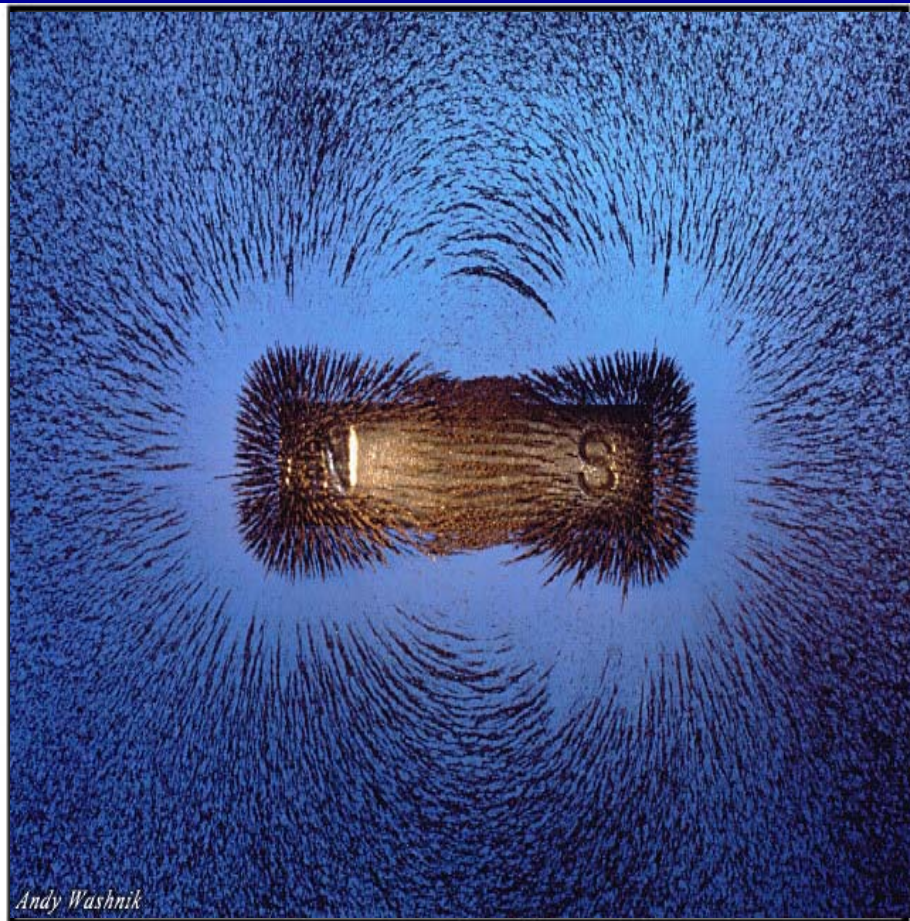
Une simulation d'une image  
du télescope Hubble

200000 galaxies/deg<sup>2</sup>

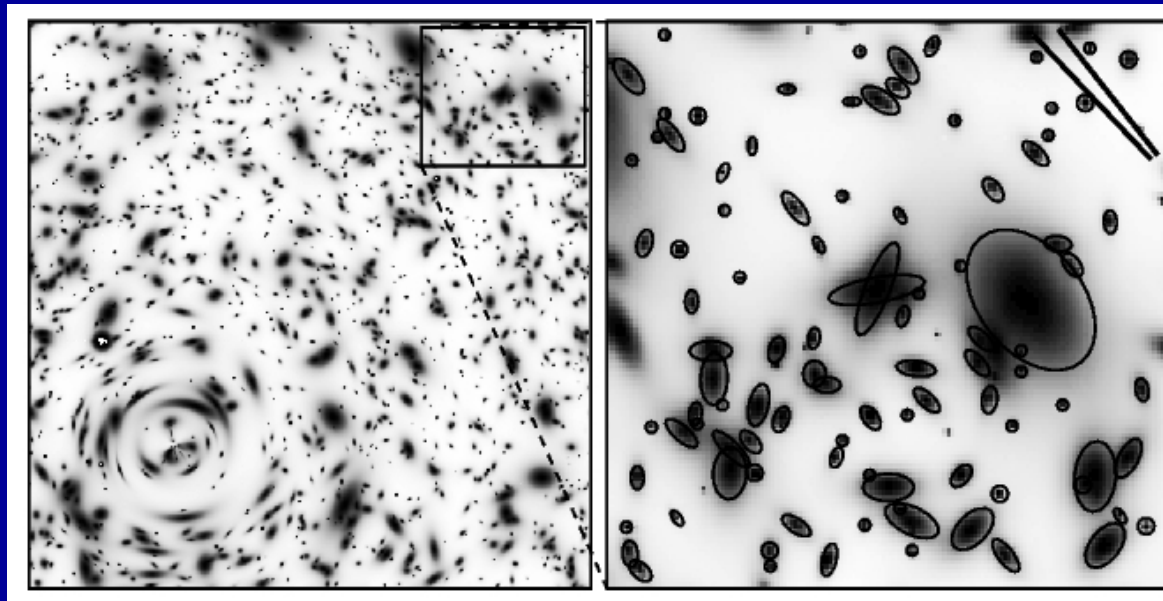
# Des milliards de galaxies déformées....



Un champ de déformation cohérent qui trace le champ de gravité comme la limaille de fer trace le champ magnétique



# Analyse statistique de la distribution des formes des galaxies



Distorsion gravitationnelle:  
une galaxie ronde devient  
elliptique



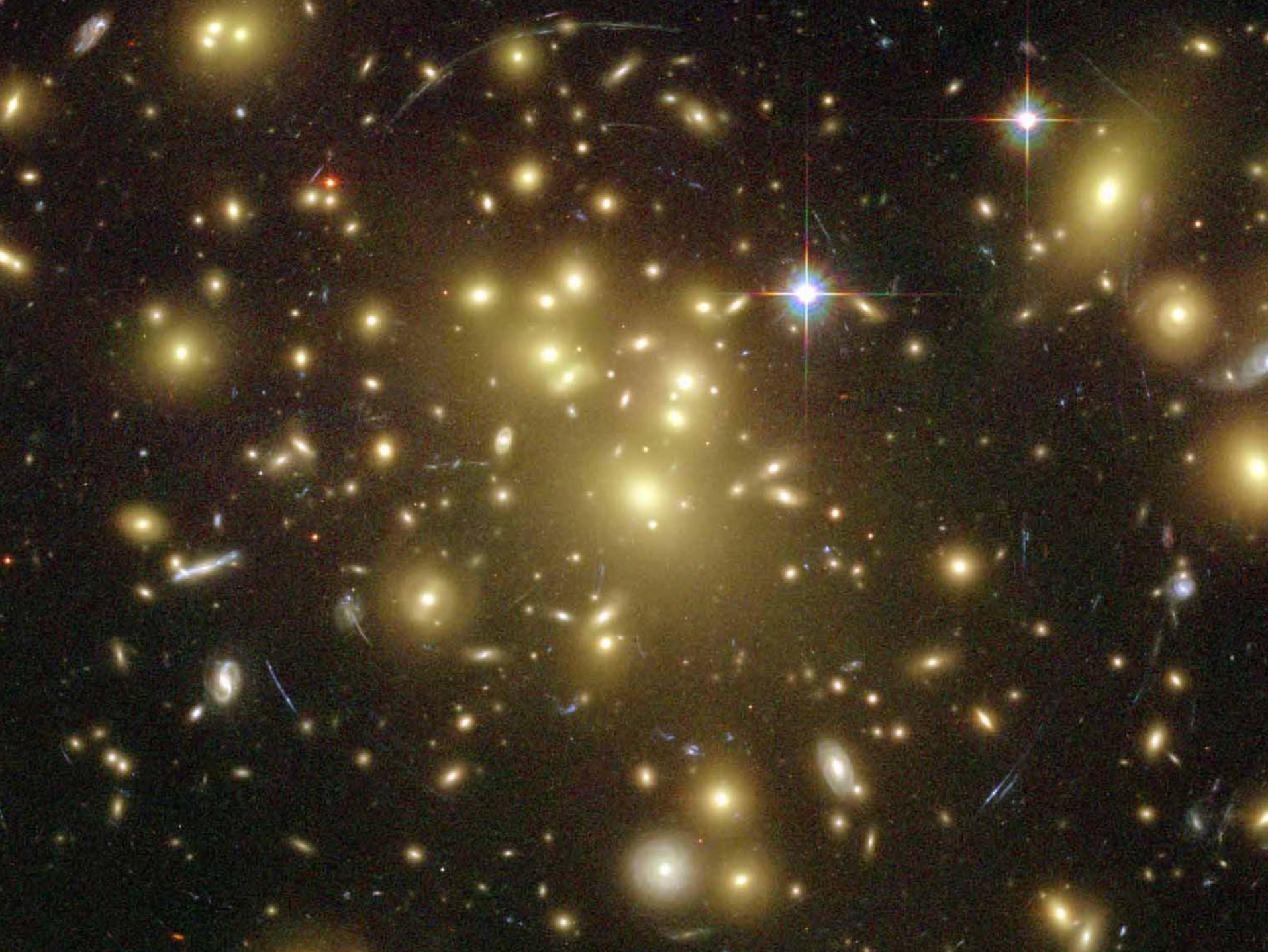
Mesure des formes des  
objets par les observations  
astronomiques

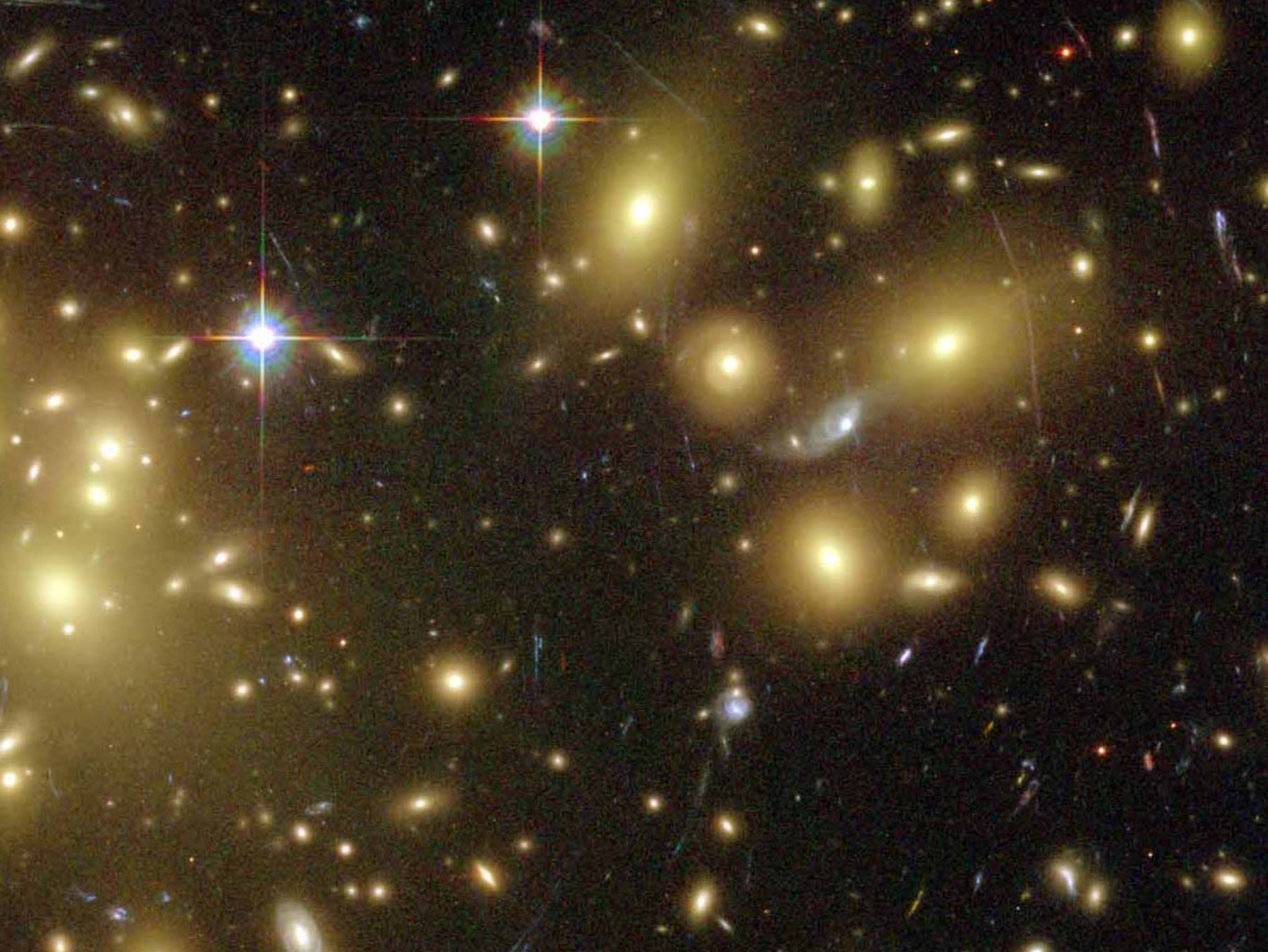


*Hypothèse:* l'orientation des galaxies est aléatoire: la forme moyenne de 1000 galaxies est un objet rond.... SAUF si une lentille gravitationnelle le déforme!

