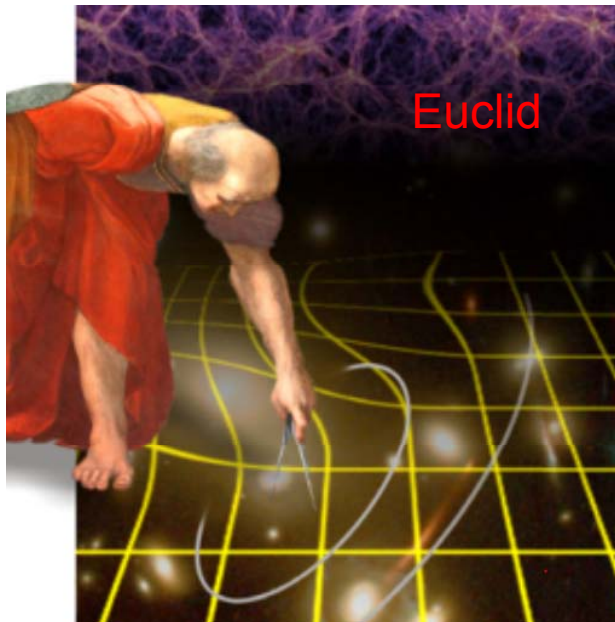




COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —



# Perspectives de solution: instruments futurs



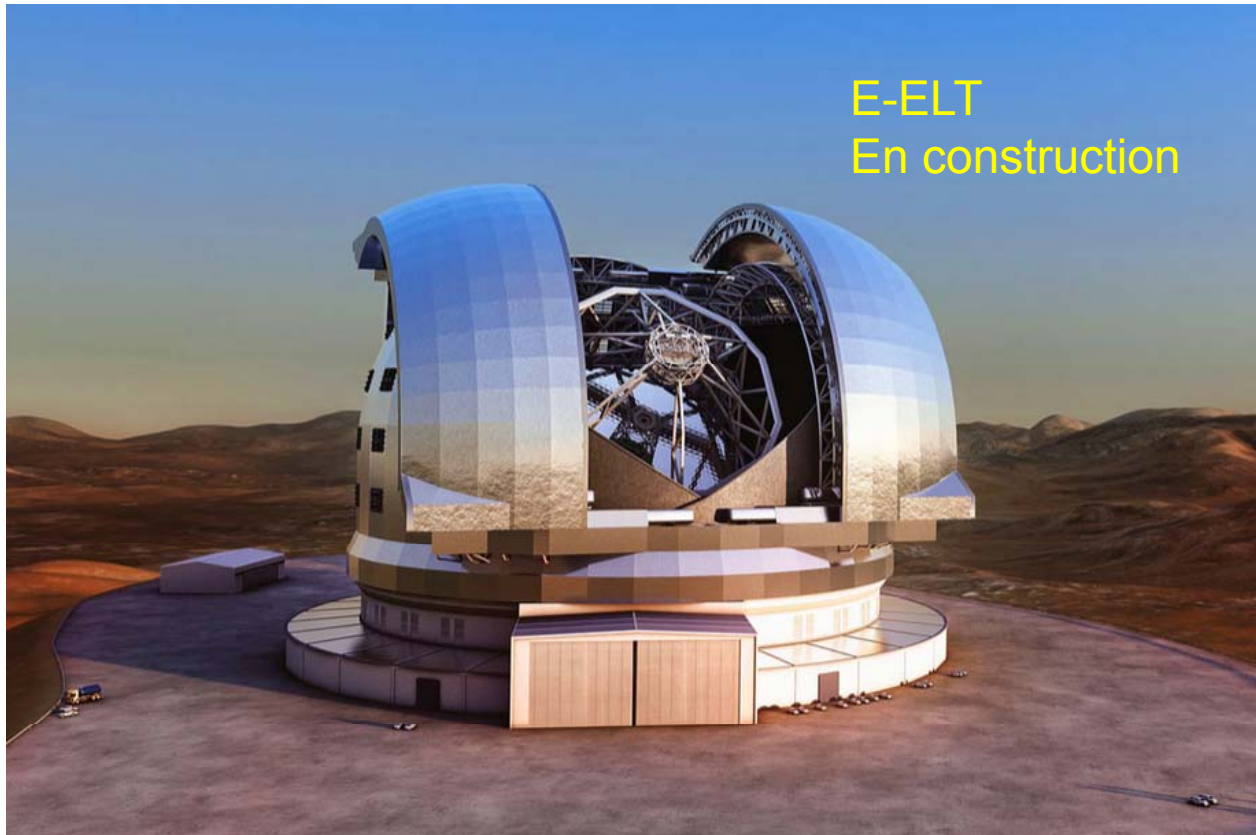
Françoise Combes



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

# Les grands observatoires du futur

E-ELT  
En construction

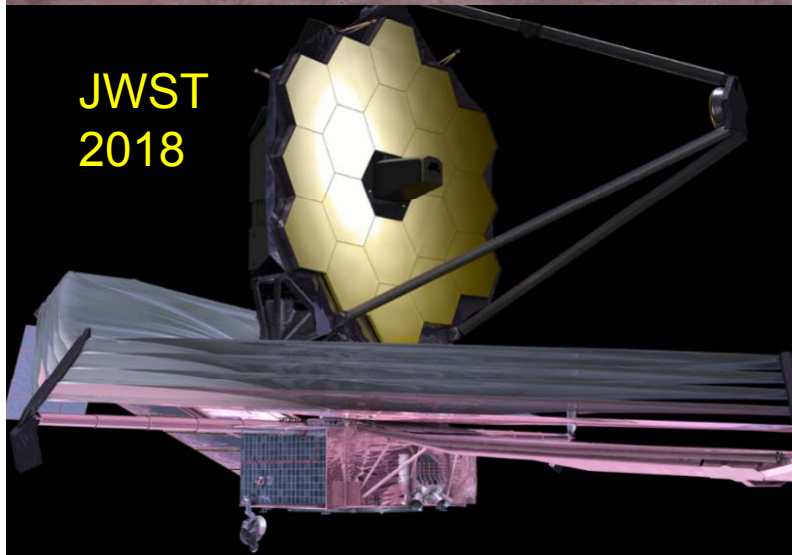


ALMA inauguré en 2013  
Désert d'Atacama

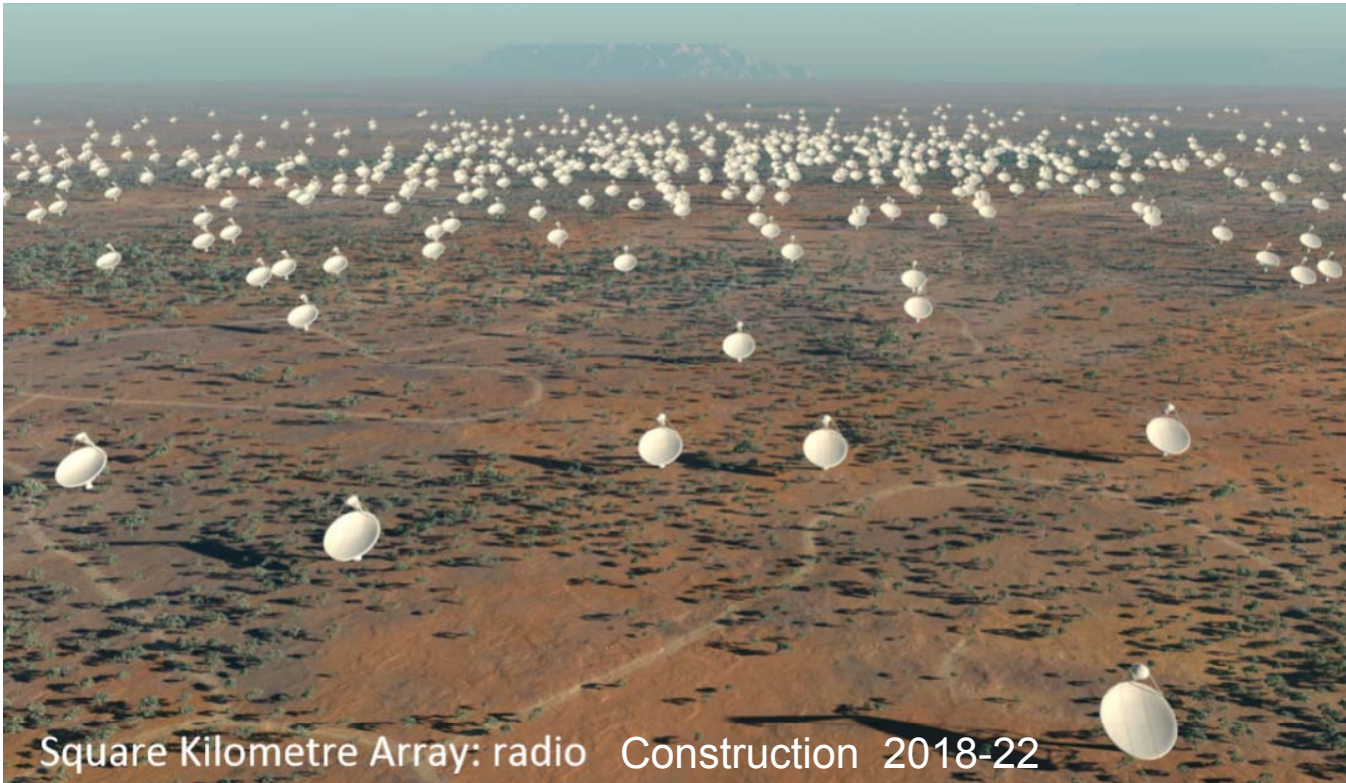
ALMA  
En opération



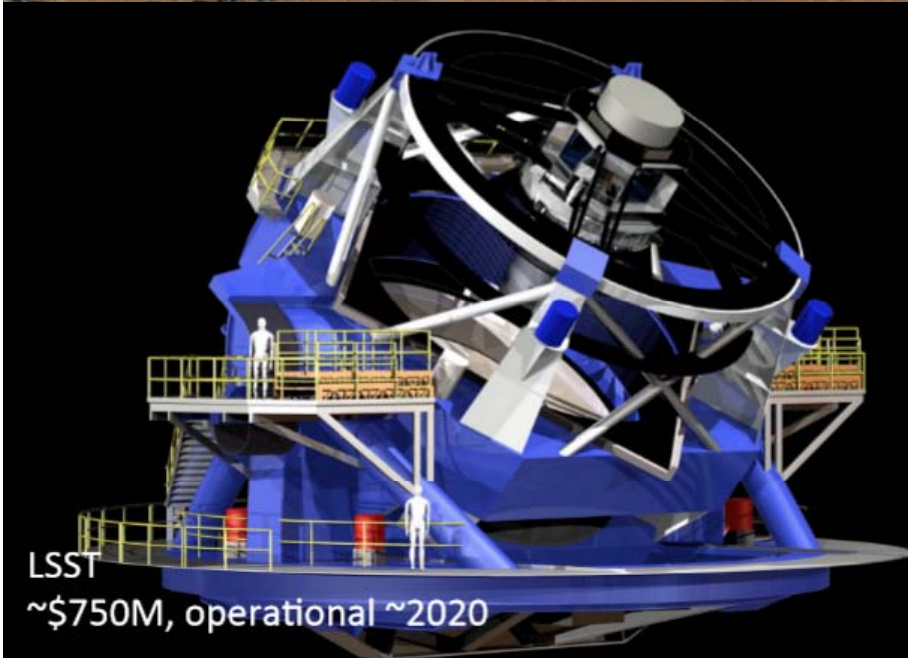
JWST  
2018



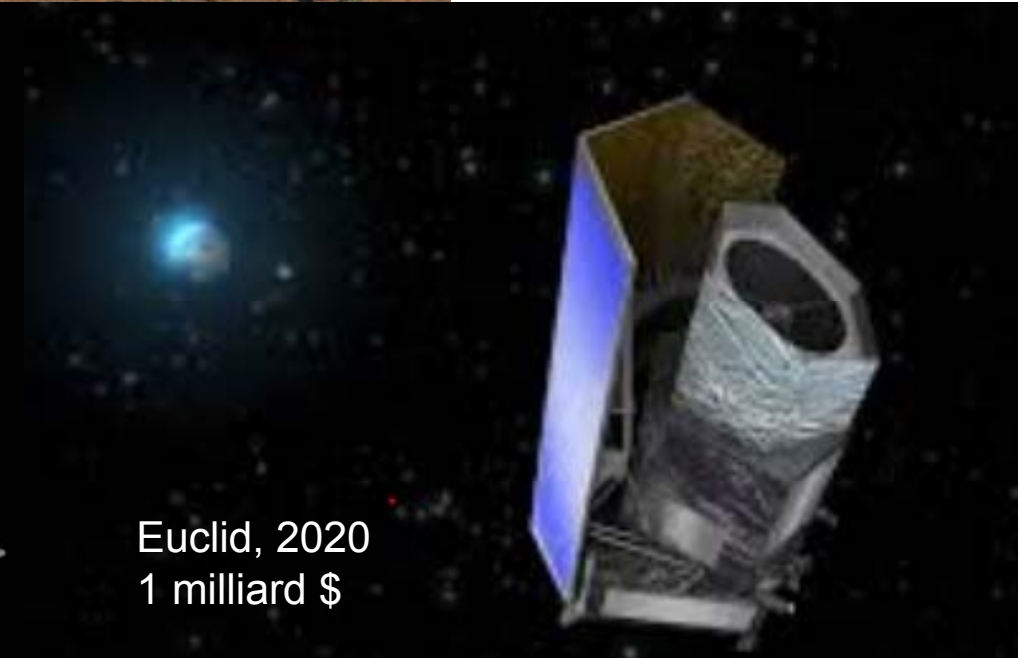
# Grand champ et milliards de galaxies



Square Kilometre Array: radio Construction 2018-22

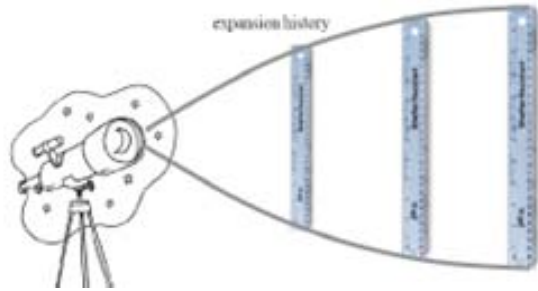


LSST  
~\$750M, operational ~2020



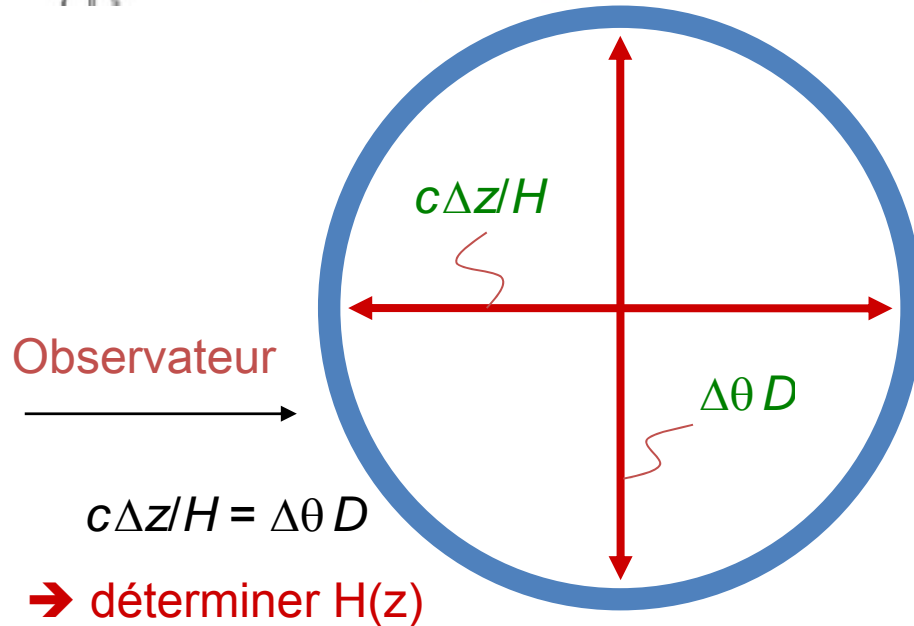
Euclid, 2020  
1 milliard \$

Baryon features as a standard ruler

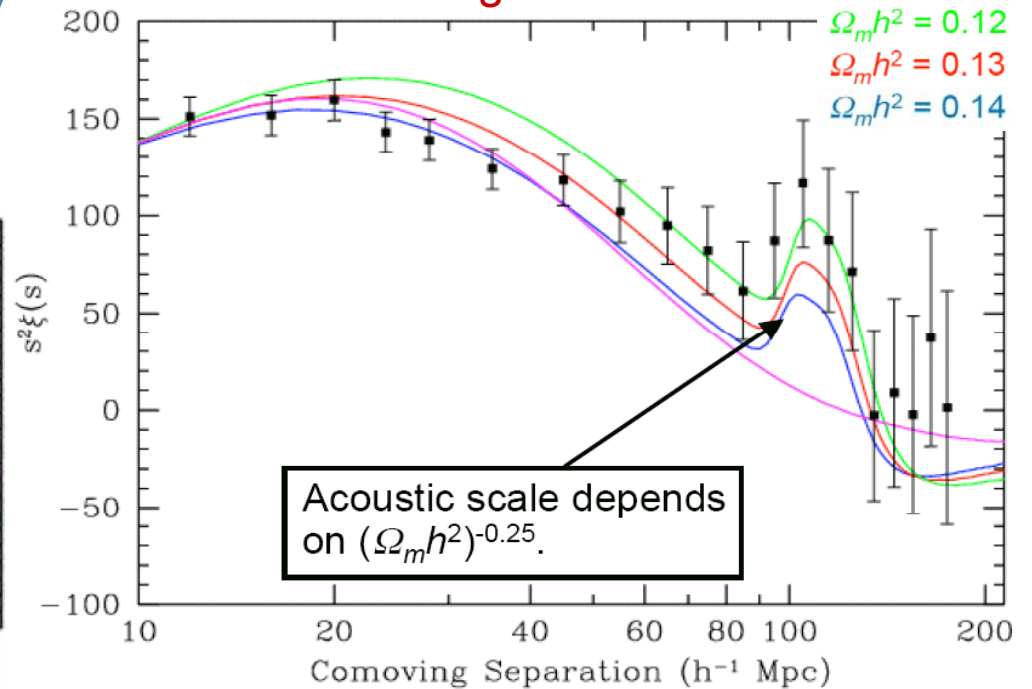
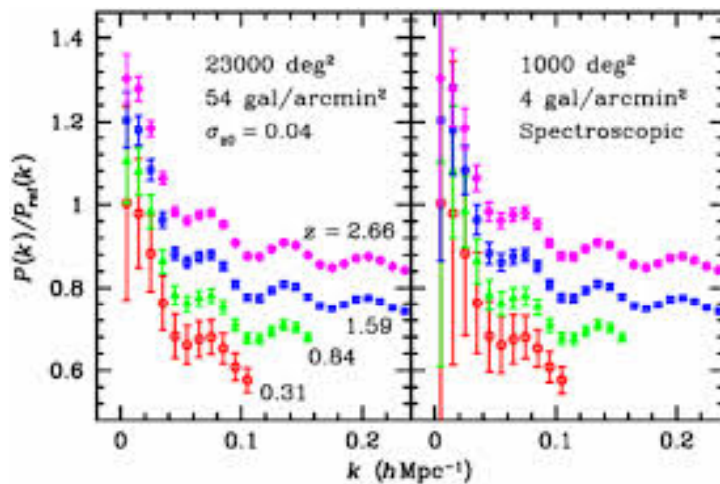


# BAO: oscillations baryoniques Règle Standard

Tester  $\Omega$ ,  $\Lambda$   
