



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Lentilles Gravitationnelles



Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Les grandes lignes

Lentilles fortes et faibles: la théorie

→ **Cisaillement cosmique (WL)**

Obtention de la masse des halos

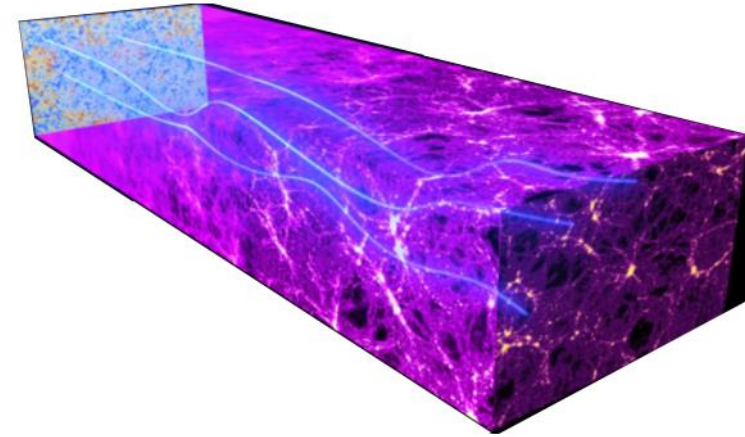
Masse des amas et biais

→ **Cisaillement du fond cosmologique**

Les diagnostics sur l'énergie noire, la gravité modifiée

→ **Les amas comme télescopes gravitationnels**

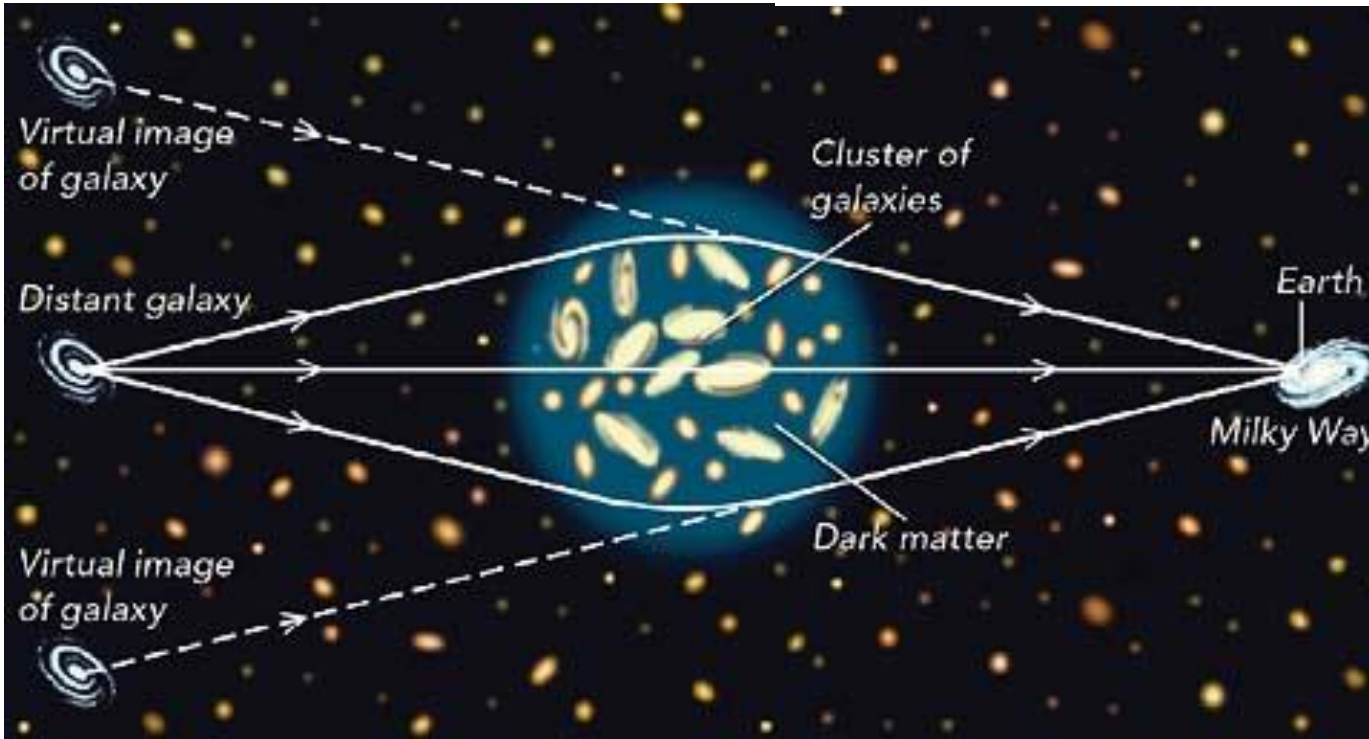
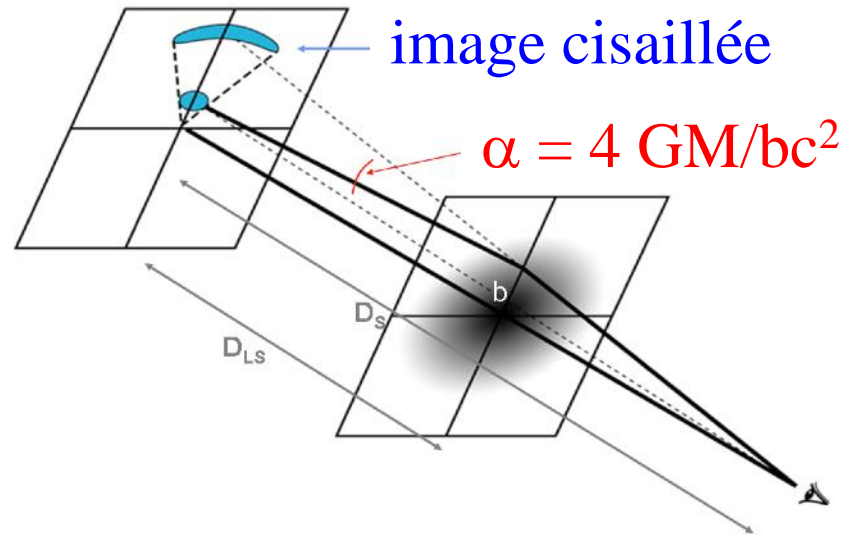
Physique des galaxies à grand redshift



Le principe

$$\hat{\alpha} = \frac{4G}{c^2} \frac{M(< \xi)}{\xi}$$

Calcul Newtonien: facteur 2



1^{ère} lentille

Quasar double

Q0957

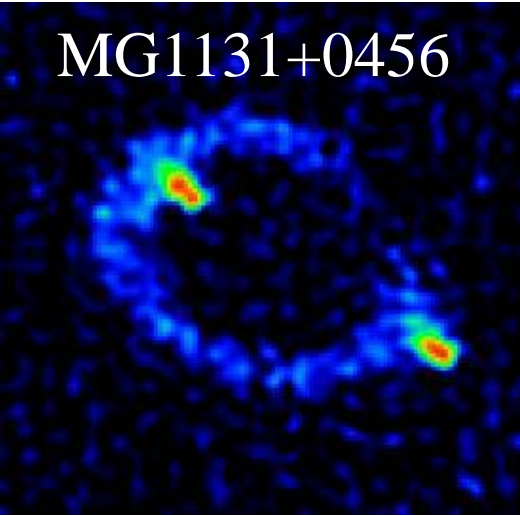
Walsh 1979

$z=1.4$

2 images à 6''

Anneaux, arcs

MG1131+0456

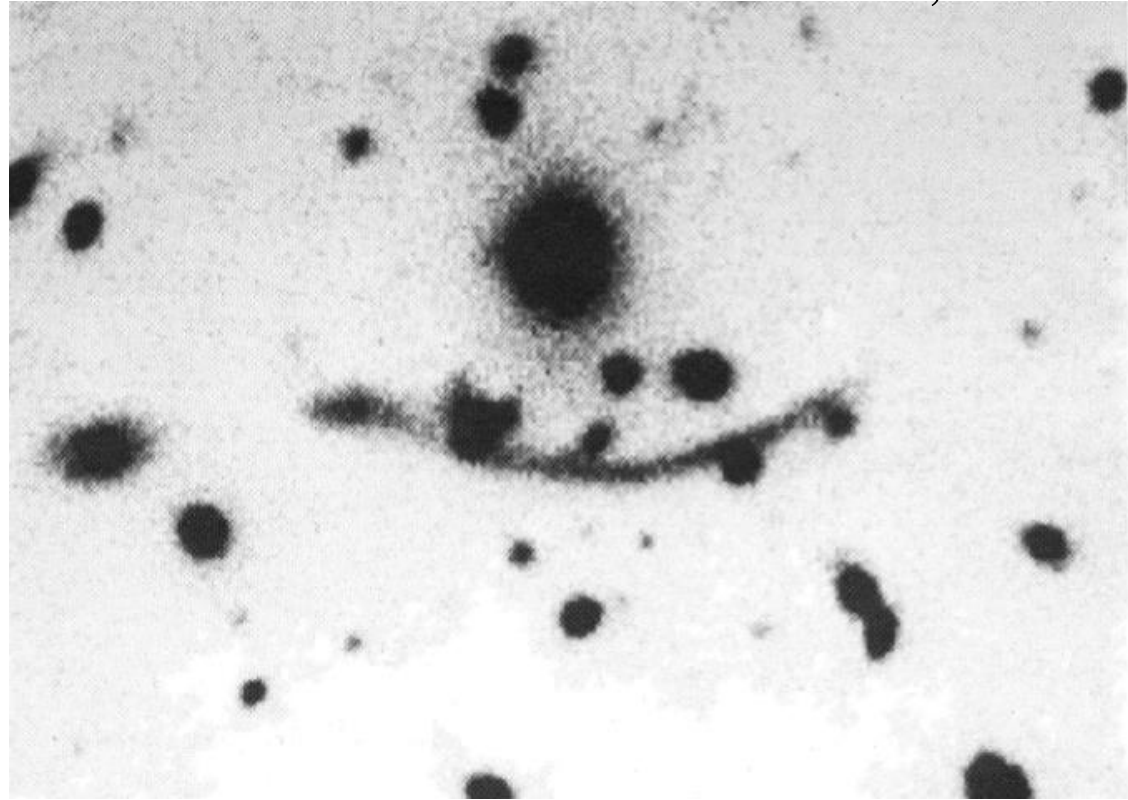


Radio, Hewitt 87

HST: Anneaux 1995-2000



Soucail et al 1987, CFHT



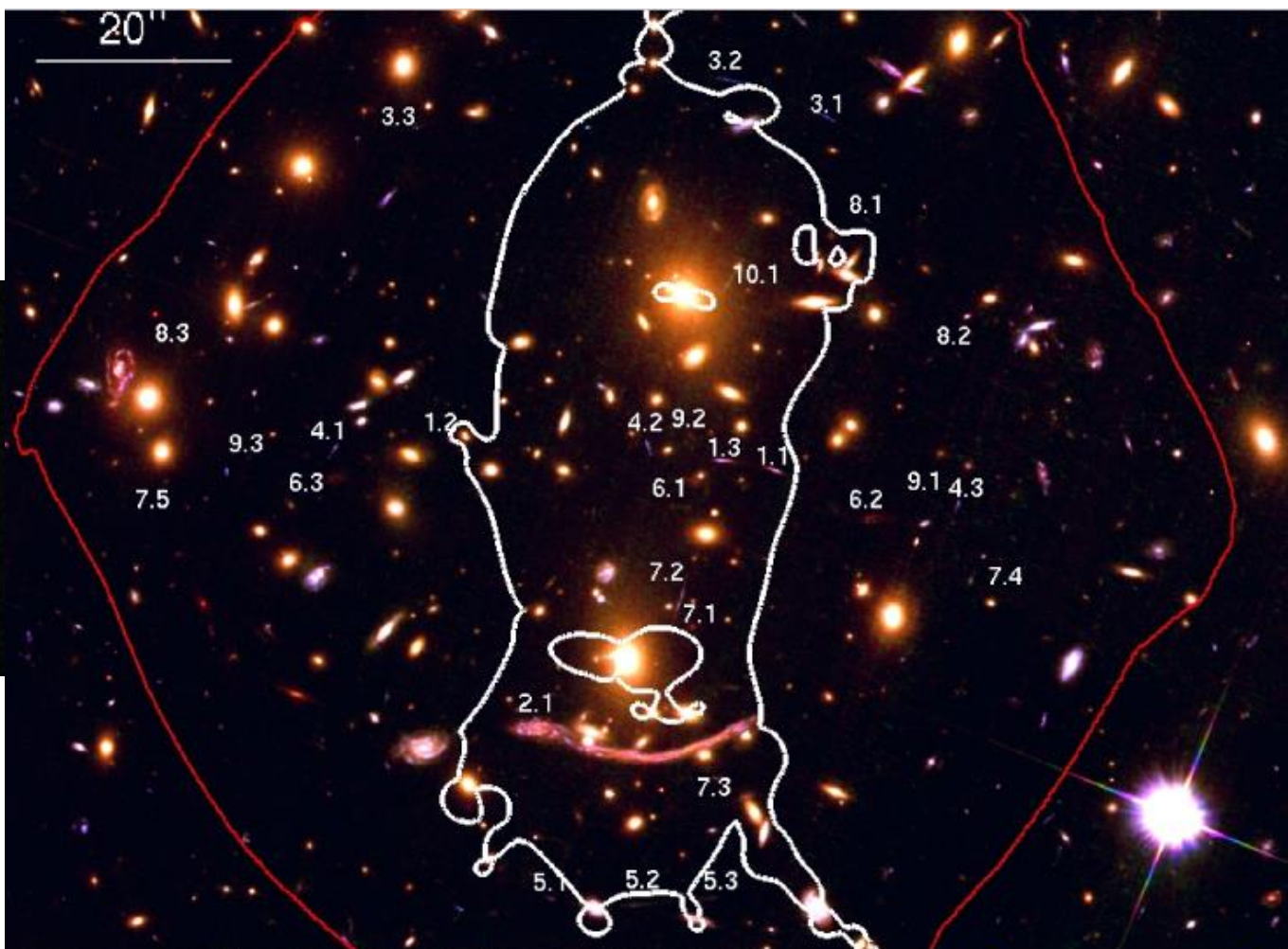
Mais que sont ces arcs bizarres dans les amas de galaxies?

Abell 370 $z=0.37$, galaxie $z=0.59$

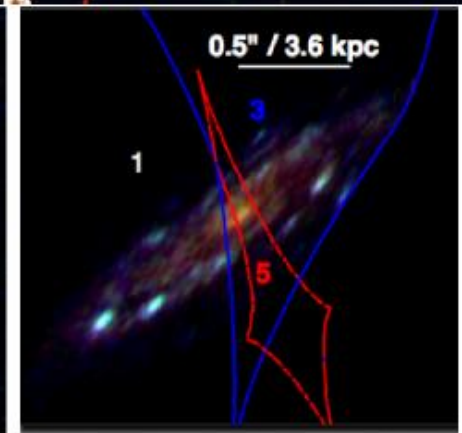
Abell 370, aujourd'hui (HST)



Images HST récentes



Beaucoup plus
d'images et
de contraintes
→ meilleur
modèle de lentille
et de masse



Richard et al 2010

Observateur

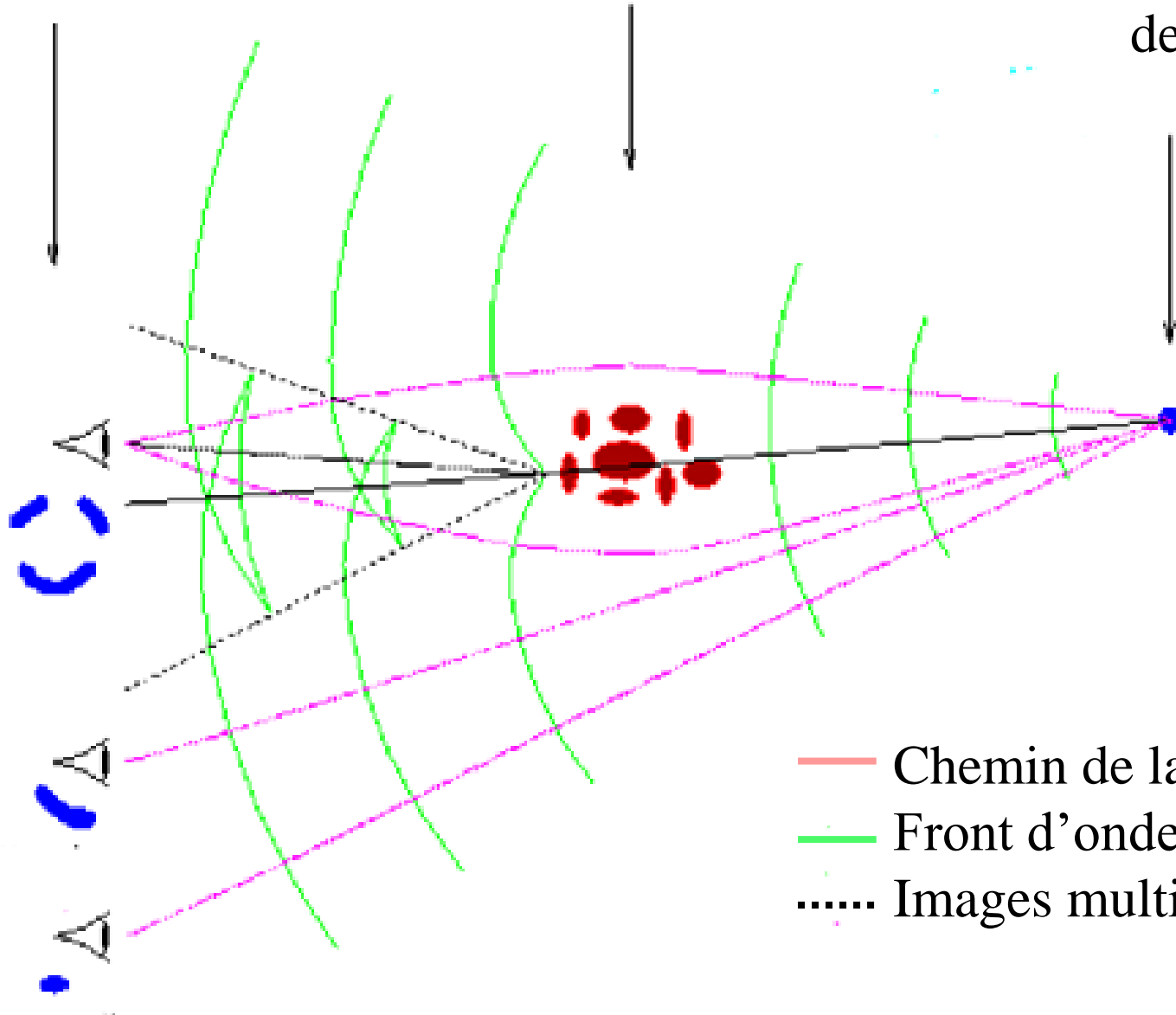
Amas de galaxies

Galaxie
de fond

Arcs
géants

Arclets

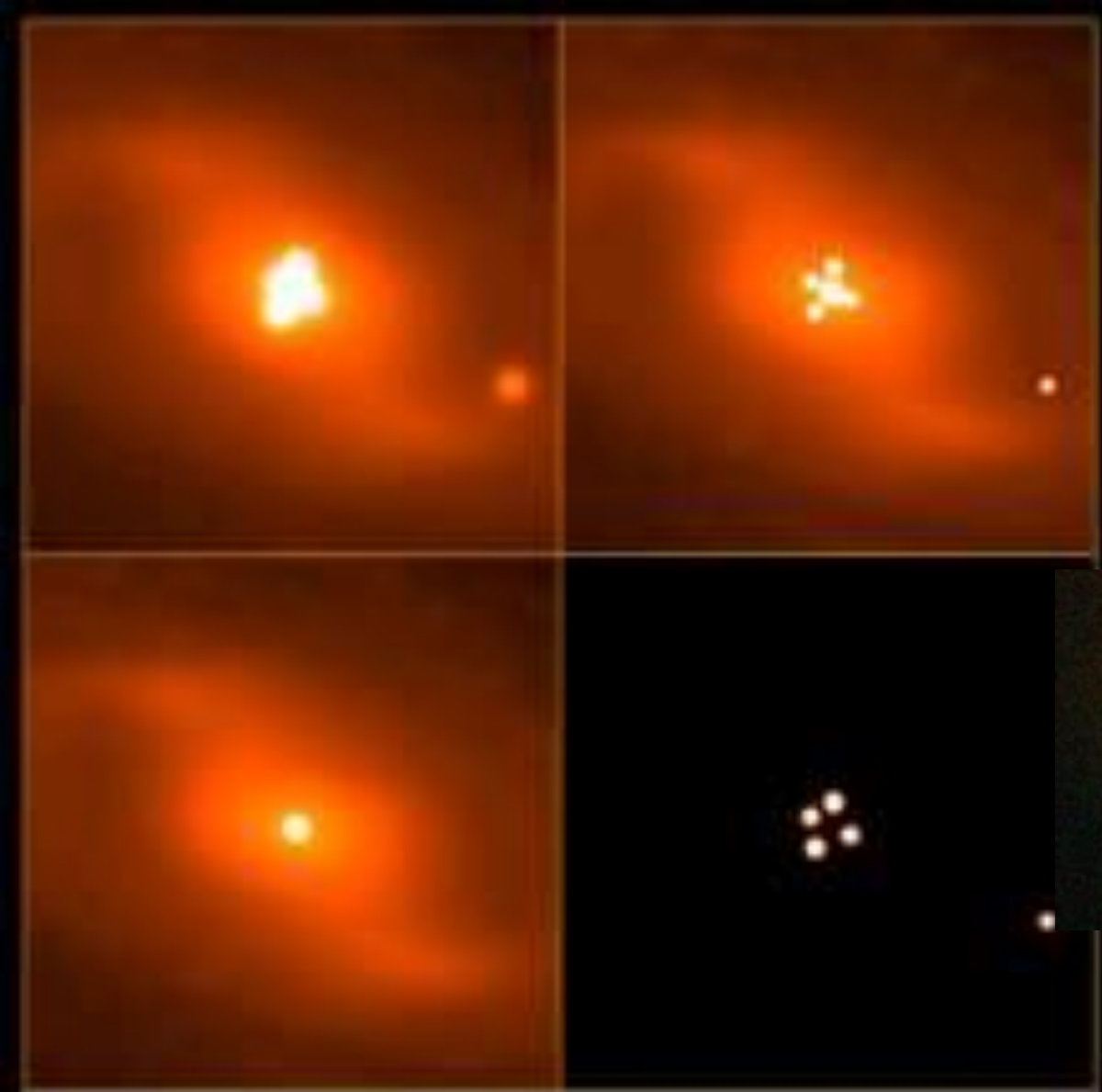
distortion



- Chemin de la lumière
- Front d'onde
- Images multiples

Lentilles fortes

La croix d'Einstein



HST (2011)

Cisaillement cosmique

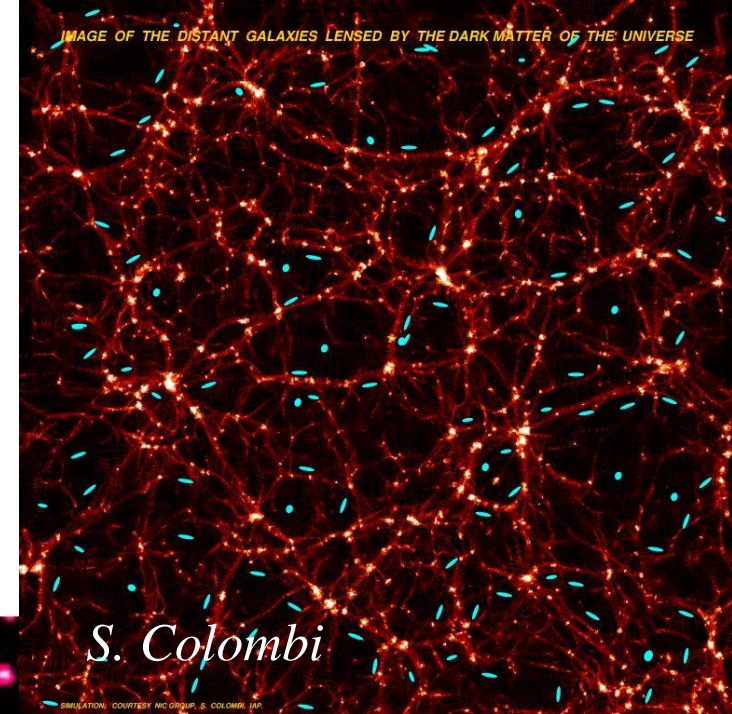
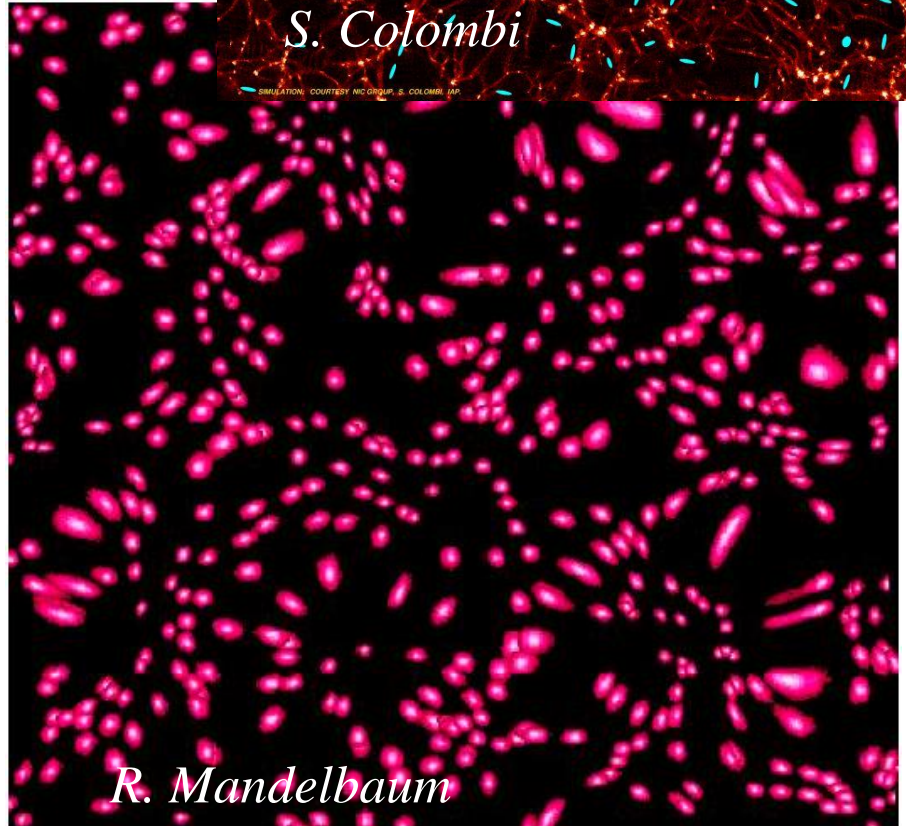
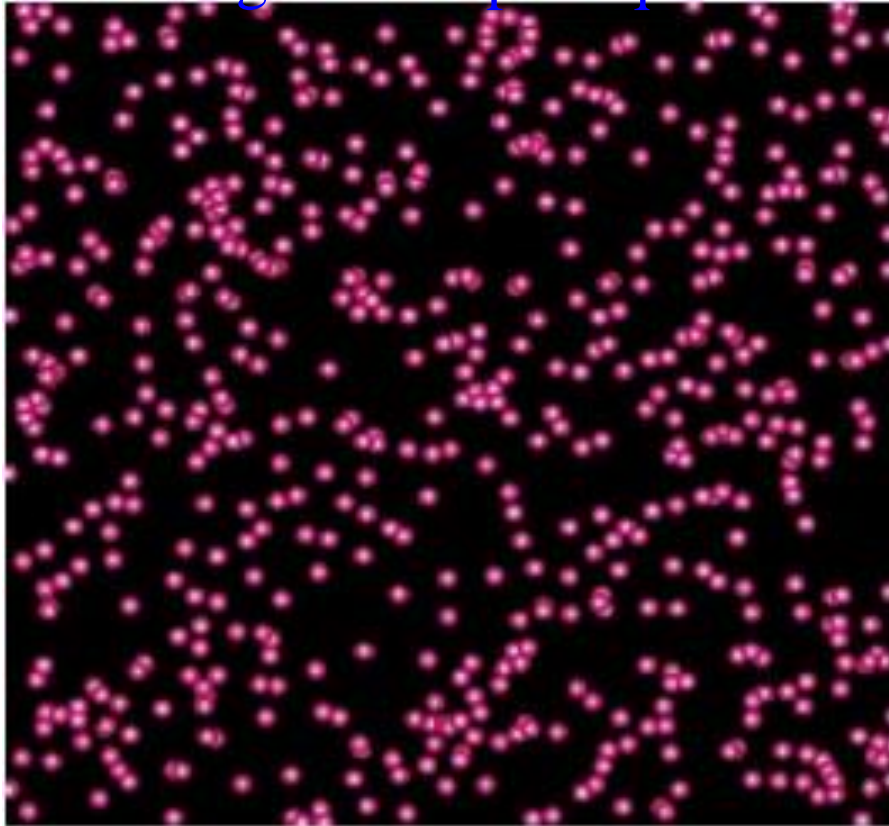
Lentilles faibles détectées depuis ~2000

(*Bacon et al 2000, van Waerbeke 2000*)

La précision au début 5-10%

Aujourd'hui 2%, 2020 < 1%?