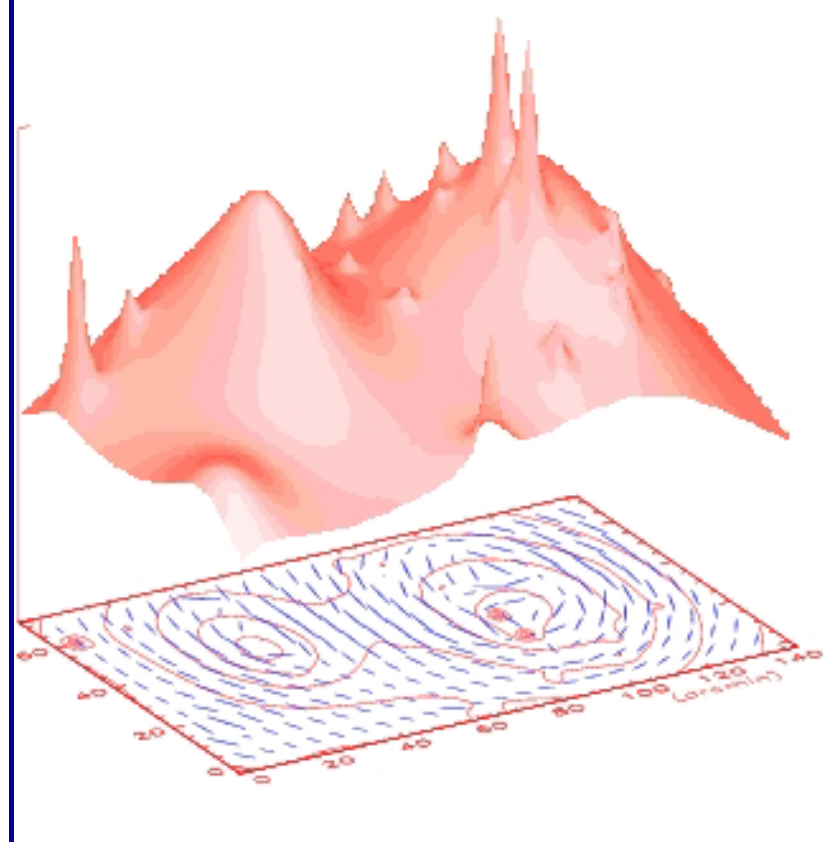
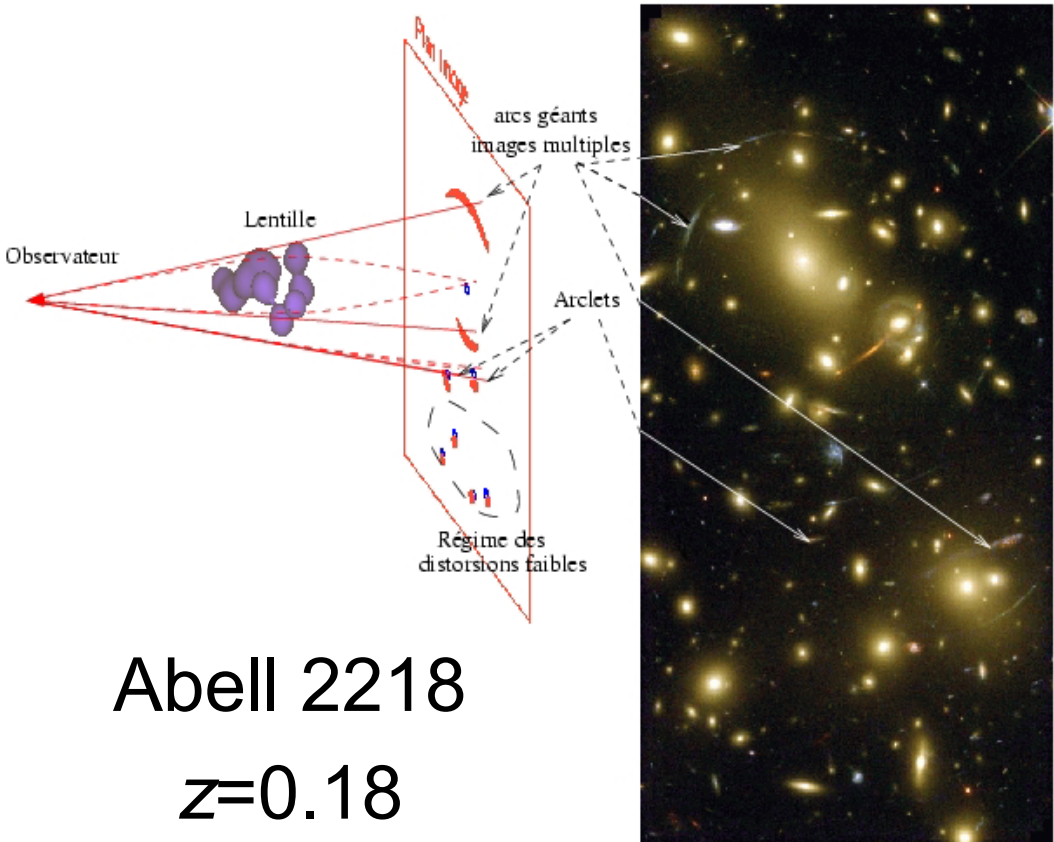
## Le champ de déformation=champ de matière



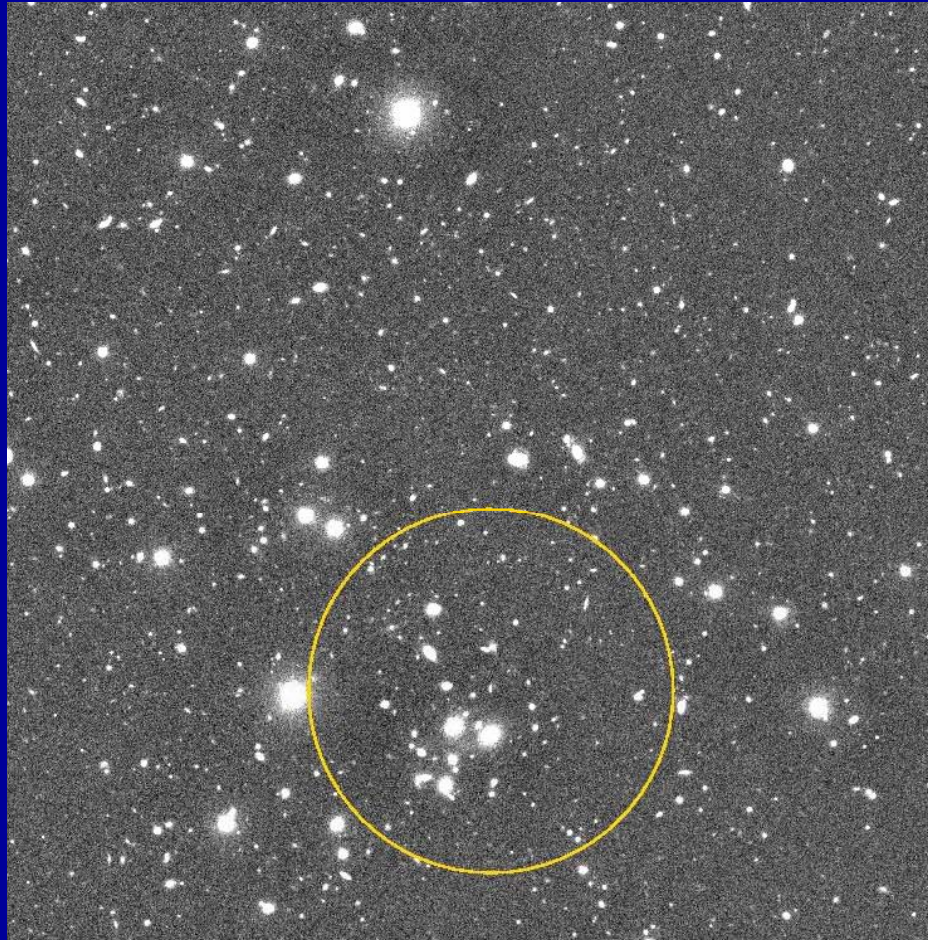




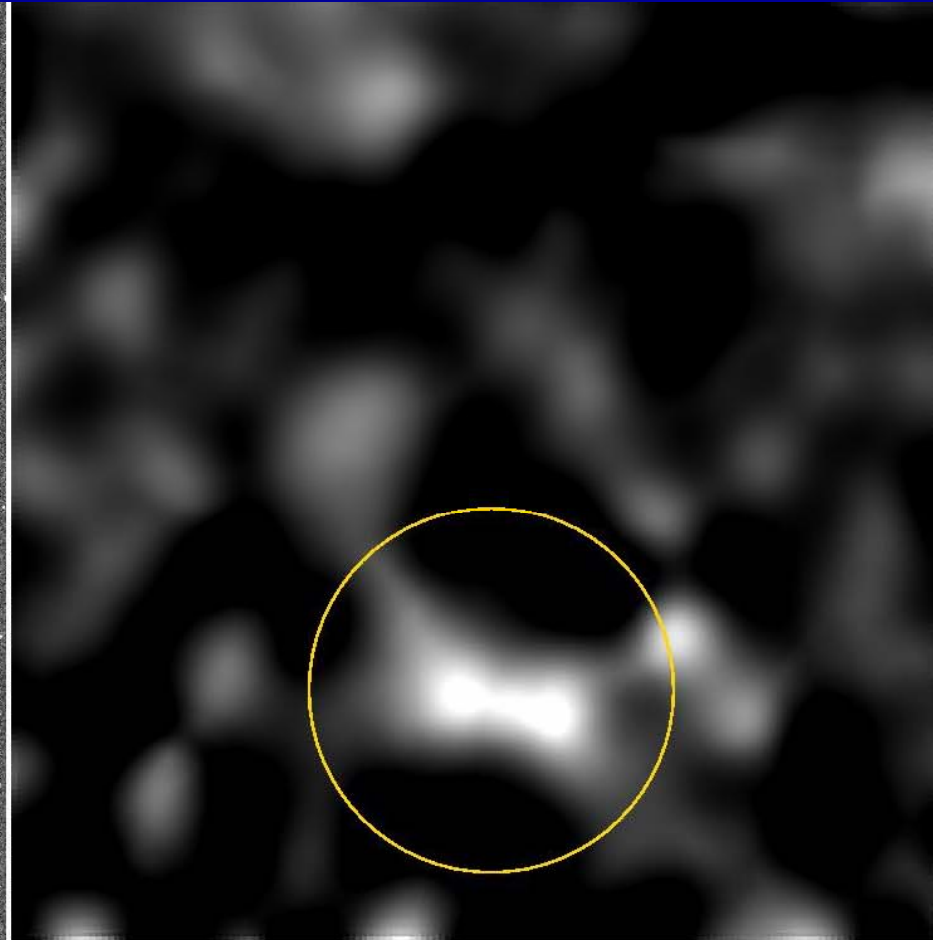
# Champ de distorsion gravitationnelle et reconstruction de la carte de densité de matière avec les galaxies.



# Reconstruction du champ de densité de matière noire



*VLT I-band Image: 36 mn exposure*



*Dark Matter reconstruction*

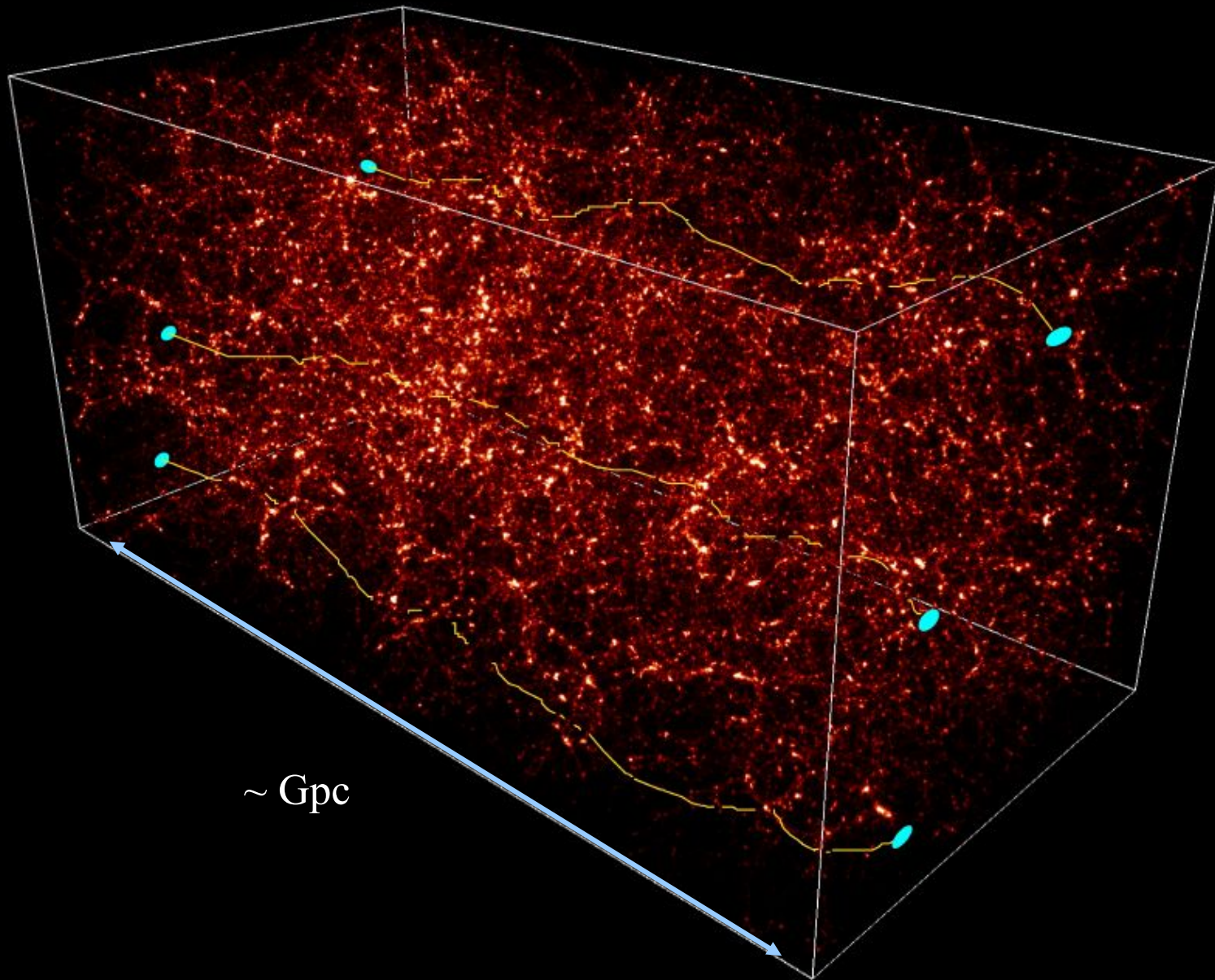
... mais s'il est vrai qu'il y a des milliards de galaxies qui sont déformées...

... mais s'il est vrai qu'il y a des milliards de galaxies qui sont déformées...