 Peut aussi tester le biais  $b$   
 Ou  $\beta = \Omega_m^{0.6}/b$

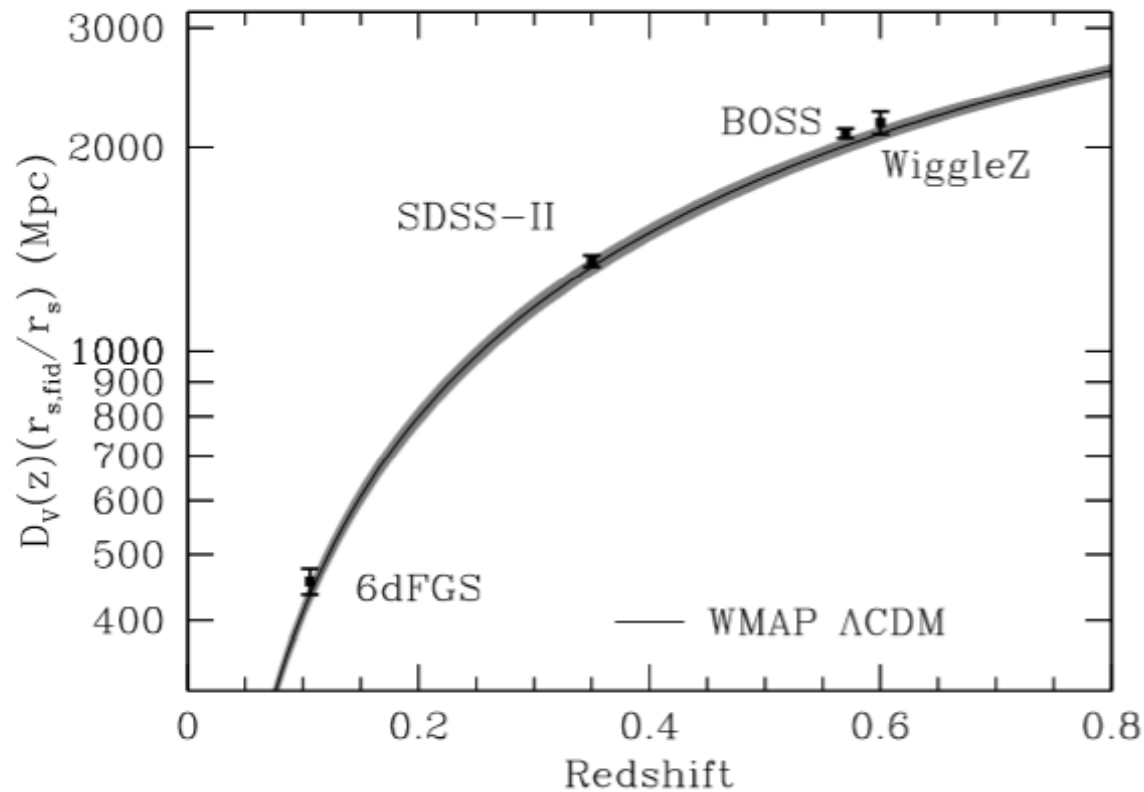


Eisenstein et al. (2005)  
 50 000 galaxies SDSS



# Résultats récents BAO avec spectro-z

$$D_V(z) = \left[ (1+z)^2 D_A^2(z) \frac{cz}{H(z)} \right]^{1/3}$$



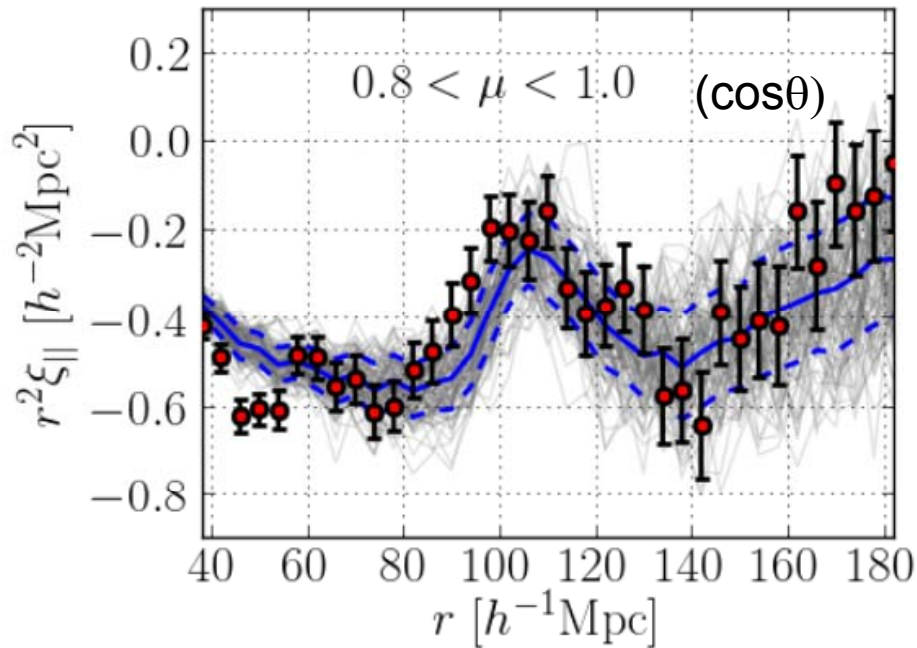
Excellent accord  
avec  $\Lambda$ CDM (grey)

$$D_V(z=2.34) = 4628 \text{ Mpc}$$

Slosar et al 2013  
Delubac et al 2014

Anderson et al 2012

# BAO dans la forêt Ly $\alpha$ à z=2.3



137 000 BOSS quasars

2.1 < z < 3.5

Bleu Ly $\alpha$  autocorrélation

Rouge: Quasar-Ly $\alpha$  cross-correl  
(Font-Ribera et al 2013)

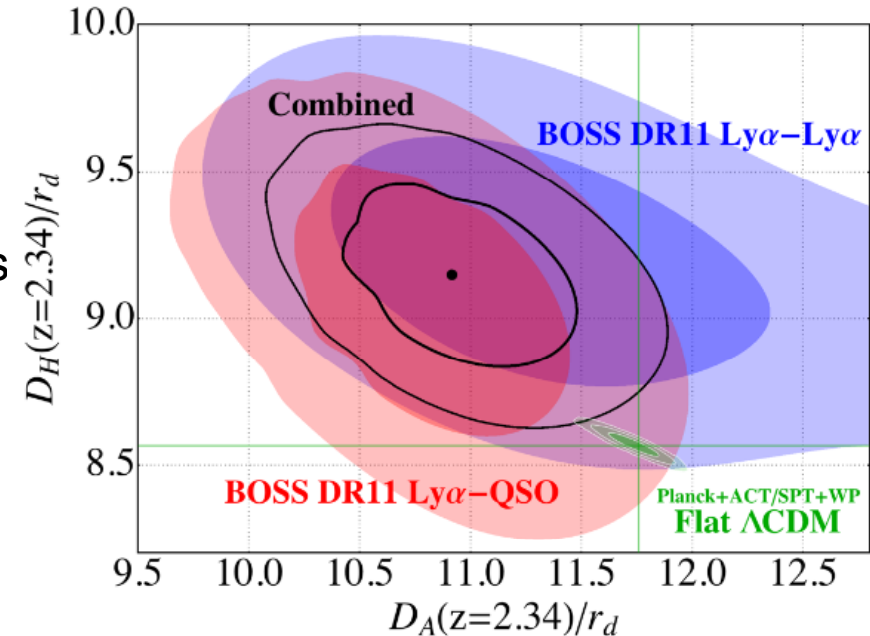
Noir: combiné

Delubac et al 2015

Points rouges: obs comparées aux simulations  
de quasars (grey)  
rd horizon sonore

$D_A$  dist angulaire,  $D_H = c / H$

Tension avec Planck à  $2.5\sigma$



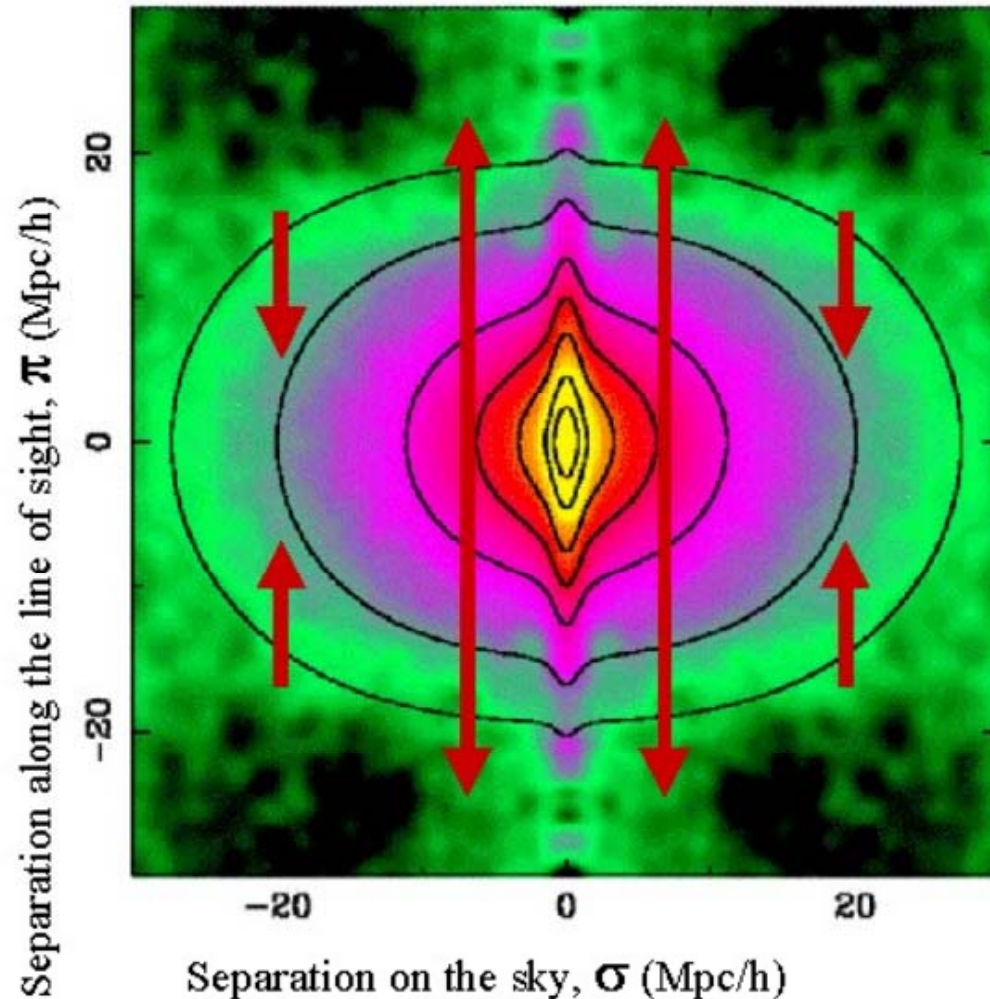
# RSD « Redshift space distortions »