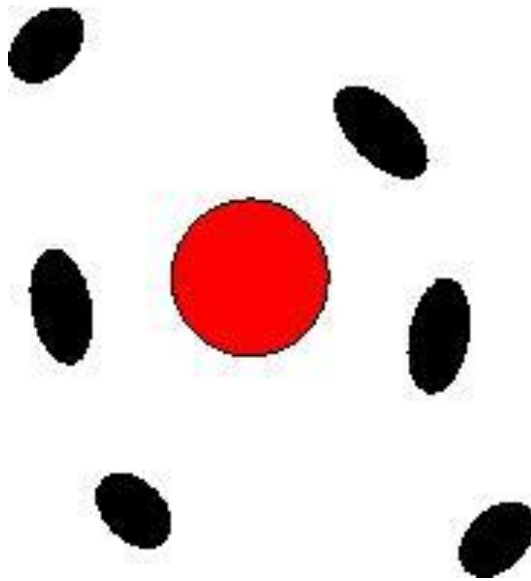
Pour des galaxies sphériques..



R. Mandelbaum

Lentille faible: galaxie-galaxie

- **Empiler plusieurs galaxies de même taille et masse** – pour avoir une statistique significative sur la forme des galaxies autour



Problème des satellites?
Empiler selon l'âge?
Selon la couleur?

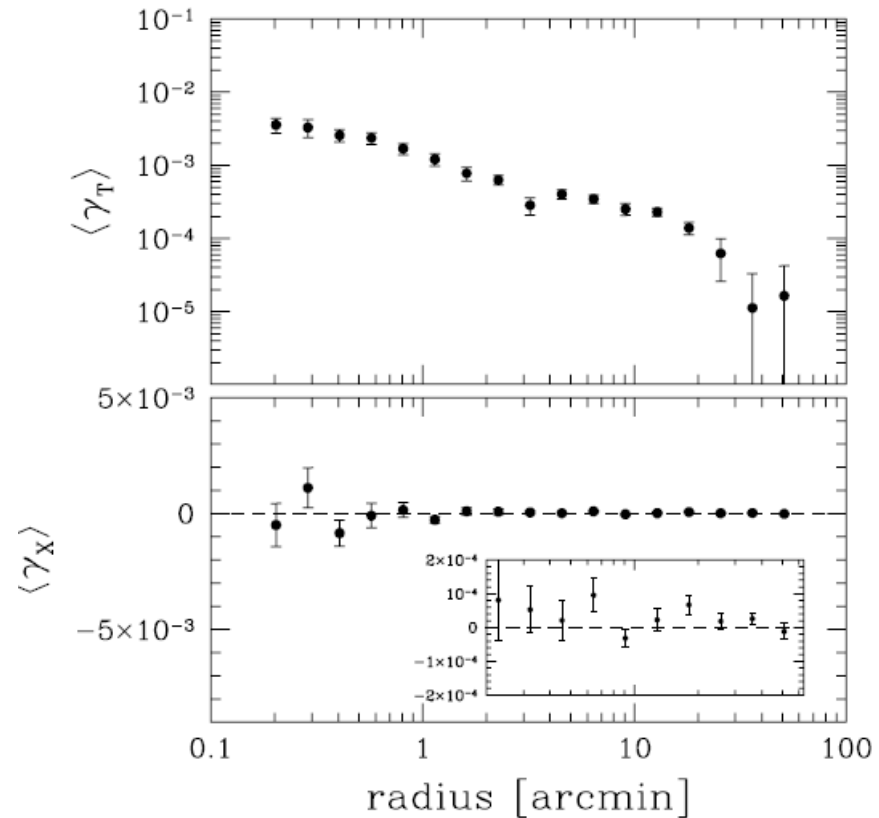
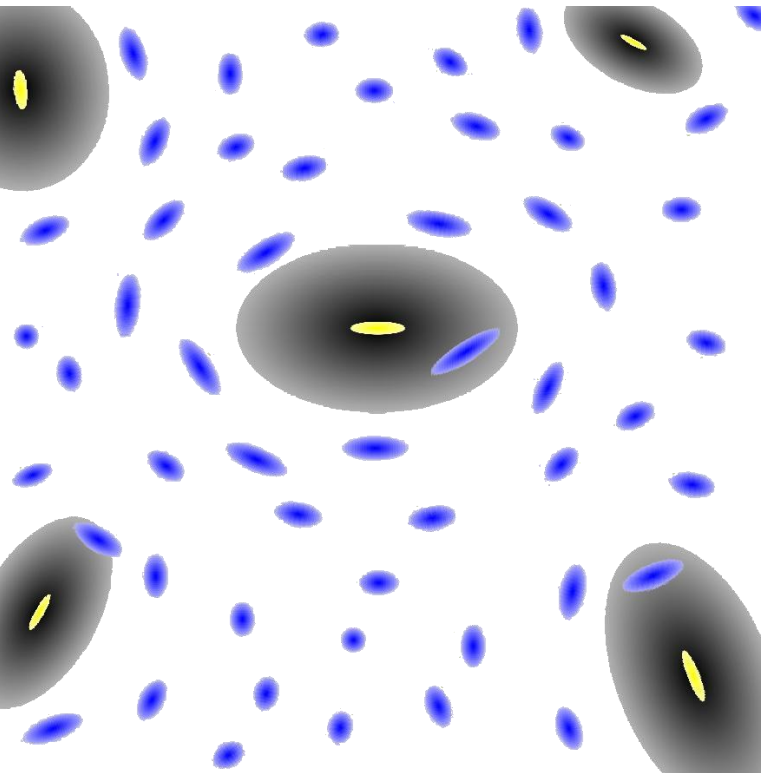
Revèle la **quantité de matière moyenne totale** et sa distribution autour des galaxies centrales ou amas (corrélation galaxie-masse)

, *Hoekstra et al 2004, Gavazzi et al 2007, Mandelbaum et al 2016*

Alignement des halos

Obtenir la distribution de matière noire, mais aussi la forme, l'étendue
RCS (Red-Cluster-Survey) 120 000 lentilles, 1.5 million de sources

$$\epsilon_{\text{halo}} = 0.7 \epsilon_{\text{gal}}$$



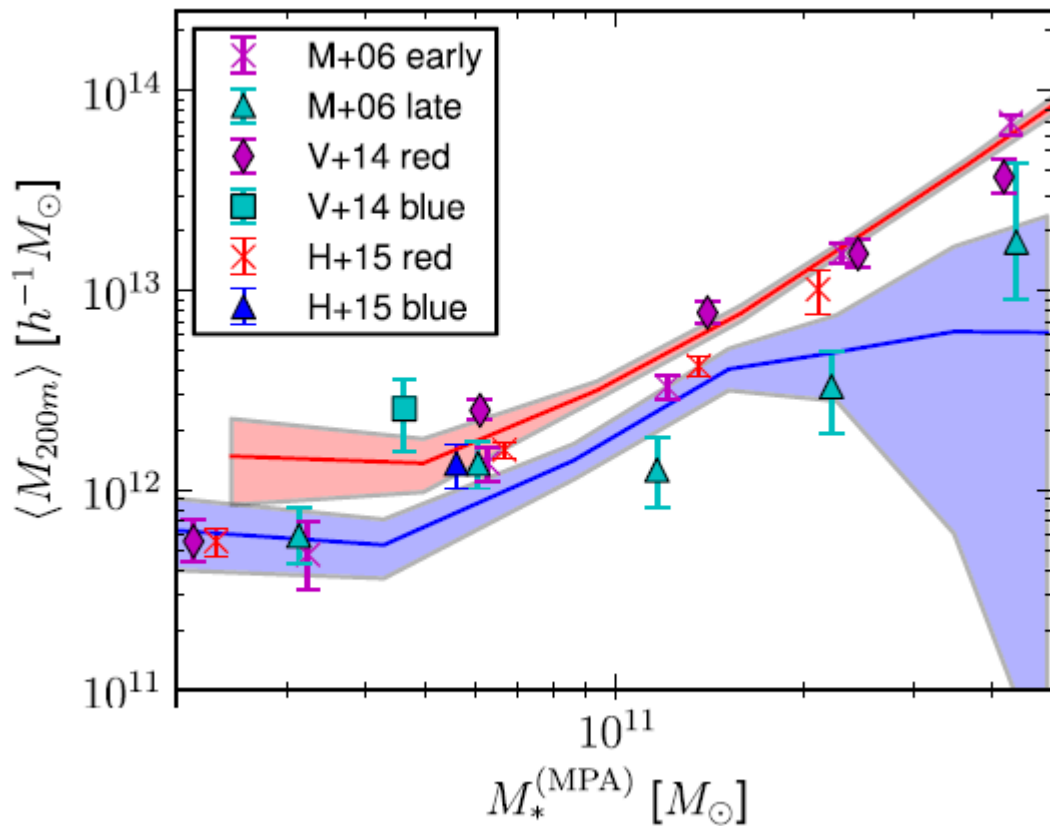
Phase
 $+45^\circ$

Hoekstra et al 2004

Bimodalité: Galaxies rouges et bleues (SDSS)

Les LBG rouges ont plus de M_{halo} que les bleues, à M^* donné

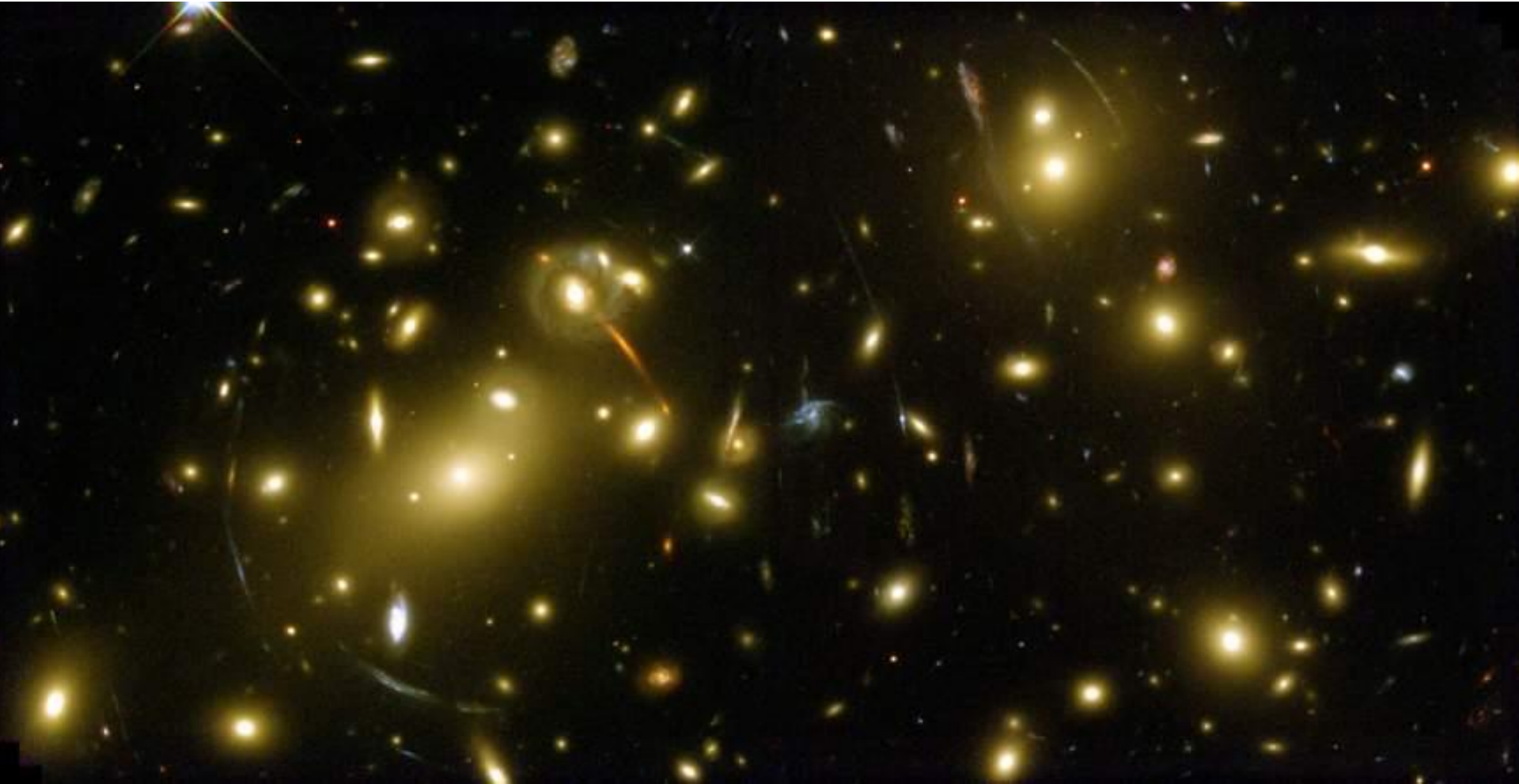
LBG=Local Brightest Galaxy: Galaxie centrale de leur halo (\neq satellites)



Les LBG rouges ont subi plus de feedback (AGN..) \rightarrow Moins d'étoiles

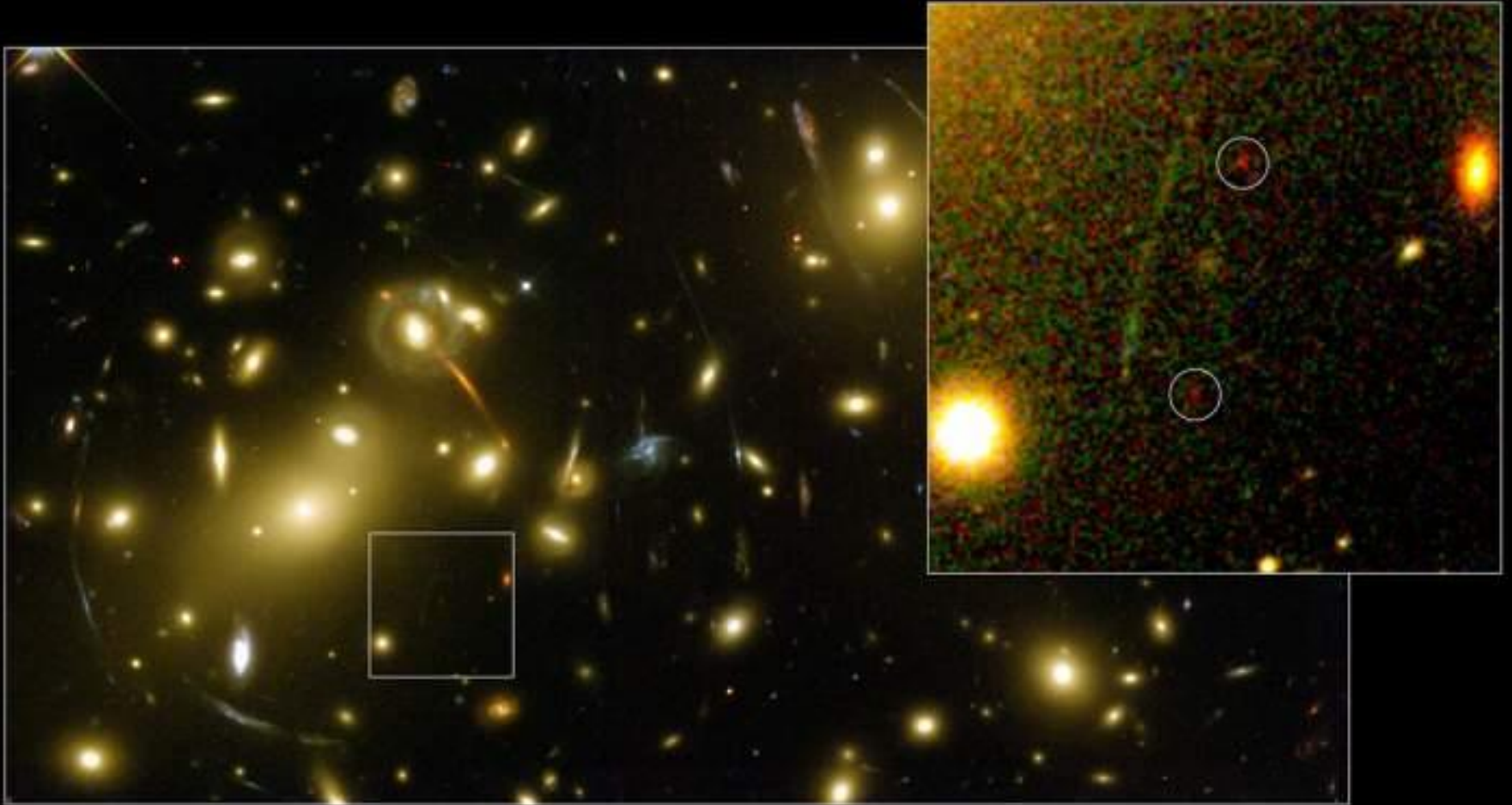
Le signe de l'effet a été
Débattu
Dépend de la concentration

Lentilles et arcs dans Abell 2218



A. Fruchter et al 1995, HST
Abell 2218 $z \sim 0.176$ $D \sim 700$ Mpc

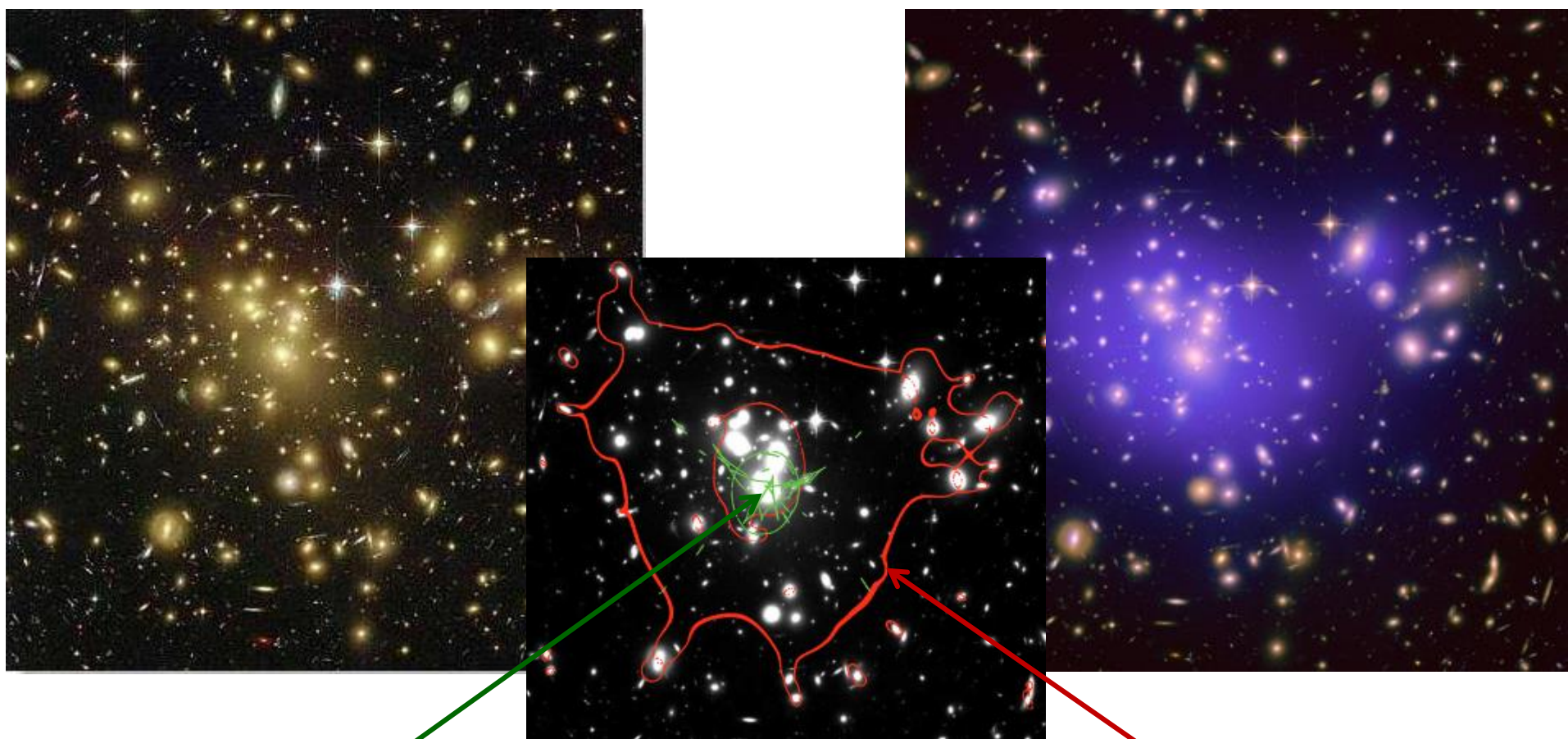
Abell 2218 (Details)



Kneib et al., 2004, Galaxie amplifiée $z \sim 7.0$, 2 images rouges
Arc orange = E gal @ $z \sim 0.7$; Galaxies bleues = SF galaxies à $z \sim 1-2.5$.

Abell 1689

En bleu: matière totale



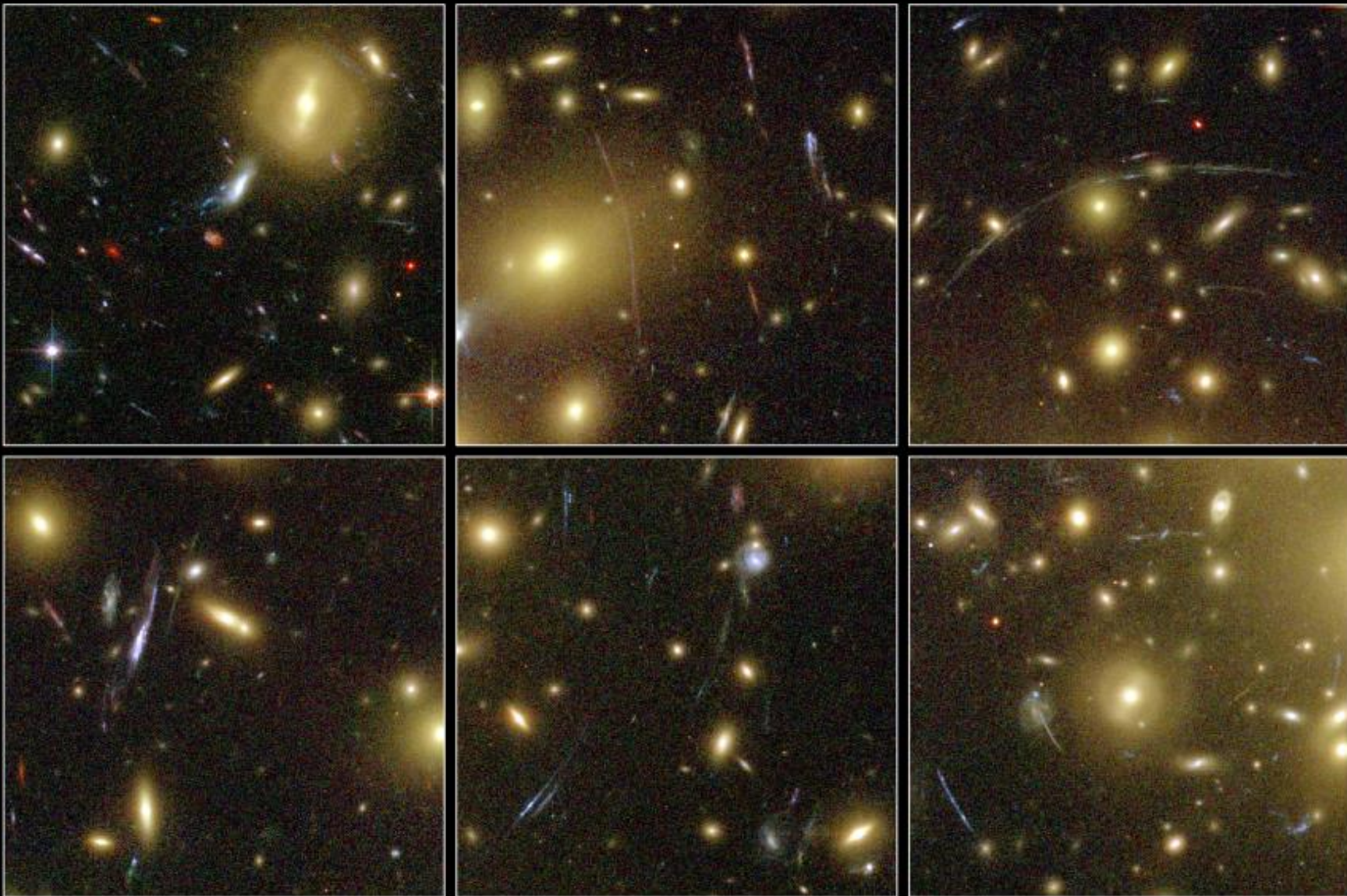
Caustiques

Lignes critiques ($z=3$)

Abell 1689, $z \sim 0.183$, 800Mpc, **une galaxie à $z=7.6$**

le plus grand nombre d'arcs et de contraintes

→ Modèle de masse précis et exact (*Zekser et al 2006*)

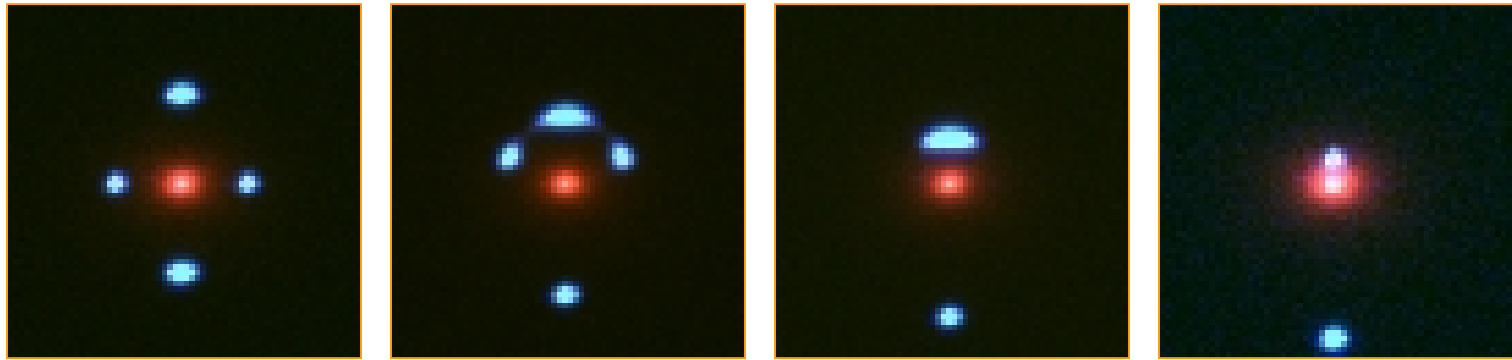


Galaxy Cluster Abell 1689 Details
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