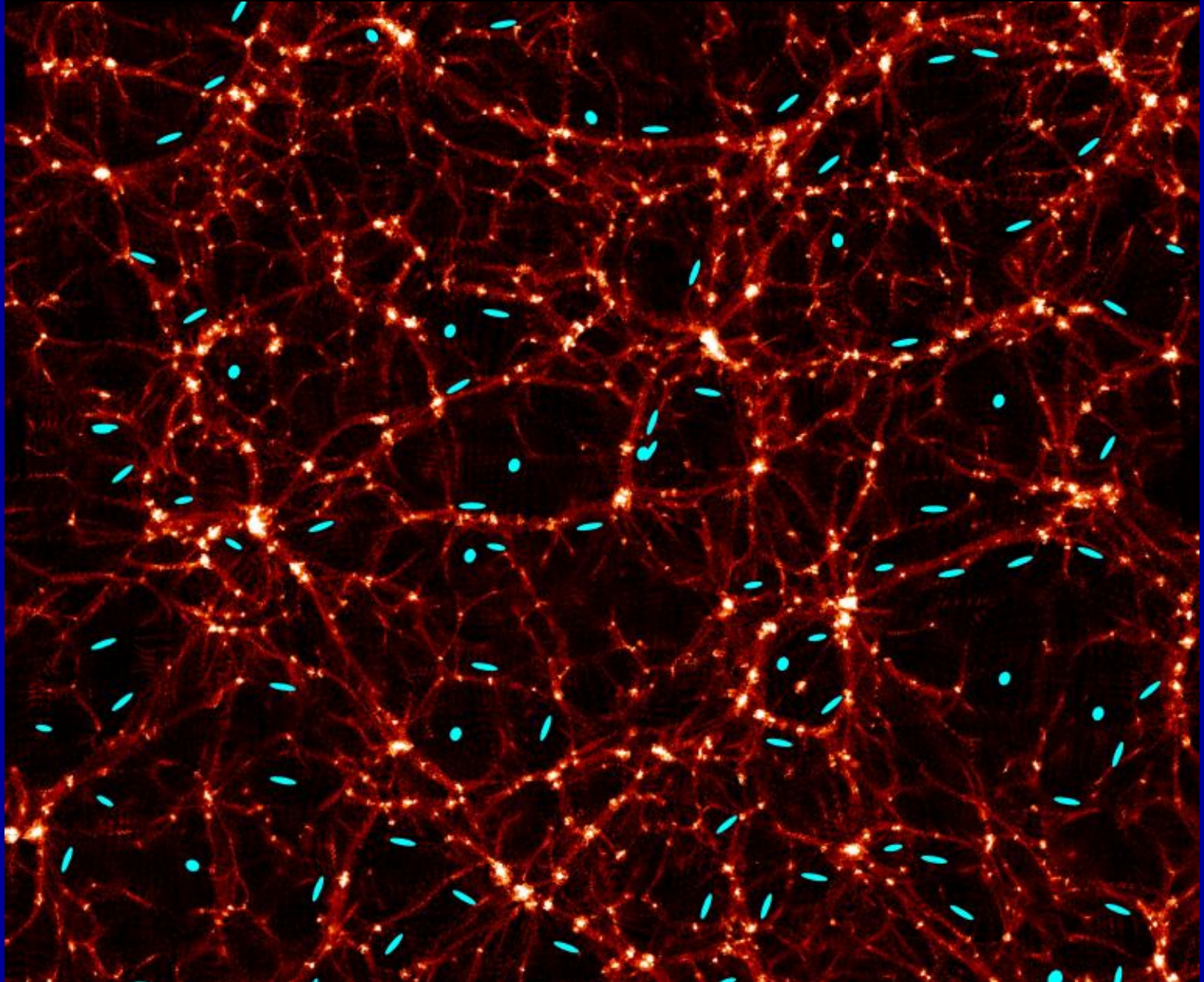
il y a aussi des centaines de millions de lentilles gravitationnelles entre ces galaxies et la Terre!!!

Leurs effets cumulés=distorsion gravitationnelle cosmologique

# Les déformations gravitationnelles cosmologiques

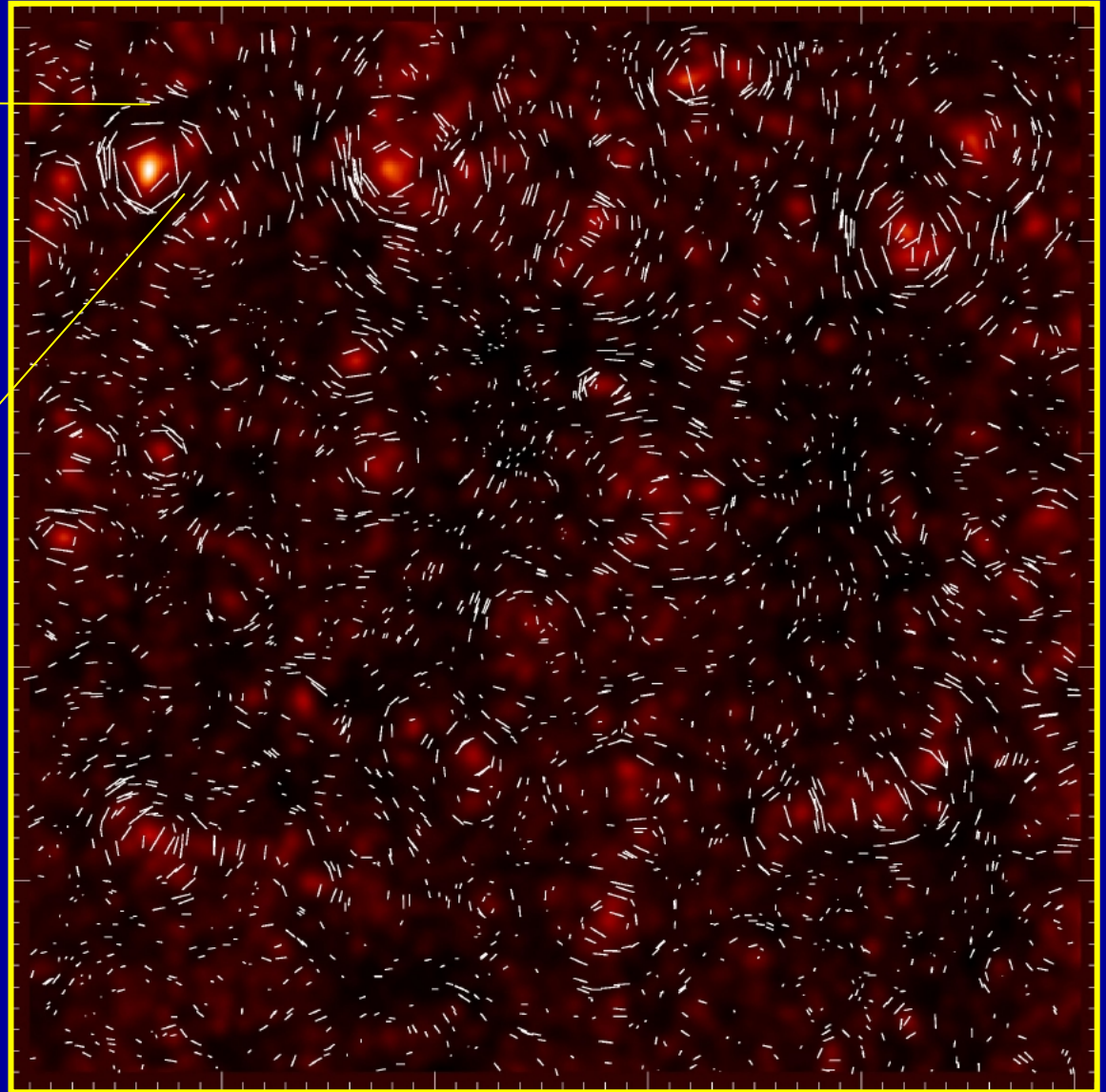
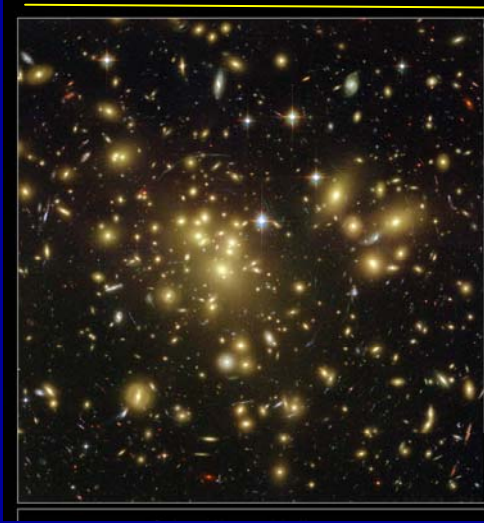


# Les déformations gravitationnelles cosmologiques





# Champ de déformation gravitationnel cosmologique projeté sur le ciel



- Mais est-il observable et mesurable?
- Si oui, comment l'exploiter pour comprendre l'Univers ?

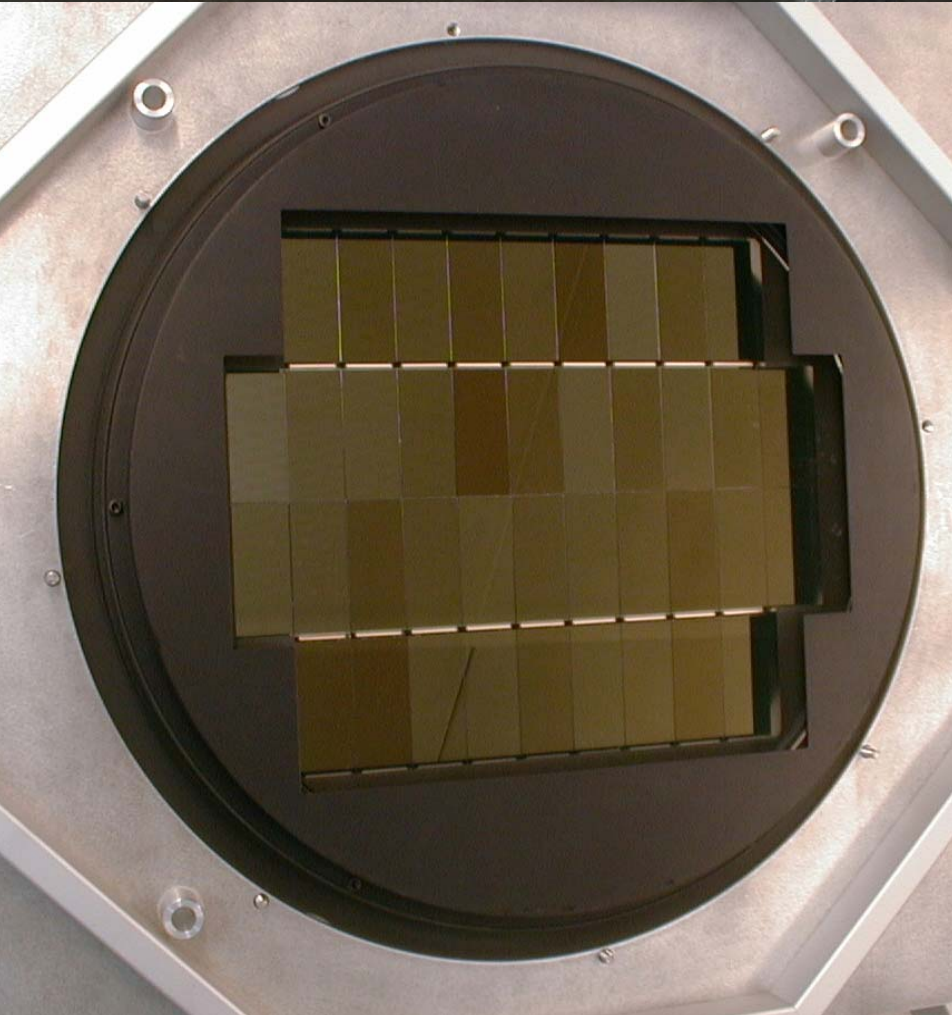
# Le Canada-France-Hawaii Legacy Survey



**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)

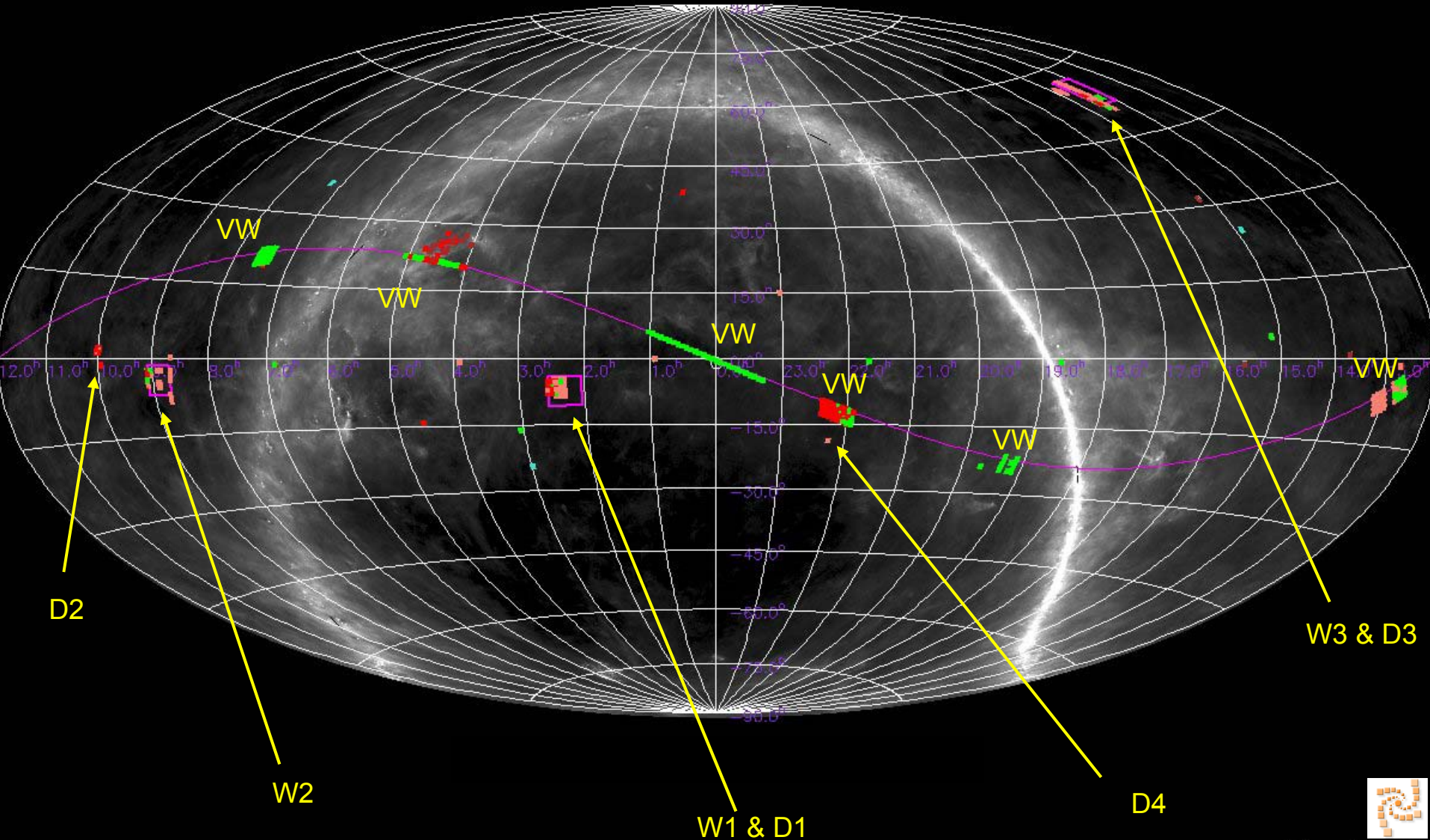
Les antennes millimétriques (bas, de gauche à droite): SMA (8 x 6m), JCMT (15m) et CSO (10 m)





# Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey: collaboration franco-canadienne