Distortions due to peculiar velocities along the line of sight (doigts de Dieu)

Effet Kaiser dans les amas  
Infall systématique

Ces flots de vitesse  
Permettent de déterminer

$\beta = \Omega_m^{0.6}/b$   
bias  $\delta_{\text{galaxies}} = b (\delta_{\text{mass}})$   
and  $\sigma_{\text{gal}}$



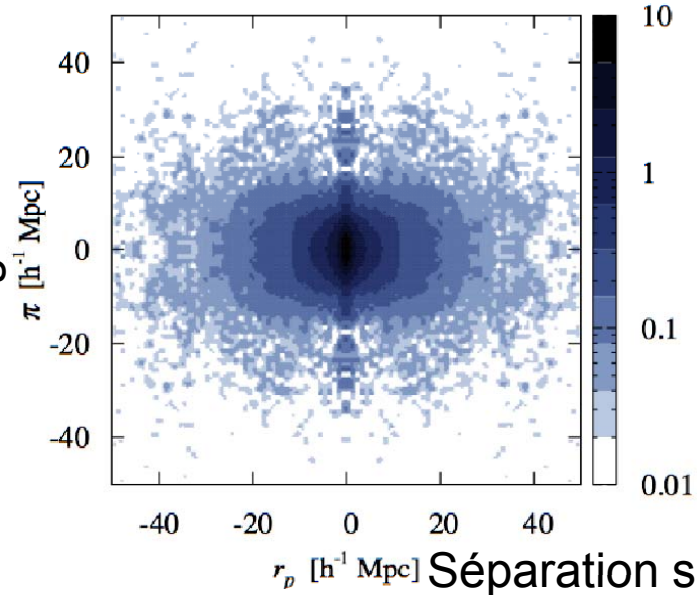
The 2dF Galaxy Redshift Survey Team (2001)



Plusieurs surveys de galaxies  
VIPERS, de la Torre et al 2013

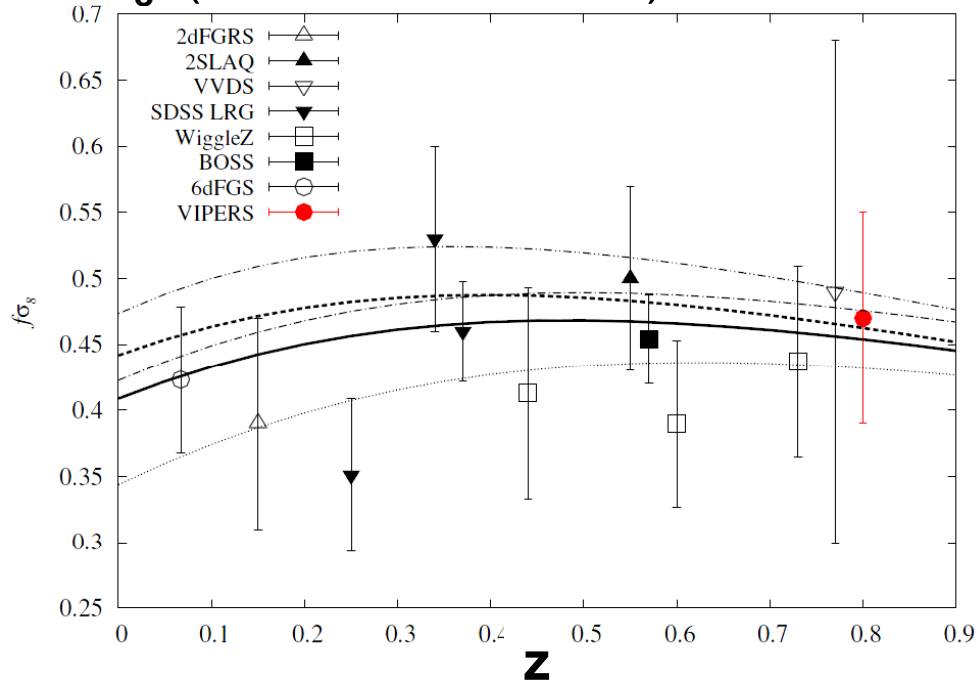
# Etat des mesures RSD

Séparation sur la ligne de visée



Séparation sur le ciel

$f \sigma_8$  (taux de croissance)



**Courbe en gras: gravité RG**

Courbes pleines, pointillés..

Gravité modifiée

DGP (Dvali et al 2010)

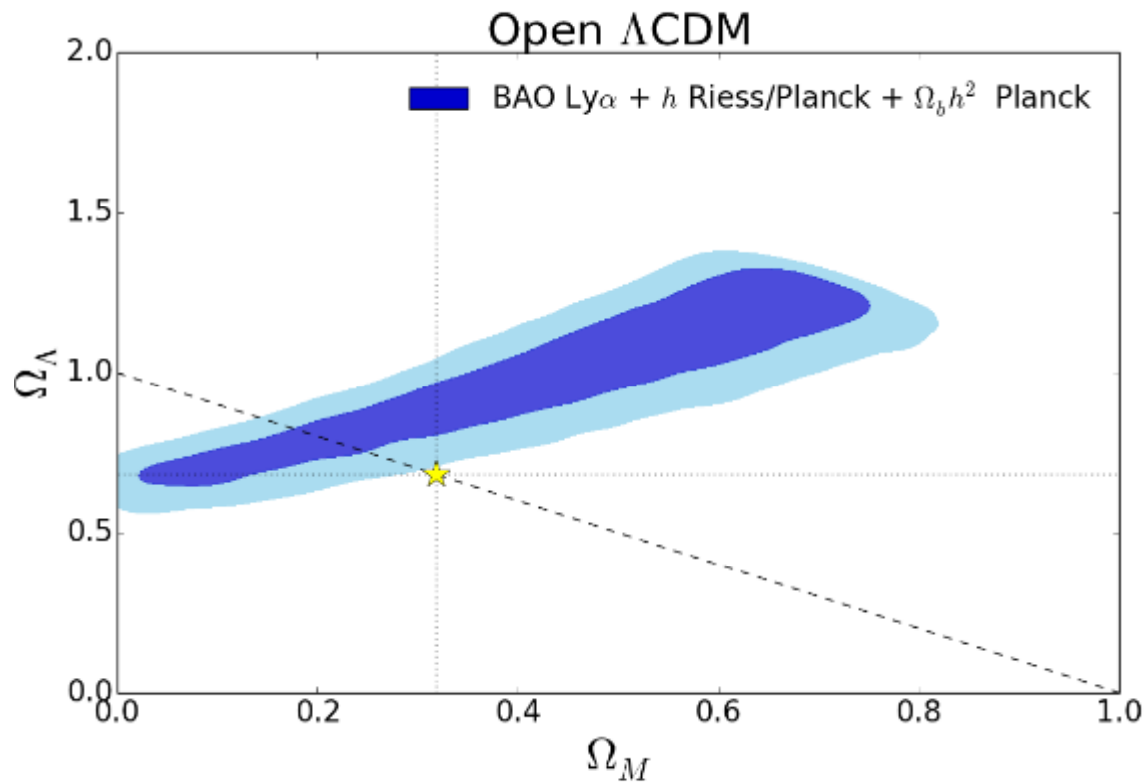
Modèles f(R) etc..



# Tension sur $H_0$ Planck, Cepheids, BAO ...

BAO à 68 et 95% de niveau de confiance (bleu)

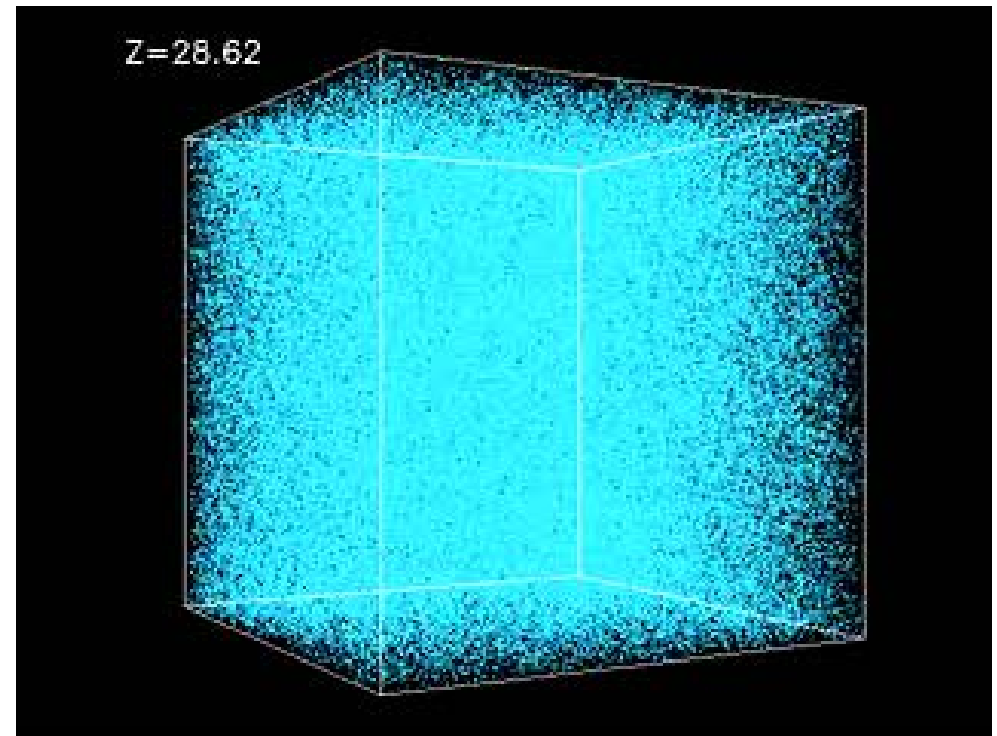
$H_0$  (Cepheids) = 74 km/s/Mpc, alors que Planck préfère 67 km/s/Mpc



Planck

# Taux de croissance comme test de la gravité

$$\ddot{\delta} + 2H(t)\dot{\delta} = 4\pi G\langle\rho\rangle\delta$$



Taux de croissance  $\gamma$   $f = d \log(\delta) / d \log(a) \sim \Omega_m^\gamma$   
Cette croissance produit des vitesses particulières  $\rightarrow$  RSD

Le taux de croissance sera mesuré par  
1- Lentilles faibles (WL) Tomographie  
2- Distortions redshift-espace dans les amas (RSD)



## « Square Kilometre Array »

Projet (~2020) pour un radiotélescope géant  
Dans le domaine de  $\lambda$  de centimètre-mètre



- **surface collectrice d'un kilomètre carré**

**50-100 x plus sensible** que les radio télescopes actuels  
Pour l'observation des *raies spectrales*

**1000 x plus sensible** que les radio télescopes actuels  
Pour les observations *en « continu »*

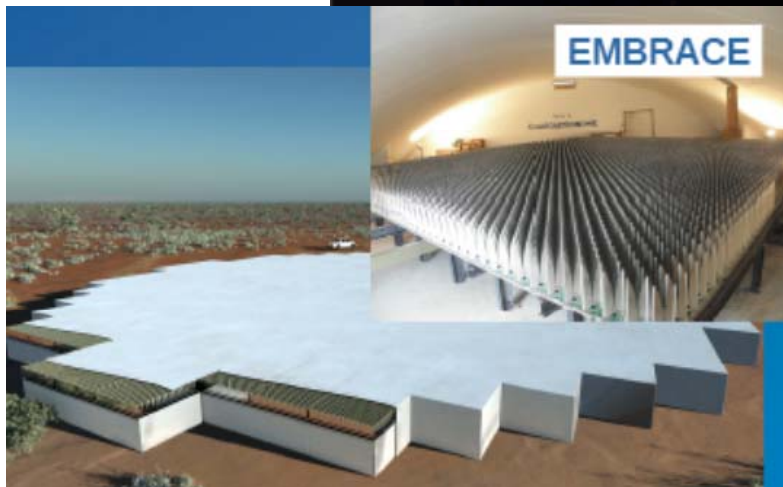
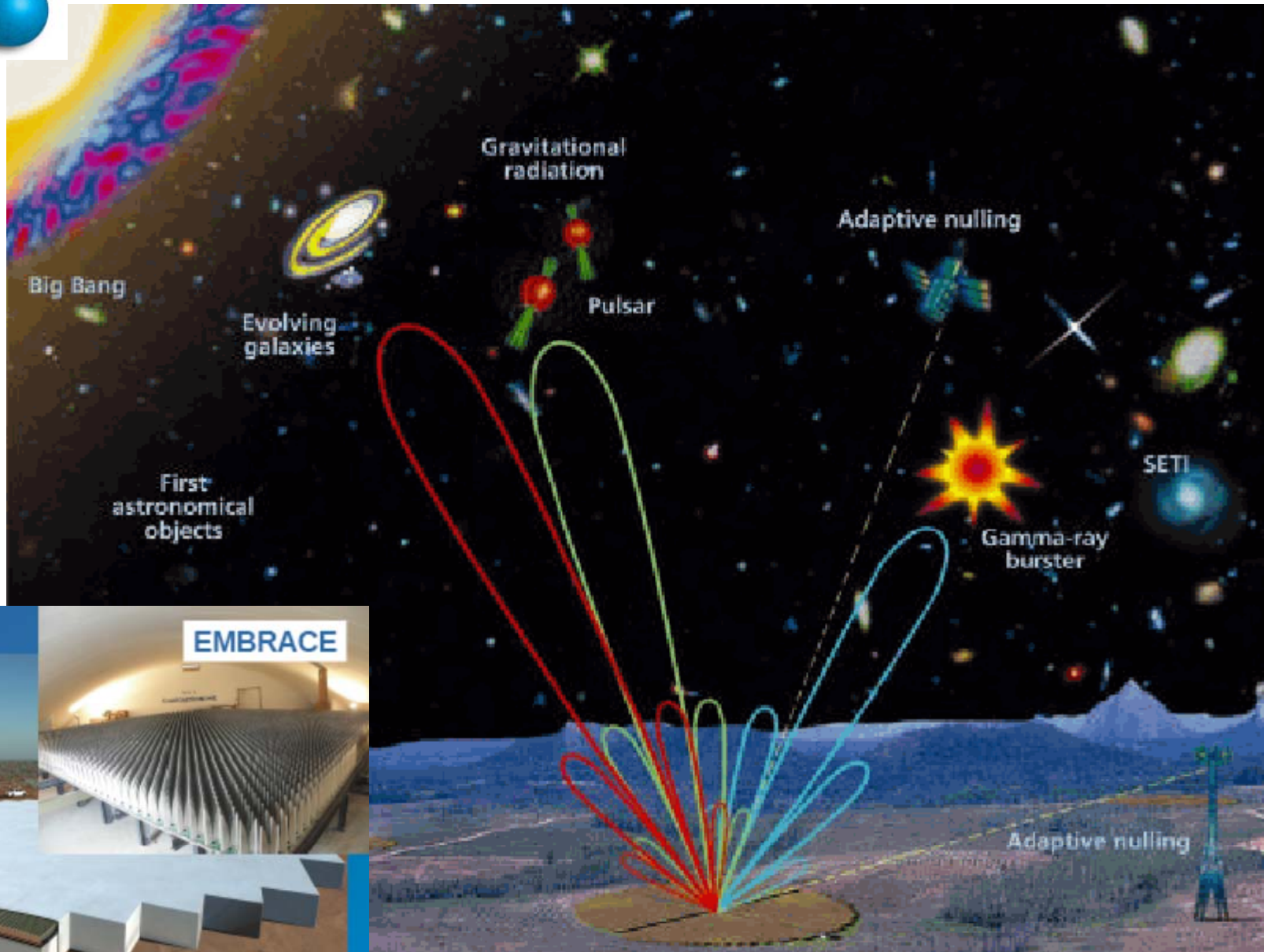
- fréquences: 70MHz – 25 GHz ( $\lambda$  1.2cm – 4m)
- champ de vue: 1 ( $\rightarrow$  100?) degrés carrés à  $\lambda$  21 cm / 1.4 GHz  
8 champs de vue indépendants
- résolution angulaire: 0.01 arcsec à  $\lambda$  21 cm / 1.4 GHz  
 $\rightarrow$  lignes de base jusqu'à ~ 3000 km