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-PRC03-01b

Grande complexité

- Contrairement aux lentilles optiques
la plus grande déflexion a lieu vers le centre
- Pas de point focal
- une galaxie $M \sim 10^{11} M_{\odot} \rightarrow$ images séparées de qq arcsec
- un amas de galaxies \rightarrow images séparées de qq arcmin



source et lentille
alignées

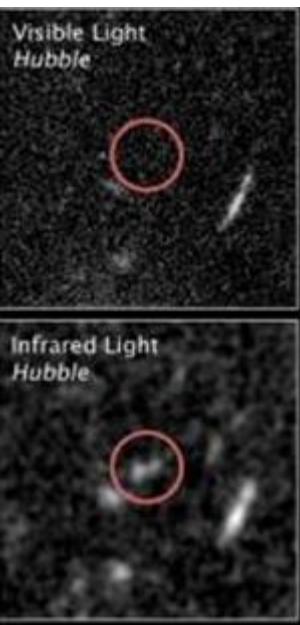
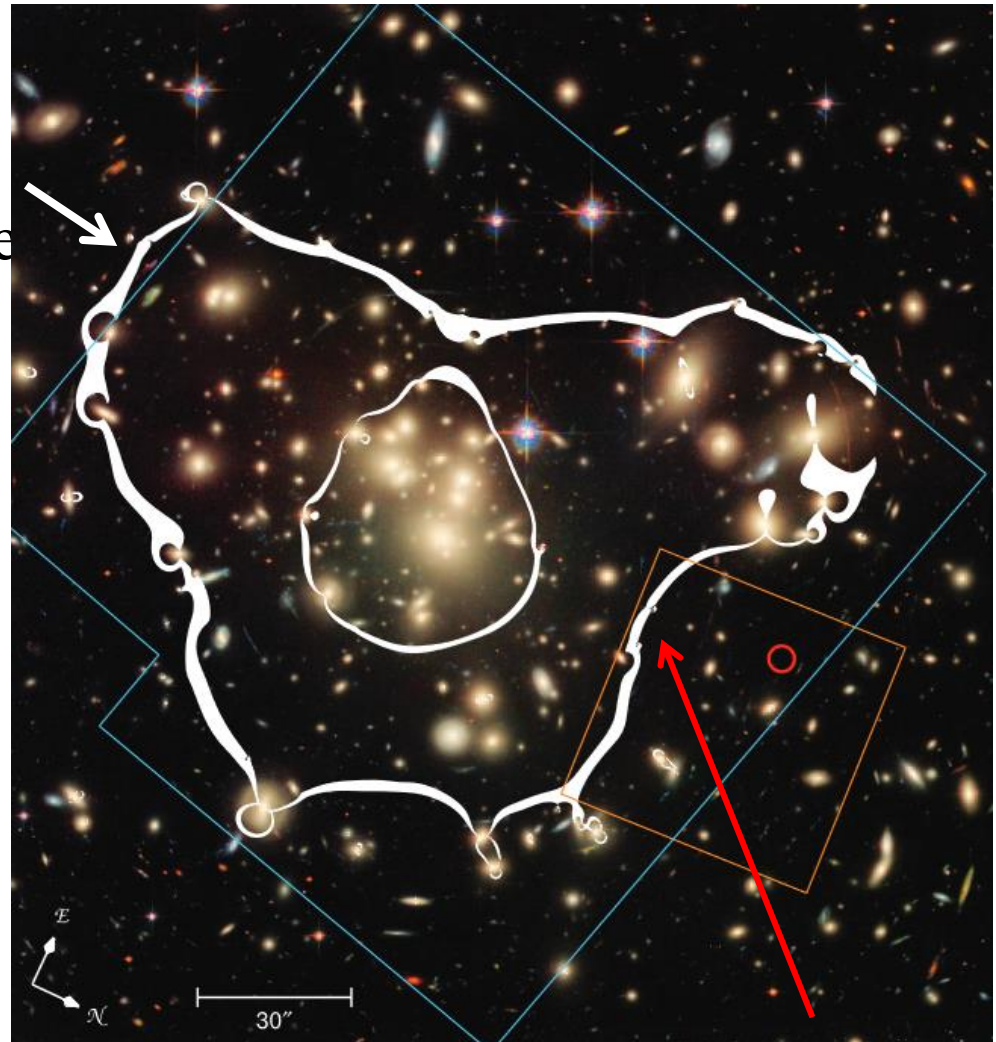


source et
lentille
non-
alignées

Abell 1689 – ligne critique - Caustiques

Ligne critique = magnification infinie
→ Caustique dans le plan source

L'amplification augmente quand on s'approche de la ligne critique



optique

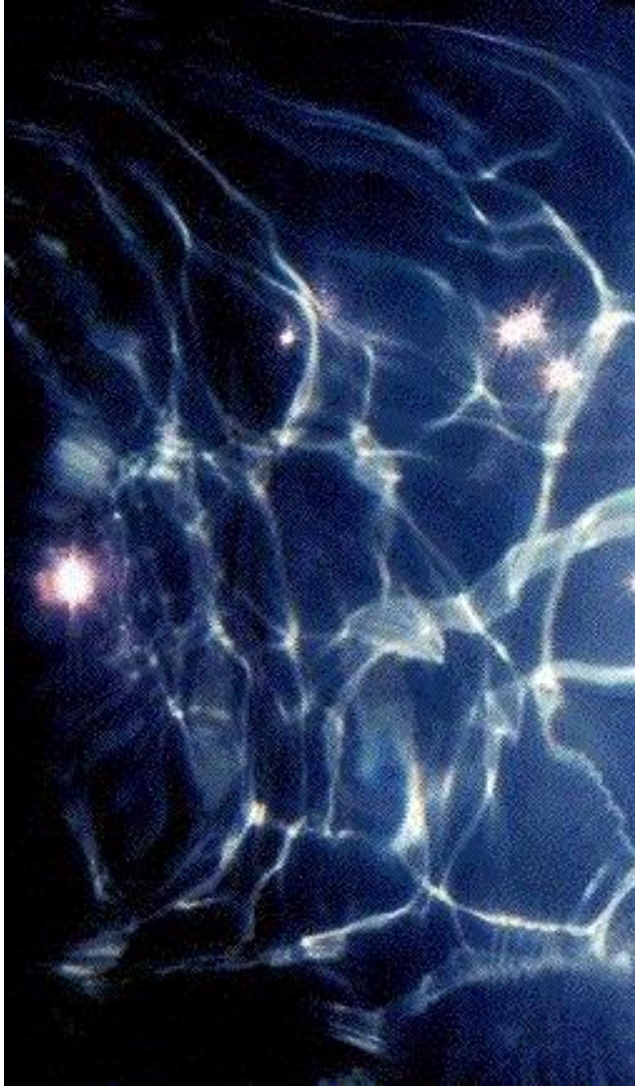
$z=7.6$

IR

L. Bradley et al 2008

Magnification
d'un facteur 9

Les caustiques



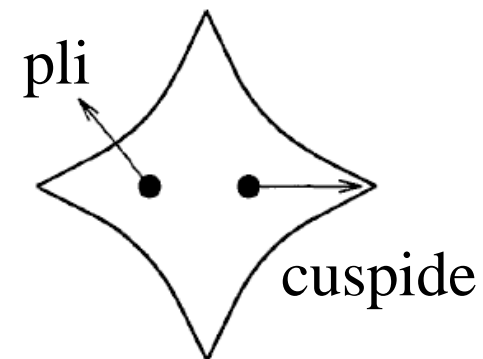
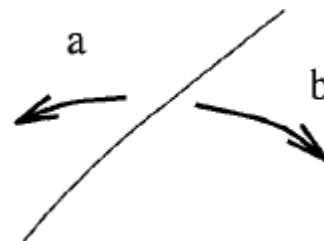
Le plan source (2D) peut être séparé en plusieurs régions, où le nombre d'images sera différent

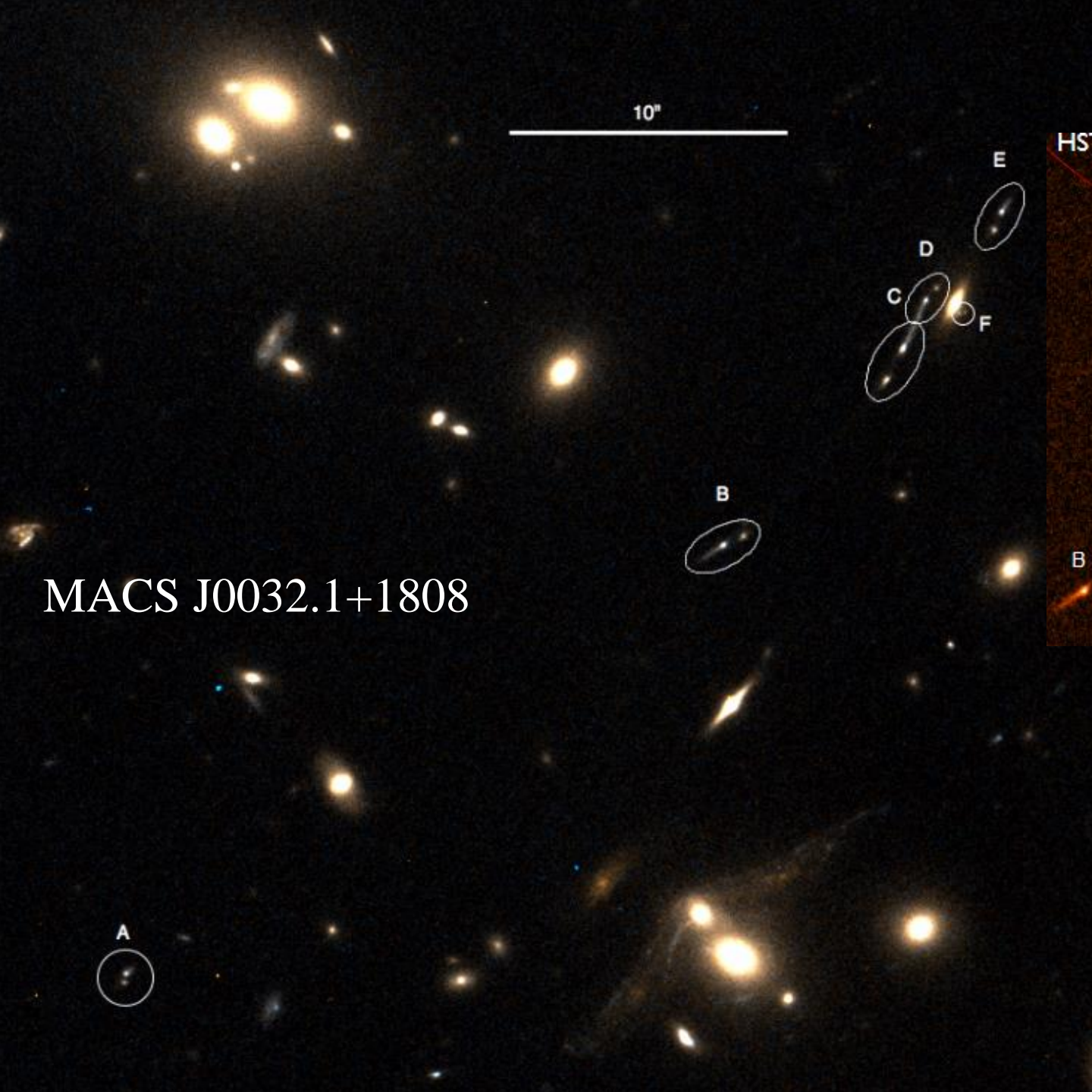
Ces diverses régions sont séparées par des caustiques

Si le potentiel n'est pas singulier, il y a
Un nombre impair d'images

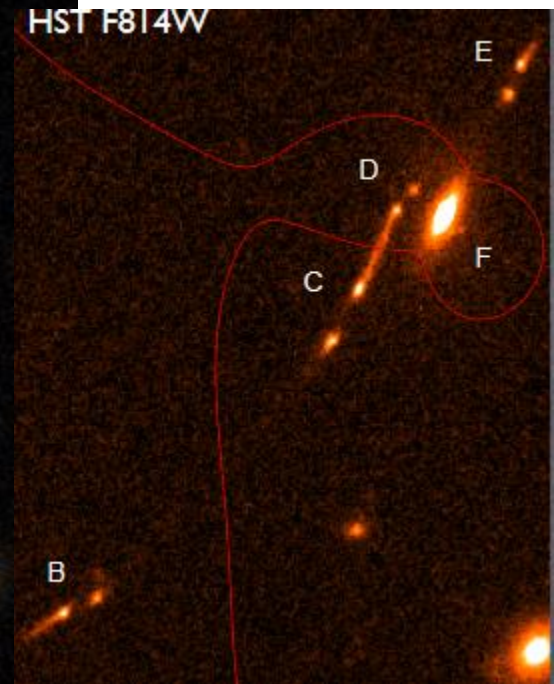
Source près des plis et cuspidés: les images se rassemblent pour former des arcs

Les images sont alors de parité différente sans un miroir





MACS J0032.1+1808



MACSJ0032-arc
 $z=3.6$

Raies de CO
détectées

*Dessauges-Zavadsky
et al 2017*

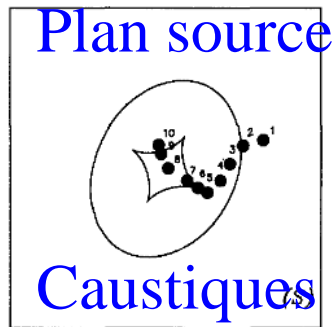
Les mirages gravitationnels

En fonction de

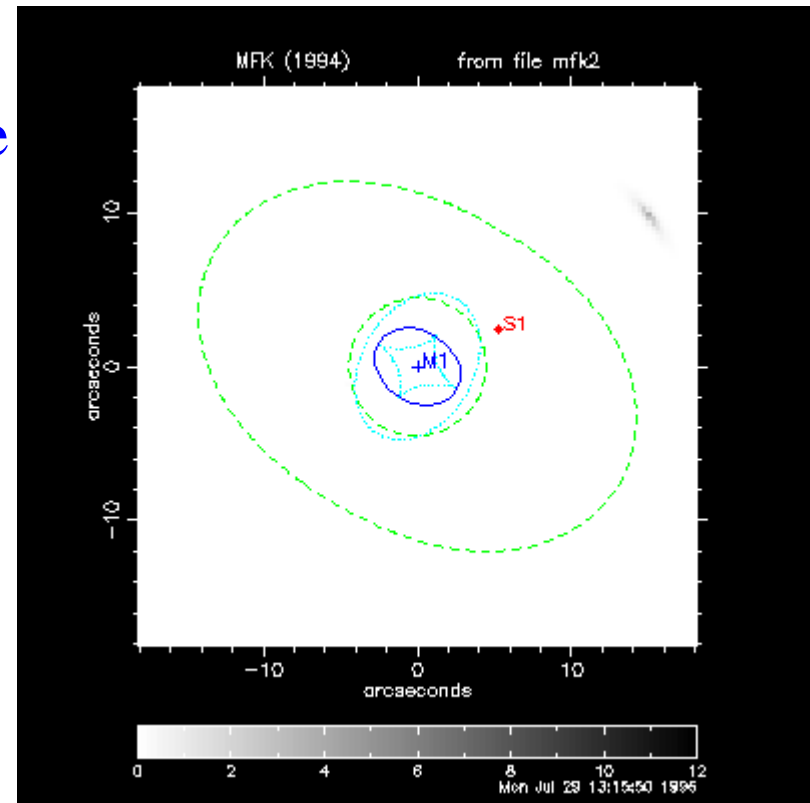
- distribution de masse dans la lentille
- alignement source – lentille – observateur

Plusieurs configurations:

- doubles
- quadruples
- arcs
- anneau



Lignes critiques



Potentiel elliptique

(seulement les sources étendues
donnent des arcs ou anneaux)

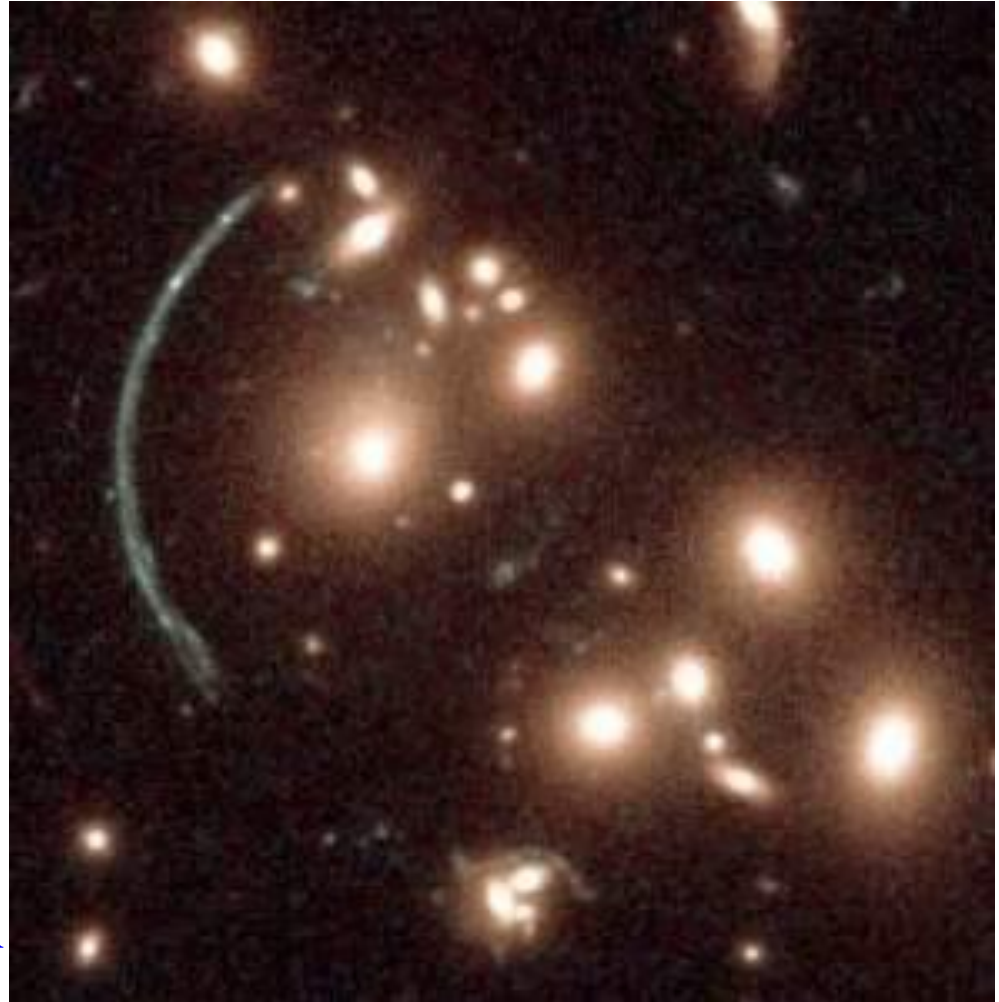
CL2244-02 – Les halos de matière noire des galaxies sont tronqués

Sous halos
de matière noire ?

Mais des halos
plus petits
que pour les
galaxies de champ

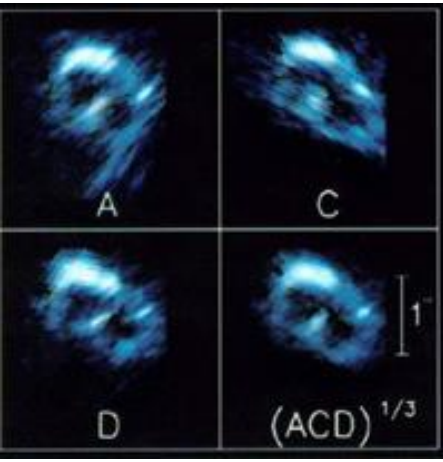
La part de la DM autour
des galaxies n'est que de
10-20%

Tout le rest devient commun



HST+WFPC2 - I. Smail et al., 1997, P. Natarajan et al. 2002.

Les arcs bleus
viennent d'une galaxie
à $z=1.675$
5 images
Gravitationnelles
→ reconstruction



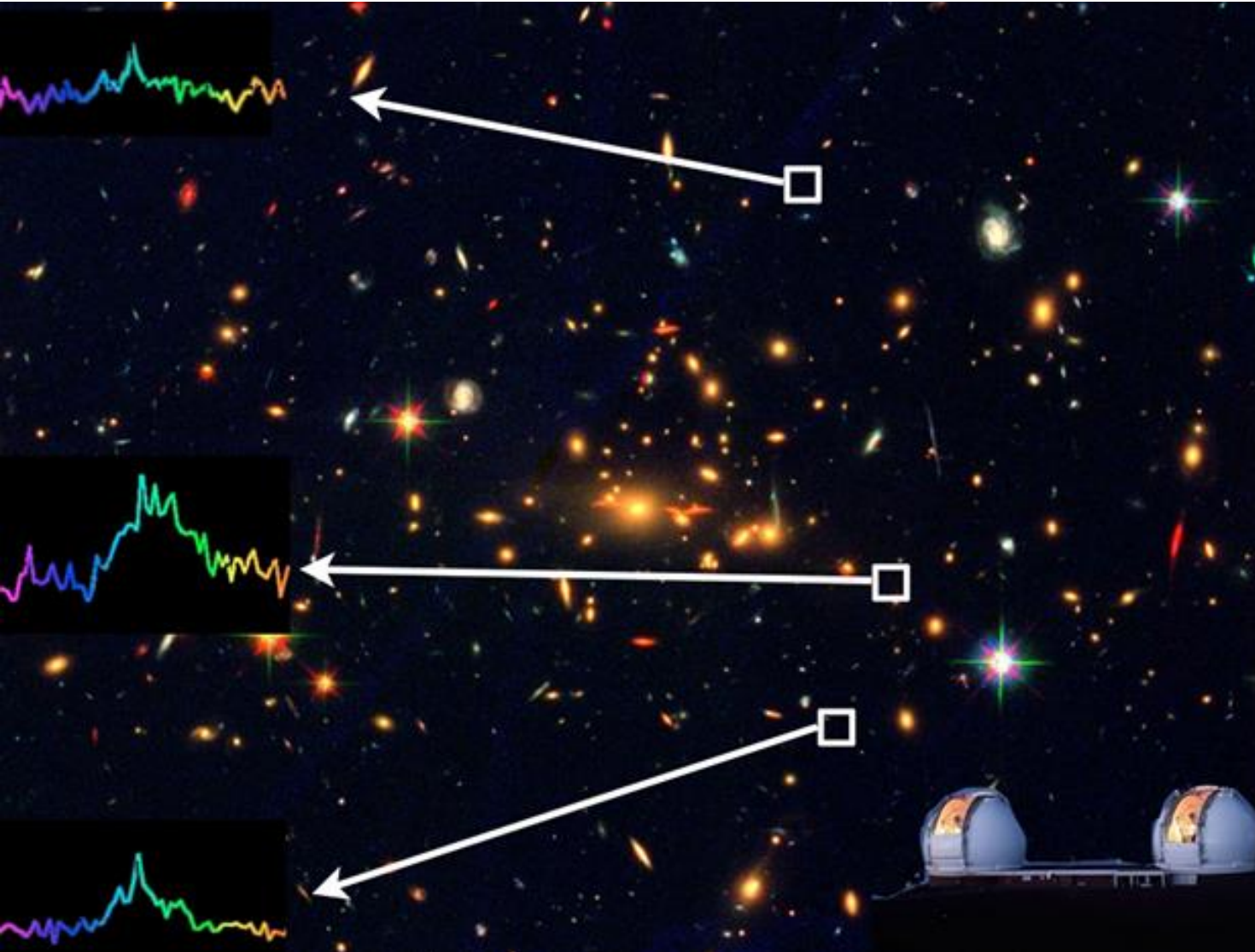
**Galaxie barrée avec un
anneau?**



HST: Colley et al 1996 CL0024+1654 $z \sim 0.391$ ~ 1000 Mpc

MACS2129.4-0741

Détection de Ly α dans la galaxie la plus faible à $z \sim 7$



Huang +2016
 $z=6.85$

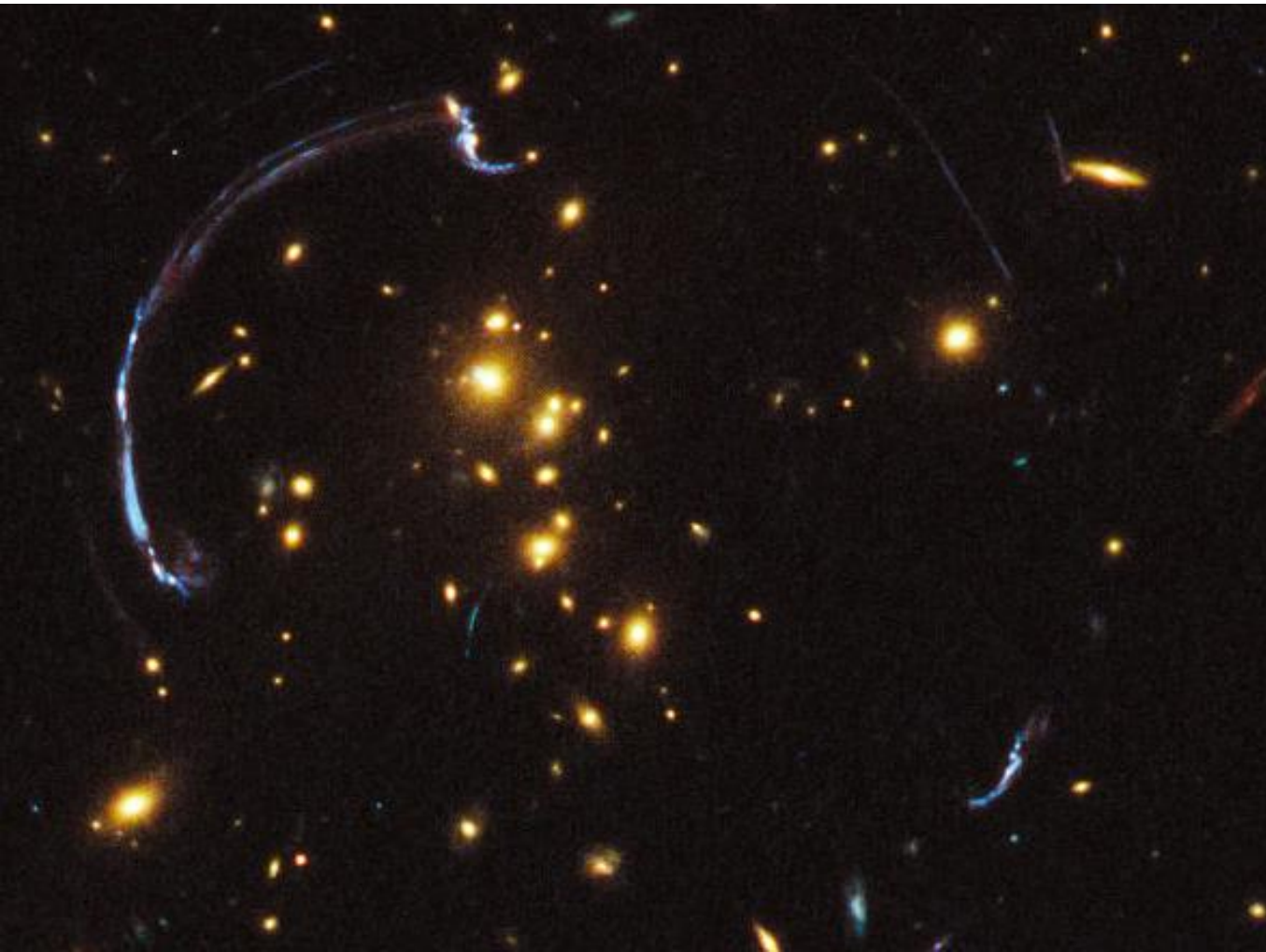
$\text{SFR}=1.4M_{\odot}/\text{an}$

Age < 20Myr

3 images de
la galaxie
avec le Keck

RCS2 032727-132609 amas-lentille à $z=0.564$ (Wuyts et al 2010)
galaxie $z=1.7$ (**5 images**) Keren Sharon et al 2012

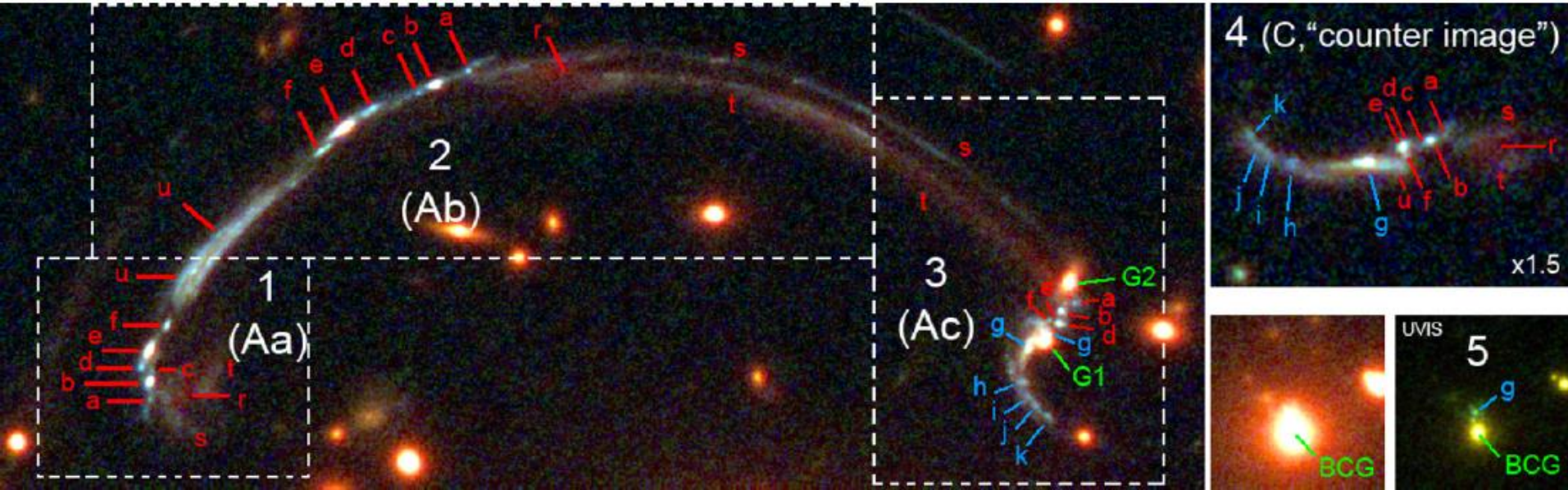
Sous-structures selon les arcs



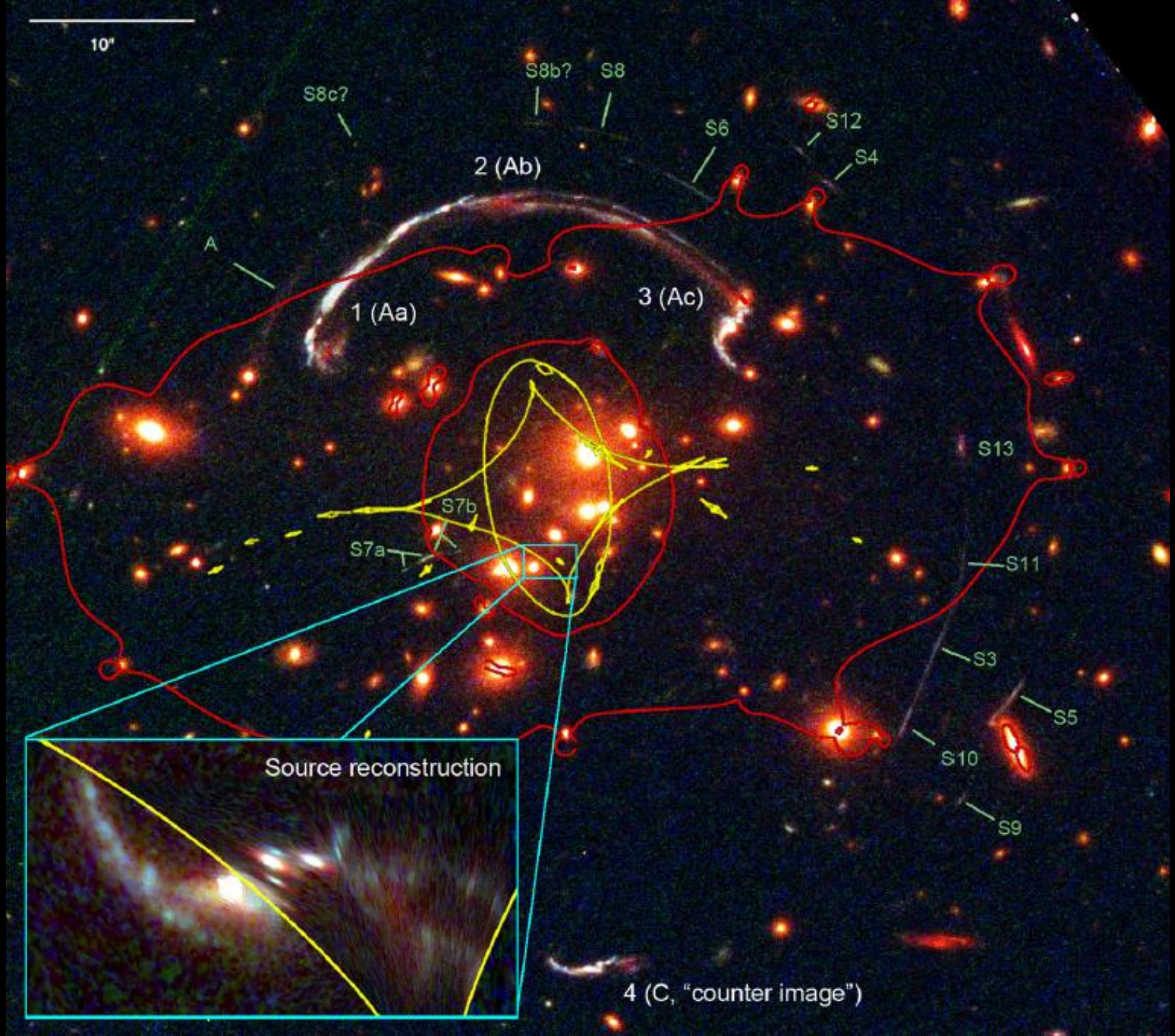
Le grand nombre
de structures
permet un modèle
de lentille très
précis et exact