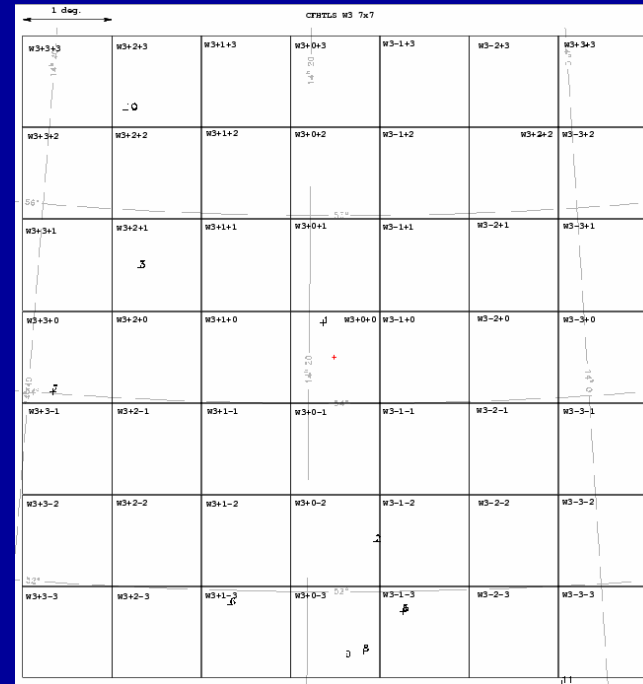
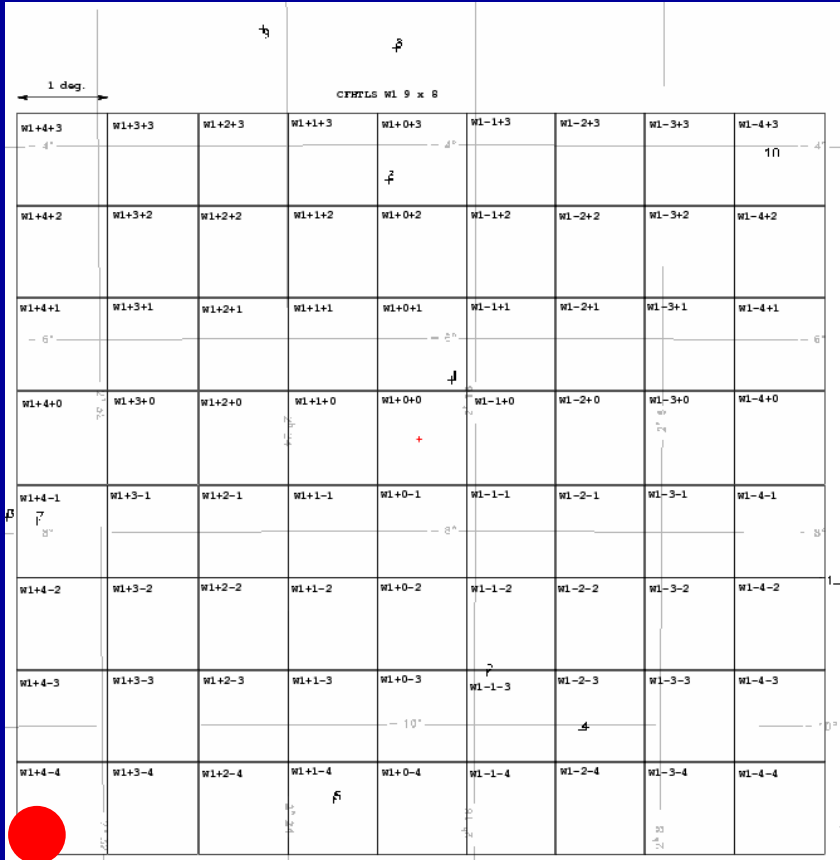
- 3 W-champs de 50 deg<sup>2</sup> (CFHTLS-Wide), 4 D-champs de 1 deg<sup>2</sup> (CFHTLS-Deep)
- 500 nuits entre Juin 2003 and Juin 2008



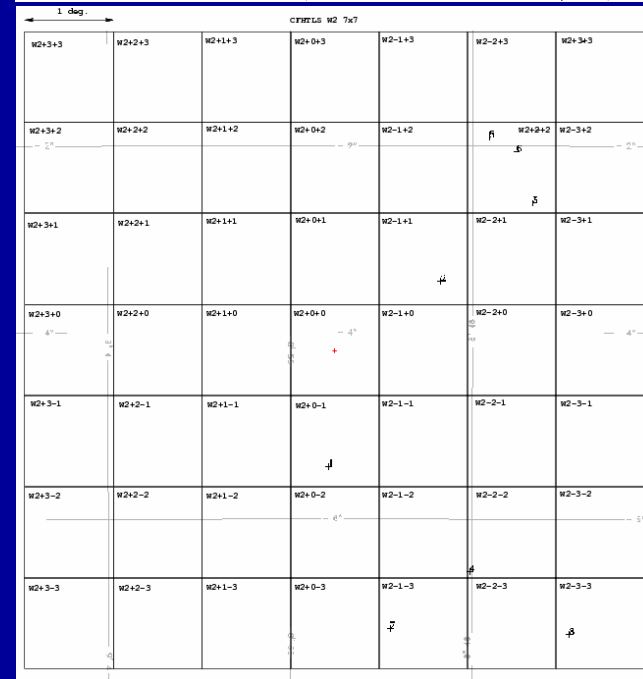
# Le CFHTLS « Wide »

$u^*$	$g$	$r$	$i$	$z$
6000s	2500s	2000s	4300s	7200s
26.40	26.60	25.90	25.50	24.80

W1: 9x8

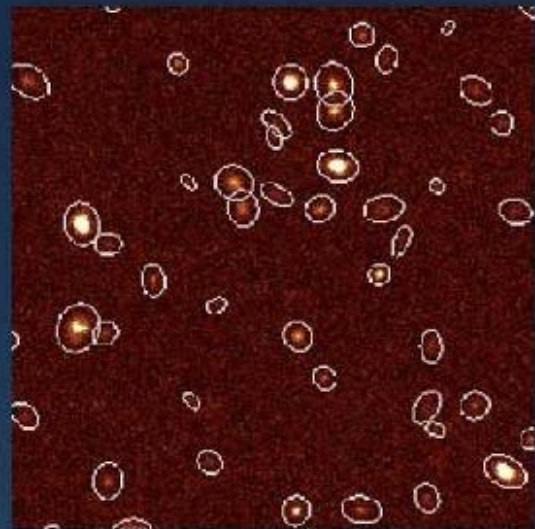


W3: 7x7



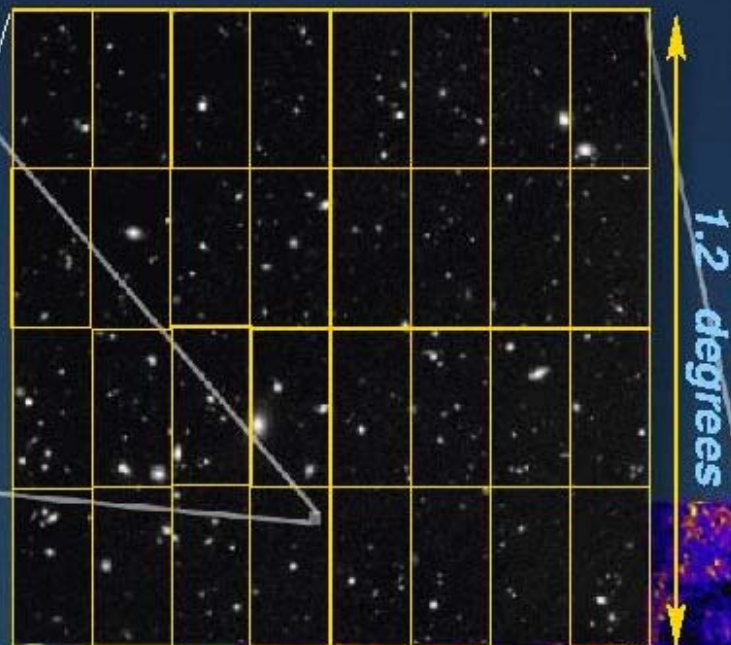
W2: 7x7

# HIGH-LEVEL PROCESSING

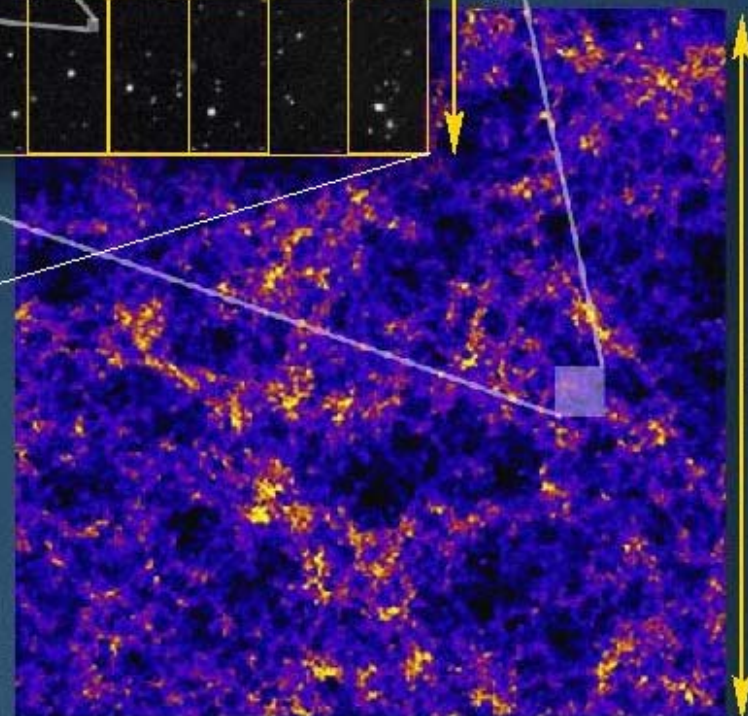


TERAPIX Data-Center

# MEGACAM FIELD



1.2 degrees



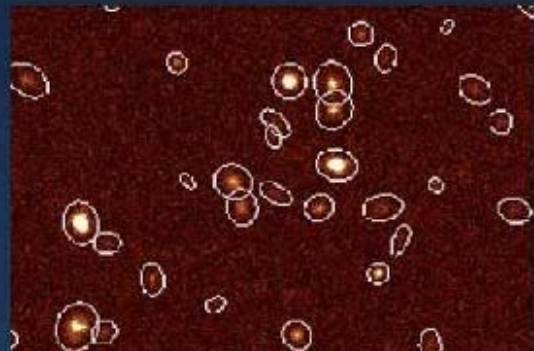
15 degrees

LARGE-SCALE STRUCTURES 100Mpc

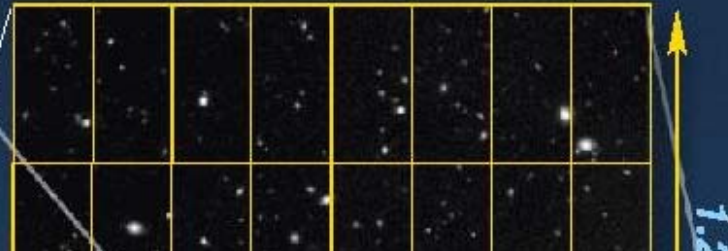


Canada-France-Hawaii-Telescope

HIGH-LEVEL PROCESSING



MEGACAM FIELD



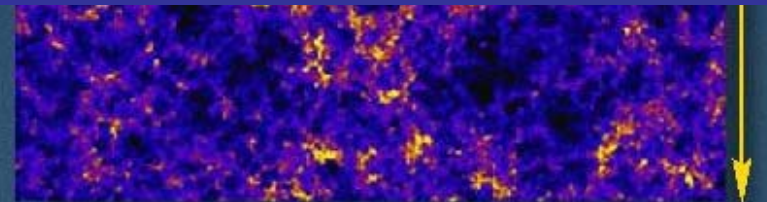
LE CFHTLS: deux gands objectifs pour sonder l'énergie noire:

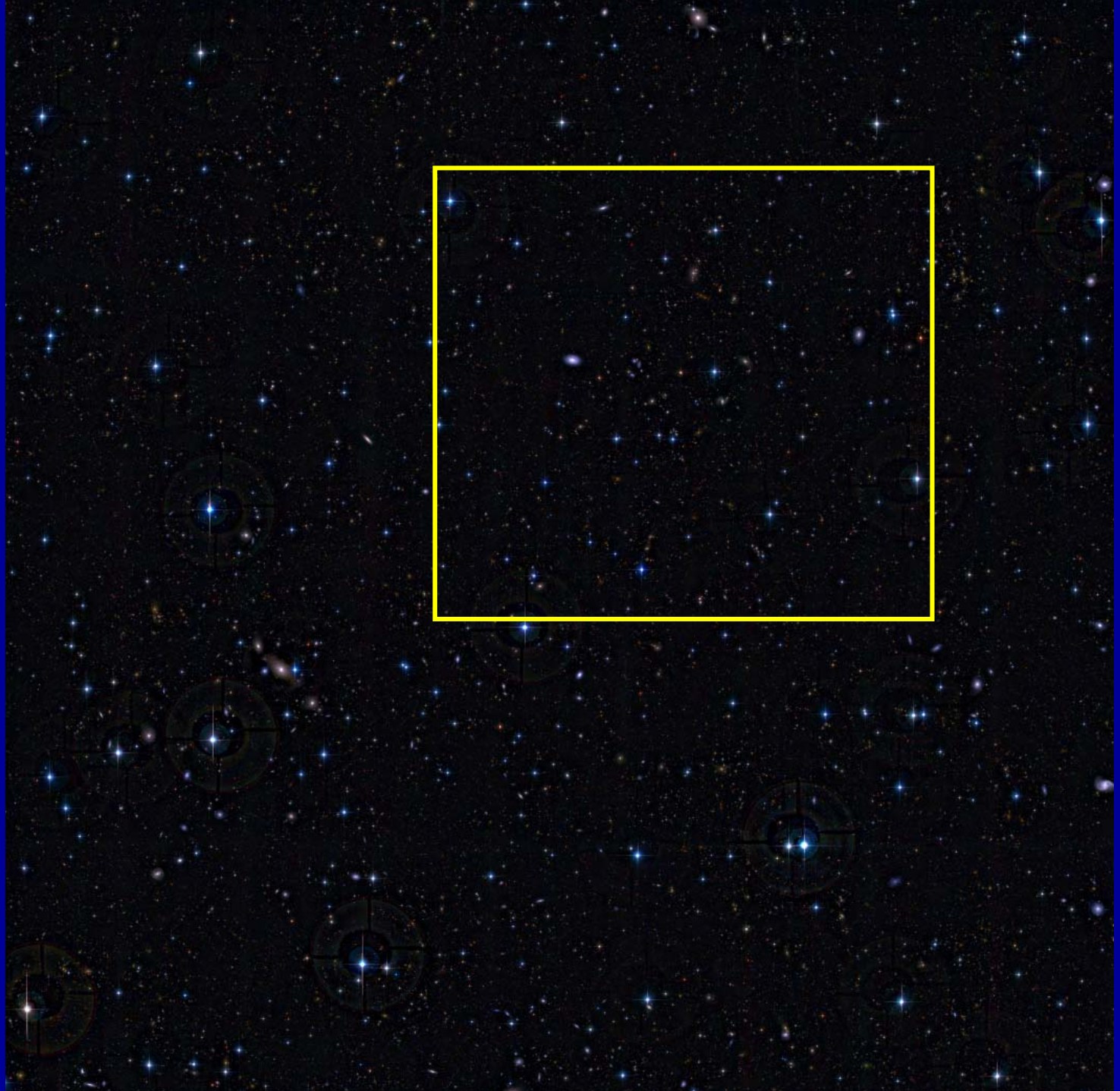
- Détecter et analyser des Supernovae: tests de l'expansion de l'Univers
- Détecter et analyser les distorsions gravitationnelles cosmologiques: tests de l'évolution de la structuration de la matière dans les grandes structures