En Australie et en Afrique du Sud

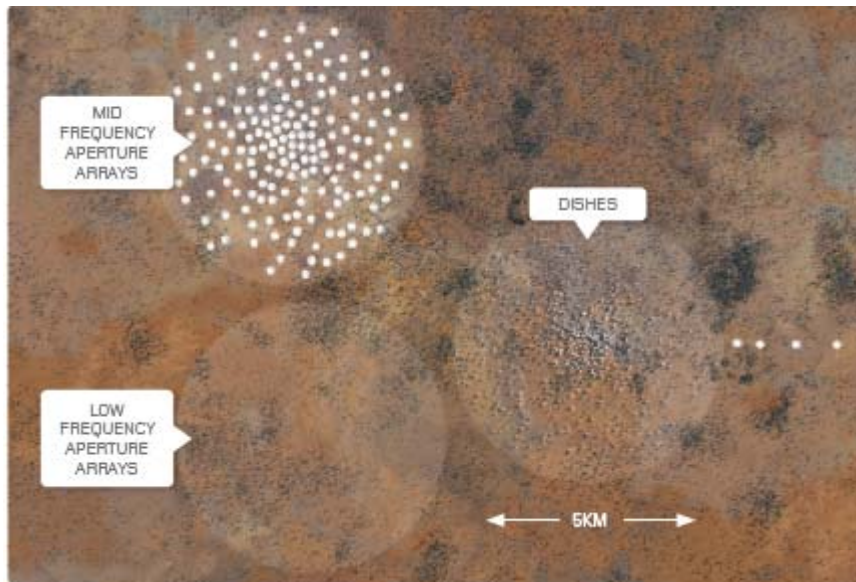


# Multi-lobes d'observation

EMBRACE  
Prototype  
À Nancy



# SKA: Square km Array



**Surface: un million de m<sup>2</sup>**  
Projet mondial ondes m/cm

→ verra le HI-21cm redshifté  
Dans les galaxies jusqu'à  $z=5$   
(au lieu de  $z=0.3$  aujourd'hui)

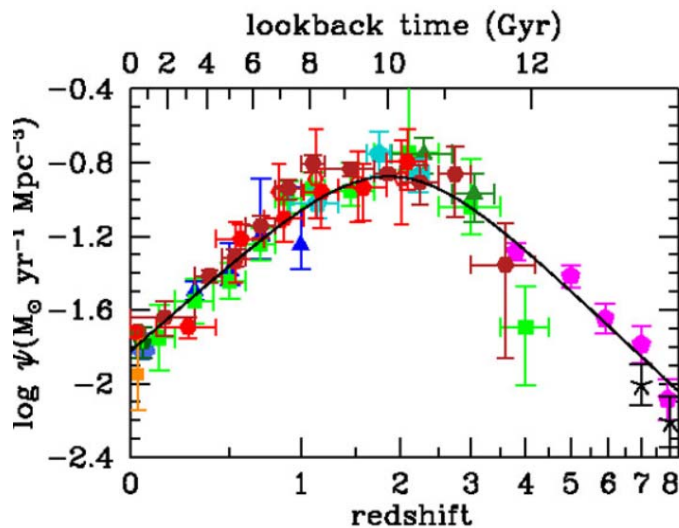
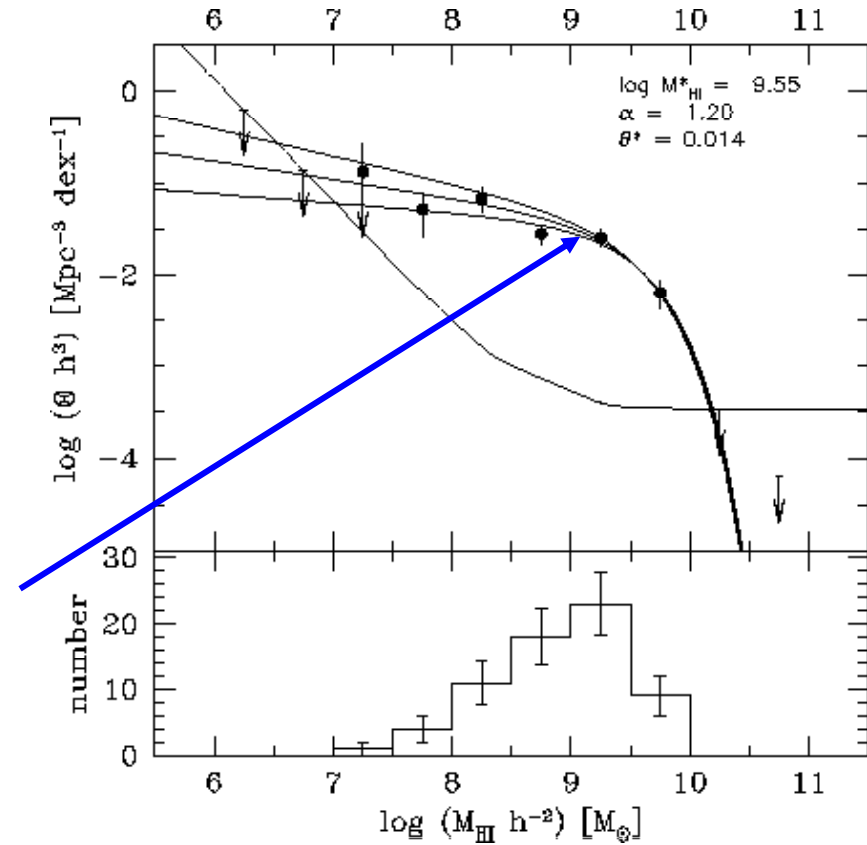
Suivre le contenu en MN des  
galaxies  
Dans toute l'histoire de l'Univers



# Masses HI détectables en fonction de z en 360 h

z	Temps (Gyr)	Mass HI (M)	# Détections
0.5-1.0	4.2-6.2	$1.7 \cdot 10^8$	$6.6 \cdot 10^5$
1.0-1.5	6.2-7.3	$4.7 \cdot 10^8$	$2.3 \cdot 10^5$
1.5-2.0	7.3-8.0	$1.1 \cdot 10^9$	$1.0 \cdot 10^5$
2.0-2.5	8.0-8.5	$2.2 \cdot 10^9$	$4.4 \cdot 10^4$
2.5-3.0	8.5-8.9	$4.1 \cdot 10^9$	$3.0 \cdot 10^4$
3.0-3.5	8.9-9.1	$6.7 \cdot 10^9$	$1.0 \cdot 10^4$
3.5-4.0	9.1-9.2	$1.2 \cdot 10^{10}$	$9.5 \cdot 10^3$
4.0-4.5	9.2-9.3	$1.6 \cdot 10^{10}$	$7.0 \cdot 10^3$

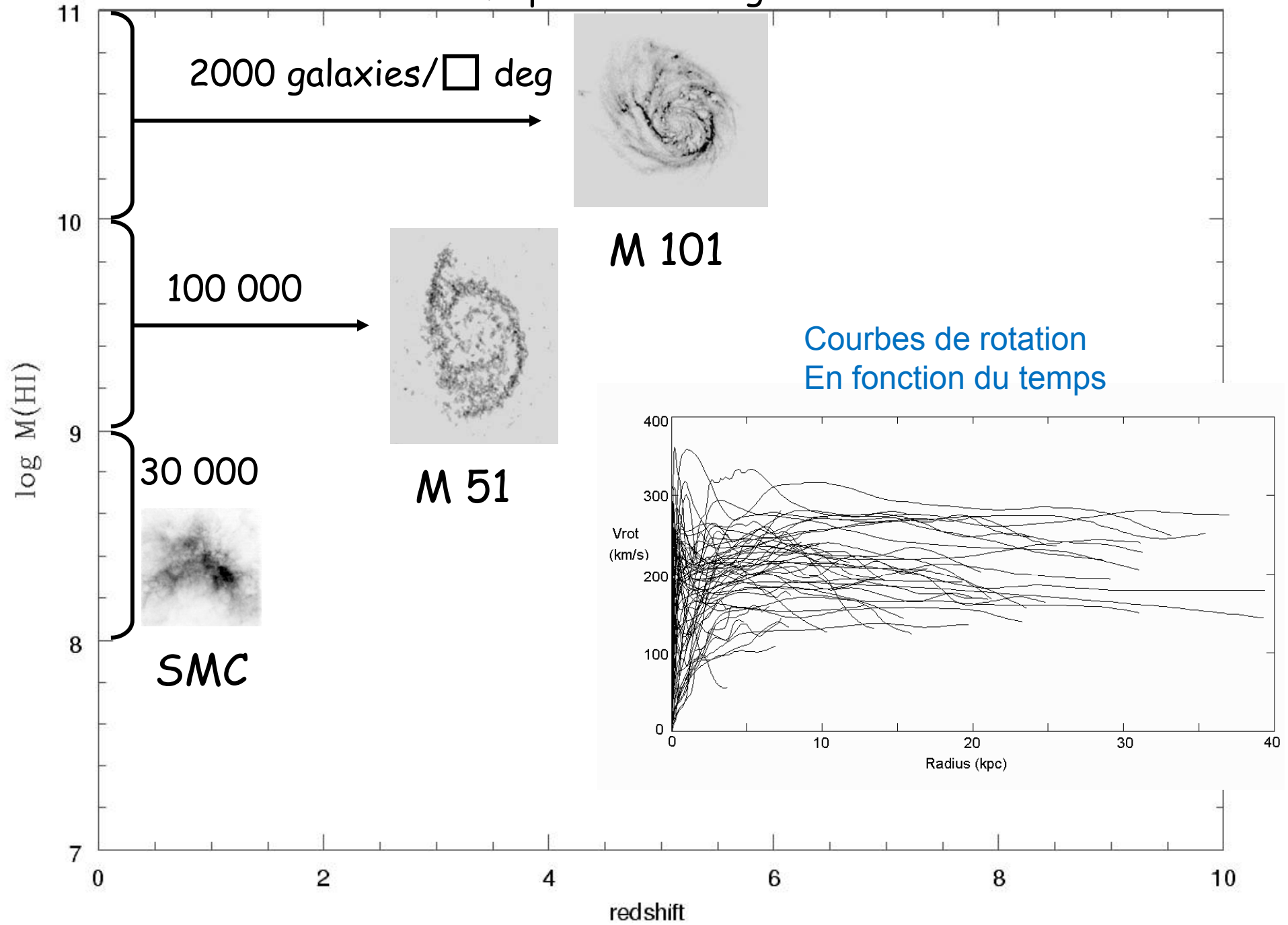
## Fonction de masse HI



Formation d'étoiles vs z

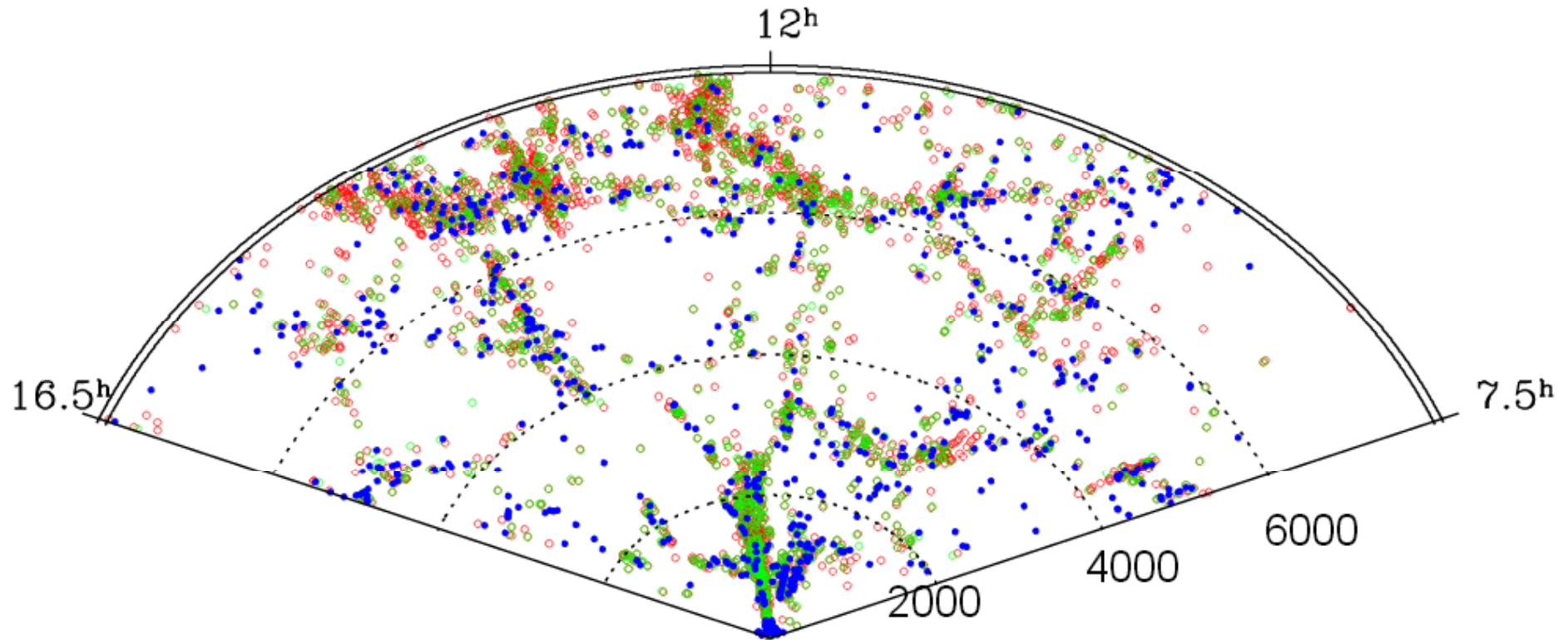


# Maximum redshift pour une intégration de 360 h avec SKA



# Recherche naines noires en HI

ALFALFA: Arecibo (300m)