Et ainsi d'étudier
les galaxies
à haute résolution
spatiale $<100\text{pc}$

RCS2 032727-132609: modèle de masse détaillé

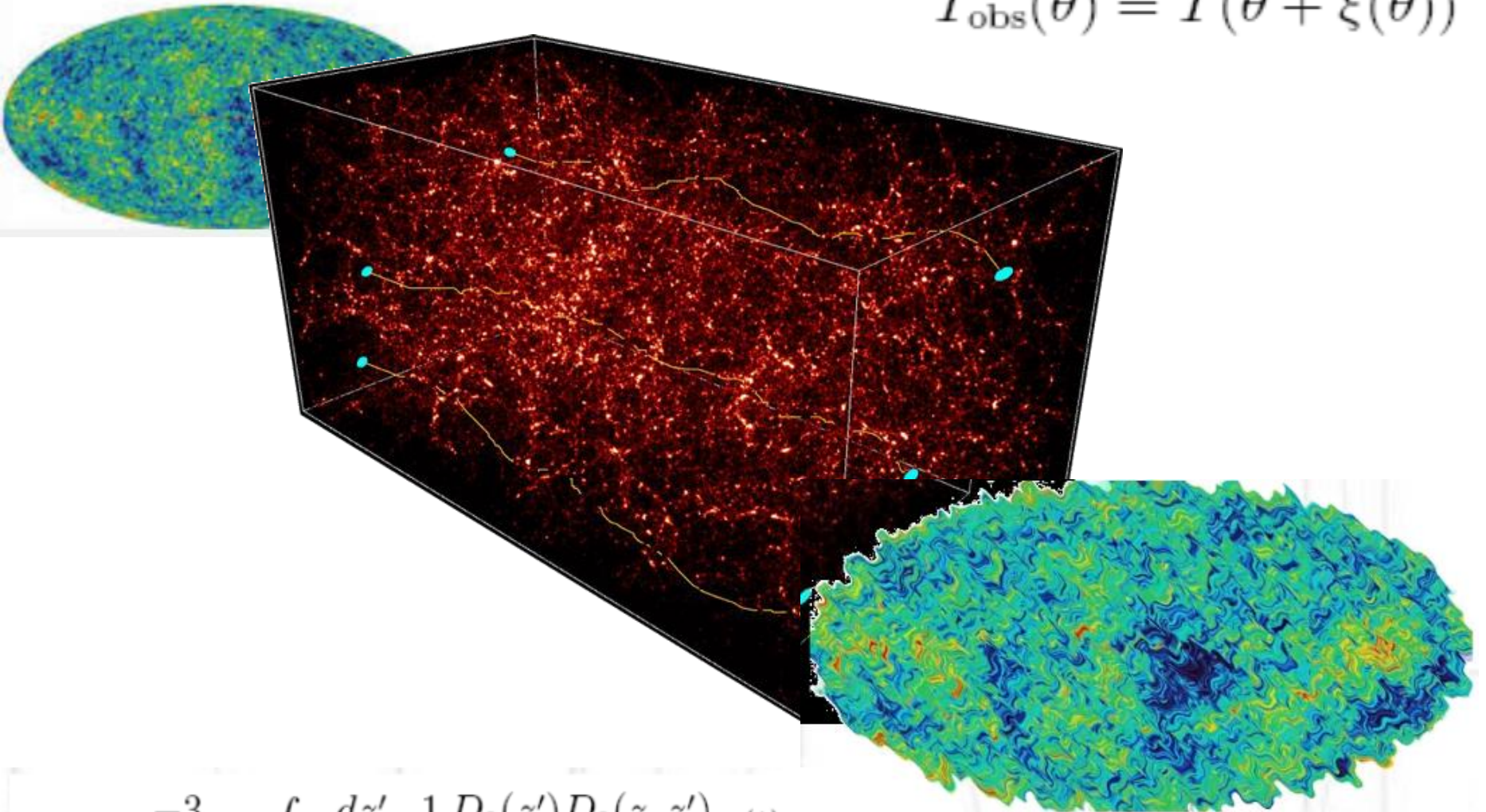


$\mu=4-100$ Important de le connaître en détails pour estimer
SFR $\sim 30 M_{\odot}/\text{an}$
Galaxies en interaction /fusion



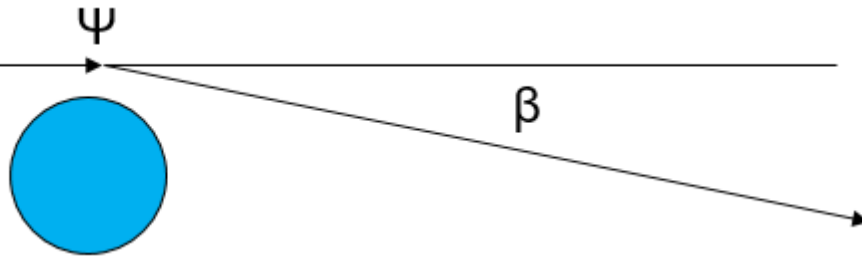
L'outil des lentilles sur le fonds cosmologique (FCM)

$$T_{\text{obs}}(\theta) = T(\theta + \xi(\theta))$$



$$\xi_i(\theta) = \frac{-3}{2} \Omega_0 \int \frac{dz'}{H(z')} \frac{1}{a} \frac{D_0(z') D_0(z, z')}{D_0(z)} \varphi_{,i}^{(1)}(\theta, z)$$

Ordres de grandeur



Ψ linéaire, gaussien
 $\Psi/c^2 \sim 2 \cdot 10^{-5}$

Théorie Newtonienne $\beta = 2 \Psi/c^2$ $\Psi \sim GM/r$
Relativité Générale $\beta = 4 \Psi/c^2$ $\beta \sim 10^{-4}$

Taille caractéristique $\sim 300 \text{ Mpc}$

Distance comobile à la dernière surface de diffusion $\sim 14\,000 \text{ Mpc}$

Statistiquement 50 déflexions,

Marche au hasard $\sqrt{50} \cdot 10^{-4} \text{ rad} = 2 \text{ arcmin} \rightarrow L=3000$

\rightarrow Le lensing va dominer les petites échelles

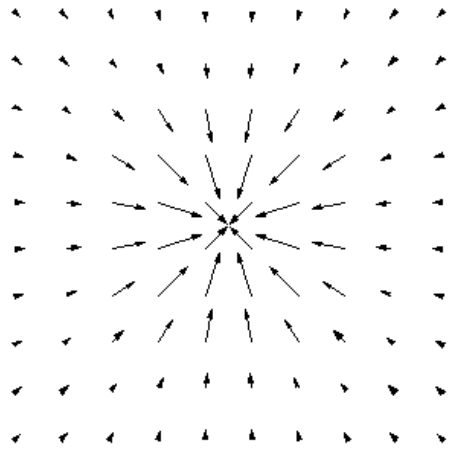
$2 \text{ arcmin} / 60 \text{ arcmin} \sim 3\%$ sur le principal pic acoustique

Deflection des photons micro-onde

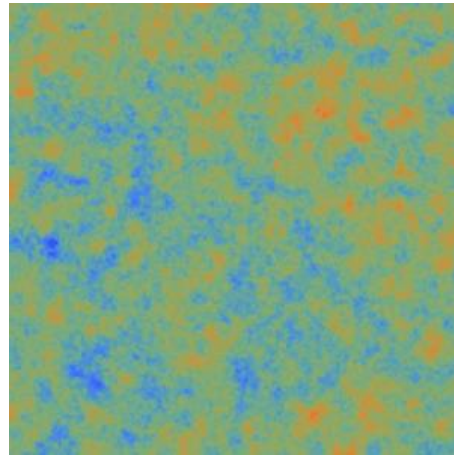
La lentille conserve la brillance de surface, déflexion $\mathbf{d}(\hat{\mathbf{n}})$

$$\Delta T(\hat{\mathbf{n}}) \rightarrow \Delta T(\hat{\mathbf{n}} + \mathbf{d}(\hat{\mathbf{n}}))$$

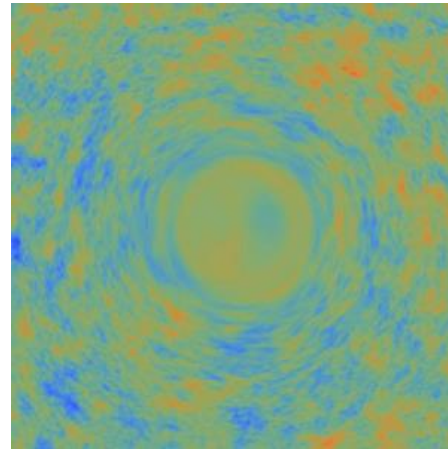
Déflexions dues au potentiel gravitationnel entre $z \sim 100$ et 0
(surtout à grand z)



Angles de déflexion



T Initial



Après lentille

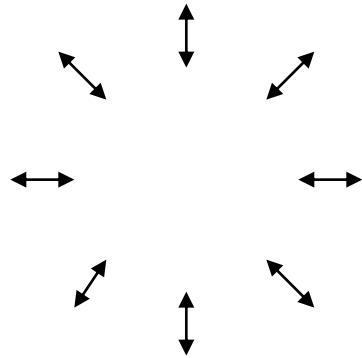
Introduit
une
Polarisation !

Au premier ordre, la déflexion est le gradient
 Φ intégré sur la ligne de visée

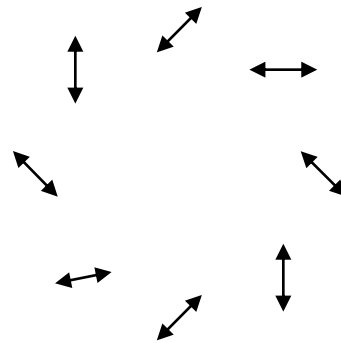
$$\mathbf{d}_a(\hat{\mathbf{n}}) = \nabla_a \phi(\hat{\mathbf{n}})$$

Modes de polarisation

Mode E (gradient)



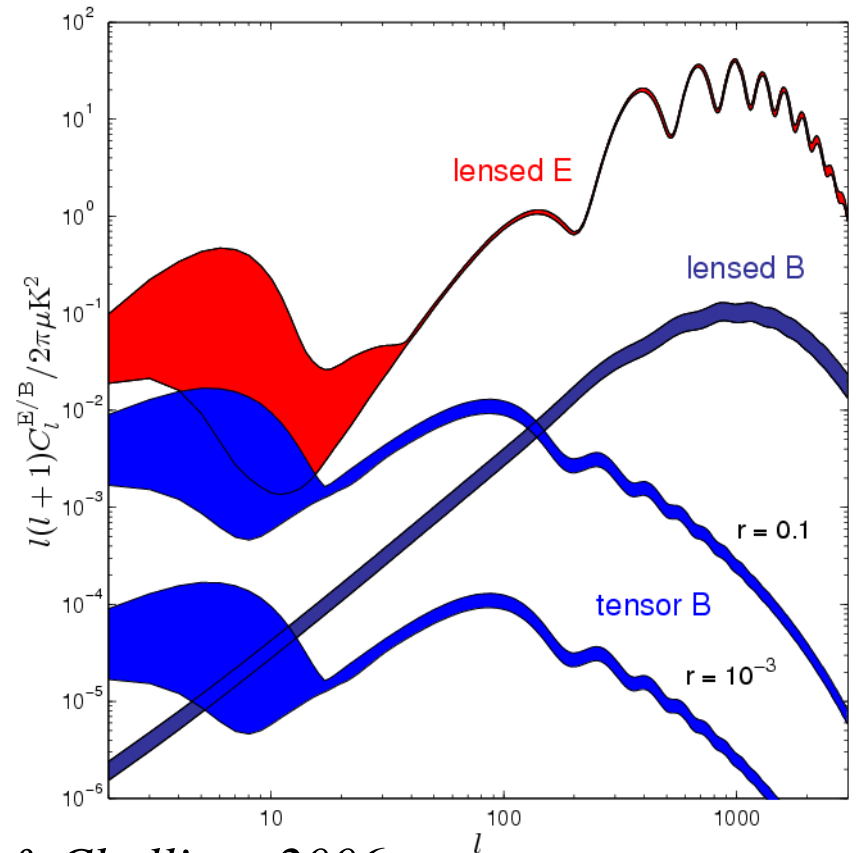
Mode B (rotationnel)



$r =$ rapport
tenseur/scalaire
 $r < 0.1$ (Planck 2018)

Les modes B sont des traceurs
d'ondes gravitationnelles

Mais peuvent aussi provenir
du cisaillement du FCM



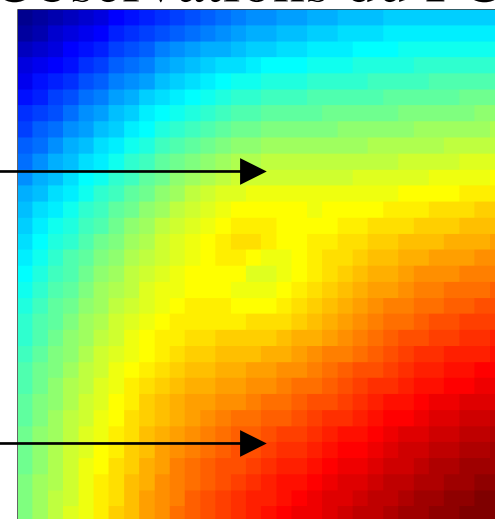
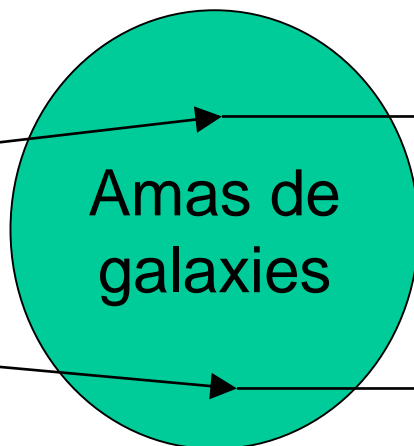
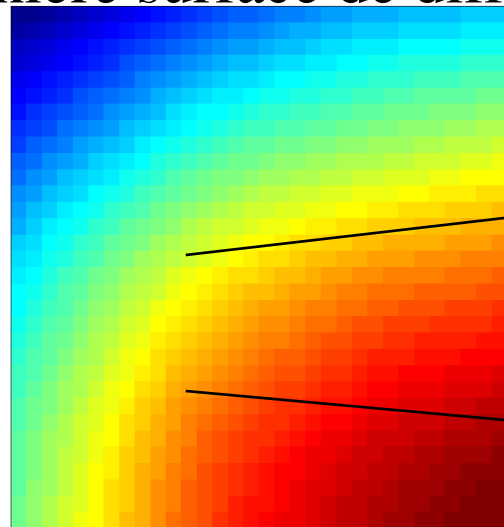
Lewis & Challinor 2006

Modélisation des déflexions

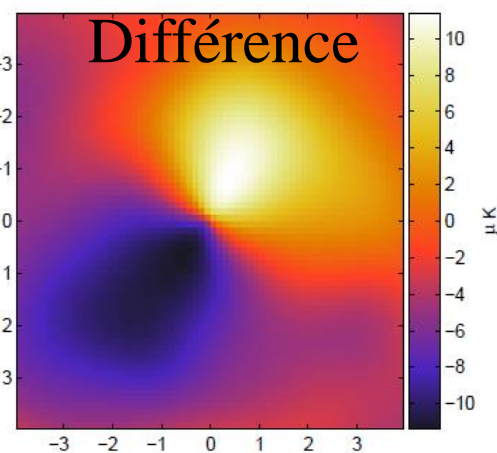
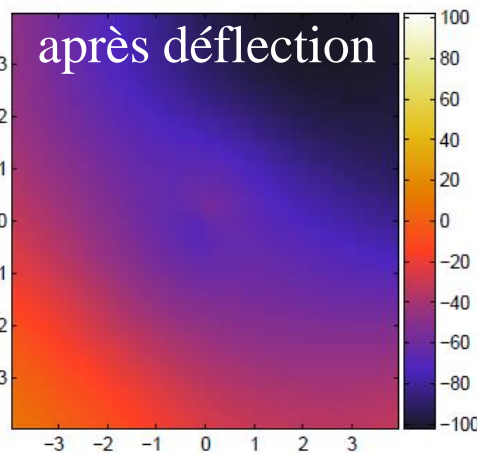
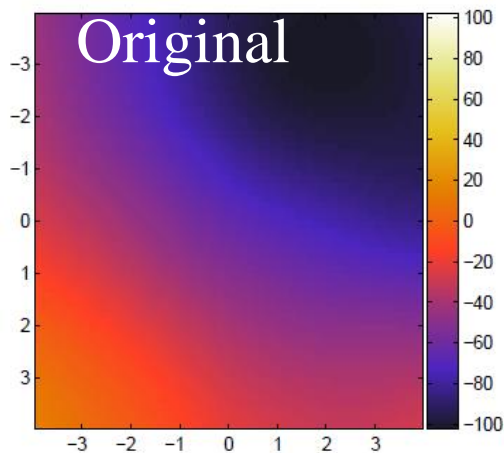
Le gradient $\sim 13 \mu\text{K} / \text{arcmin}$
déflexion d'un amas $\sim 1 \text{ arcmin}$
→ Signal de lentille $\sim 10 \mu\text{K}$

Dernière surface de diffusion

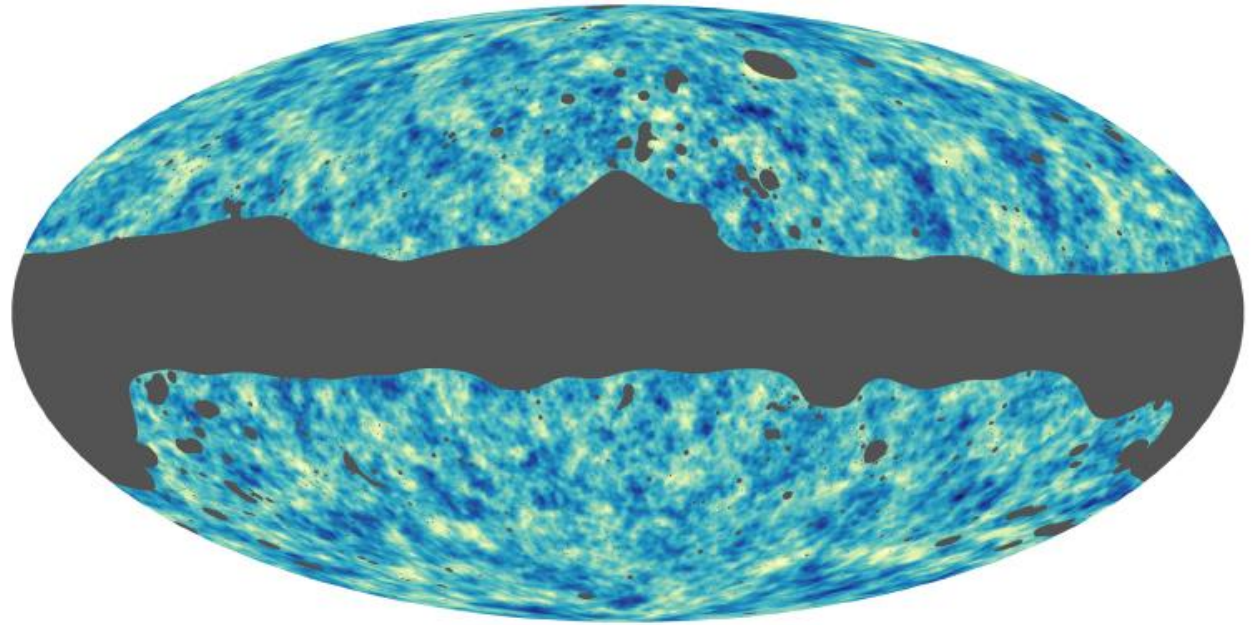
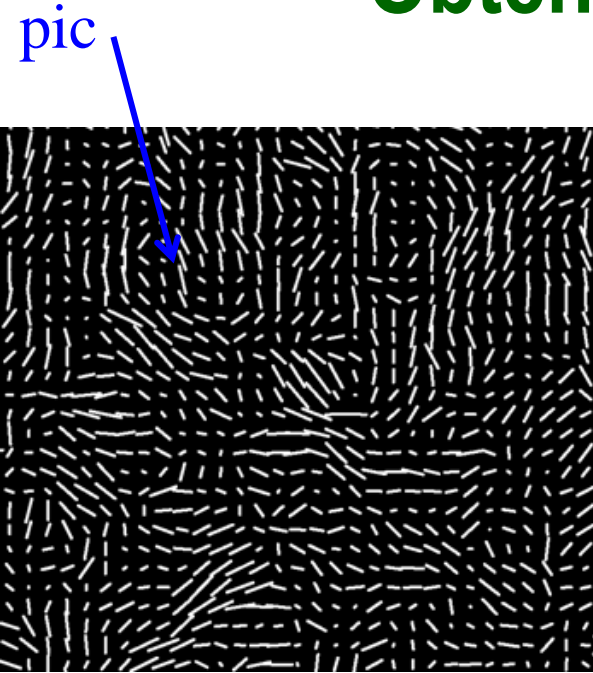
Observations du FCM



← 0.1 degré →



Obtention des angles sur le ciel



Obtenues avec filtre de Wiener

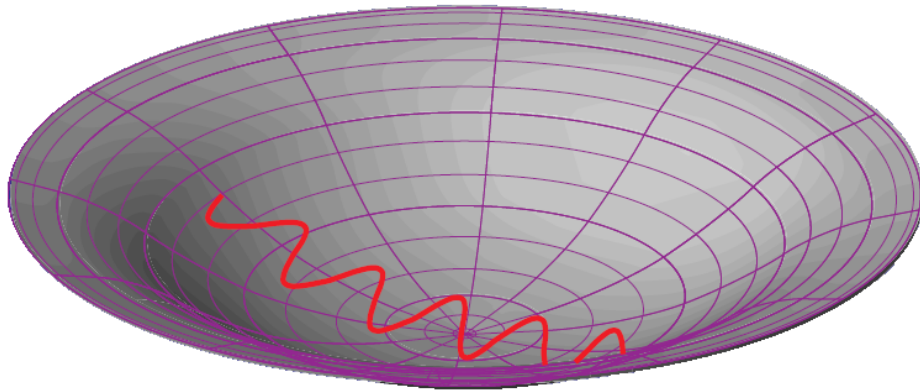
Corrélation avec les structures
à grande échelle
le long de la ligne de visée

Planck Coll (2018)



Effet Sachs-Wolfe intégré (ISW)

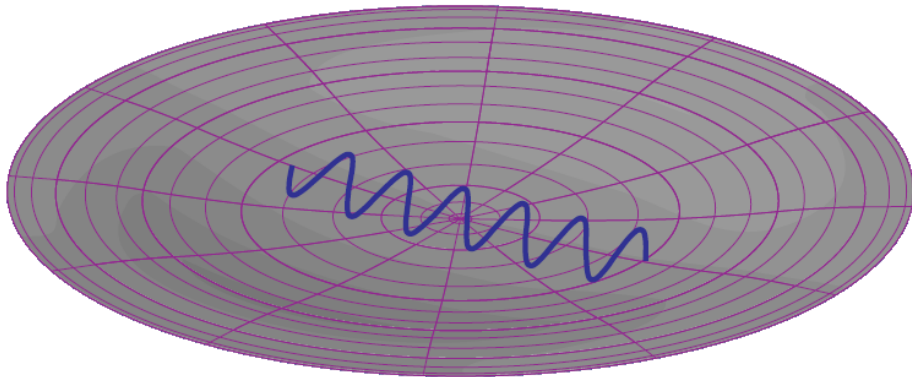
- Les photons gagnent de l'énergie en tombant → λ vers le bleu
- Puis reperdent de l'énergie en remontant → λ vers le rouge



Si le potentiel réduit sa profondeur pendant le temps de parcours des photons

→ Ils ressortent plus bleus

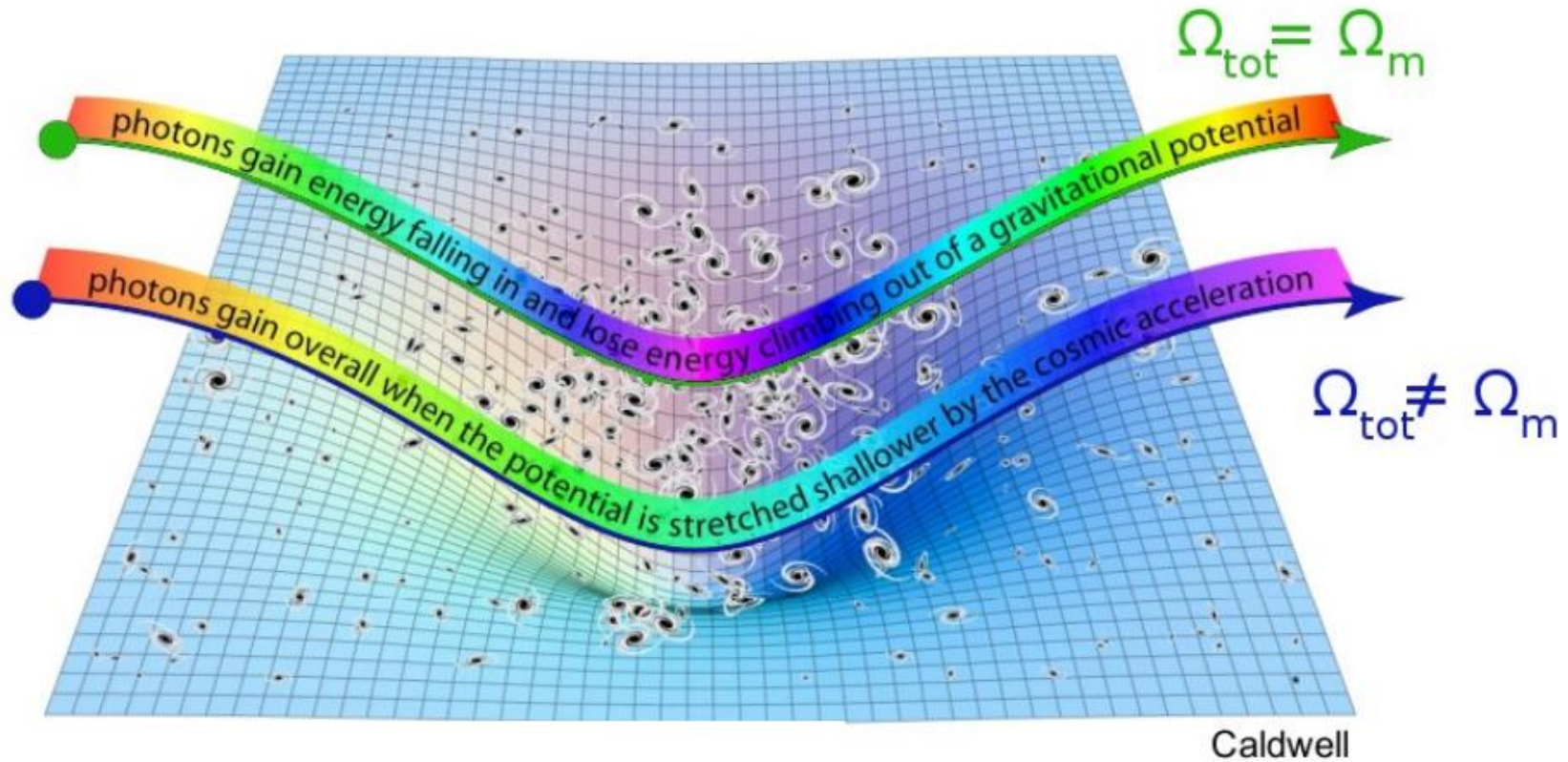
→ Si $\Lambda=0$, ils ressortent identiques