15 darras

Canada-France-Hawaii-Telescope

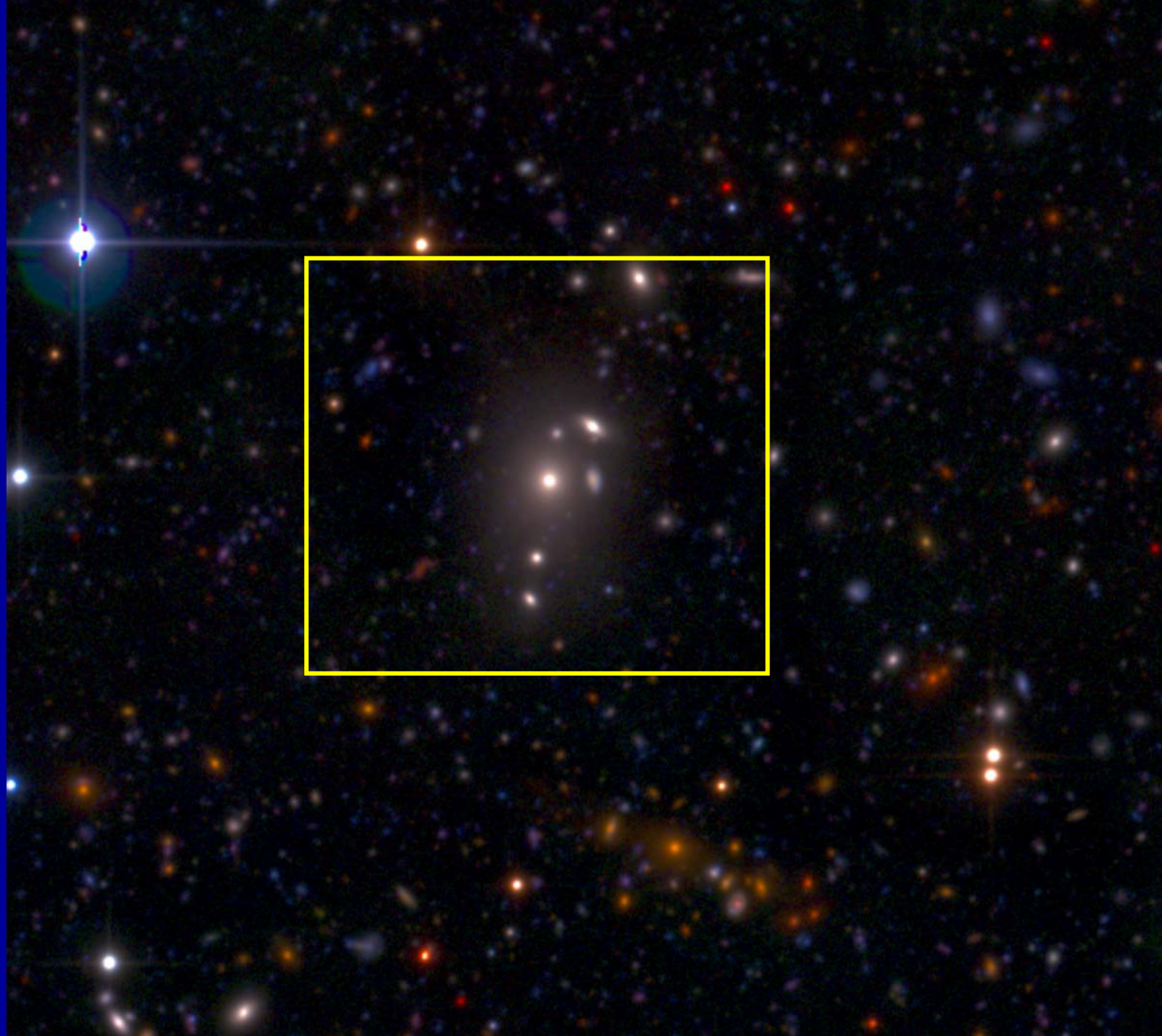
LARGE-SCALE STRUCTURES 100Mpc

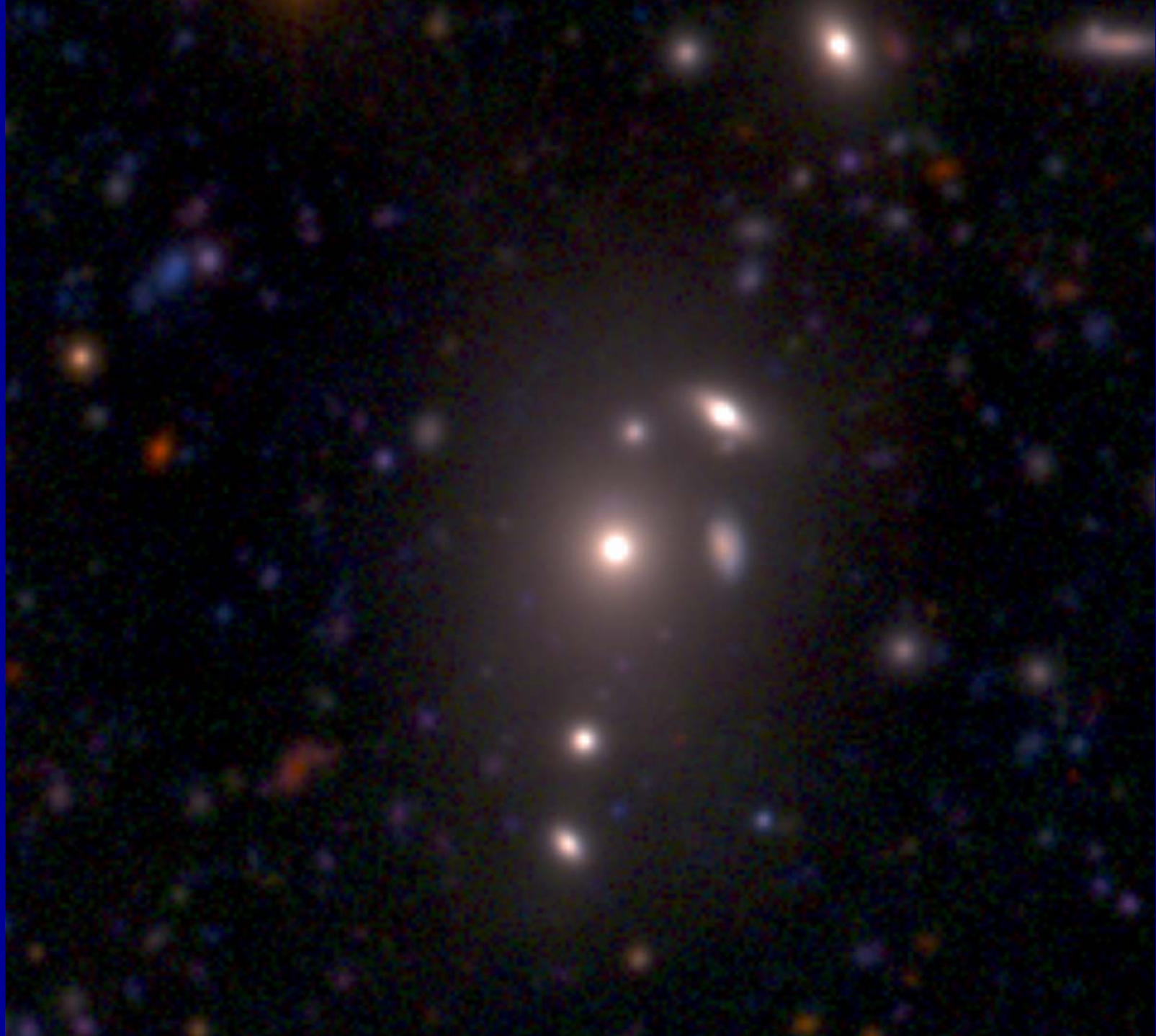




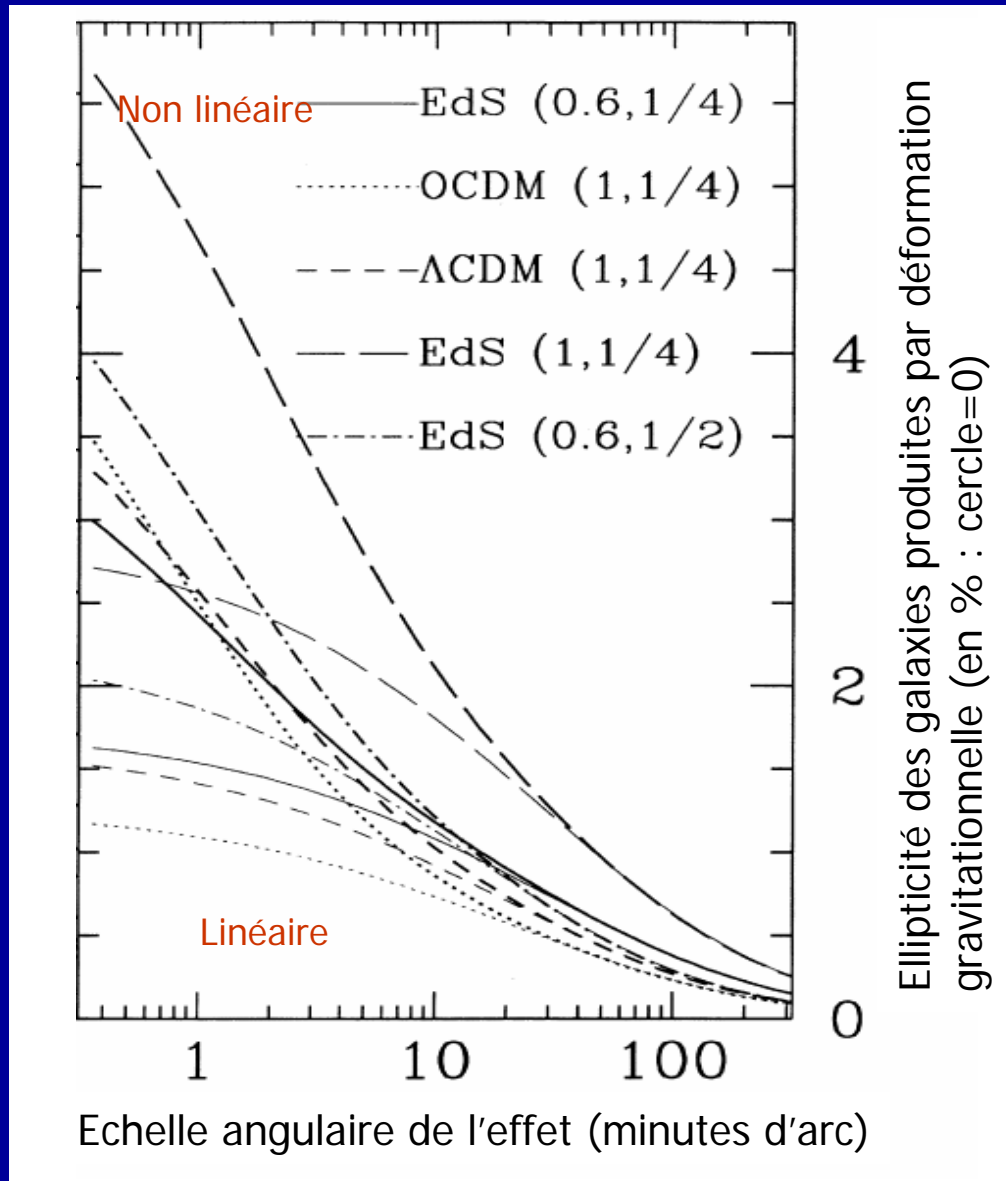






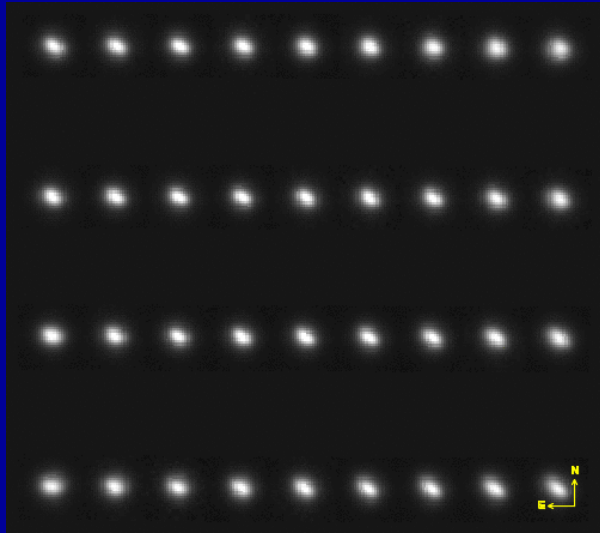


# Cisaillement gravitationnel cosmologique: les prédictions théoriques



# Enorme difficulté technique: le signal est 100 fois plus faible que les déformations produites par l'instrument et l'atmosphère