Rouge: optique

Bleu HI

Vert: les deux

Recherche dans les vides:  
Négative jusqu'à présent

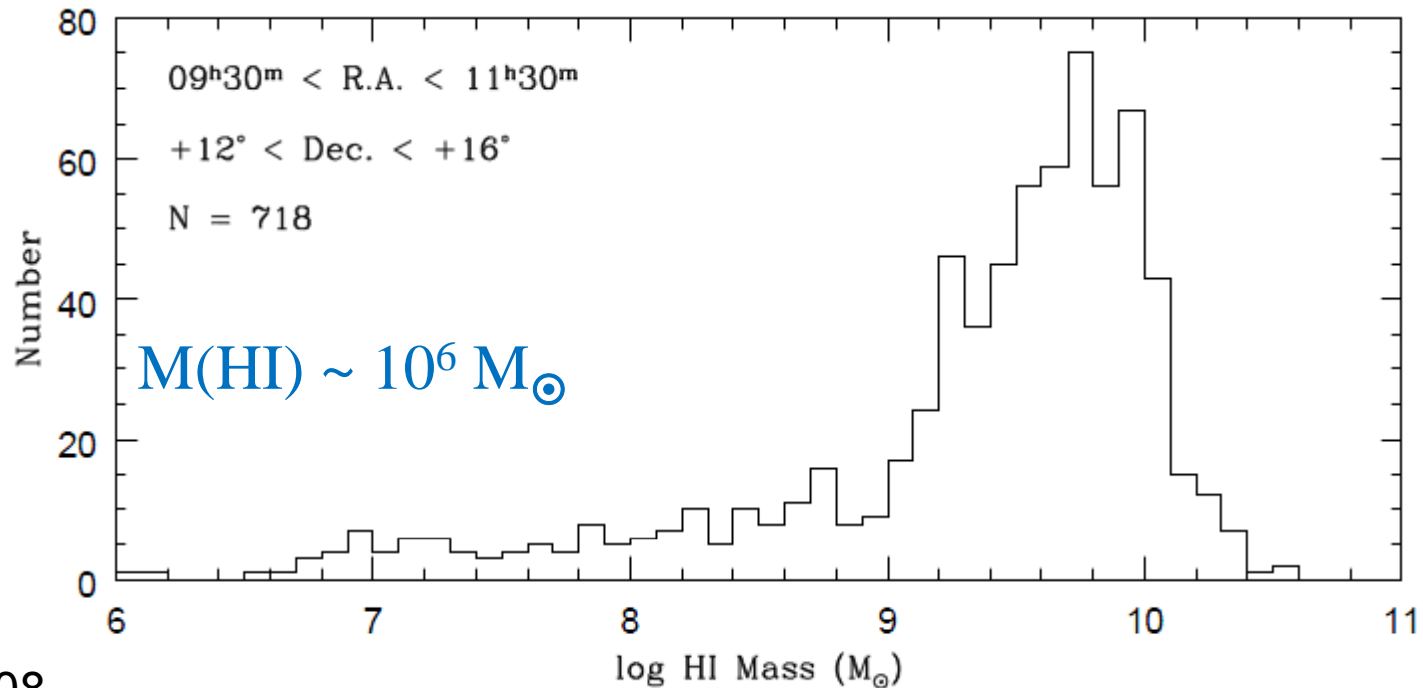


# ALFALFA: Nuages HI à grande vitesse

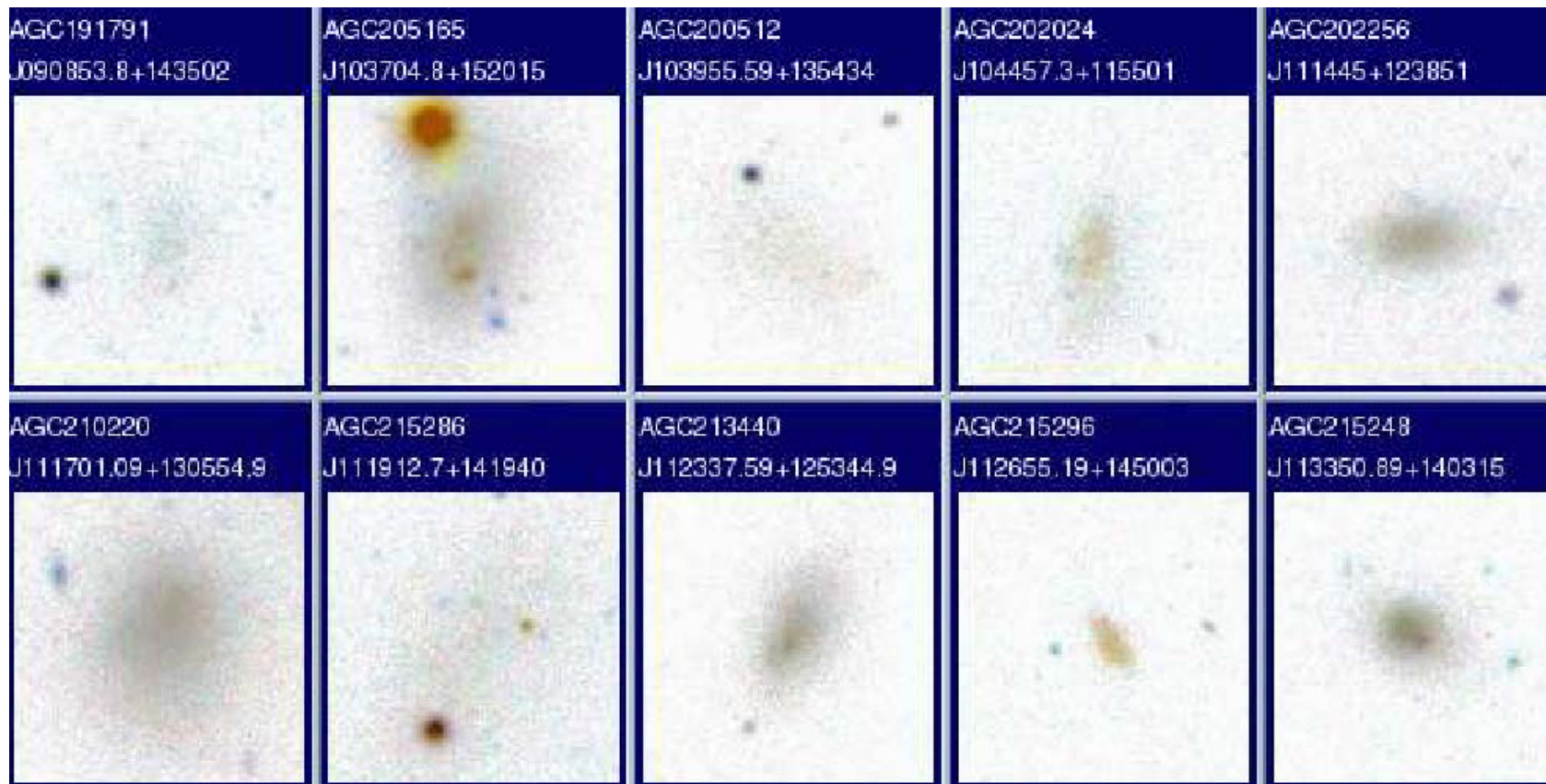
Recherche d'étoiles en optique: Toujours trouvé un signal

→ Découvertes de naines normales

→ Pas de naines noires



# Toujours des étoiles, faible $\Sigma$



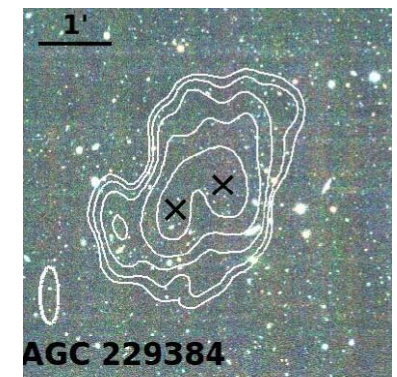
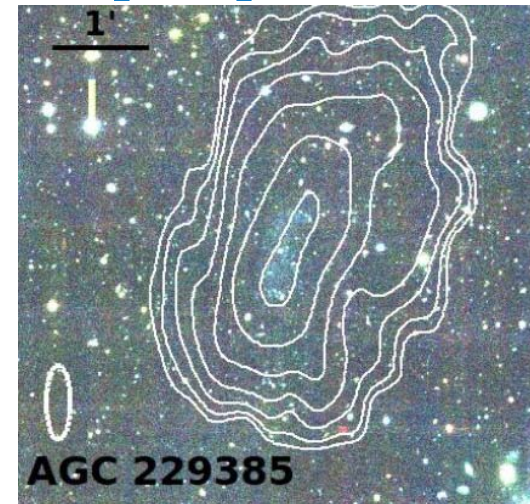
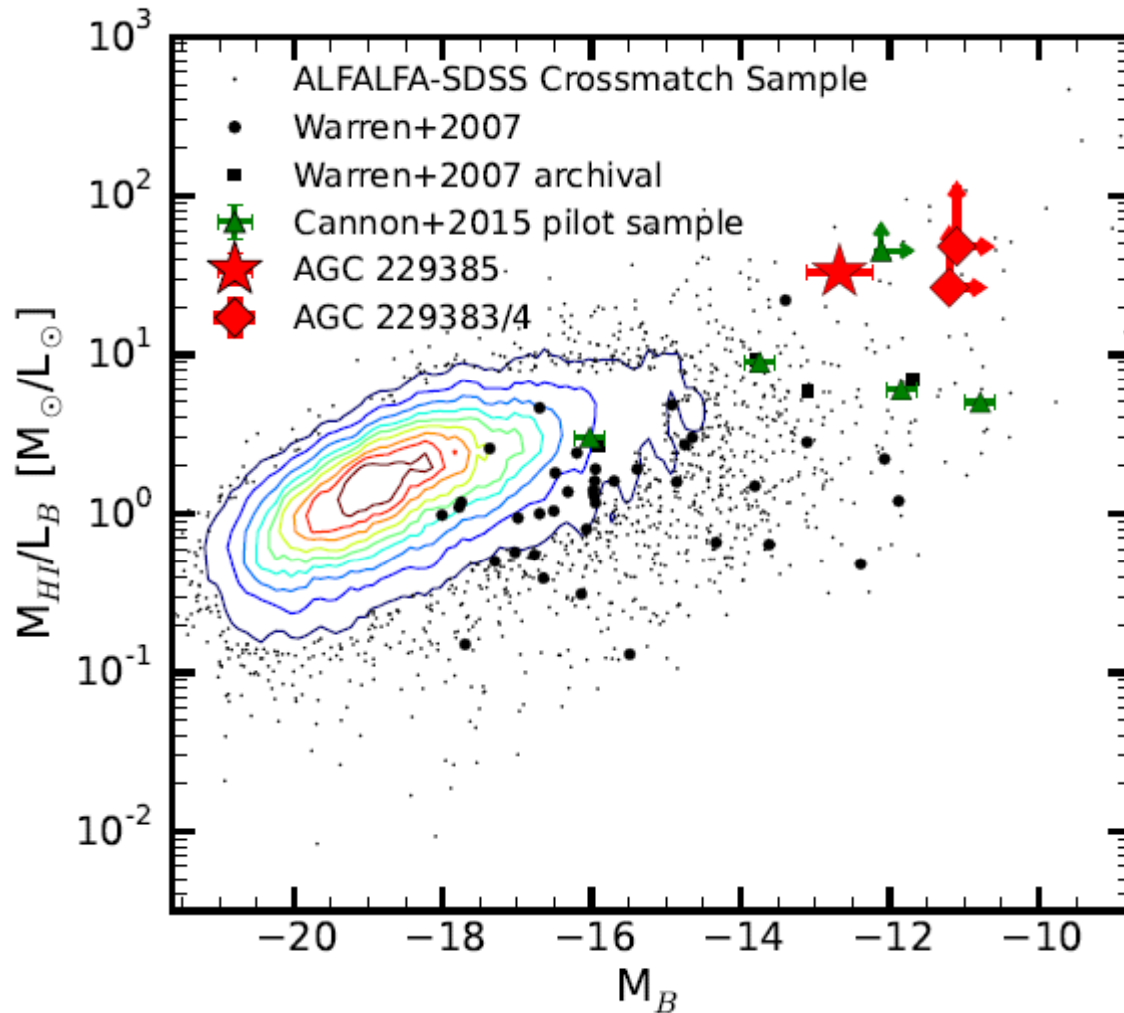
$$M(\text{HI}) < 10^{7.2} M_{\odot}$$