Pour un univers plat dominé par la matière, les effets se compensent exactement

Effet Sachs-Wolfe intégré

Perte ou gain d'énergie des photons du CMB en traversant les structures



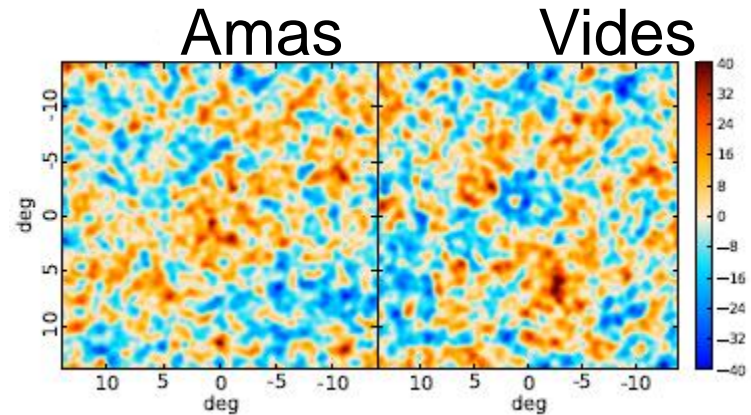
L'amplitude de l'effet: information sur la quantité d'énergie noire à cette époque

Aussi information sur la croissance des structures, et modification de la gravité

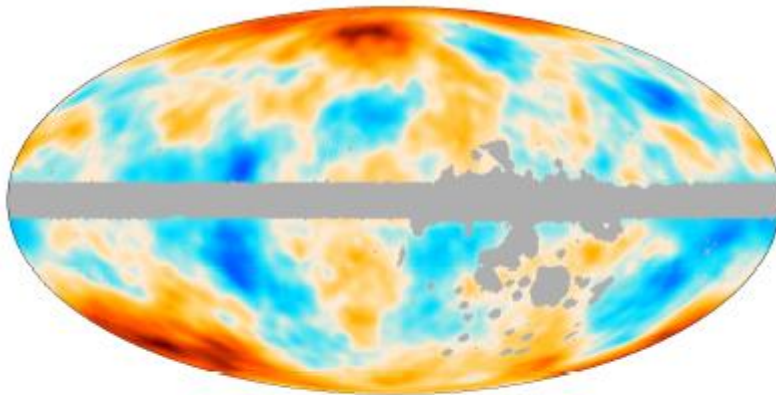
Corrélation Fonds micro-onde -> Structures

Détection à 3σ avec Planck
Empilant 50 super-amas et vides

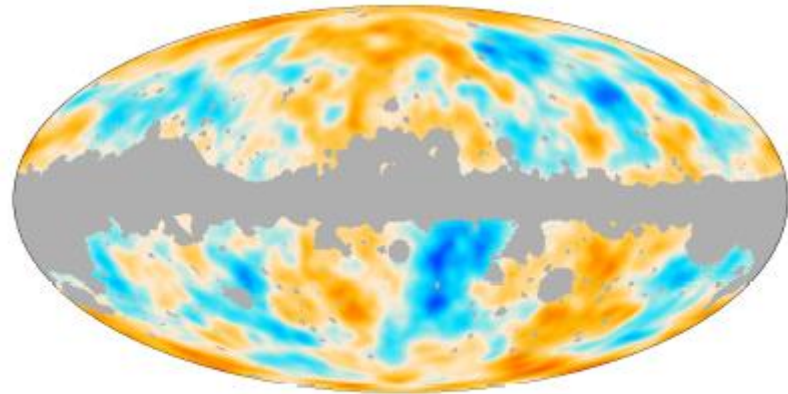
Aussi Granett et al (2008)



NVSS radio sources+CMB



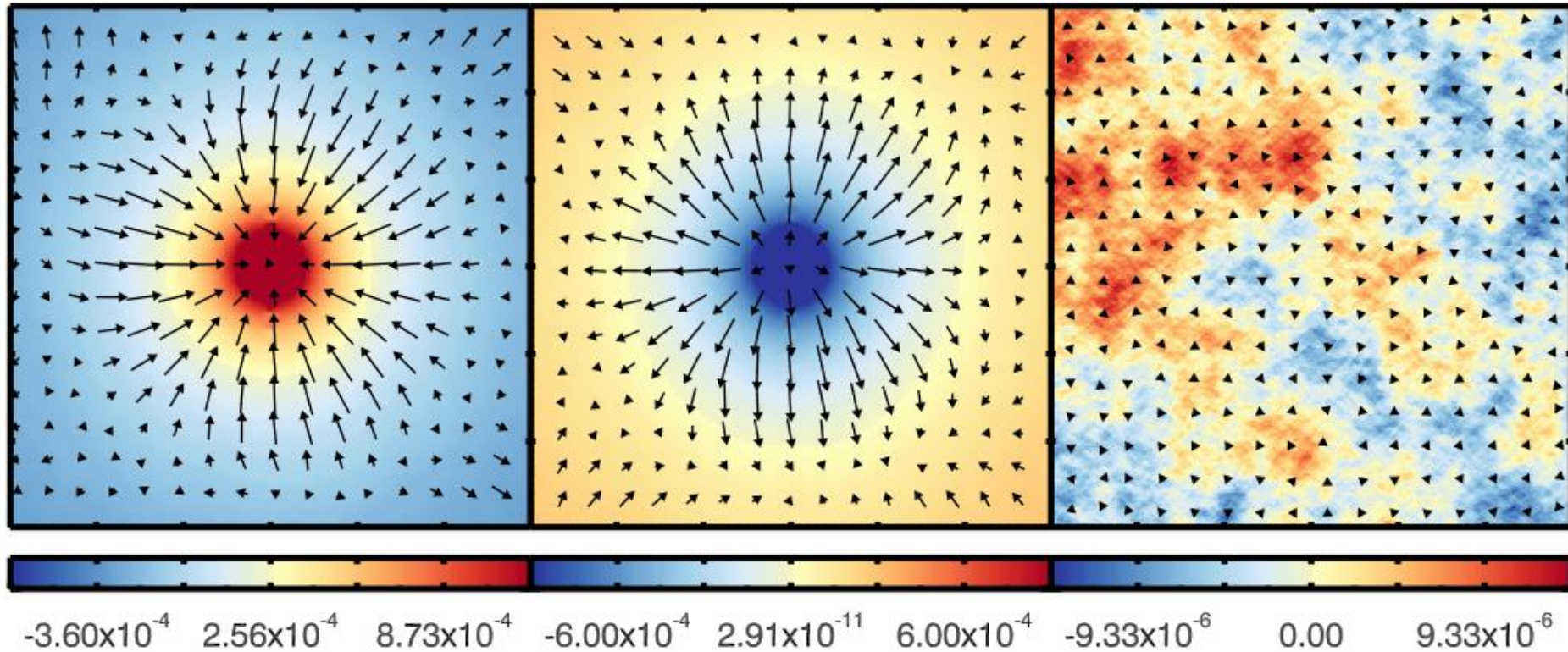
lentilles +CMB



Cartes ISW: Bleu= sous-densités
Rouge= sur-densités

Corrélation avec le fond infrarouge

Le fond infrarouge, dû à la formation d'étoiles dans les galaxies



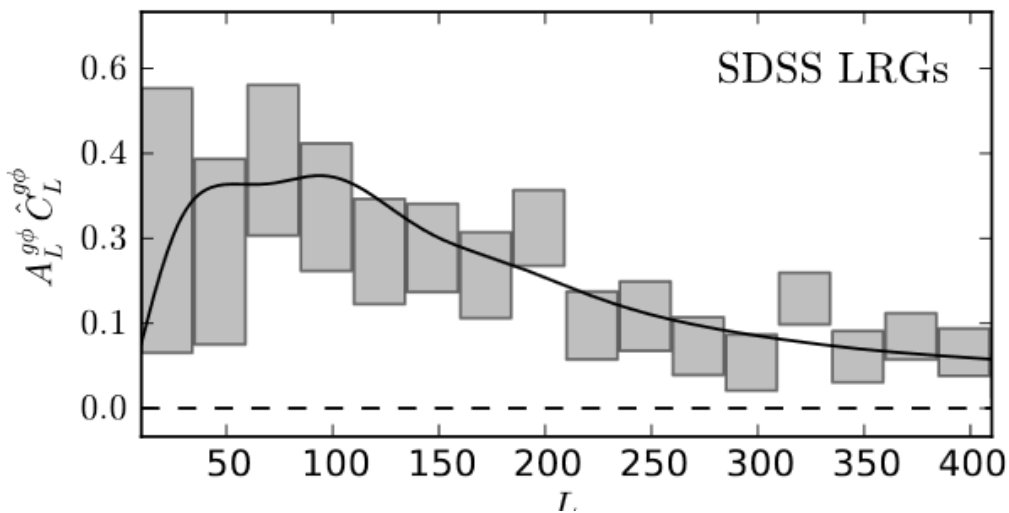
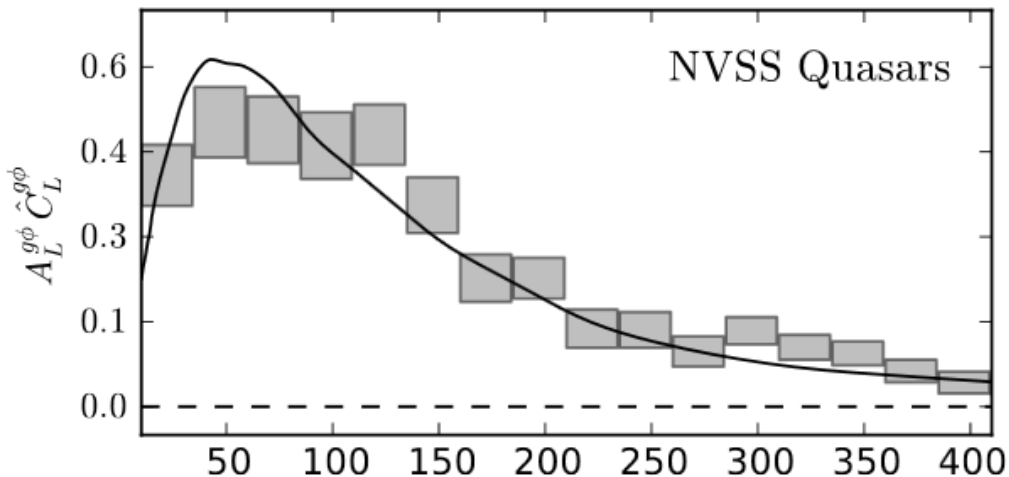
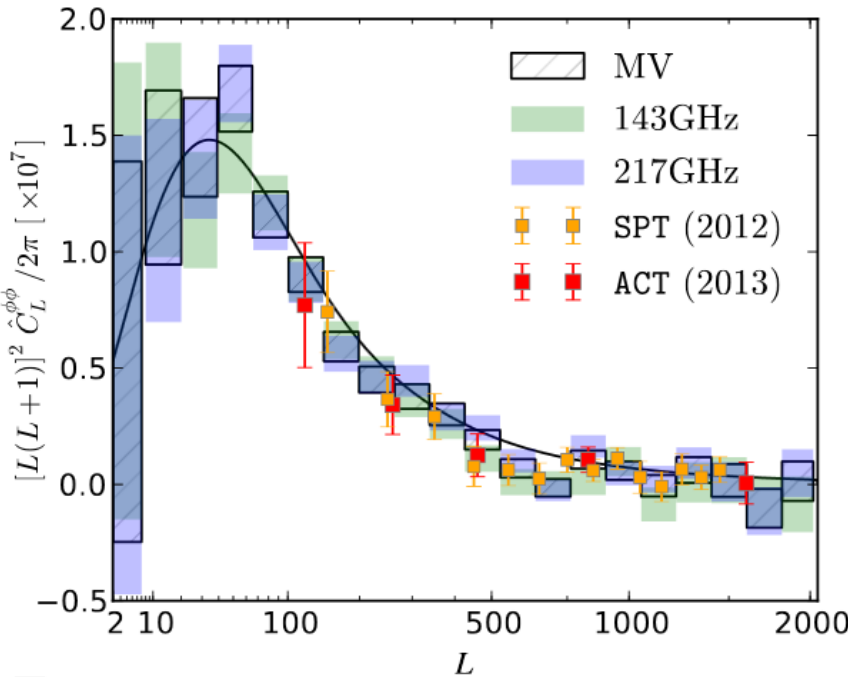
Sur-densités

Vides

Au hasard

Flèches: déflexions des lentilles gravitationnelles

Cisaillement du FCM et grandes structures

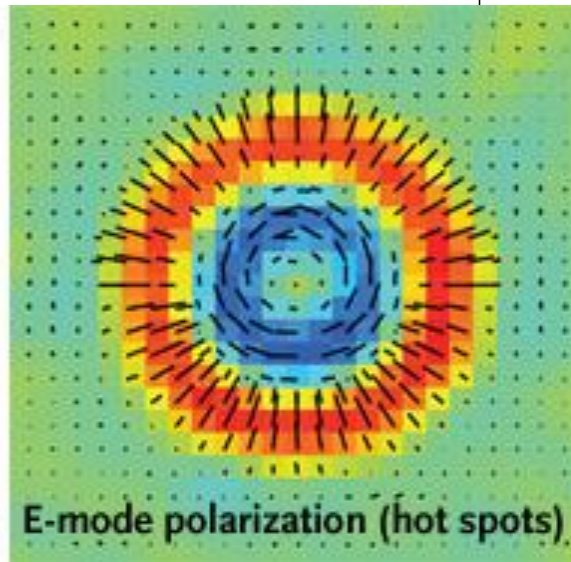
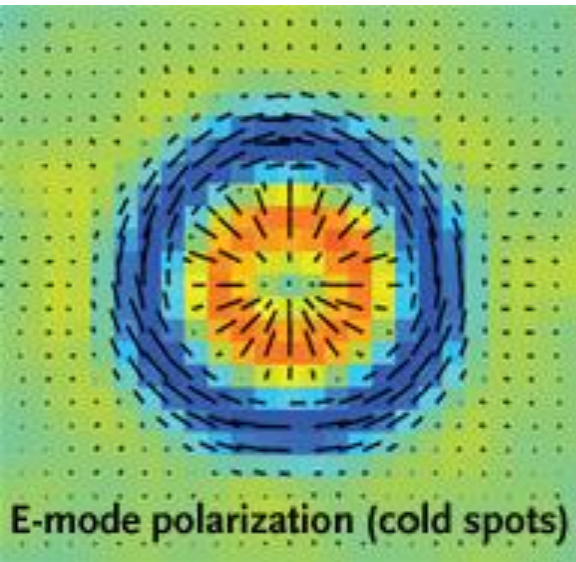
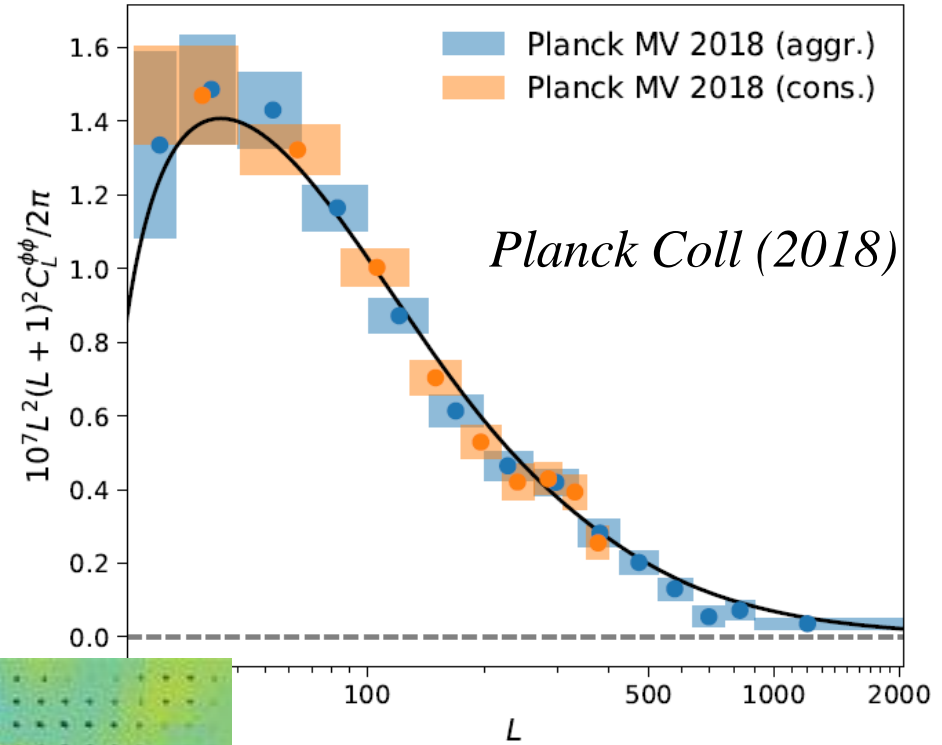
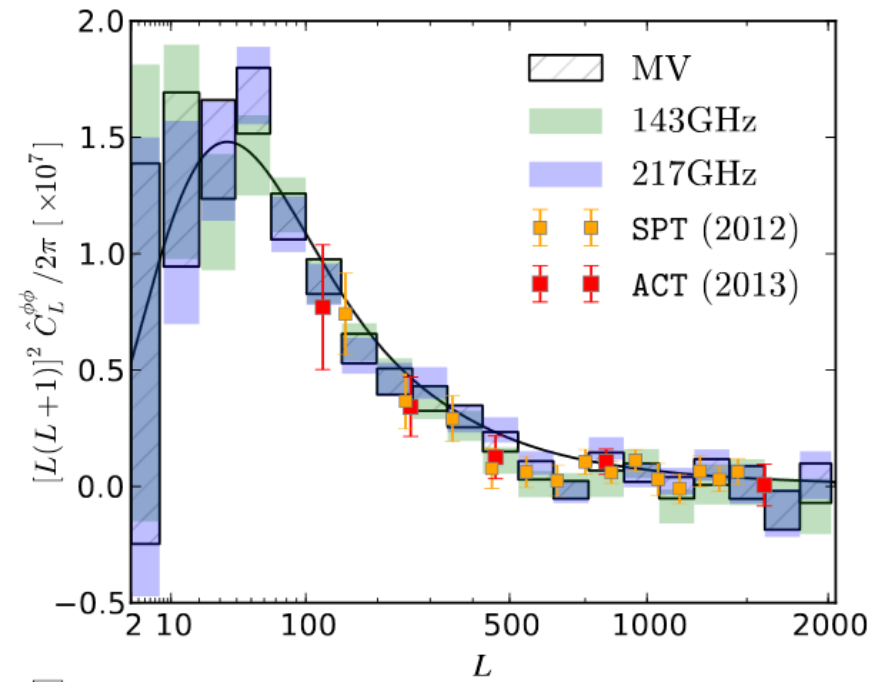


Mesure de la courbure

Contrainte Amplitude σ_8

Corrélation avec les grandes Structures sur la ligne de visée

Cisaillement du FCM



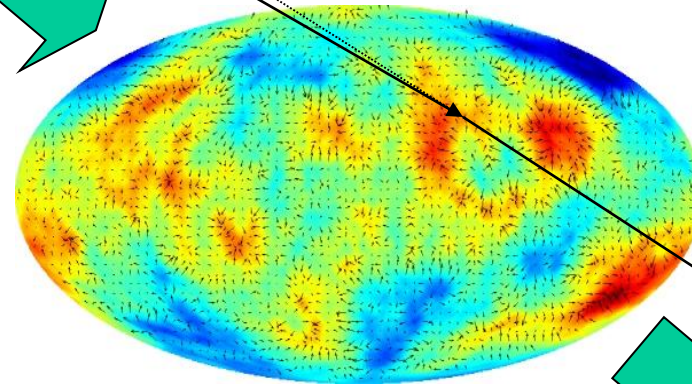
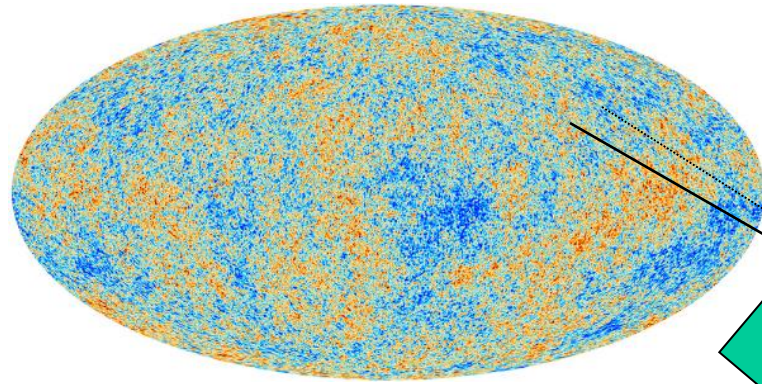
Planck: mode E,
empilement de 10^4 points
froids et chauds
→ Bon accord avec
 Λ CDM

Cisaillement du FCM et Energie noire

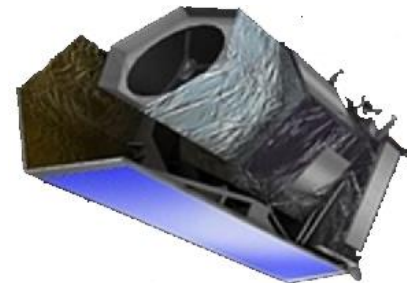
Le plan source est la dernière surface de diffusion, à $z \sim 1000$,

La probabilité de lentille est max pour la moitié de la distance, i.e. $z \sim 2$

La taille des structures $\sim 100 \text{Mpc}$



Observateur



Le redshift $z \sim 2$: trop tôt pour l'énergie noire

Λ commence vers $z \sim 0.5$

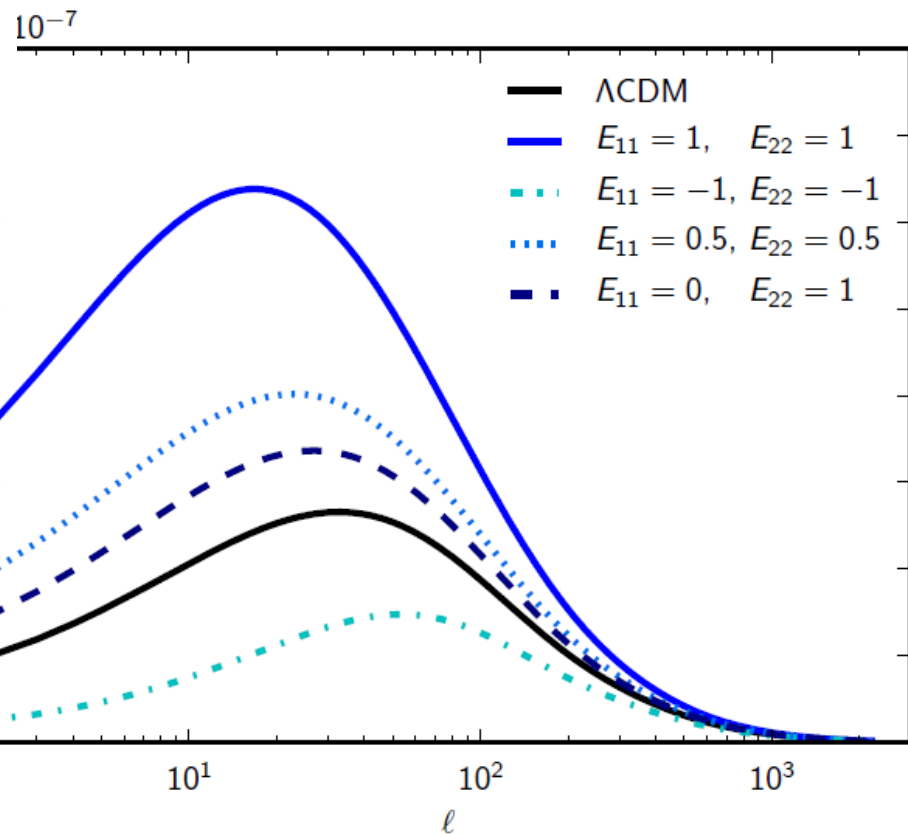
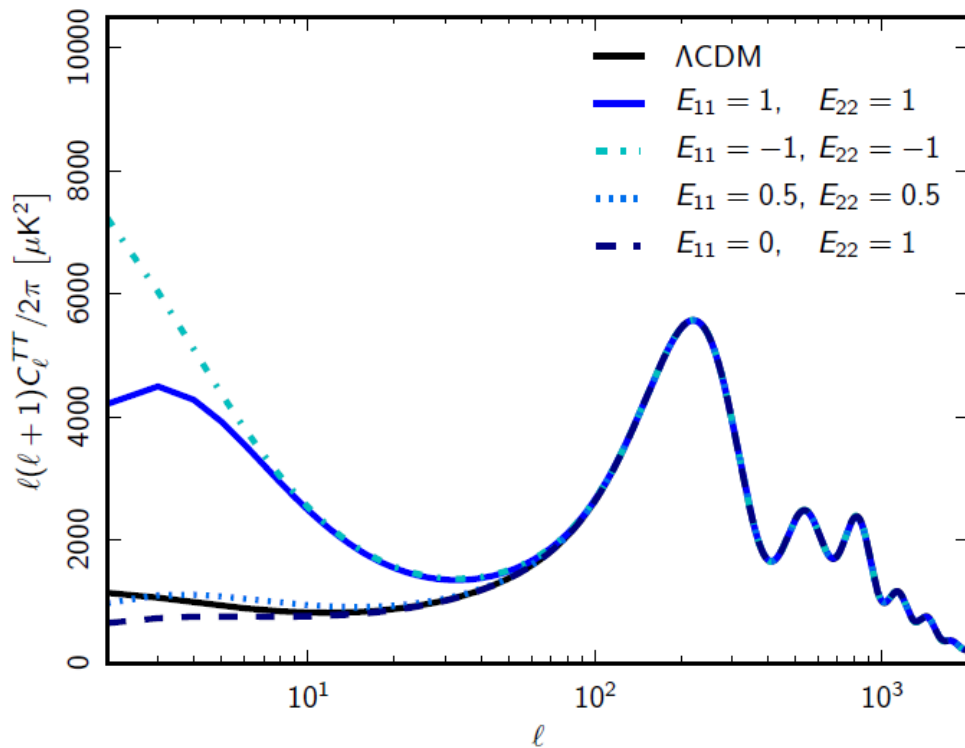
L'énergie sombre peut toutefois être sensible aux grandes échelles $l < 60$