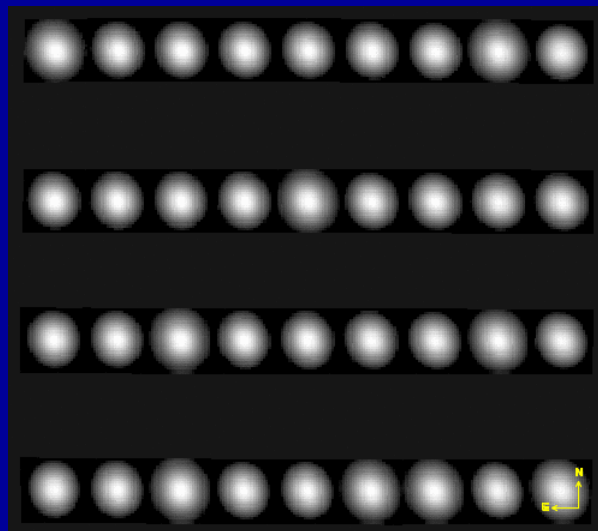
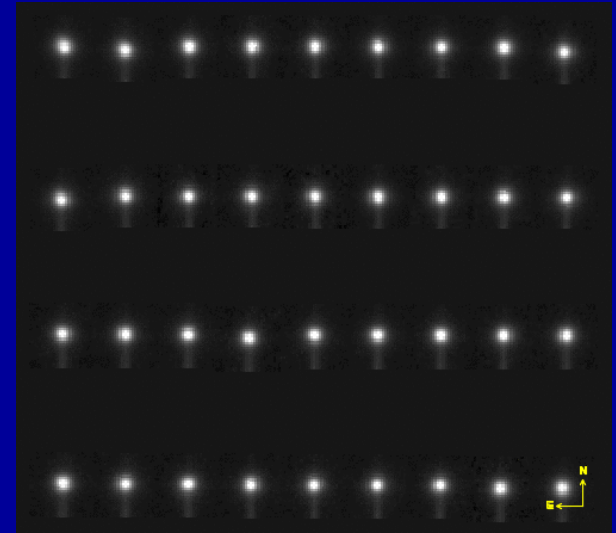
Télescope qui oscille



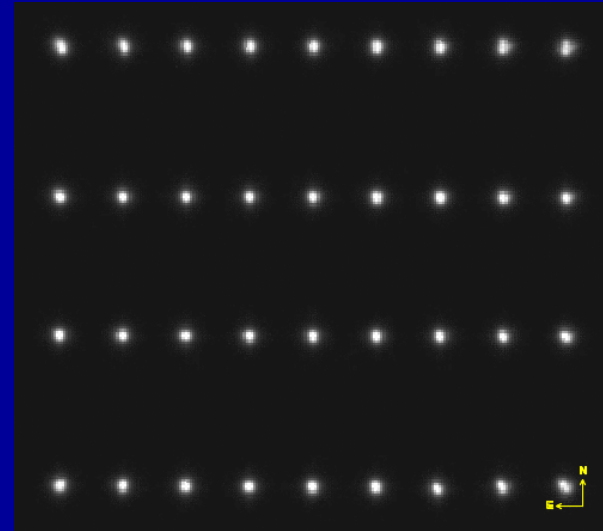
Télescope défocalisé



Télescope perdant le guidage

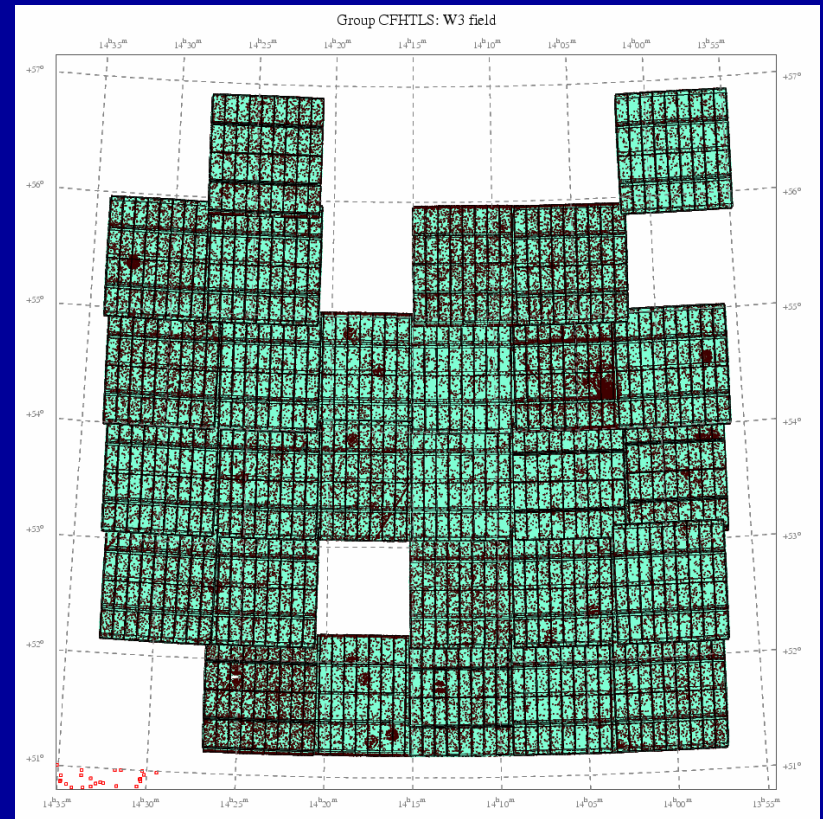
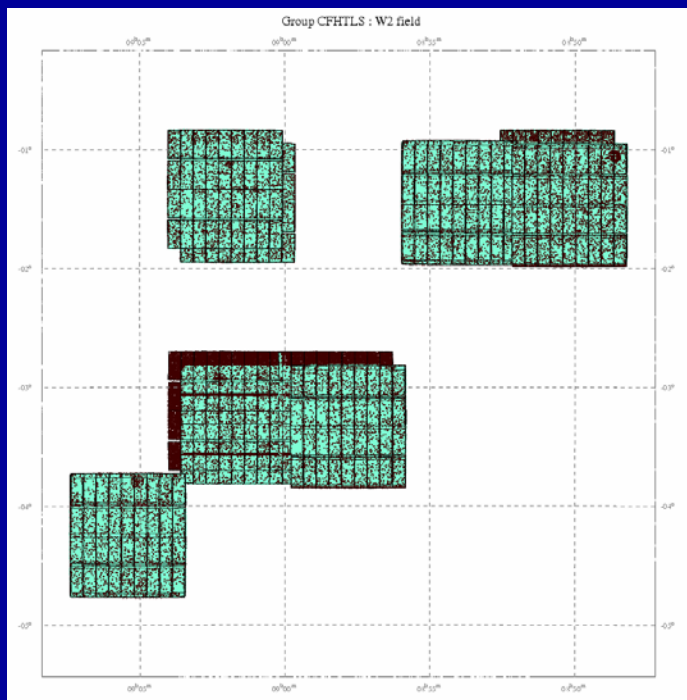
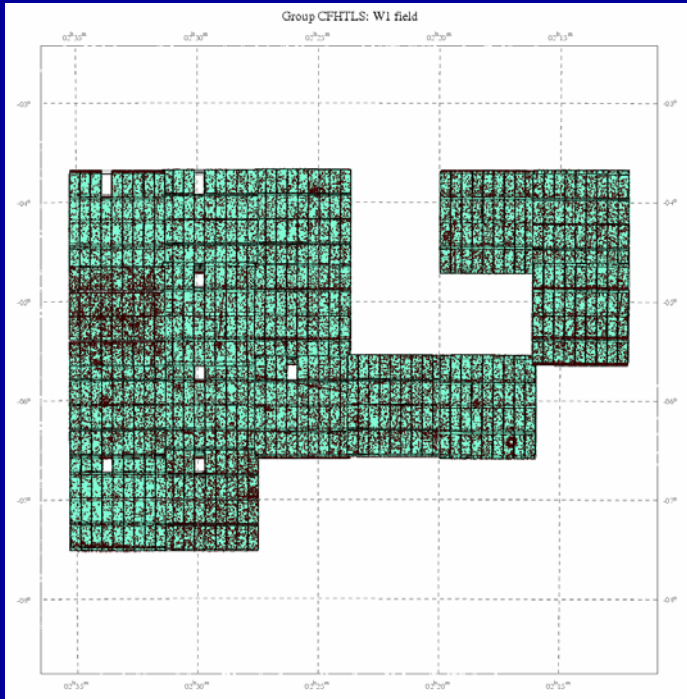


Seeing 2.5 ''

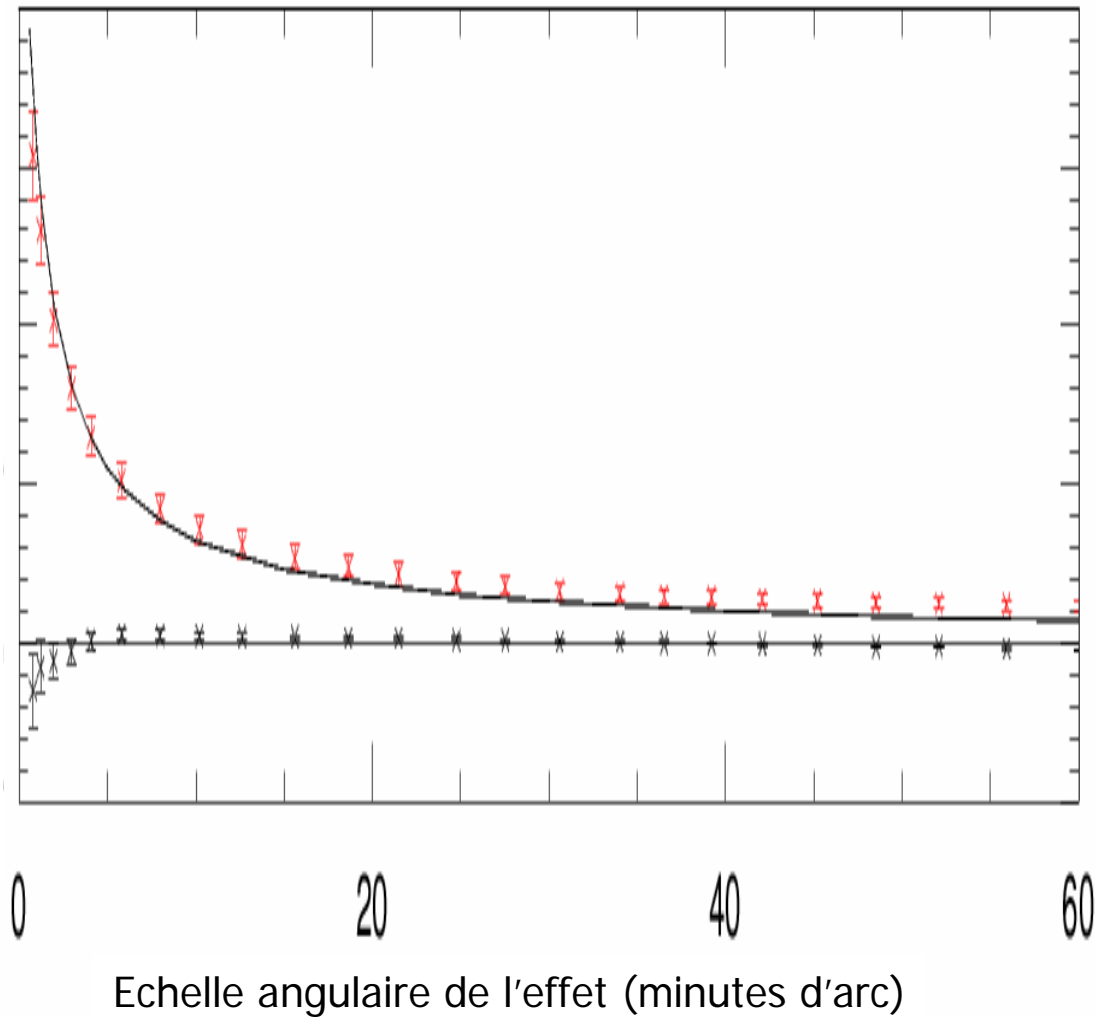


Seeing 0.55''

# Les observations actuelles: 30% des données analysées pour le cisaillement gravitationnel cosmologique



Ellipticité des galaxies produites par déformation gravitationnelle (en % : cercle=0)

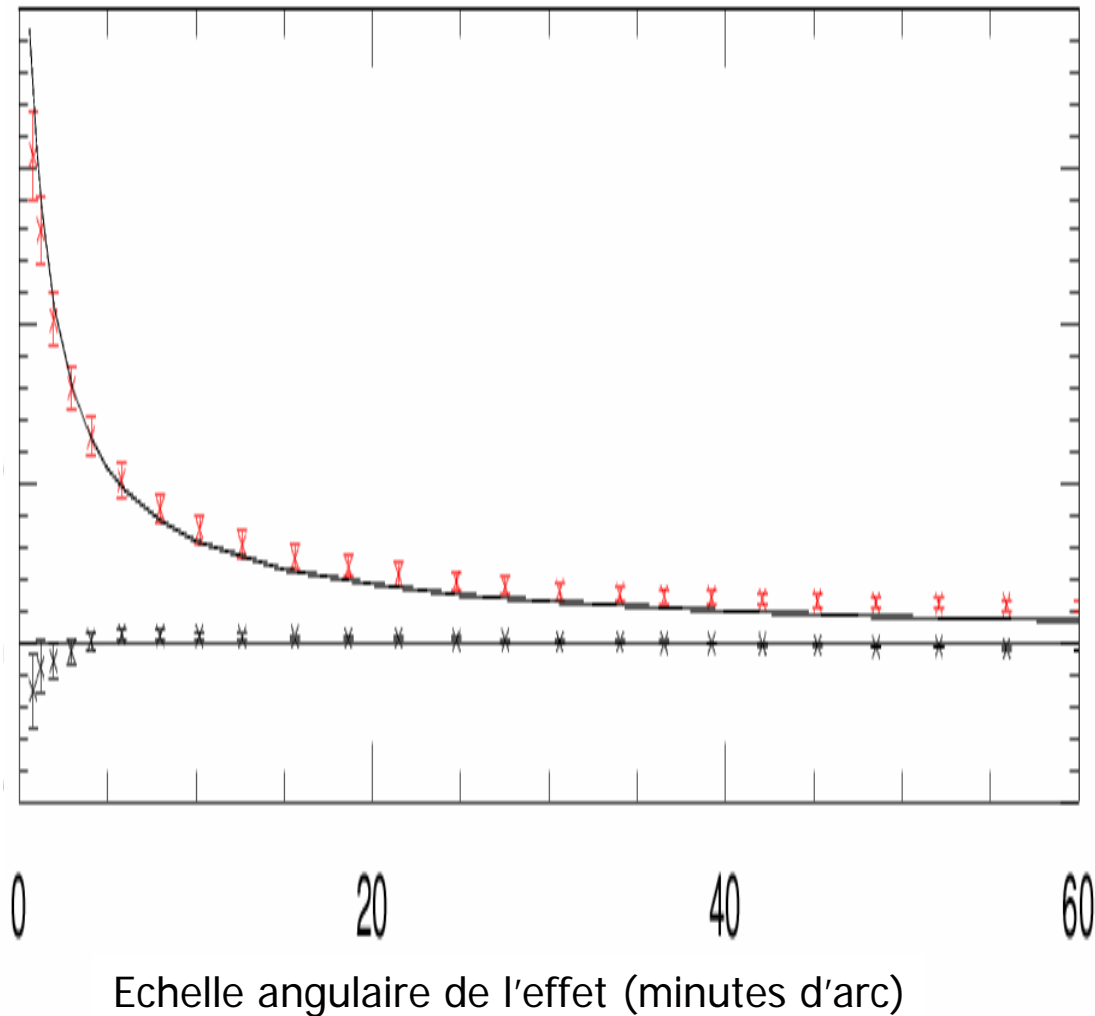


# Les résultats

50 deg<sup>2</sup>

5 millions de  
galaxies  
analysées

Ellipticité des galaxies produites par déformation gravitationnelle (en % : cercle=0)