Images SDSS

Haynes 2008

# Découverte de 2 candidats?

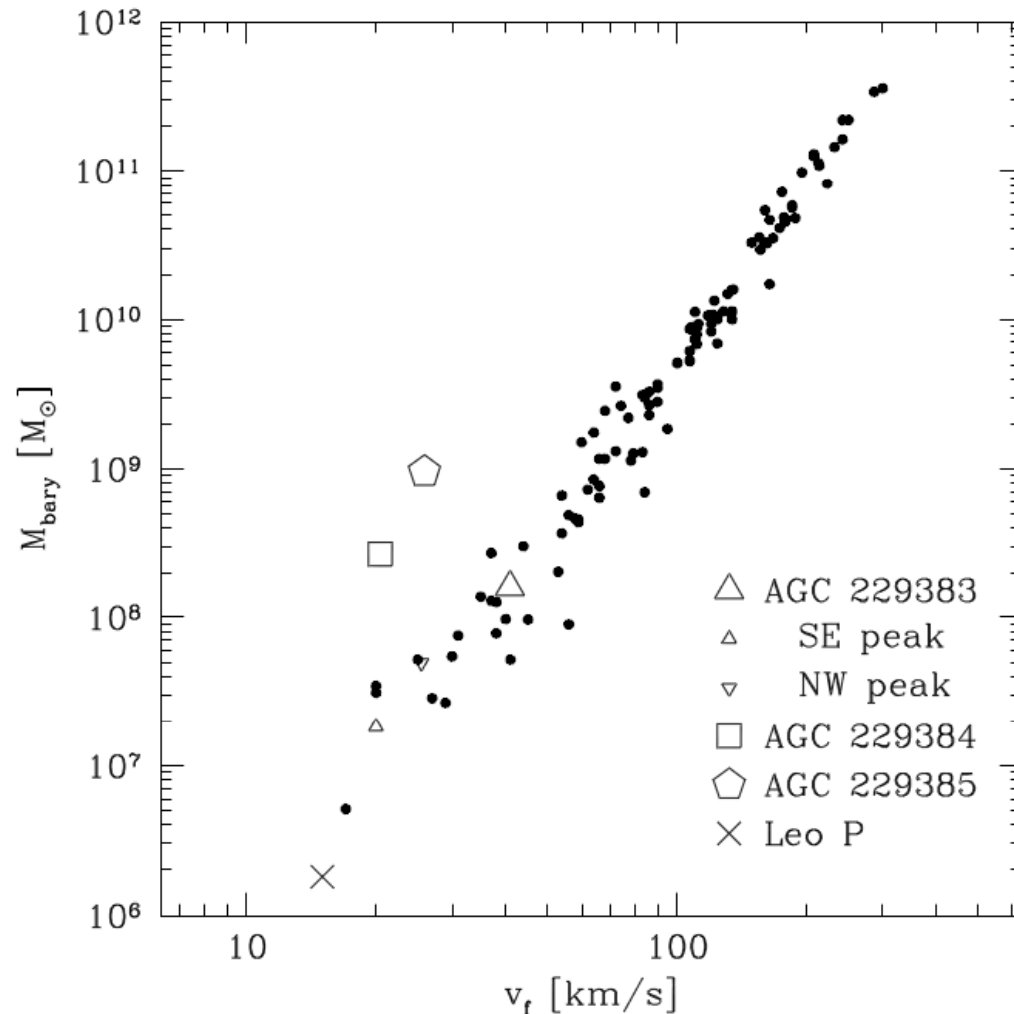
0.4% de systèmes presque sombres



Janowiecki et al 2015

# Cinématique des nuages HI

Juste en dehors de l'amas de Virgo



Un des systèmes est composé de 2 clumps

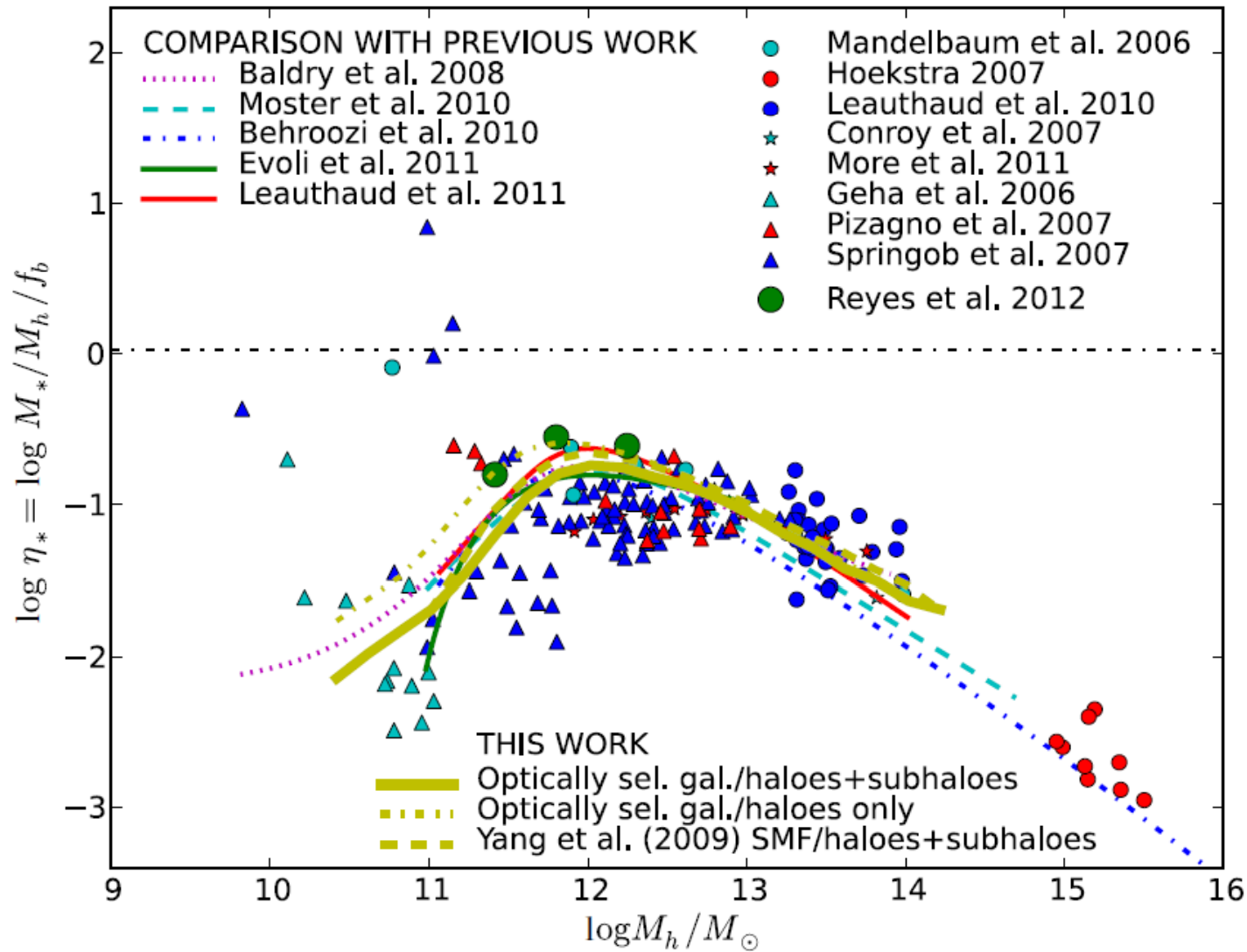
Faut-il prendre le DV entre les 2?

Difficile de reconnaître une rotation, ou d'interpréter les profils de vitesse

Inclinaison?

Peut-être vu de face

# Fraction de baryons (étoiles)

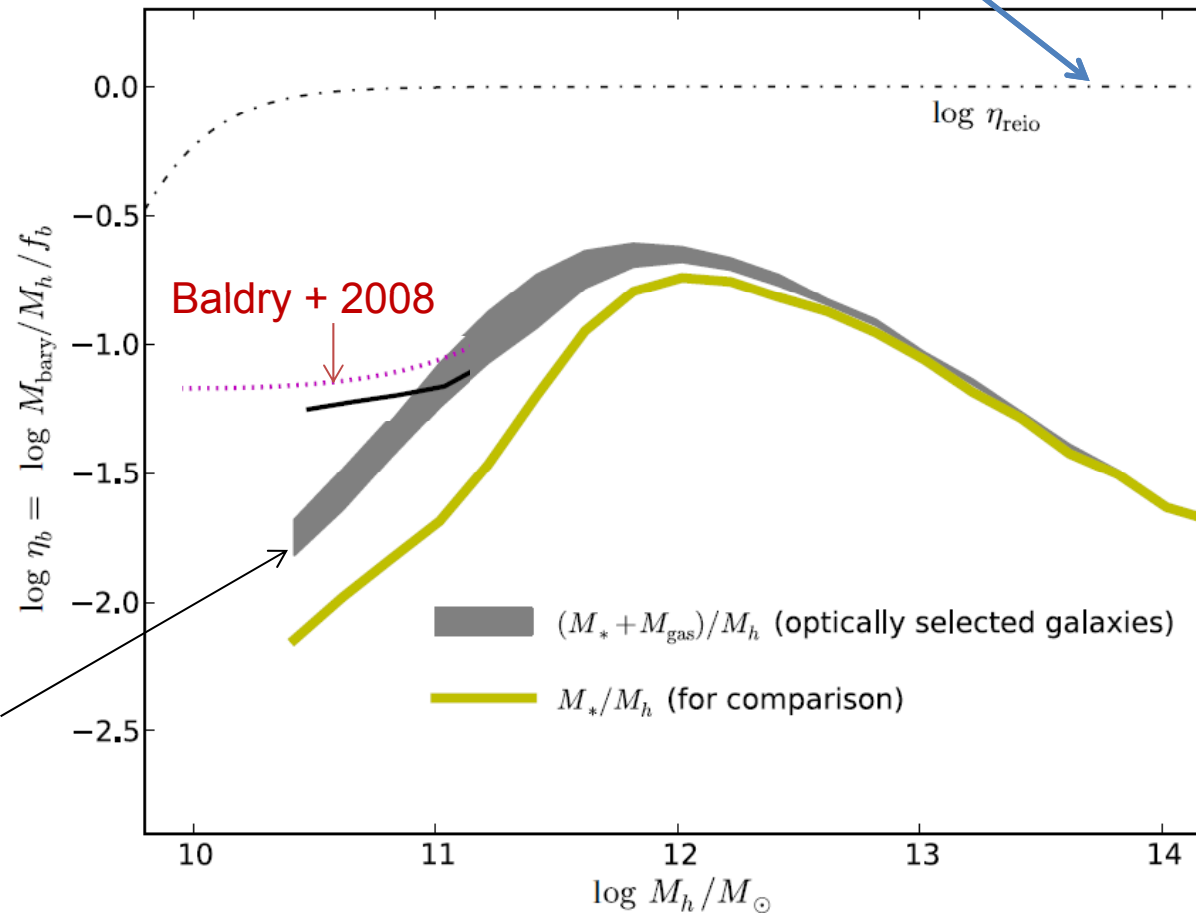


Match  
d'abondance  
des halos

et des 8000  
galaxies  
sélectionnées

# Fraction de baryons (étoiles+gaz)

$\eta_{\text{reio}}$  fraction de baryons prédite par les simulations hydrodynamiques, incluant la réionization *Okamoto et al 2008*



Epaisseur du trait: sensibilité gaz HI

*Papastergis et al 2012*

# Satellite EUCLID

## 1-Nature de l'énergie noire: $w$ $P = w \rho$

Equation d'état, histoire de l'expansion et taux de croissance,  
Plusieurs outils: Weak Lensing, BAO, RSD, Amas de galaxies

## 2-Gravité au-delà d'Einstein: $\gamma$

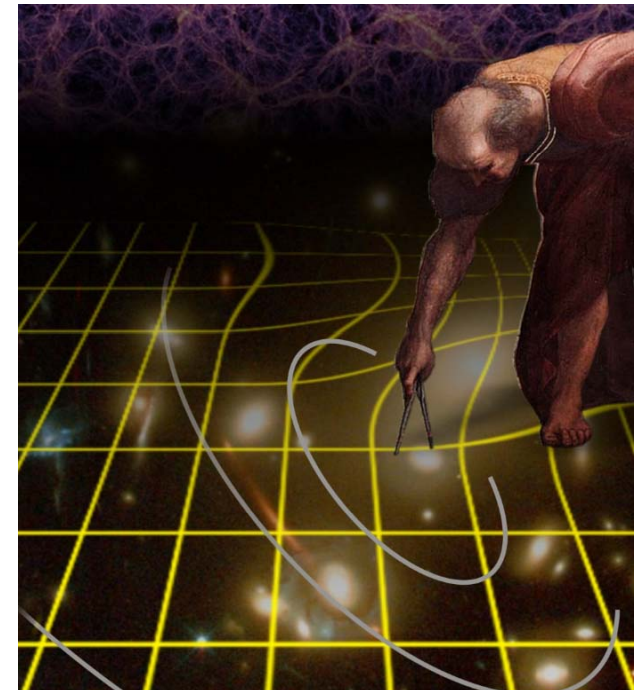
Tester la gravité modifiée, en mesurant le taux de croissance  $\gamma$

## 3-La nature de la matière noire, $m_\nu$

Tester le modèle  $\Lambda$ CDM et mesurer  
la masse des neutrinos

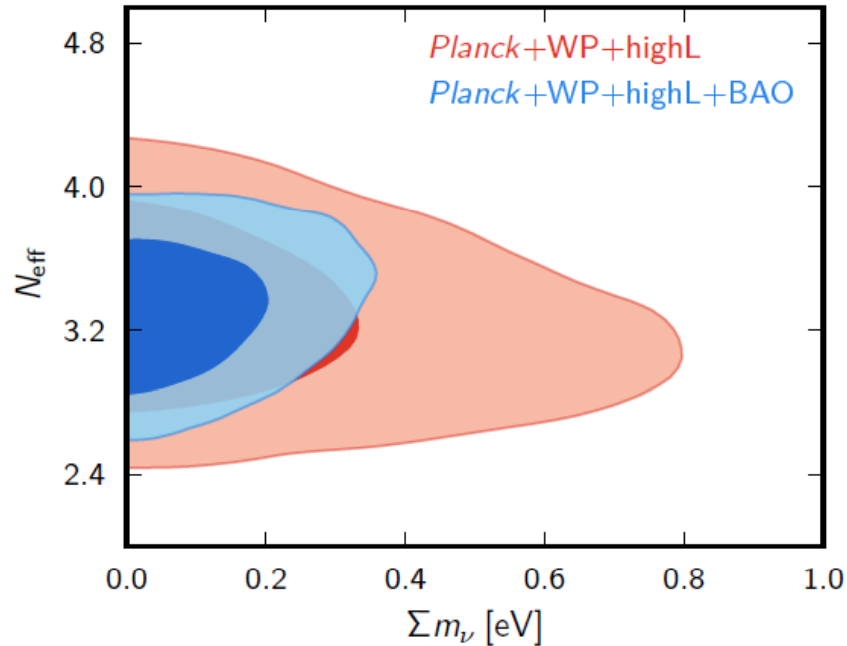
## 4- Les graines des structures cosmiques

Améliorer d'un facteur 20,  $n =$  index spectral,  
 $\sigma_8 =$  amplitude du spectre de puissance,  
 $f_{\text{NL}} =$  non-gaussianités

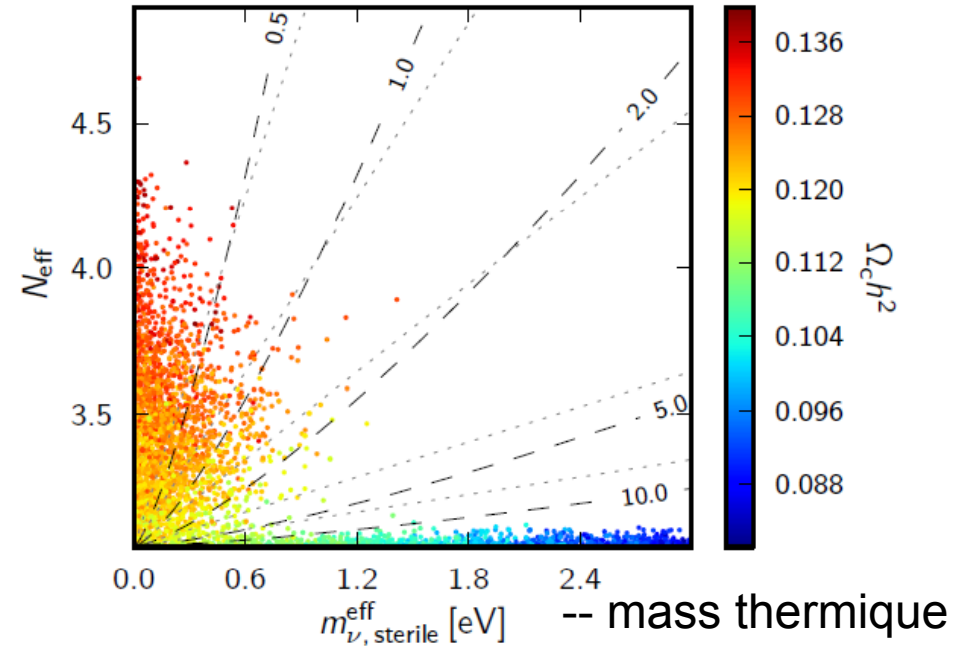


# Masse et nombre des neutrinos

Avec d'autres neutrinos faible masse



avec un neutrino stérile massif



Planck coll (2013) Paper XVI

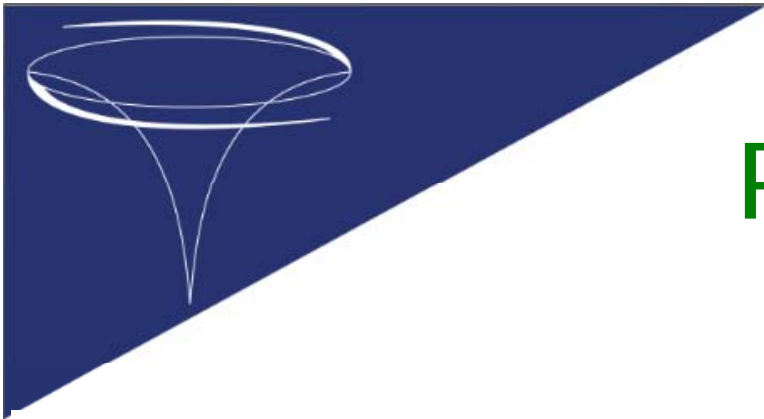
La masse du neutrino contrainte par le spectre de puissance