Cisaillement du FCM et gravité modifiée

$$ds^2 = a^2 \left[-(1 + 2\Psi)d\tau^2 + (1 - 2\Phi)dx^2 \right]$$

$\Phi - \Psi =$ glissement

Gravitationnel, ou $\eta = \Phi/\Psi$



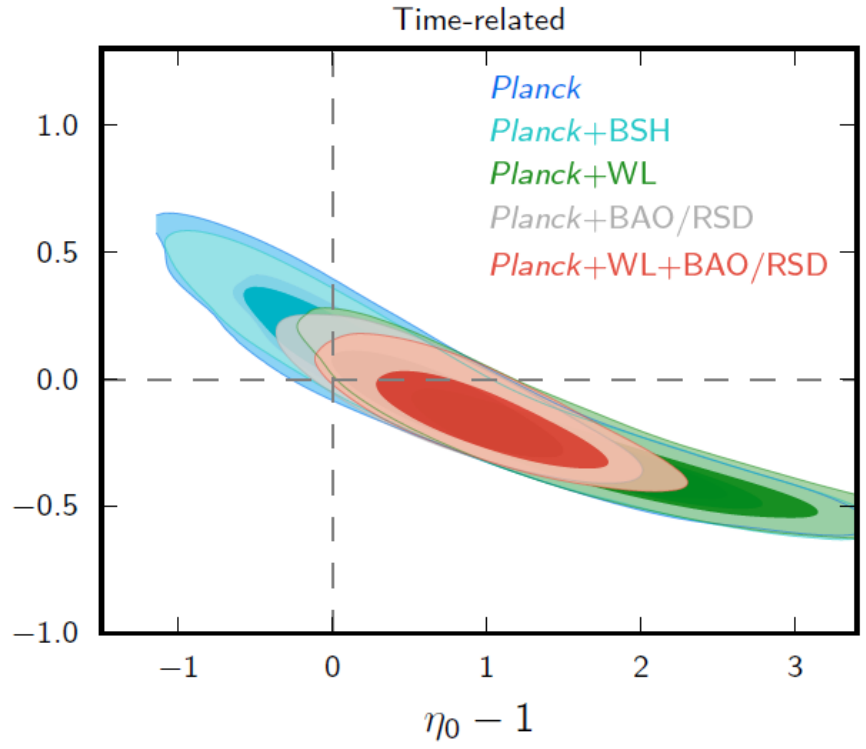
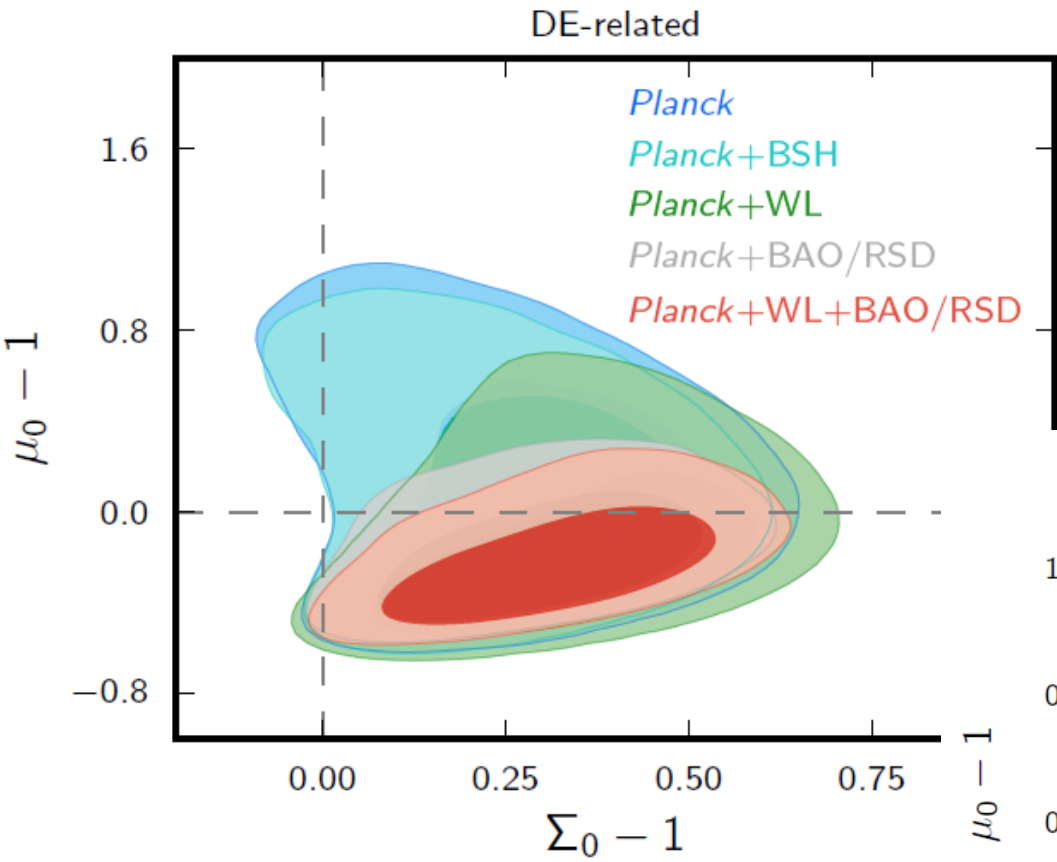
$$-k^2 \Phi = 4\pi G a^2 Q(a, k) \rho \Delta$$

Idem $\mu(a, k)$ pour Ψ

Et id $\Sigma(a, k)$ pour $\Psi + \Phi$

Cisaillement du FCM: diagnostics gravité

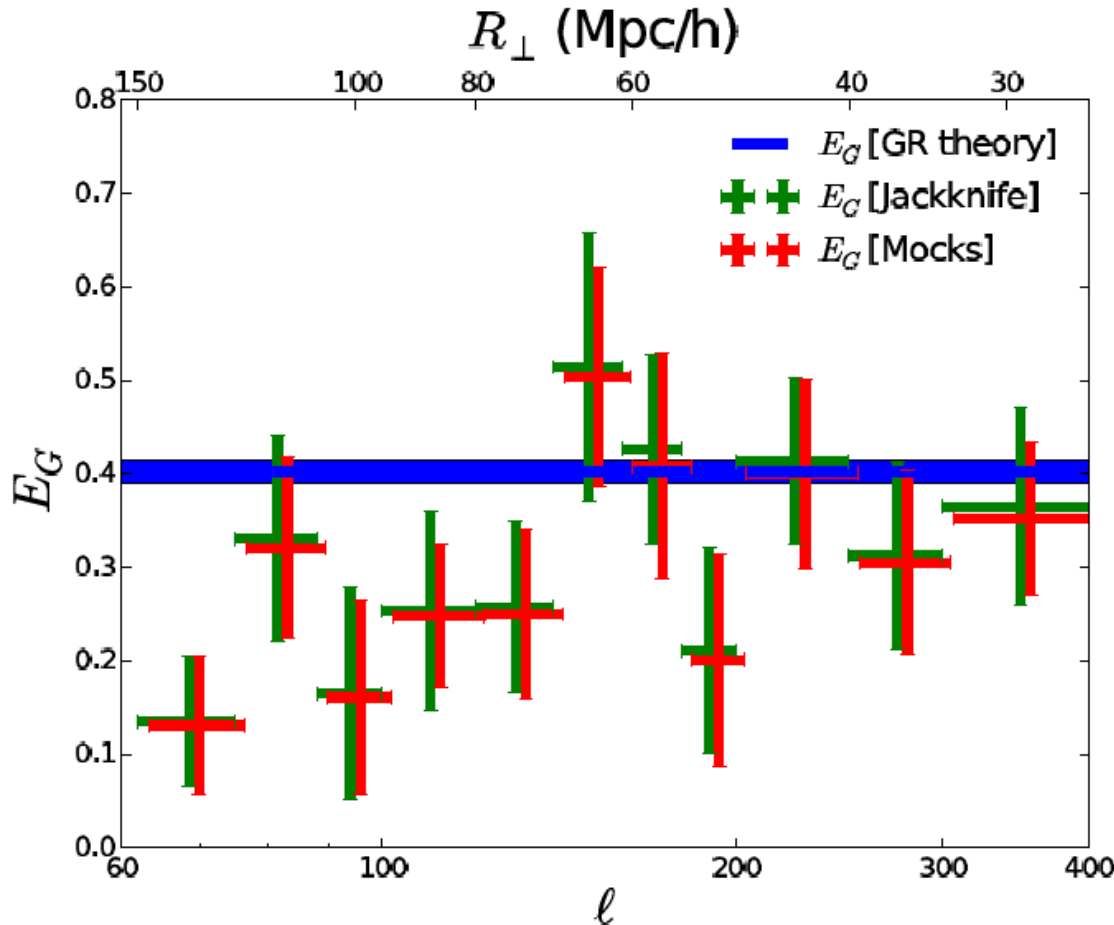
Trois effets
Lissage des pics acoustiques
Non-gaussianités
Création de mode-B



$\mu_0 = \Sigma_0 = \eta_0 = 1$ pour GR

Tests Cisaillement du FCM +SDSS

Indépendant du biais



$$E_G = \Omega_m(0) / f(z)$$

Fonction de croissance

$$f(z) = \Omega_m(z)^\gamma$$

$\gamma = 0.55$ pour GR

Données: fonctions de corrélation CMASS (RSD) +FCM lensing

Écarts à GR au bas l

Echelles > 80 Mpc

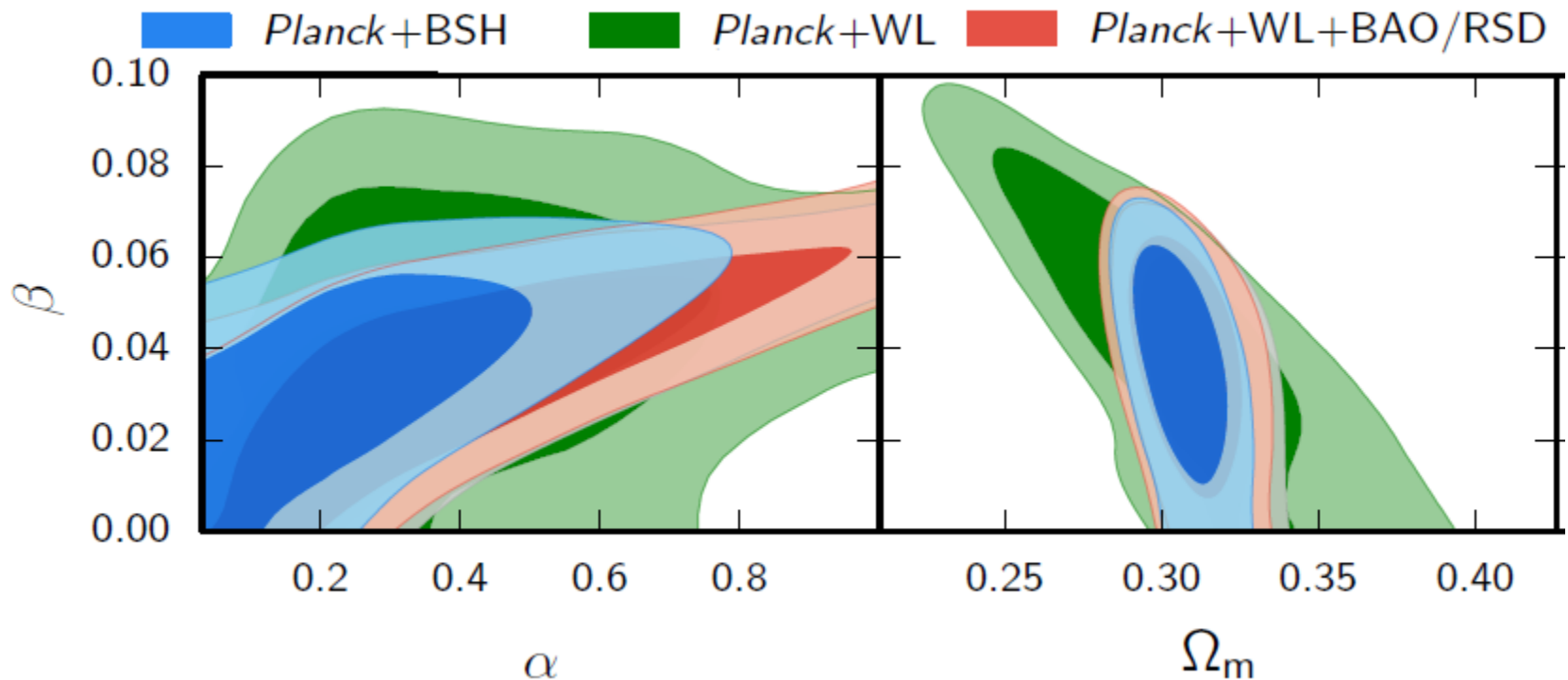
Futur: intensité mapping avec SKA

Pullen et al 2016

Cisaillement du FCM, DE couplée

5^{ème} force, couplant l'énergie noire à la matière noire (mais pas les baryons), $G_{\text{eff}} = G (1+\beta^2)$

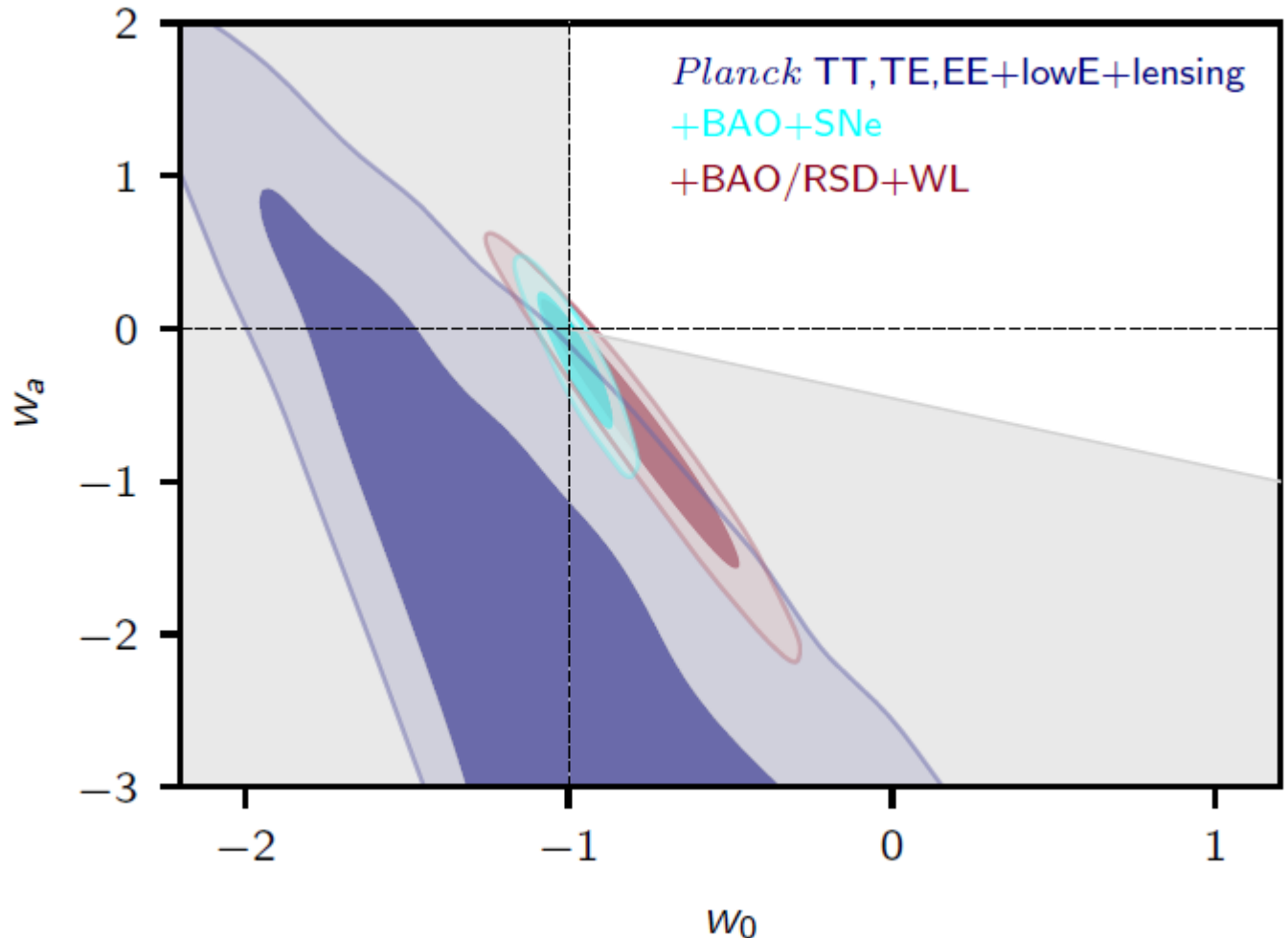
$P = w \rho$, avec $w = -2/(\alpha+2)$



Cisaillement du FCM et énergie noire

Energie noire $w = w_0 + (1-a) w_a$

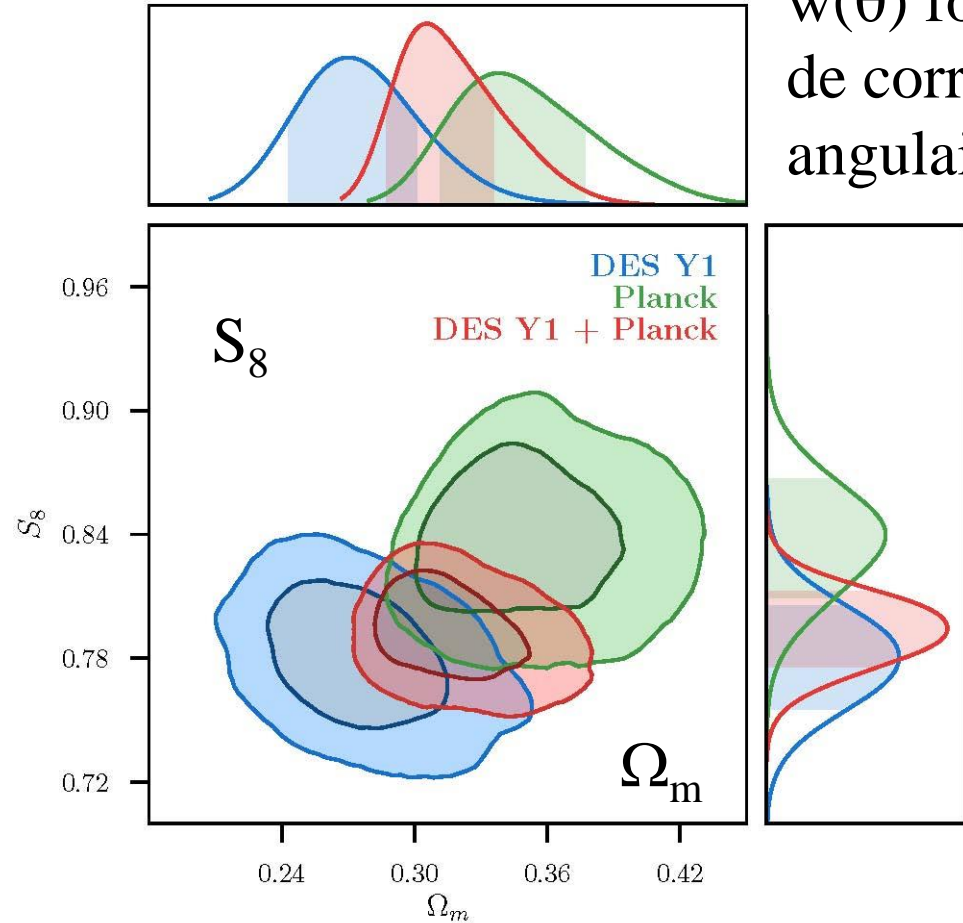
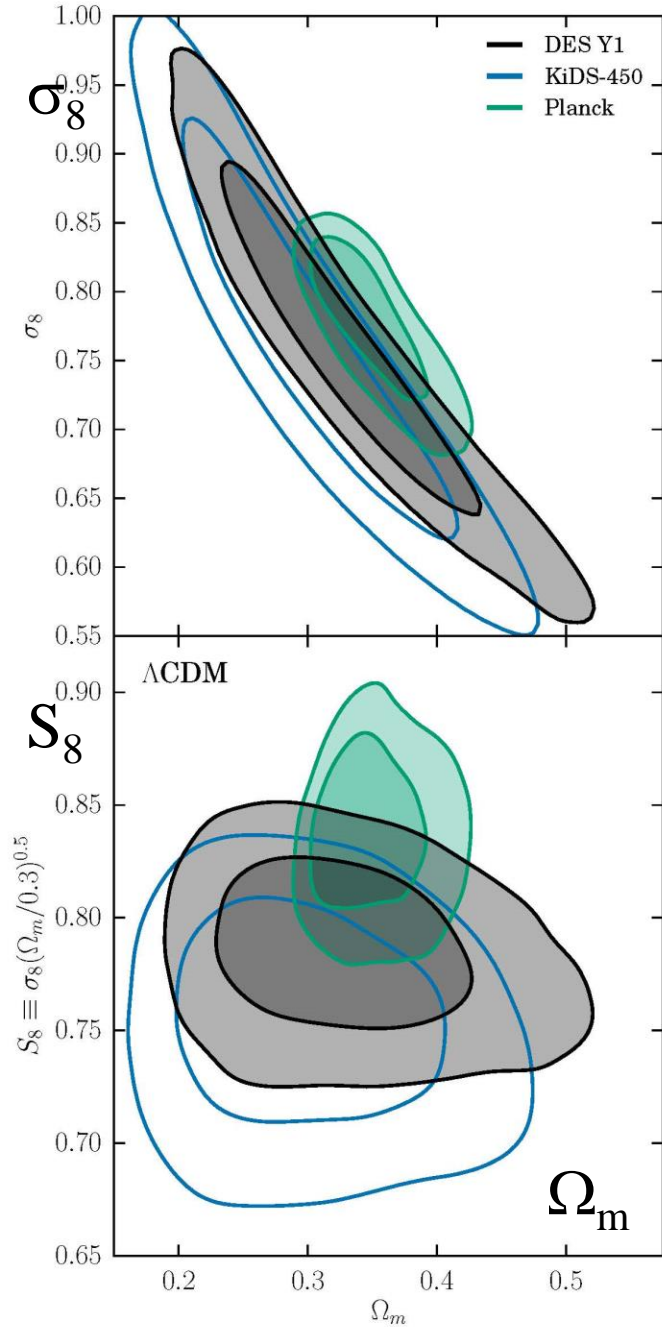
Planck en désaccord avec les autres diagnostics des grandes structures



DES: Résultats An 1 (2017)

Univers Plat avec $w_X = -1$ comme hypothèse

$w(\theta)$ fonction
de corrélation
angulaire



Gauche: Contraintes cisaillement (*Troxel et al. 2017*)

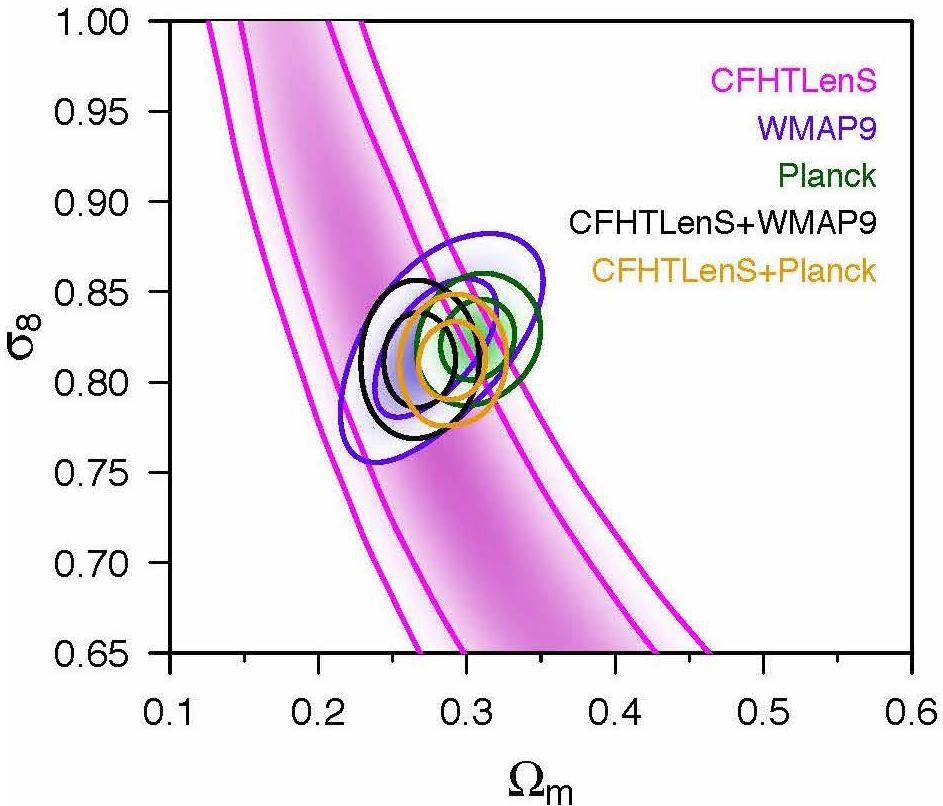
Droite: Contraintes des 3 traceurs combinés

(ξ_{\pm} , $w(\theta) + \gamma_t$) de DES Y1 (*Abbott et al. 2017*)