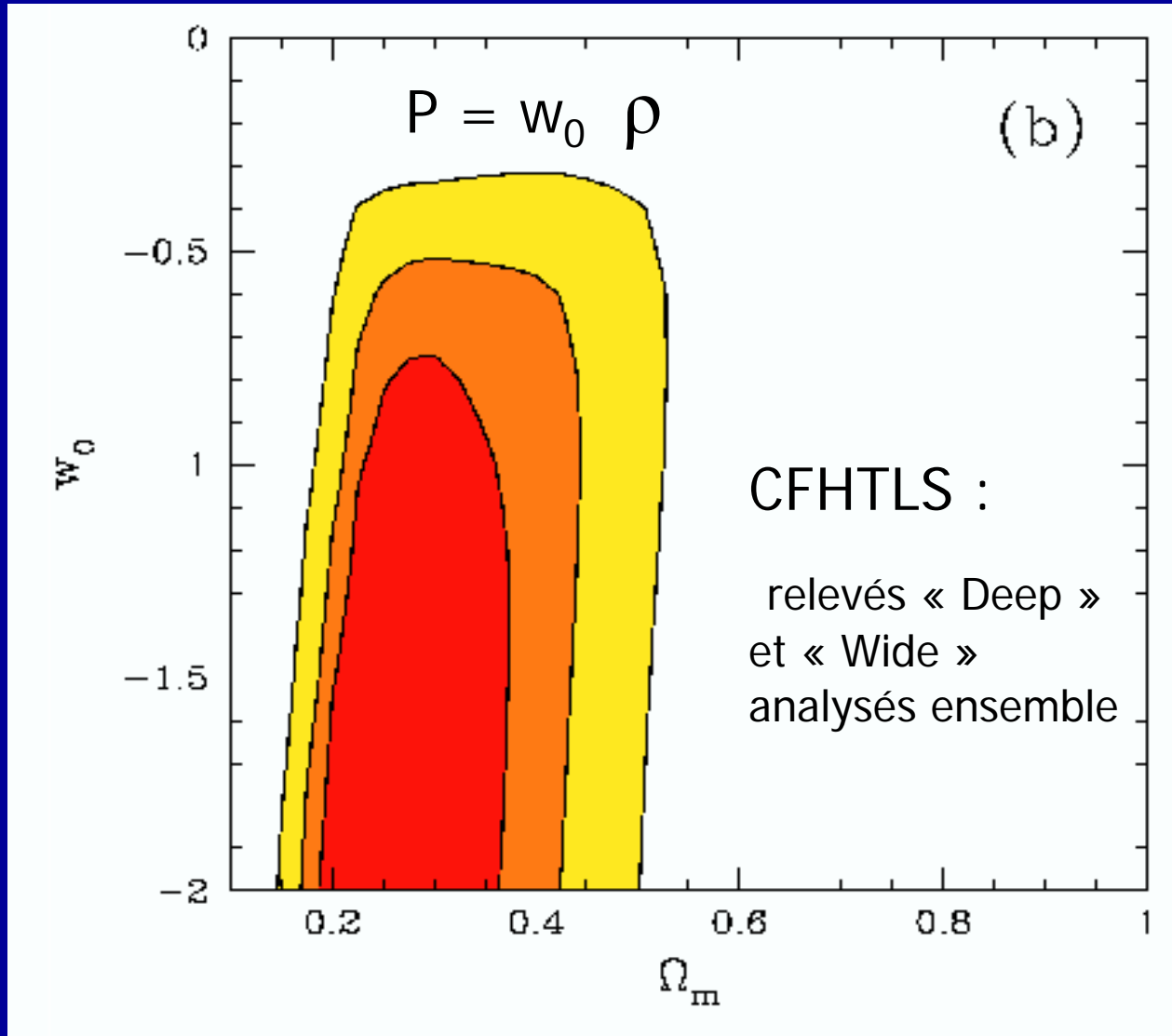


• Line:  $\sigma_8=0.85$  ;  $\Omega_m=0.27$  ;  $\Lambda=0.73$  ;  $h=0.71$  ;  $\langle z_s \rangle=0.85$  ;  $\sigma_\epsilon=0.36$  ;  
 $n_{gal}=15 \text{ gal/arcmin}^2$

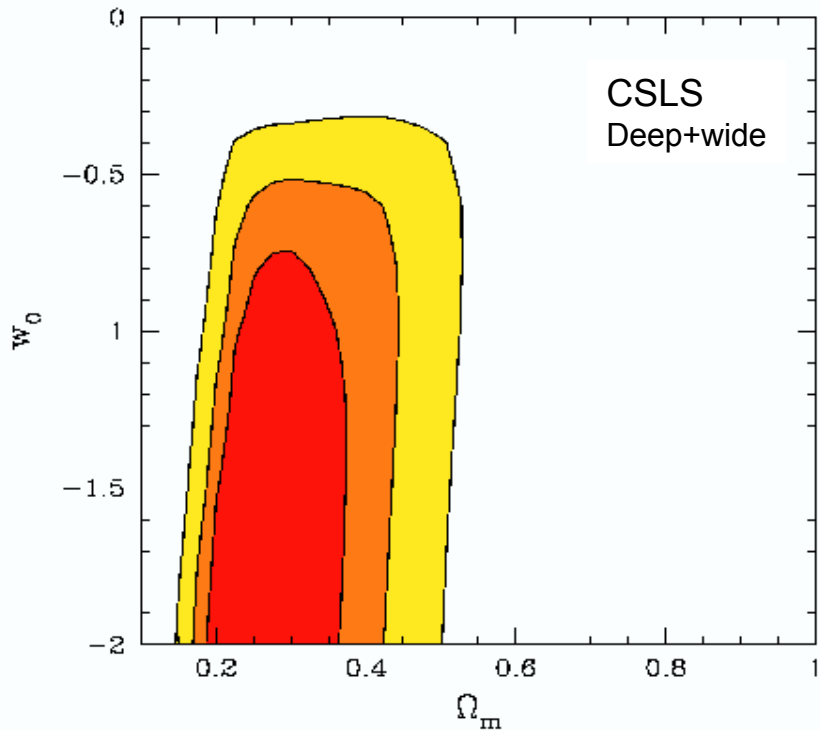
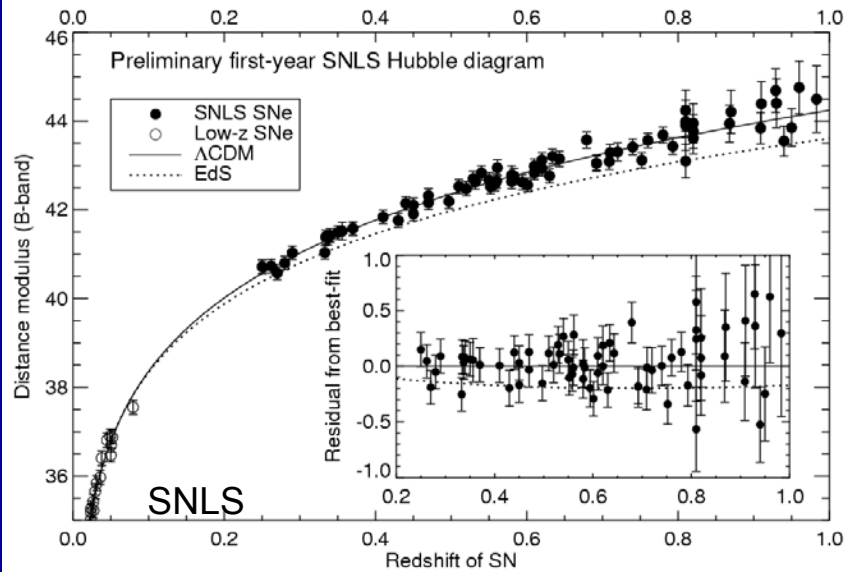
Comparaison  
aux modèles  
cosmologiques



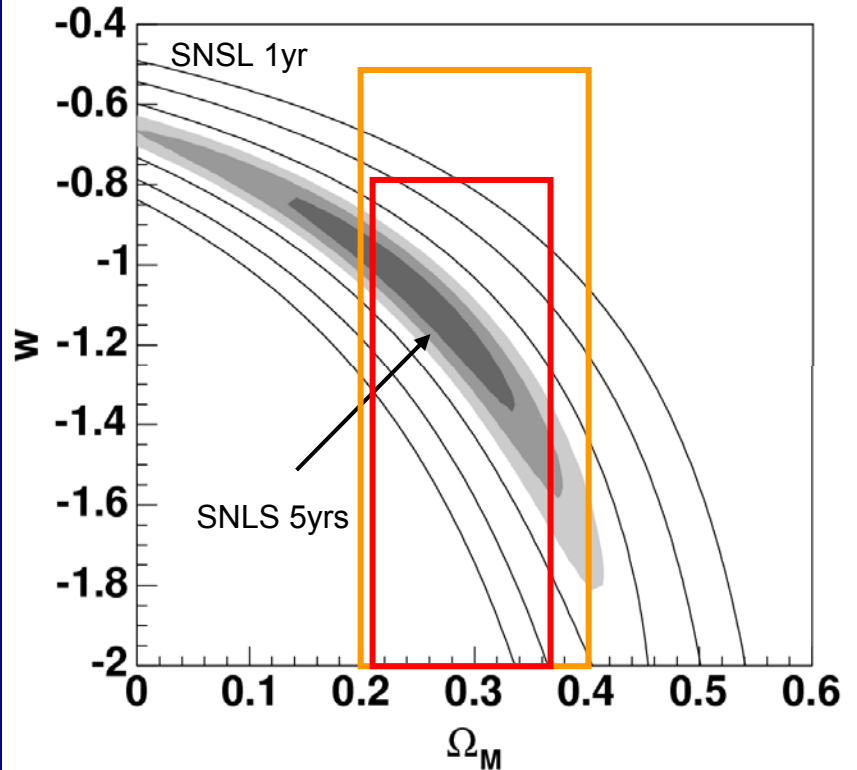
# Propriétés de l'énergie noire avec le cisaillement cosmologique



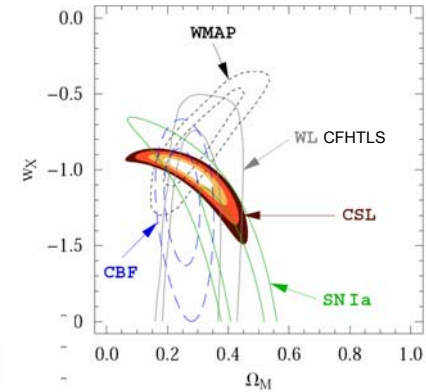
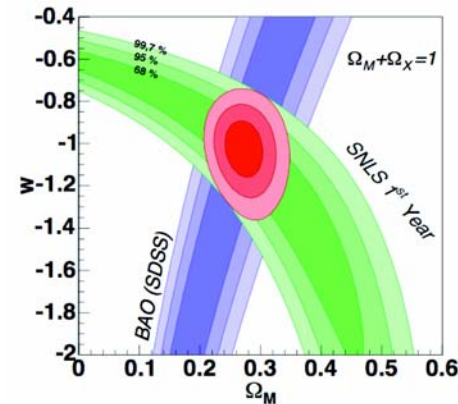
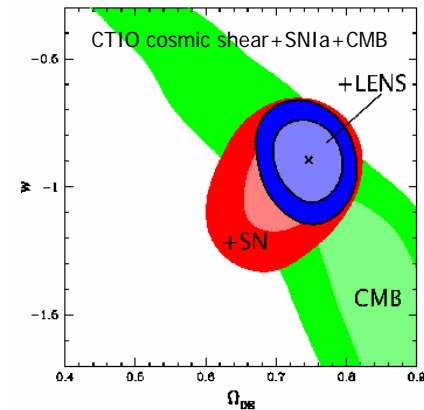
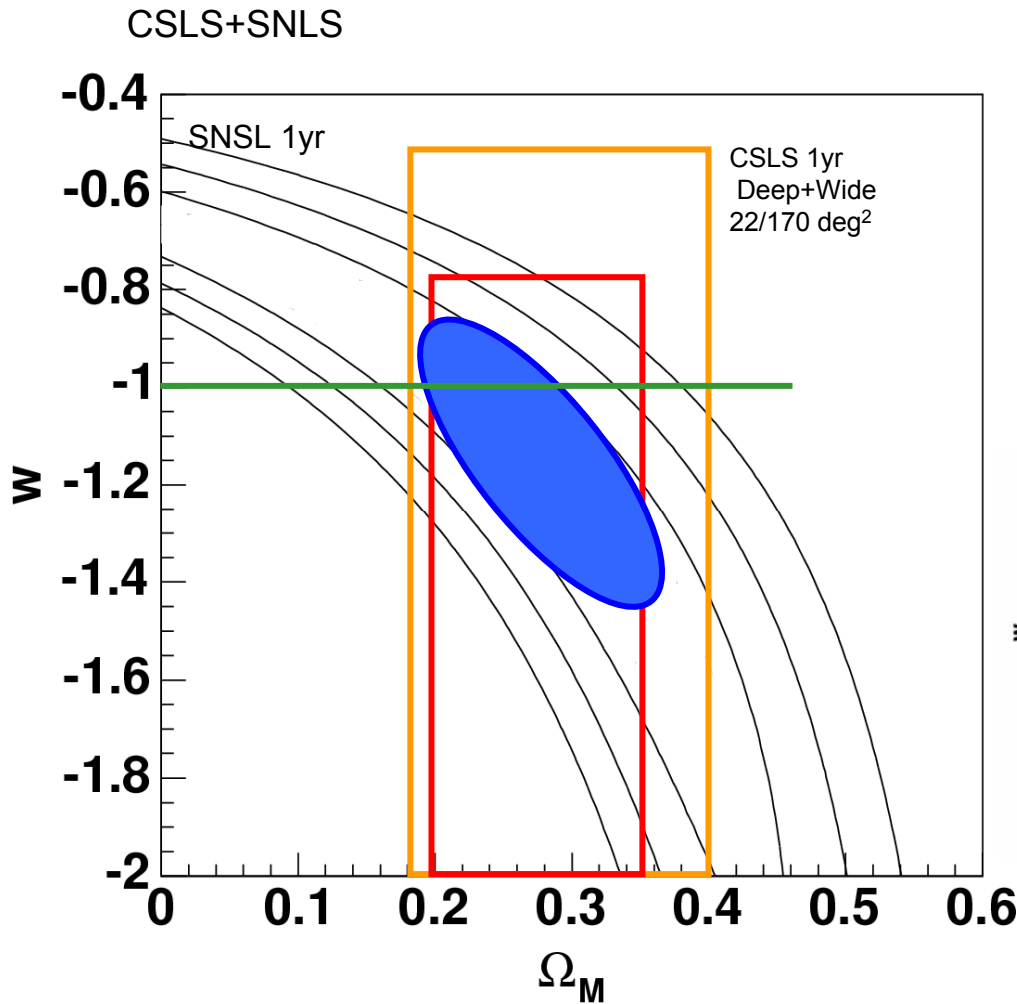
# Supernovae et cisaillement gravitationnel du CFHTLS