$N_{\text{eff}}$  pourrait être plus grand due à l'asymétrie des leptons

Ou à l'existence d'un neutrino stérile

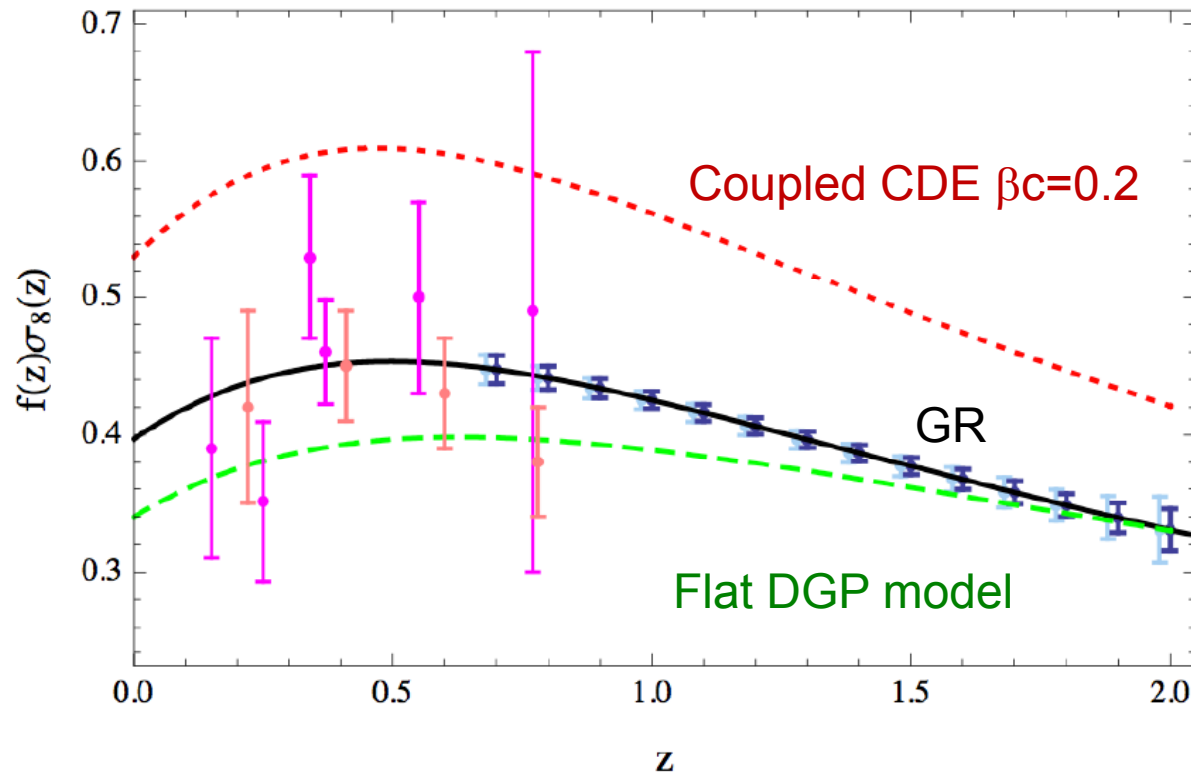
Avec Euclid  $\rightarrow \sigma(M_\nu) = 0.03 \text{ eV}, \sigma(N_{\text{eff}}) = 0.02$





# Prédictions avec Euclid

Déviations à la RG  
50 millions de galaxies  $z$



$f = d \log \delta / d \log a$ ,  
où  $\delta(t)$  est le facteur  
de croissance

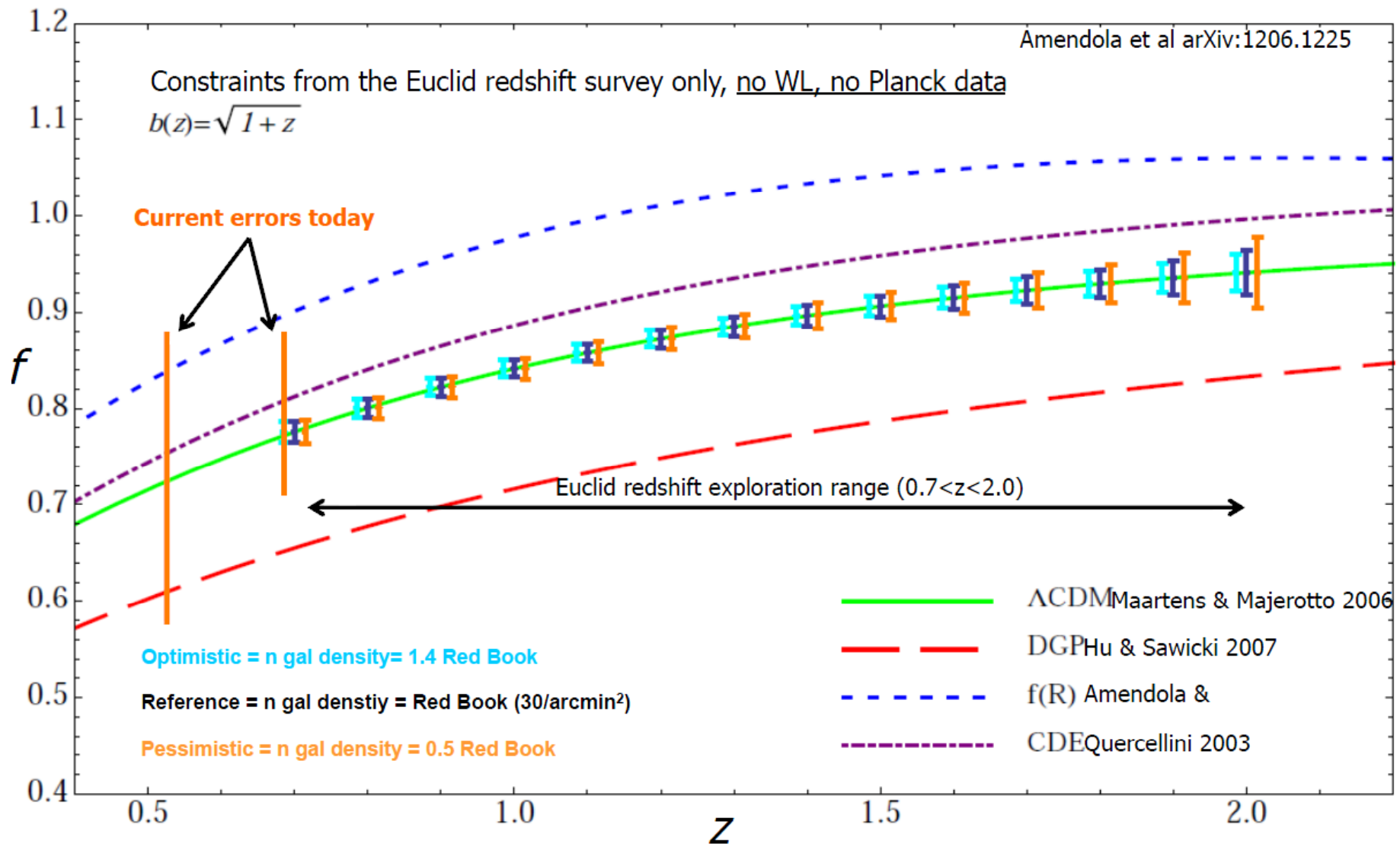
$\sigma_8$  variance amplitude  
des structures  
(normalisation)

$f\sigma_8$  mesurée par  
l'anisotropie RSD

$\gamma(\text{GR}) = 0.55$   
 $f(z) \sim \Omega_m^\gamma$

Majerotto et al 2012  
CDE, DGP, di Porto et al 2012

# Exploration des modèles d'énergie noire avec Euclid (redshifts seulement sans WL)





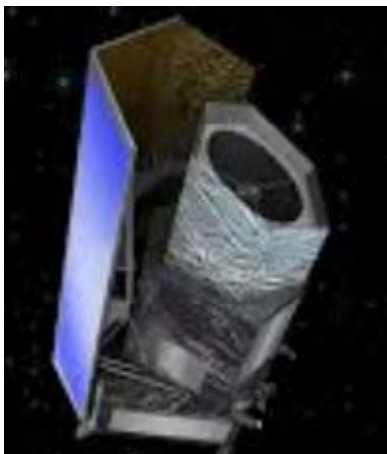
# EUCLID Legacy

Survey étendu 15 000 deg<sup>2</sup>  
 Survey profond 40 deg<sup>2</sup> (+2mag)

12 milliards de sources (3 $\sigma$ )

50 millions de redshifts

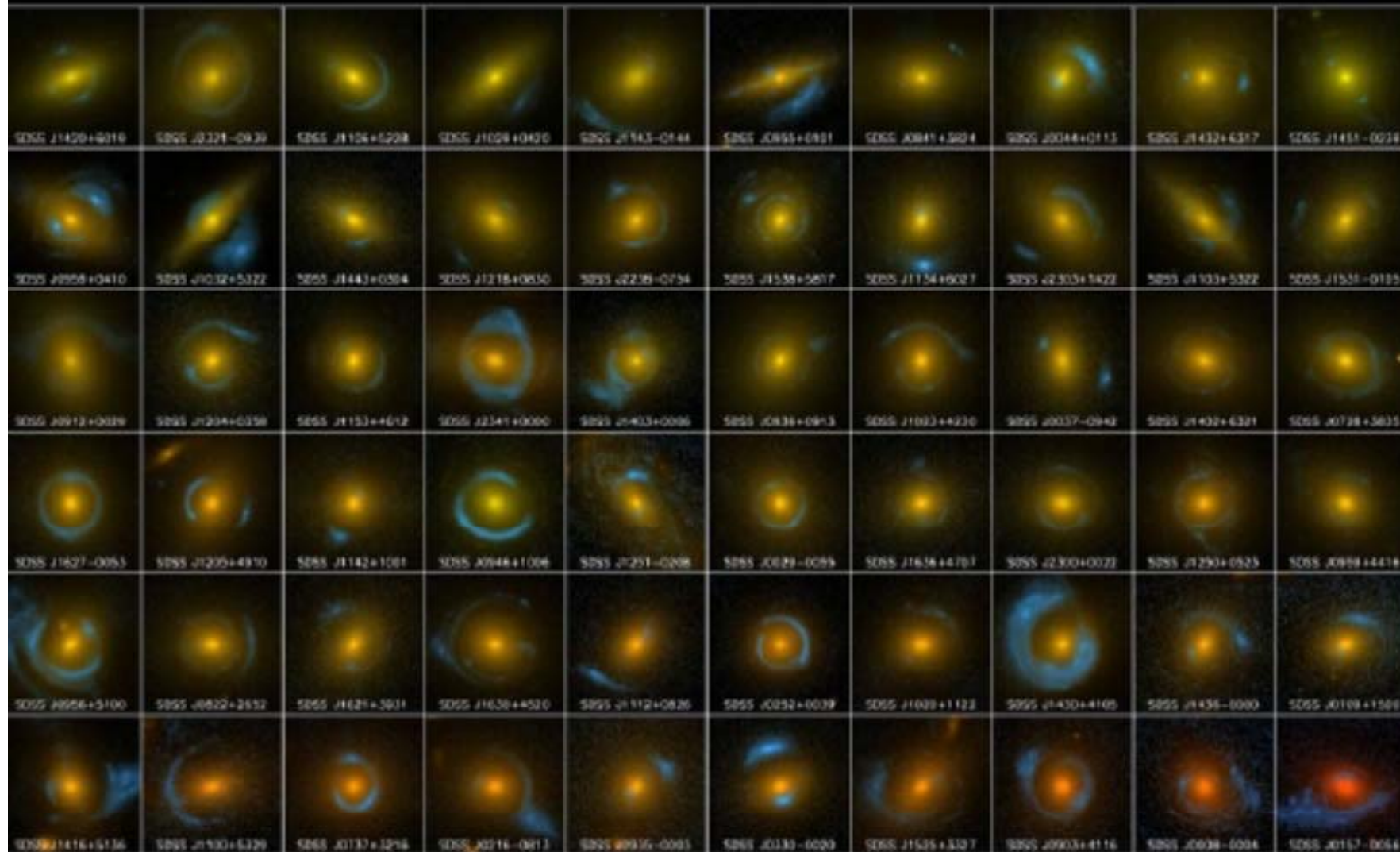
Un réservoir de cibles pour  
 JWST, GAIA, ELT  
 ALMA, Subaru, VLT, etc



Objects	Euclid	Before Euclid
Galaxies at $1 < z < 3$ with precise mass measurement	$\sim 2 \times 10^8$	$\sim 5 \times 10^6$
Massive galaxies ( $1 < z < 3$ )	Few hundreds	Few tens
H $\alpha$ Emitters with metal abundance measurements at $z \sim 2-3$	$\sim 4 \times 10^7 / 10^4$	$\sim 10^4 / \sim 10^2 ?$
Galaxies in clusters of galaxies at $z > 1$	$\sim 2 \times 10^4$	$\sim 10^3 ?$
Active Galactic Nuclei galaxies ( $0.7 < z < 2$ )	$\sim 10^4$	$< 10^3$
Dwarf galaxies	$\sim 10^5$	
T <sub>eff</sub> $\sim 400$ K Y dwarfs	$\sim \text{few } 10^2$	$< 10$
Lensing galaxies with arc and rings	$\sim 300,000$	$\sim 10-100$
Quasars at $z > 8$	$\sim 30$	None

# Strong Lensing: 60 SLACS

SLACS (~2010 - HST)



SLACS: The Sloan Lens ACS Survey

[www.SLACS.org](http://www.SLACS.org)

A. Bolton (U. Hawai'i IIA), L. Koopmans (Kapteyn), T. Treu (UCSB), R. Gavazzi (IAP Paris), L. Moustakas (JPL/Caltech), S. Burles (MIT)