ξ_{\pm} , γ_t : lentilles

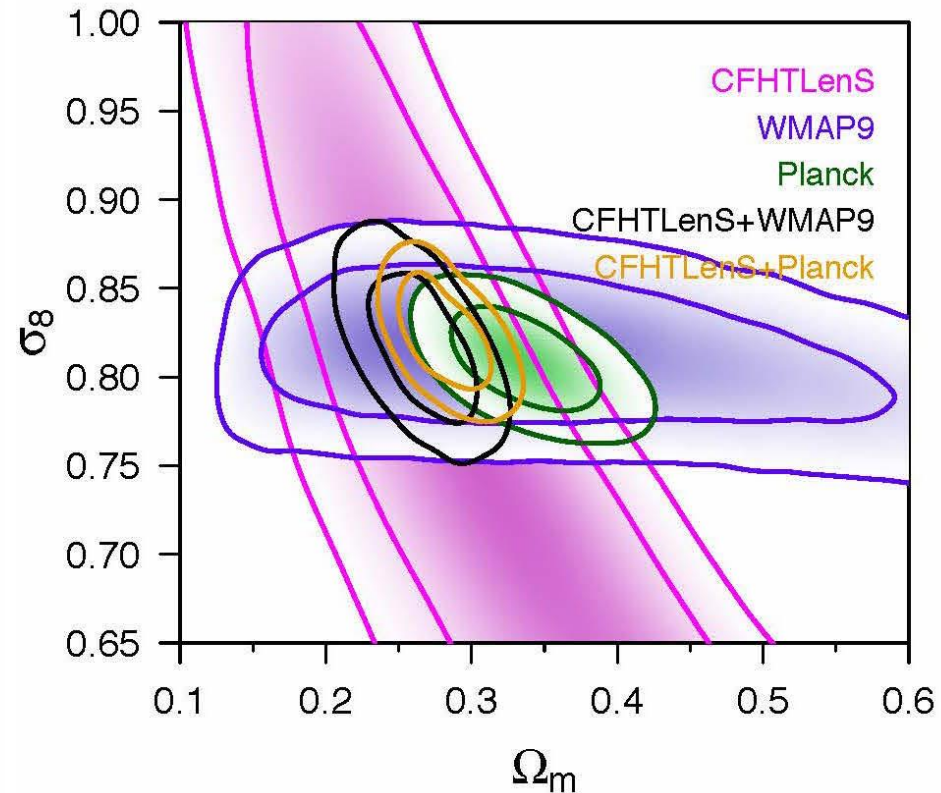
Effet de la courbure de l'Univers

Univers Plat



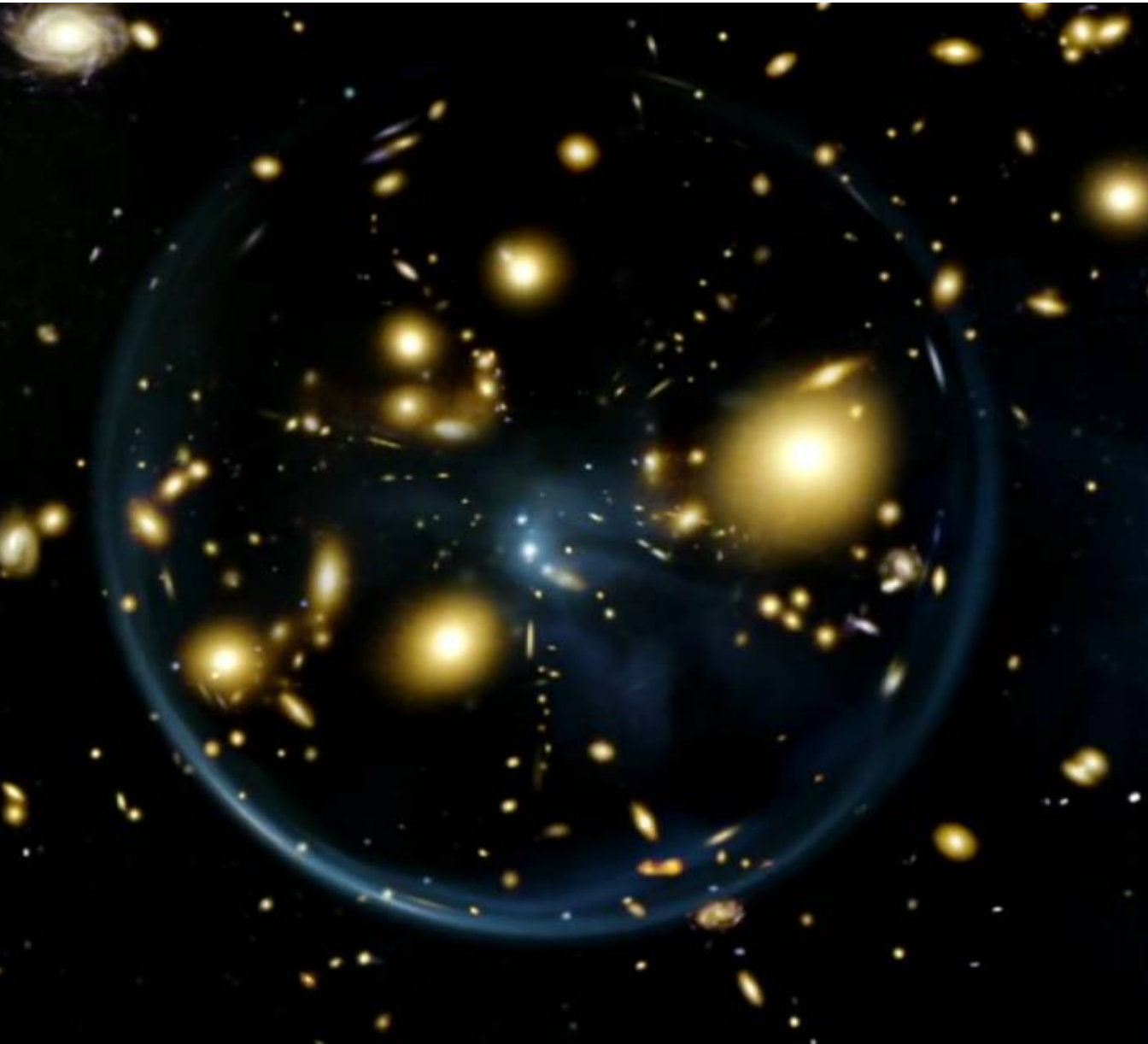
Résultats CFHTLenS

Univers courbe



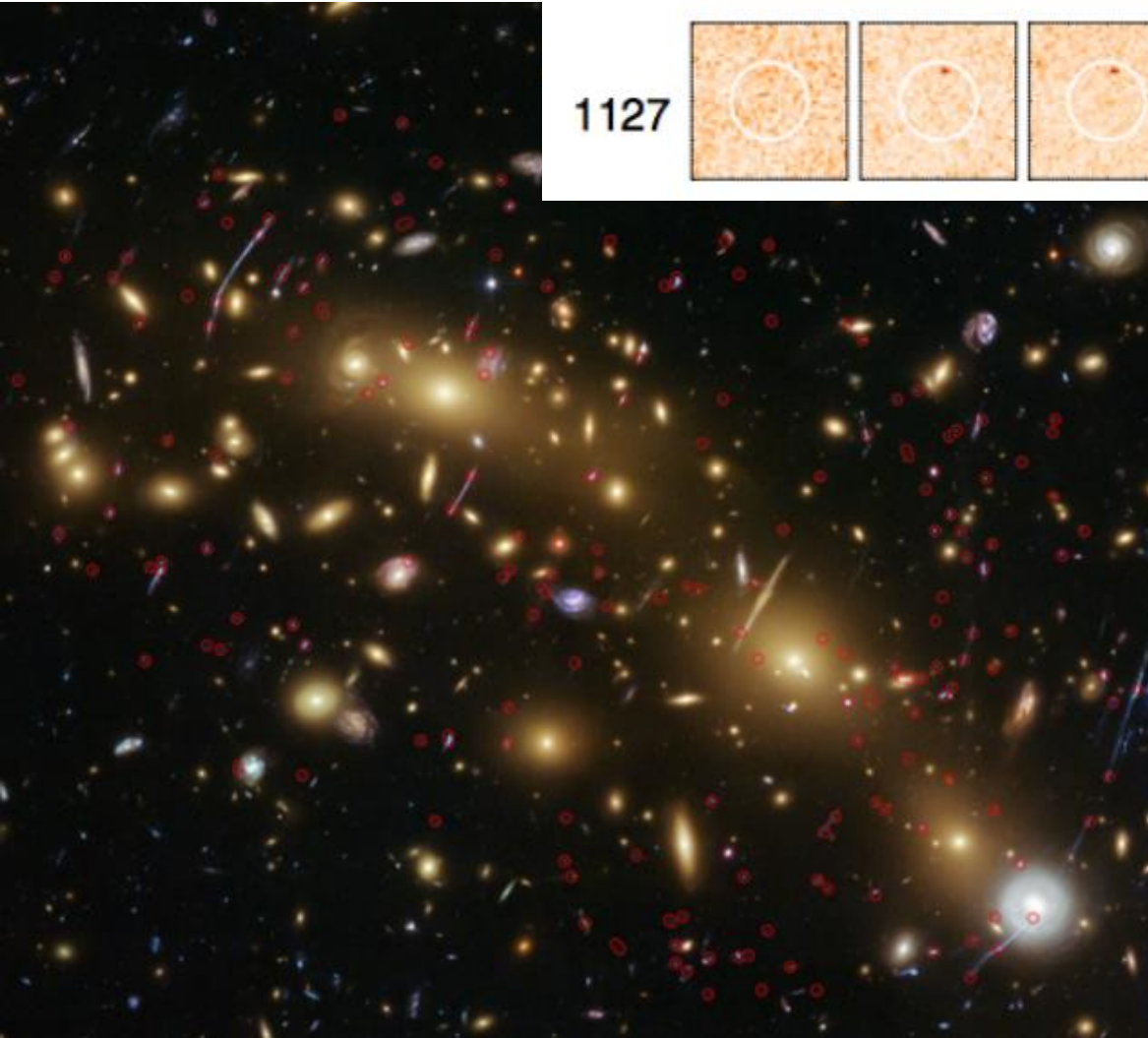
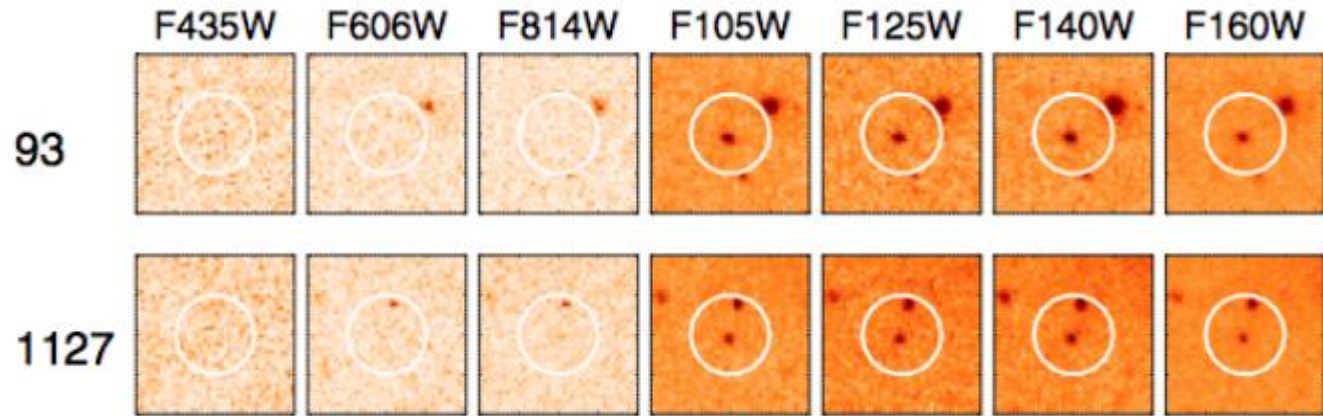
Fu et al. (2014)

Galaxies à grand redshift



Ce que l'on connaît aujourd'hui sur les galaxies à $z > 6$ provient en grande partie des lentilles

Moyens de sélection



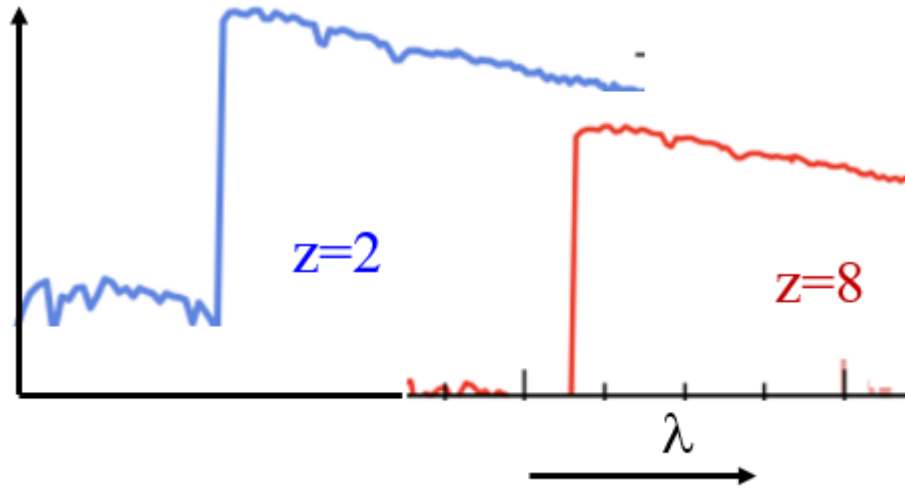
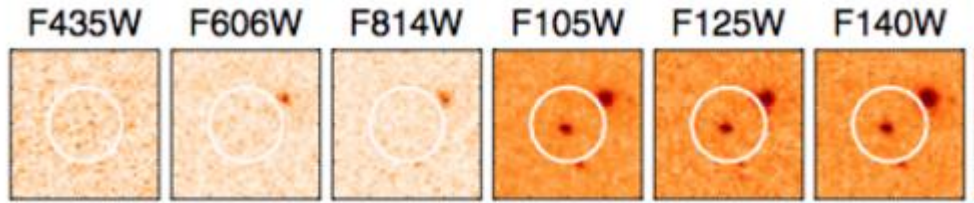
Se servir des amas proches
comme télescope

Programme clé au HST
« Frontier Fields »

Sélection d'objets par le
Lyman-break

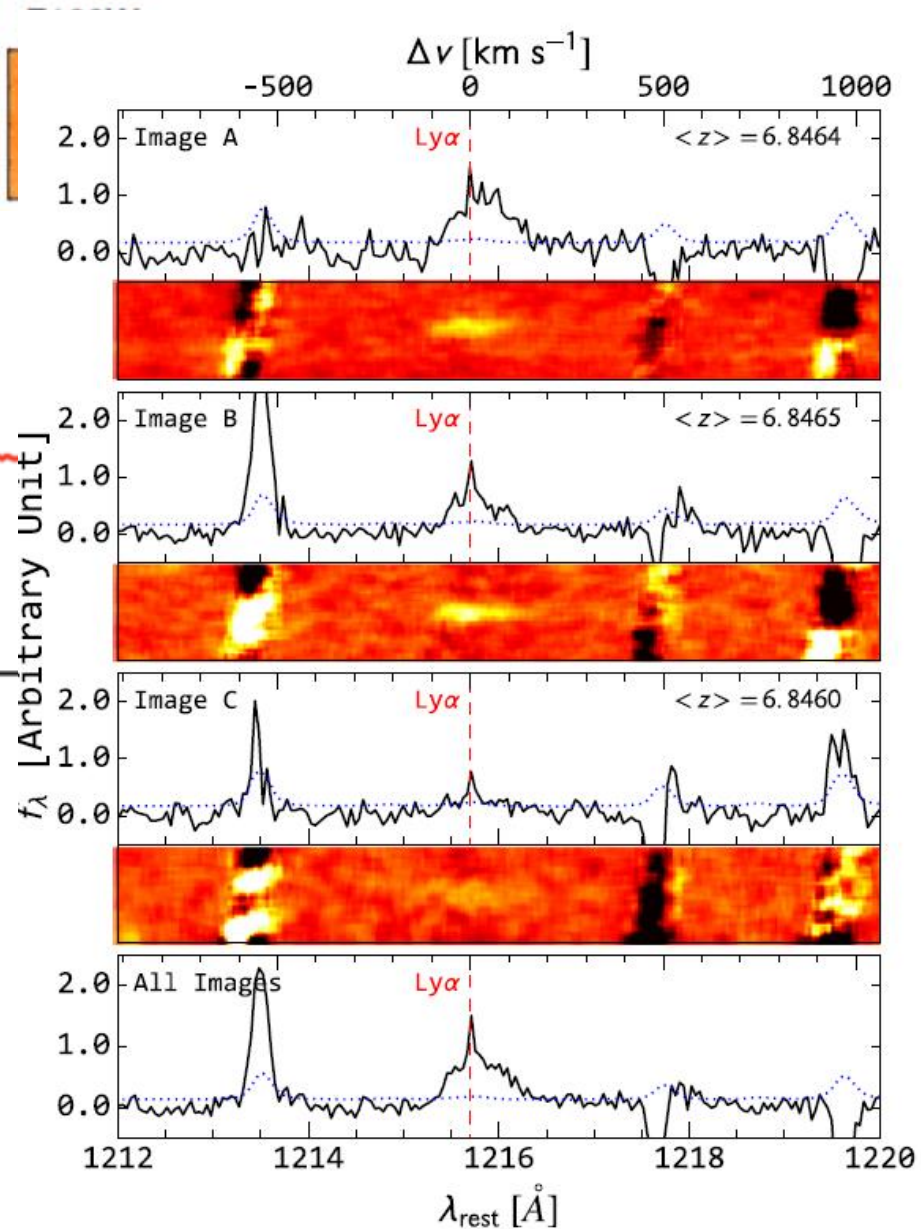
Suivi des candidats

Huang et al 2016
 $z \sim 7$, amplification 11, 5, 3



Spectroscopie Ly α
Recherche de plusieurs
images possibles

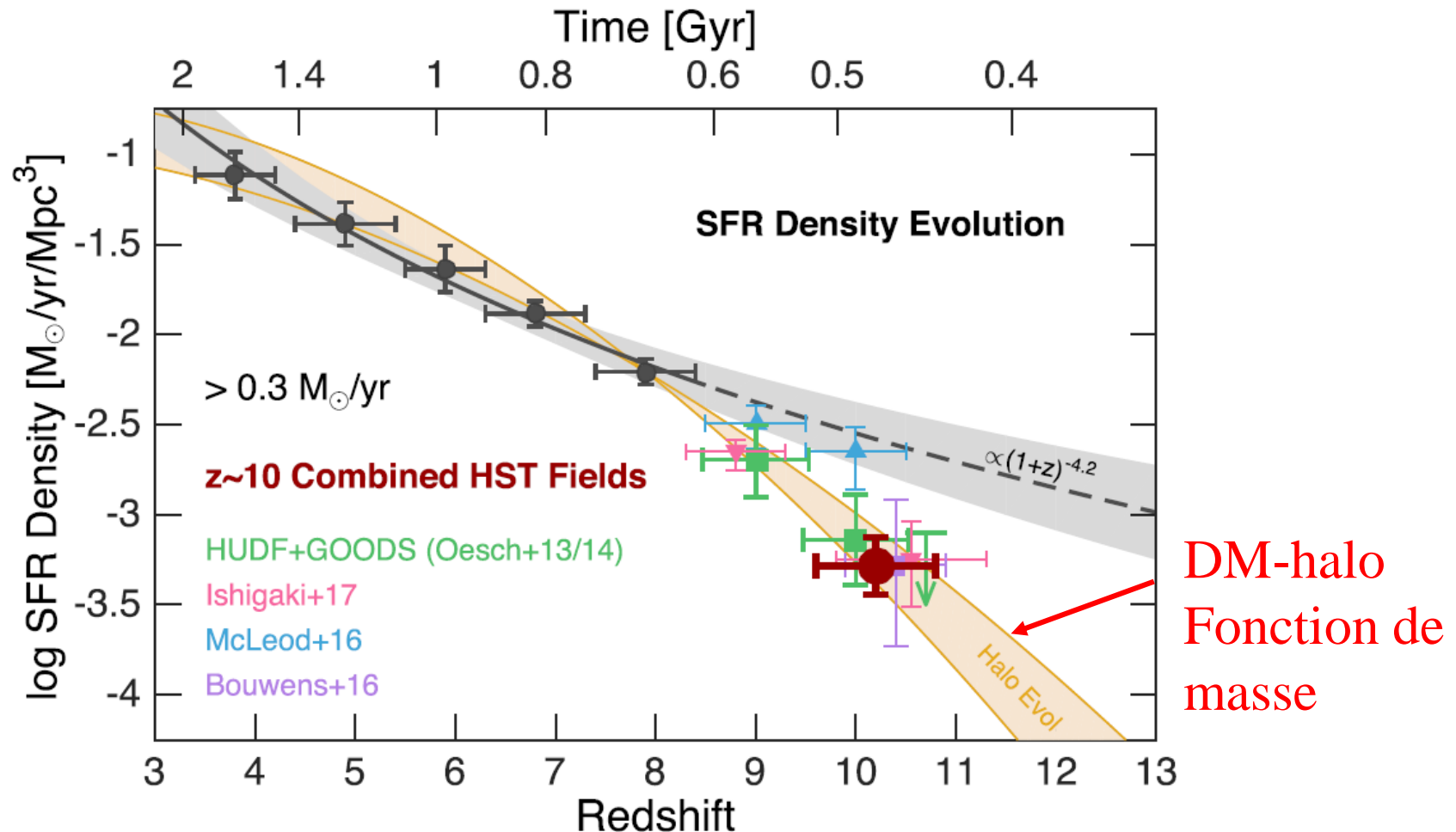
→ $z=7-8$, époque de la réionisation



Evolution de la densité lumineuse

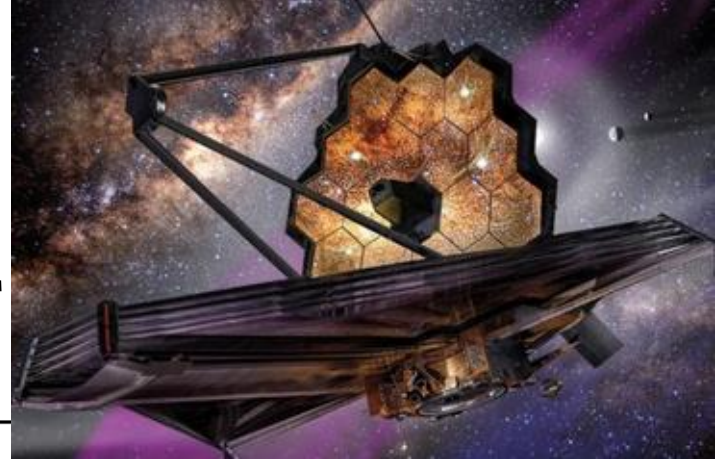
Oesch et al 2018

Evolution plus rapide après $z=8$

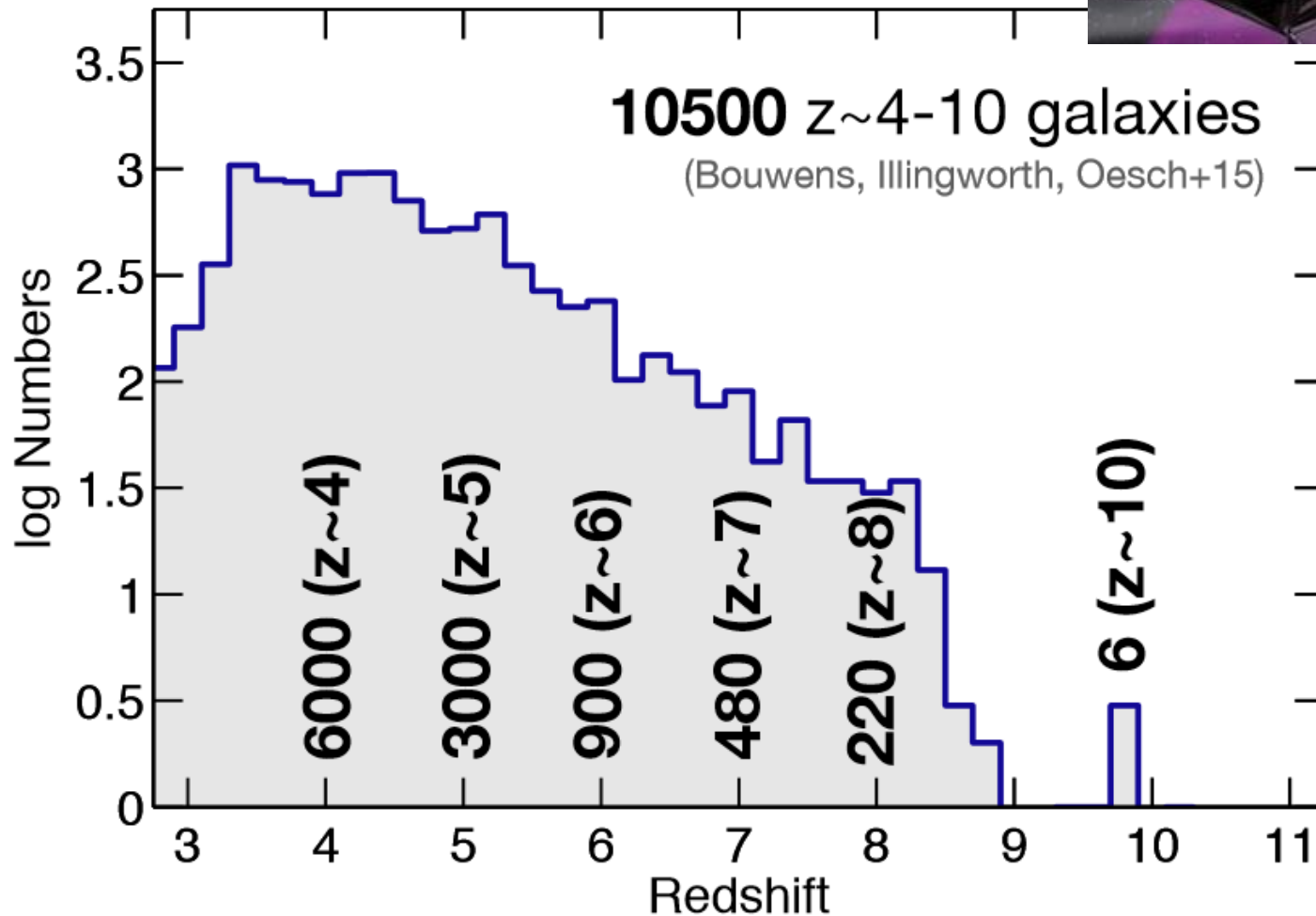


Il existe des modèles pour l'expliquer (mais grandes incertitudes)

Où en sommes-nous?



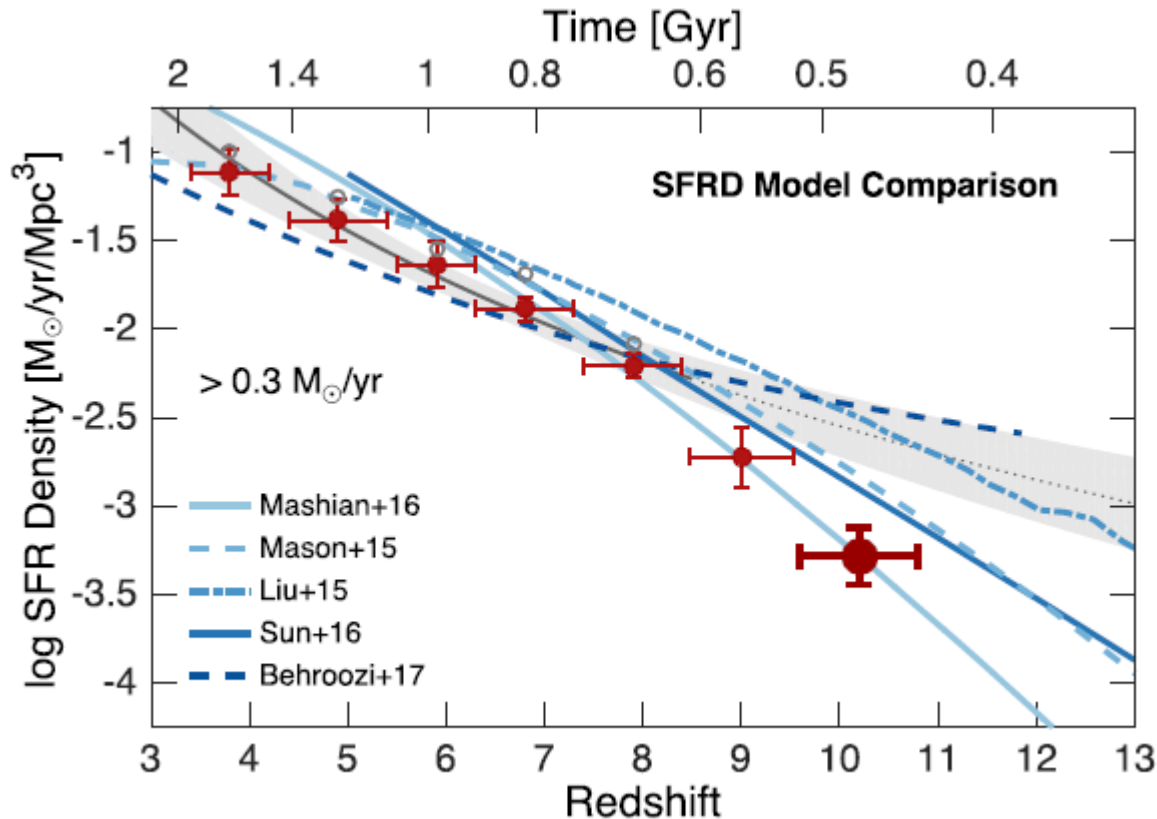
HST UDF, difficile d'aller plus loin → JWST



JWST encore retardé en 2021

Oesch et al 2016

Chute plus rapide que les prévisions des modèles

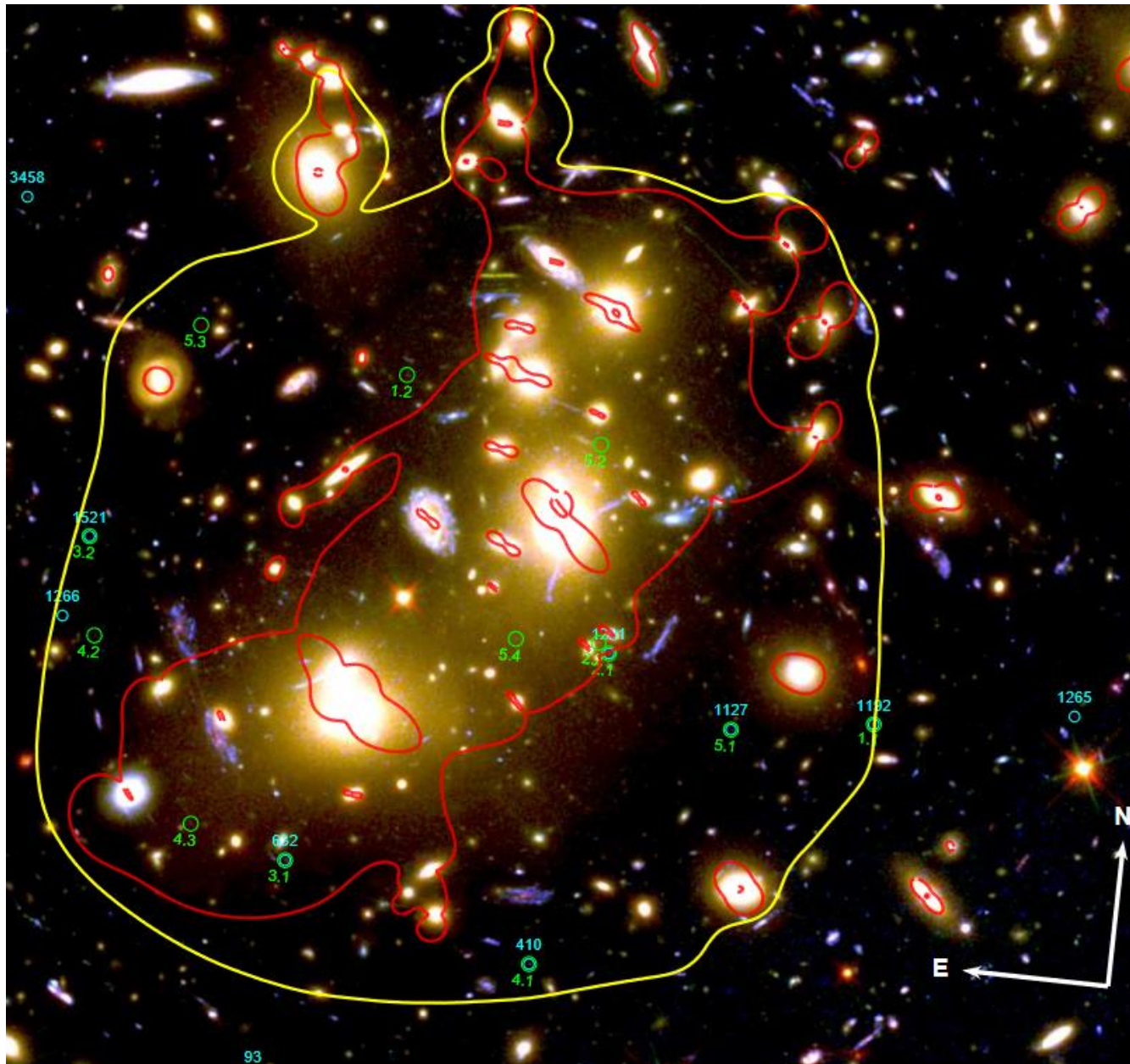


Les modèles dépendent beaucoup du taux de formation d'étoiles du refroidissement du gaz, etc..