CSLS+SNLS



# $w = -1$ : l'énergie sombre est-elle la constante cosmologique?



... pas certain ...  
nous sommes loin de la fin de  
l'histoire

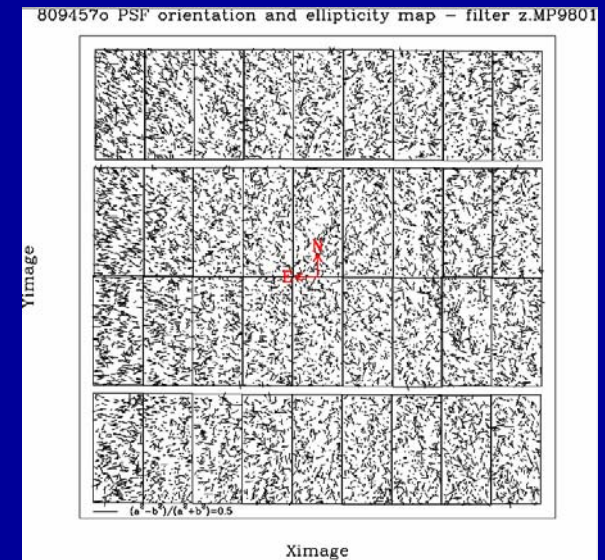
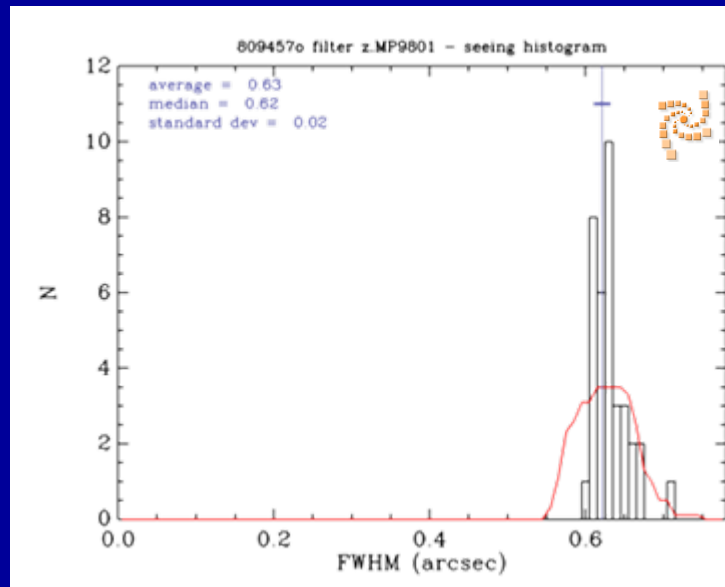
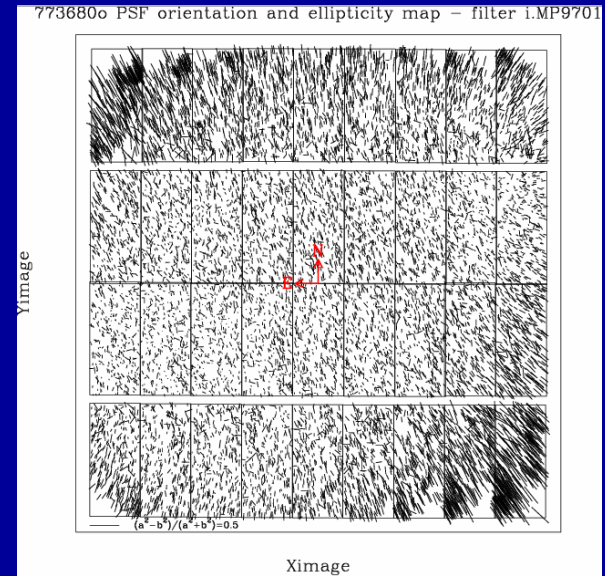
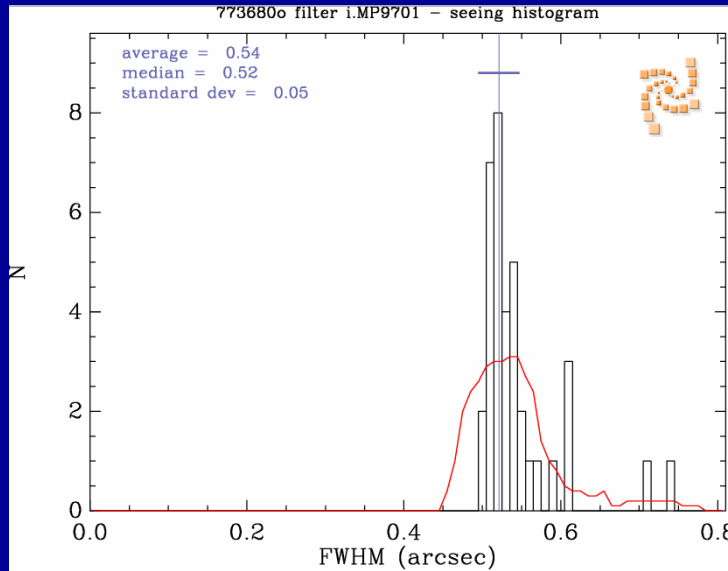
- Premières analyses: hypothèse que  $w$  est constant
- Manque de données pour avoir une précision suffisante
- Effets des défauts de correction et contaminations astrophysiques: effets systématiques

CFHTLS : comment faire  
mieux ?

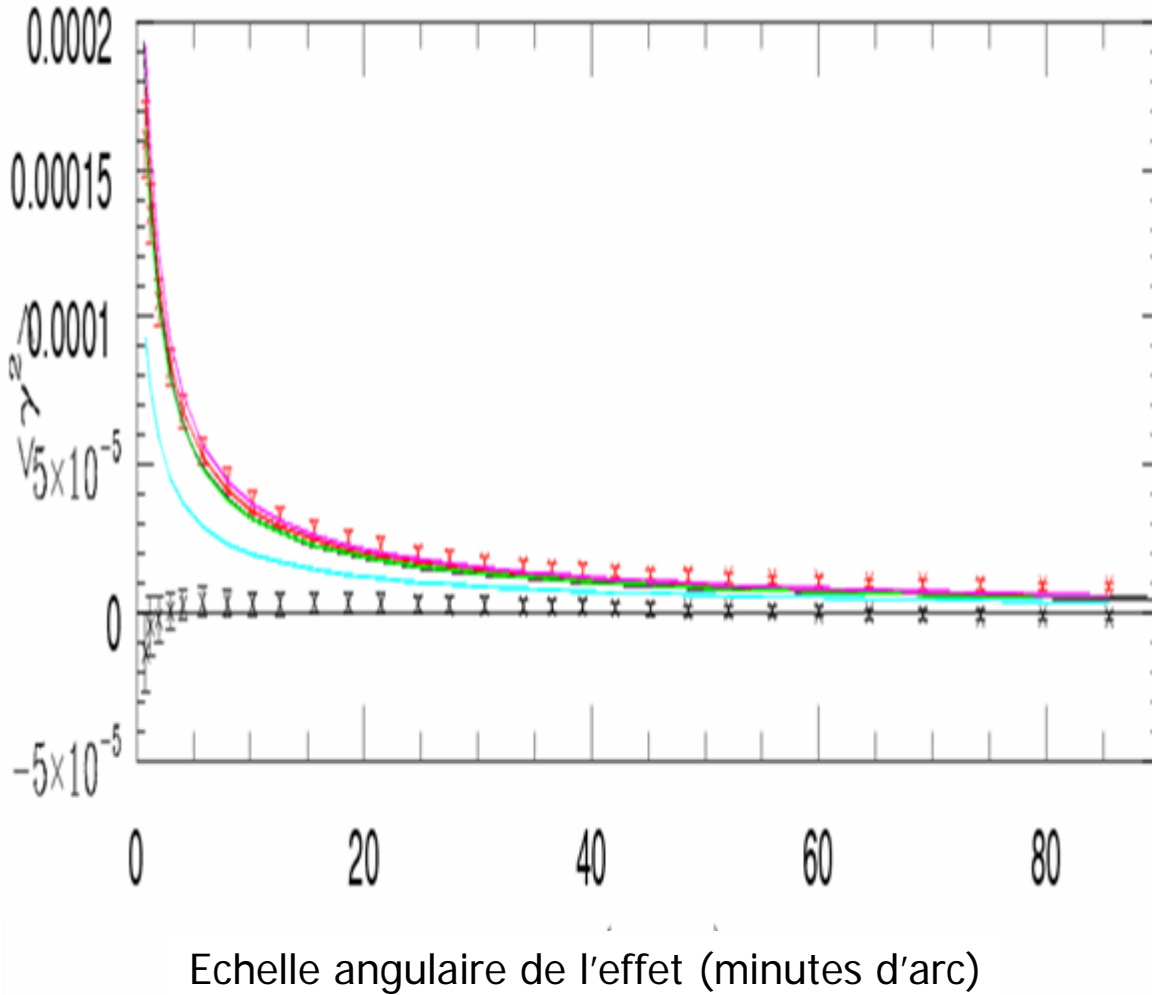
# Analyser des échelles angulaires encore plus grande:

- Meilleur pour une interprétation sans équivoque
- Mais le signal diminue progressivement lorsque les échelles augmentent
- Les images doivent être encore meilleures.  
IL faut améliorer l'instrument

# MegaPrime/Megacam: Vers des images exceptionnelles



Ellipticité des galaxies produites par déformation gravitationnelle (en % : cercle=0)

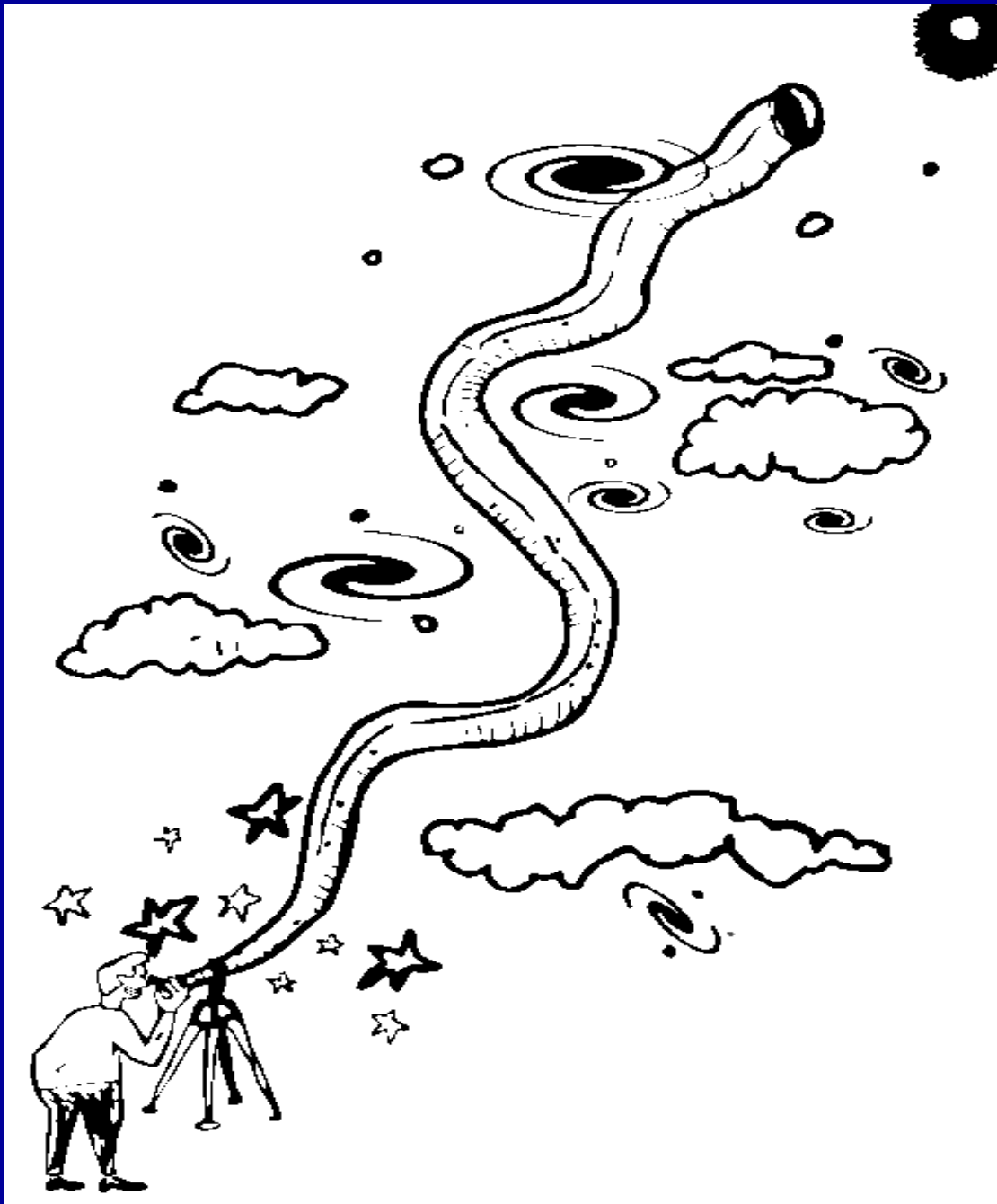


L'analyse  
des très  
grandes  
échelles



# Le futur....

Survey	Sq. Degrees	Filters	Depth	Dates	Status
CTIO	75	1	shallow		published
VIRMOS	9	1	moderate		published
COSMOS	2 (space)	1	moderate		complete
DLS (NOAO)	36	4	deep		complete
Subaru	30?	1?	deep	2005?	observing
CFH Legacy	170	5	moderate	2004-2008	observing
RCS2 (CFH)	830	3	shallow	2005-2007	approved
<b>VST/KIDS/ VIKING</b>	1700	4+5	moderate	2007-2010?	50%approved
DES (NOAO)	5000	4	moderate	2008-2012?	proposed
Pan- STARRS	~10,000?	5?	moderate	2006-2012?	~funded
LSST	15,000?	5?	deep	2010-2020?	proposed
JDEM/SNAP	1000+ (space)	9	deep	2013-2018?	proposed
<b>VST/VISTA</b>	5000?	4+5	moderate	2010-2015?	proposed
DUNE	20000? (space)	2+1?	moderate	2012-2015?	proposed



Des mirages pour  
voir le réel...  
Cela ne fait que  
commencer!