Le mieux est de supposer que $\text{SFR}/M_h = \text{cste}$

➔ Contraint la physique des premières galaxies

Abell 2744 (HST Frontier Field)



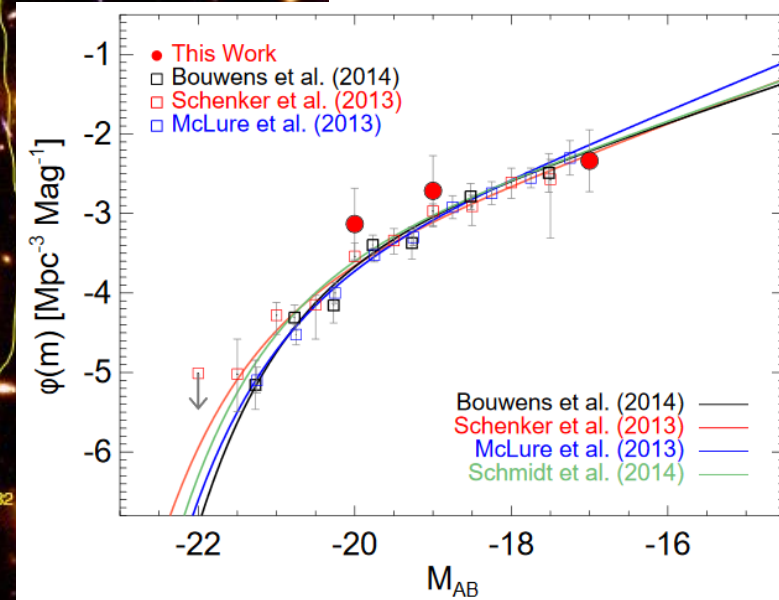
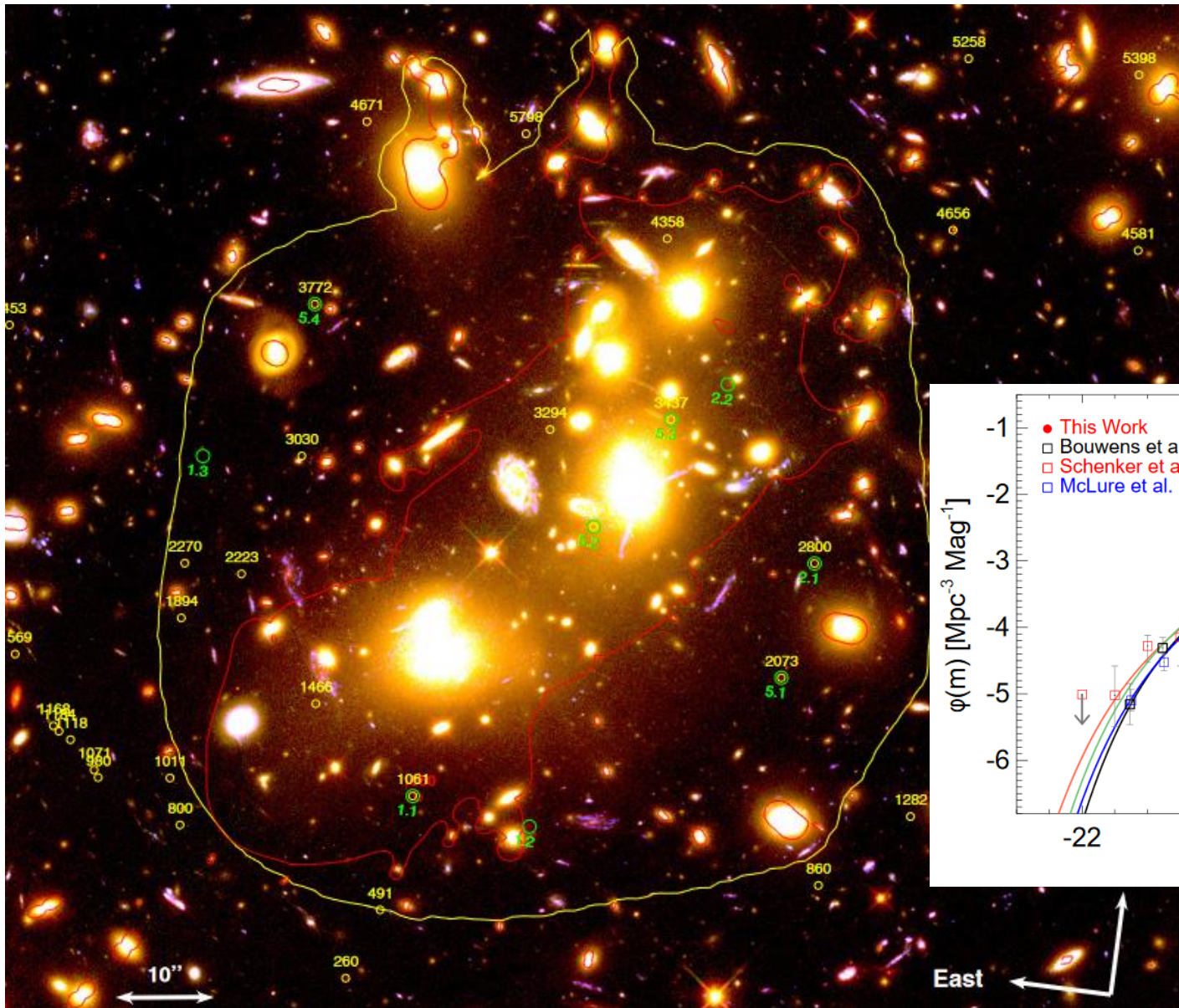
Rouge
ligne critique
pour $z=7$

Jaune: ligne
délimitant
les images
multiples

Atek et al 2014

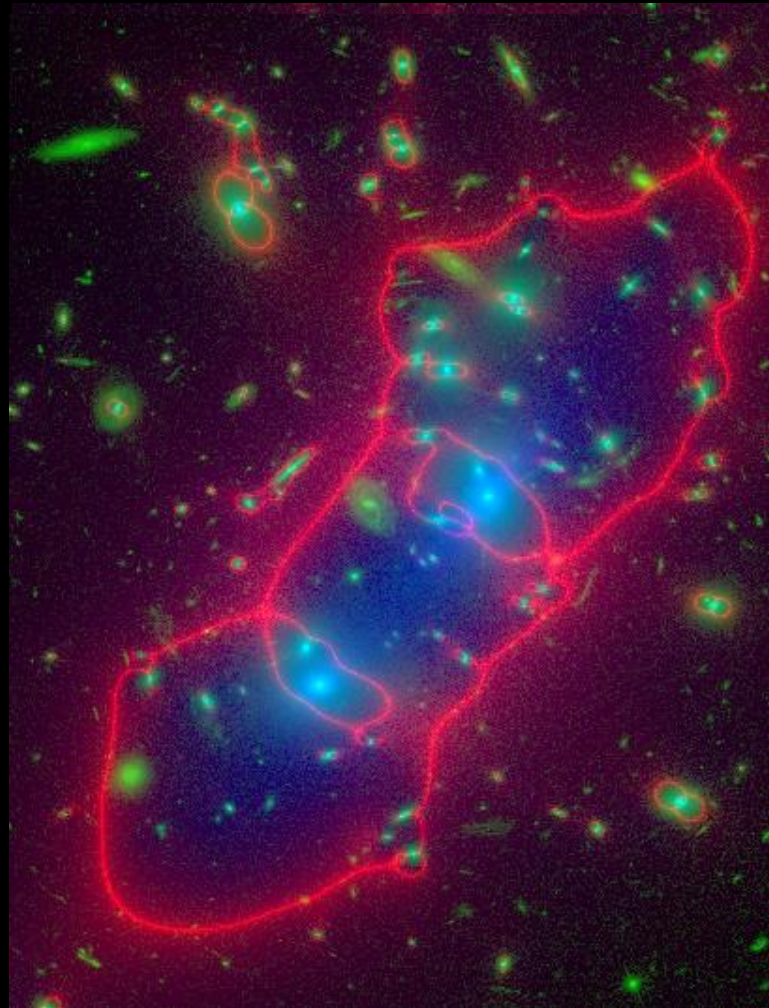
Abell 2744 -- Frontier Field

Jaune $z=7$
Rouge $z=8$
Vert: images multiples



Atek et al 2015

L'interprétation des lentilles est complexe

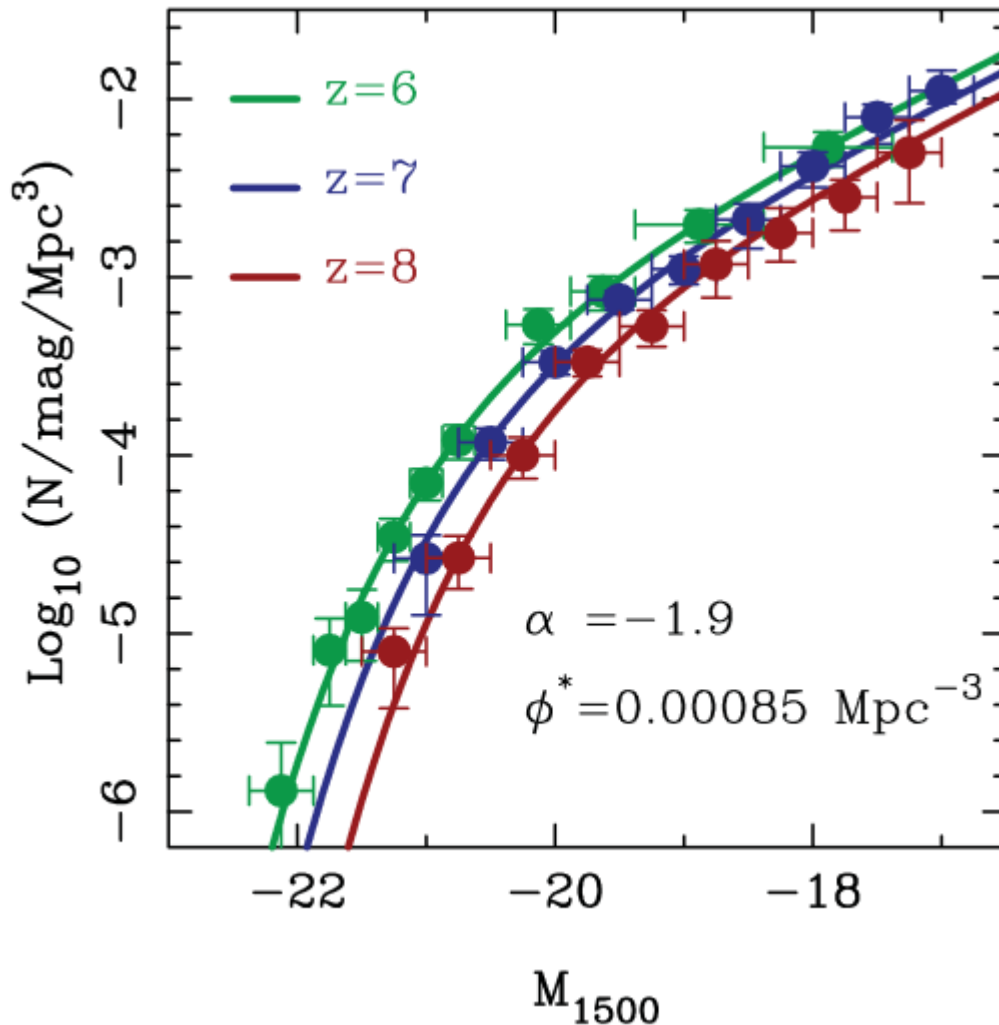


Les points gris
montrent
l'évolution
à $z=8$

Castellano et al 2016

Plusieurs cartes de magnification existent pour Abell 2477

Evolution en densité ou luminosité?



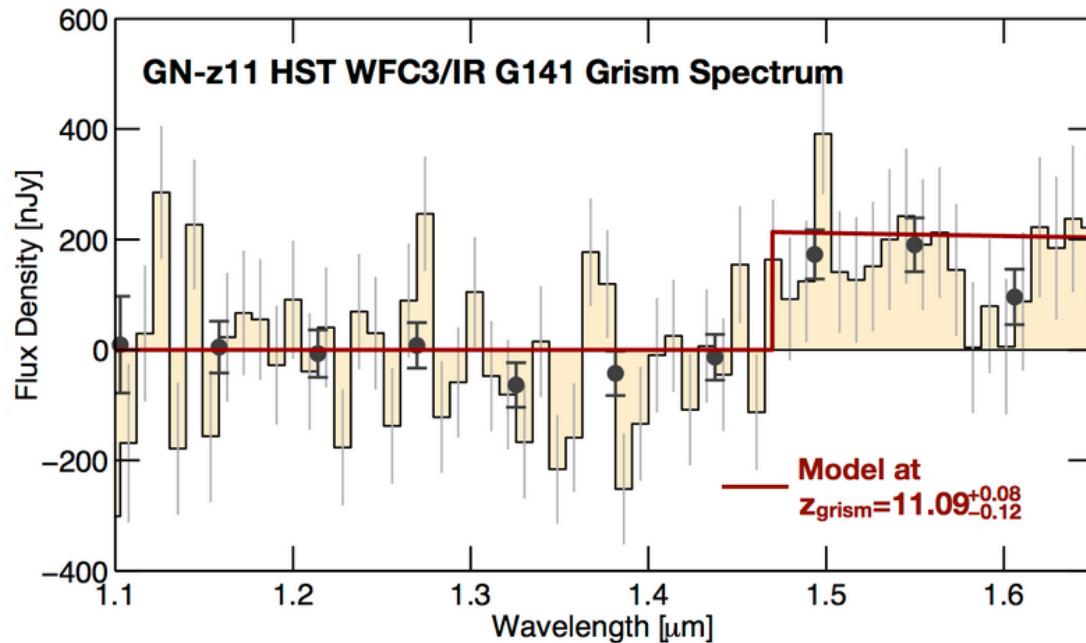
$z > 7$ évolution en densité

$5 < z < 7$ évolution en
Luminosité

Souvent dégénérescence

Objet à $z=11.1$ très surprenant!

400 Myr après le Big-Bang



Masse $10^9 M_{\odot}$

On aurait dû attendre
~ 10-100 fois plus de
surface pour détecter un
si brillant objet

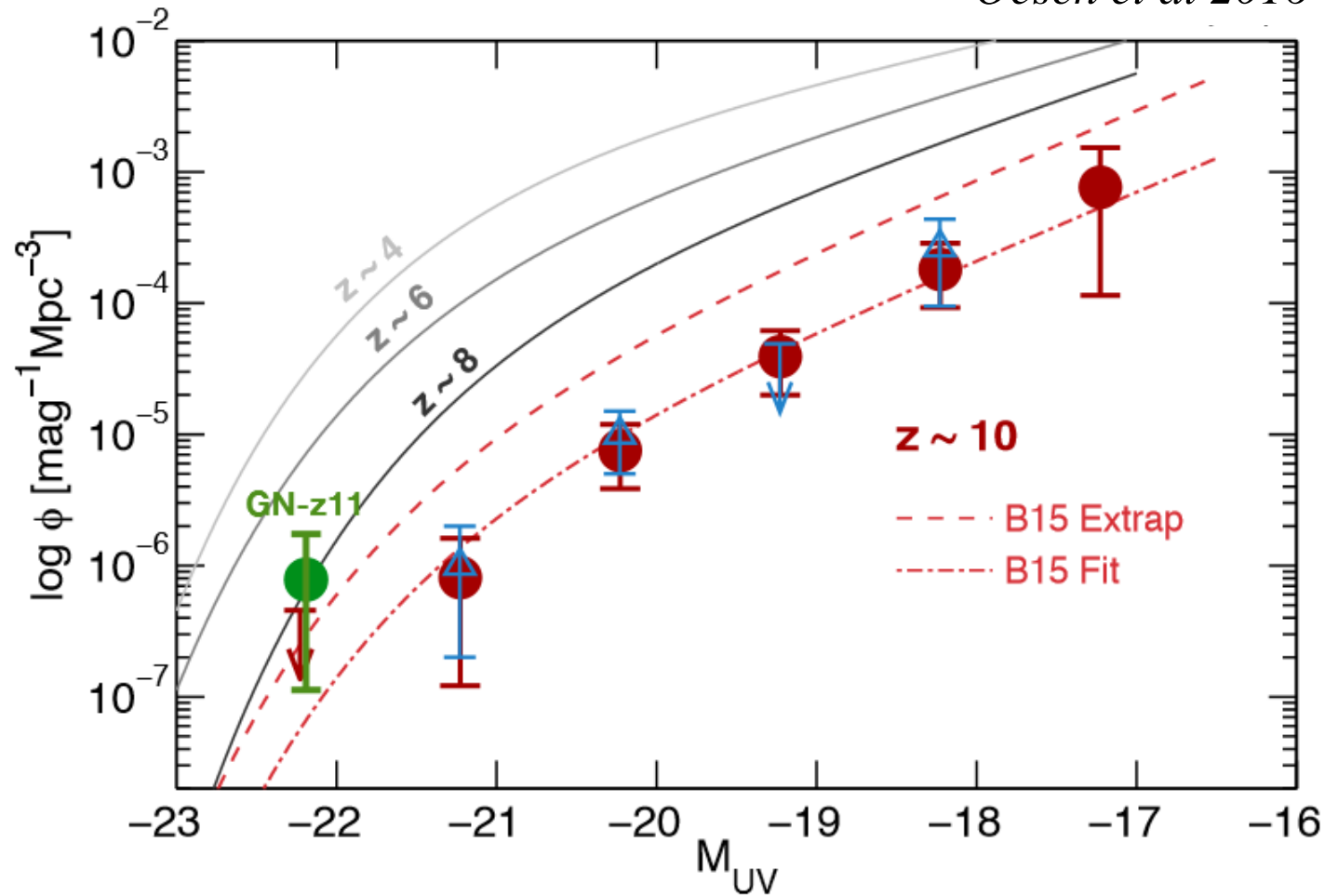
Le z-phot indiquait
10.2 (*Labbe 2008*)

La galaxie la plus brillante à $z > 6$

Détectée dans un survey de seulement $0.2^{\circ 2}$

Produit une distortion dans la fonction de Luminosité

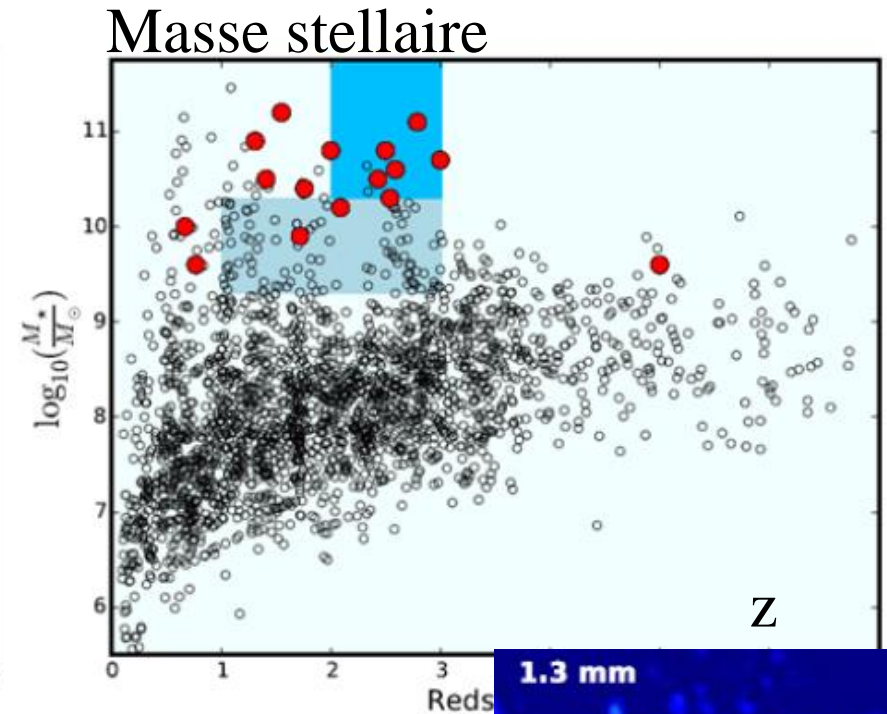
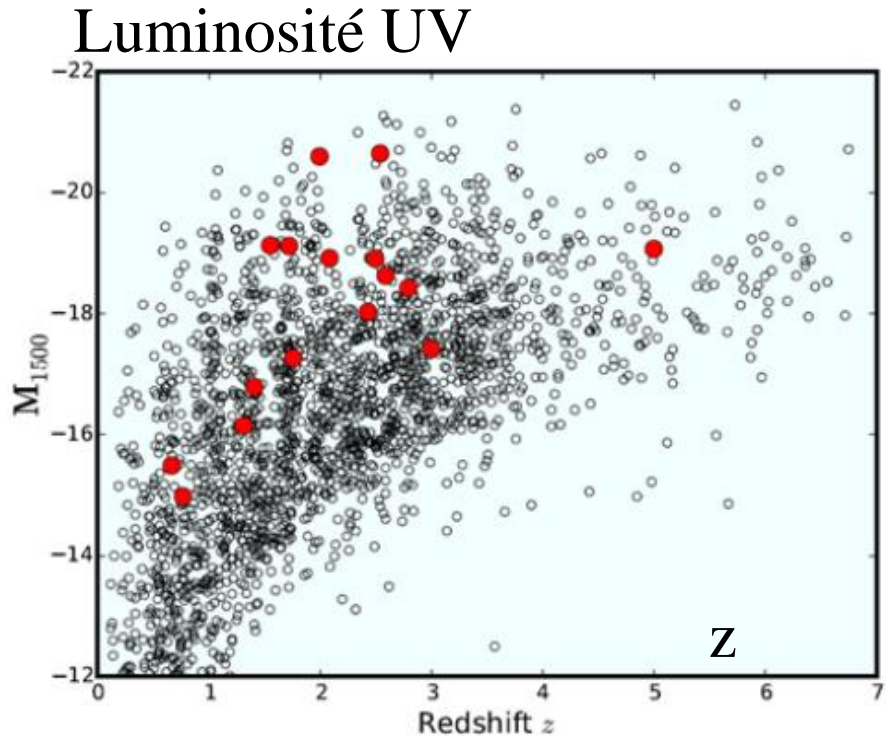
Oesch et al 2016



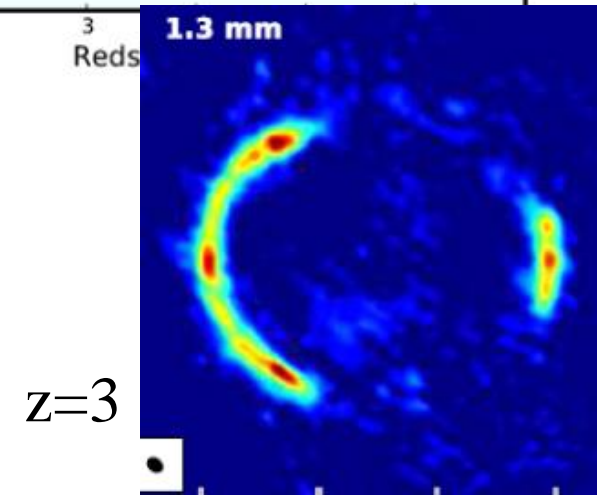
Seulement les galaxies massives sont détectées (plus de poussière)

Surveys avec ALMA

80% des $M > 2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$



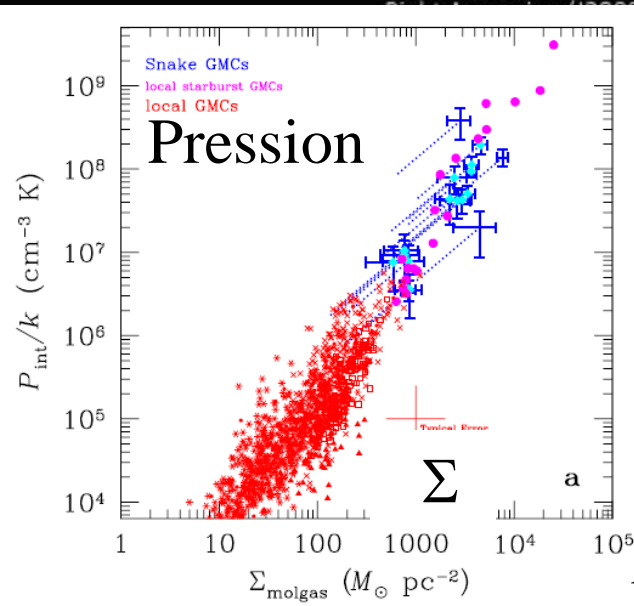
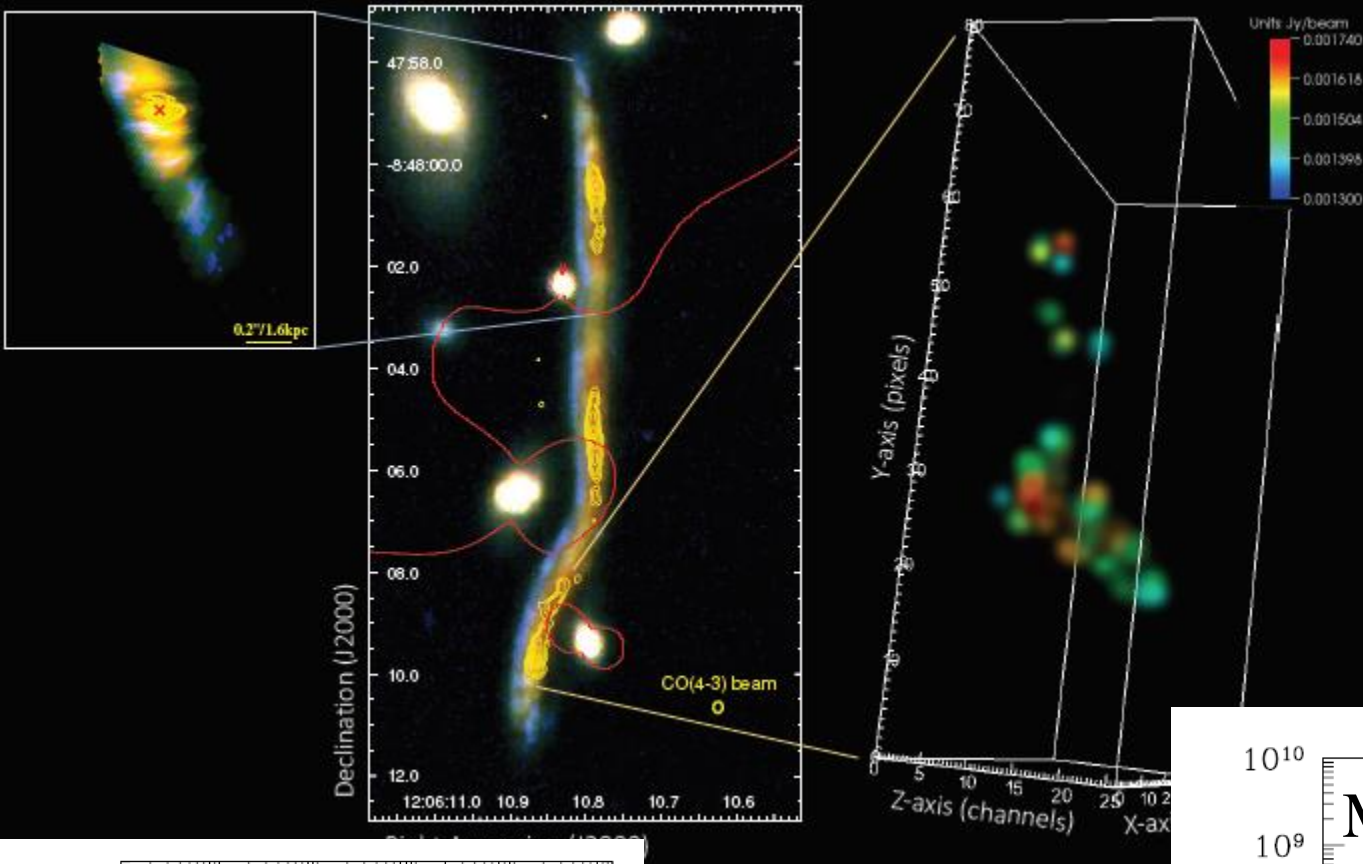
HUDF couvert par un survey large et peu profond (*Dunlop et al 2016*) + des petits plus profonds (*Aravena et al 2016, Bouwens et al 2016*)



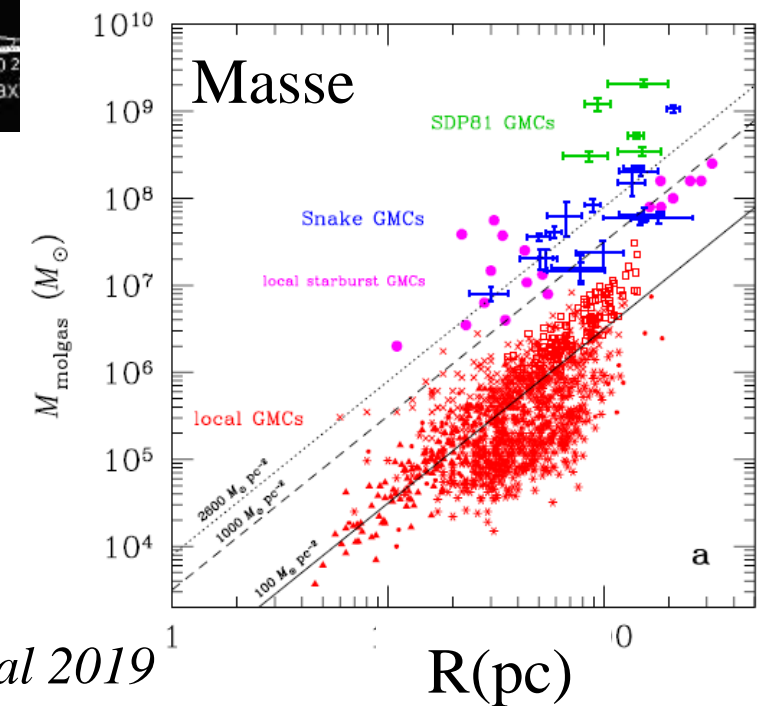
Le serpent

Nuages moléculaires
détectés un par un
grâce à $\mu=10-100$

Evolution avec z



Dessauges-Zavadsky et al 2019



Résumé

MACS J1206.2-0847

→ Cisaillement cosmique– galaxie-galaxie

Obtention de la masse des halos

Masse des amas et biais, Alignement Galaxie-halo

→ Cisaillement du fonds cosmologique

Energie noire: gravité modifiée favorisée?

→ les amas comme télescopes gravitationnels

Physique des galaxies à grand redshift

Nuages moléculaires: évolution avec z

Chute brutale à $z > 8$, → science avec le JWST

SDSS J1038+4849 $z=0.966$