# Va devenir une industrie

Etudes des sous-structures → **Contraintes sur la matière noire**

→ Nombre similaire par unité de surface avec SKA 100 000



# Matière Froide ou tiède?



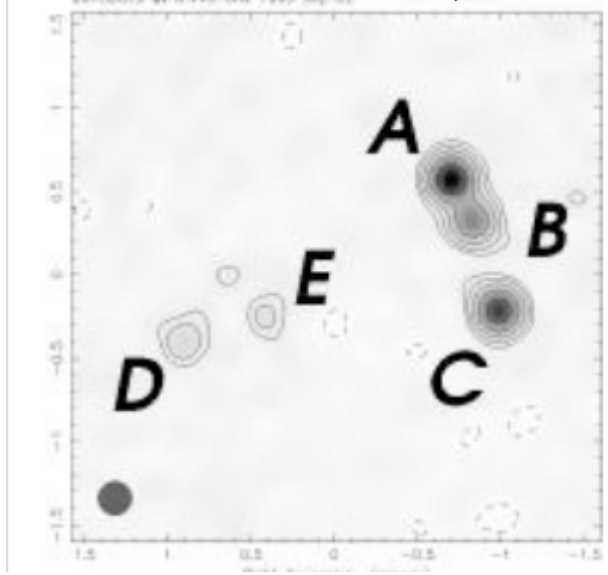
CDM



WDM

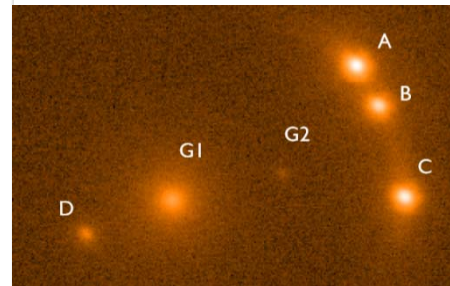
# Faire des images avec des lentilles

CLASS B2045+265, VLA 15GHz

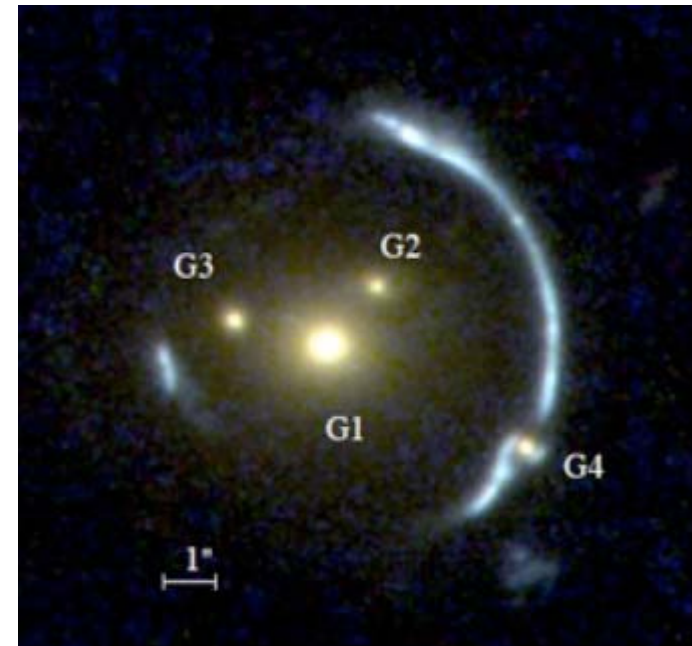


E=G1

NIR, Keck



Dwarf G2: lens



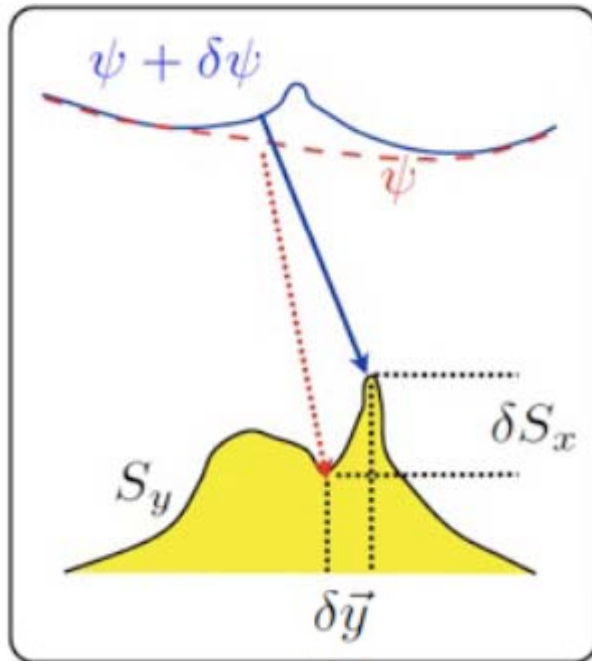
Detector des sous-structures comme des anomalies de rapports de flux entre images

→ jusqu'à présent: uniquement des naines brillantes, pas besoin de halos noirs

sous-structures comme des anomalies de brillance

Sous-structure:  
source ou lentille?

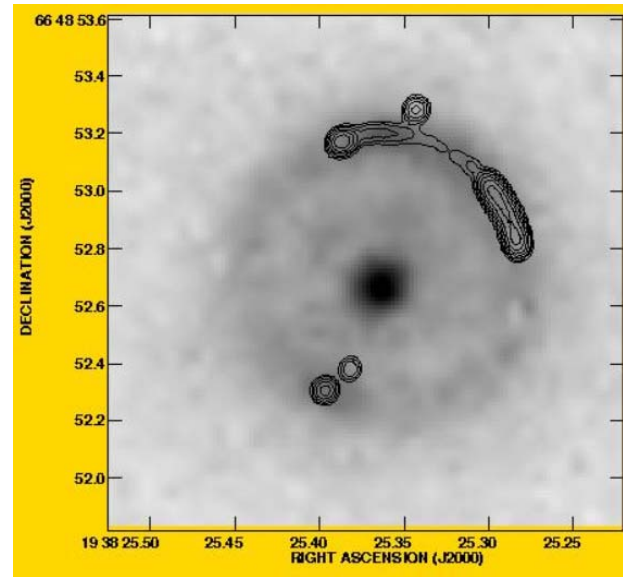
# Outil des lentilles fortes



Potentiel

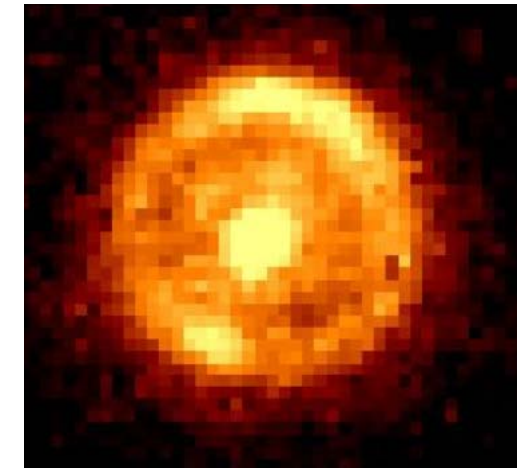
$$\psi = \psi \text{ lisse} + \delta\psi \text{ (pixel)}$$

Modéliser les sous-structures à la fois dans la source et dans la lentille

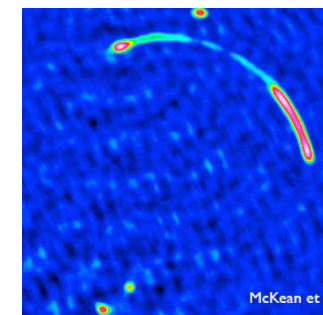


Radio (Merlin)

B1938+666



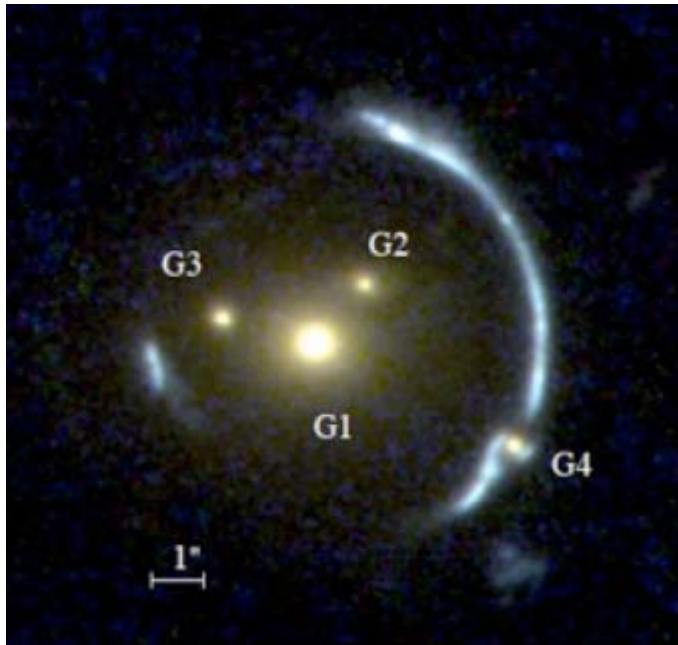
HST NIR



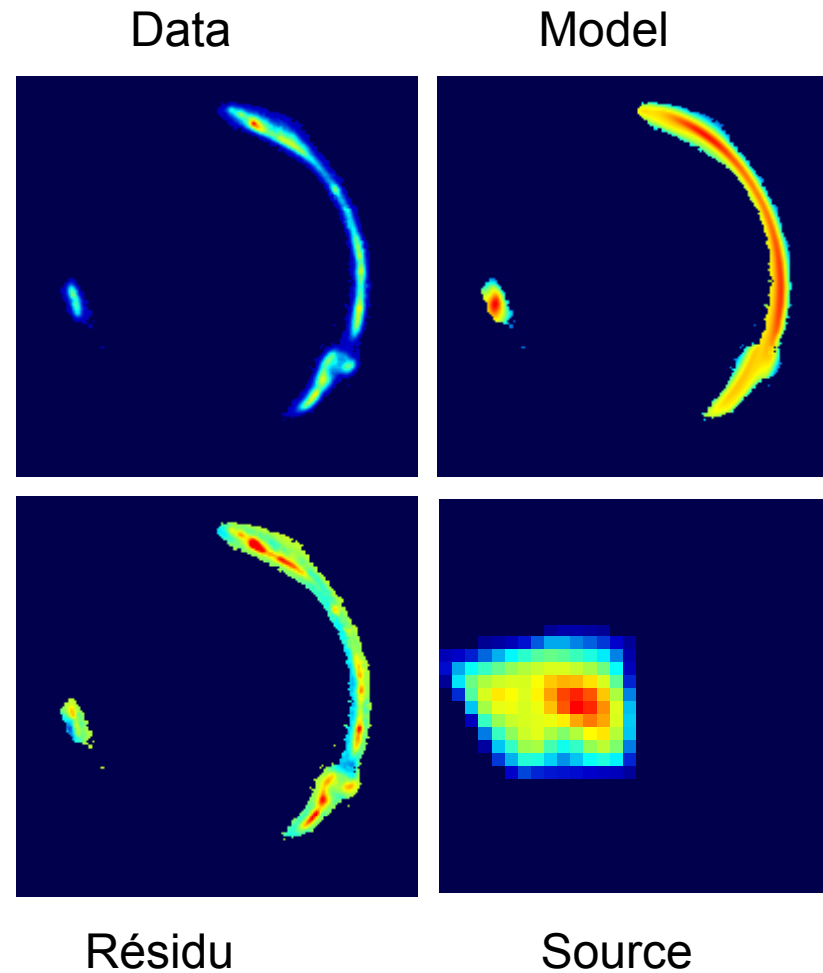
EVN  
3mas  
McKean



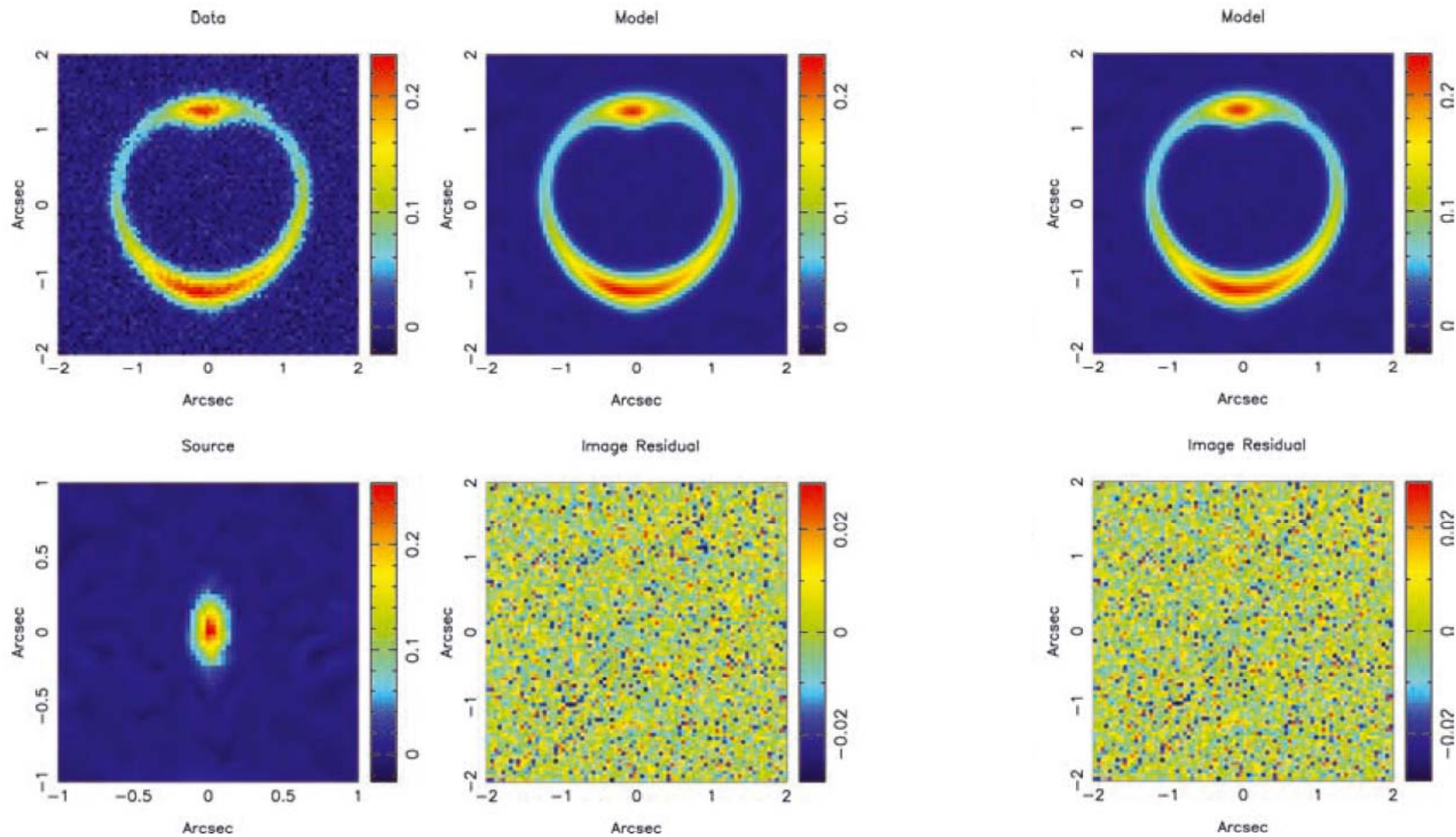
# Modèle simple source lisse $\rho \sim r^{-\alpha}$



SDSSJ120602.09+514229.5  
Vegetti et al 2010



# Ajout d'une sous-structure

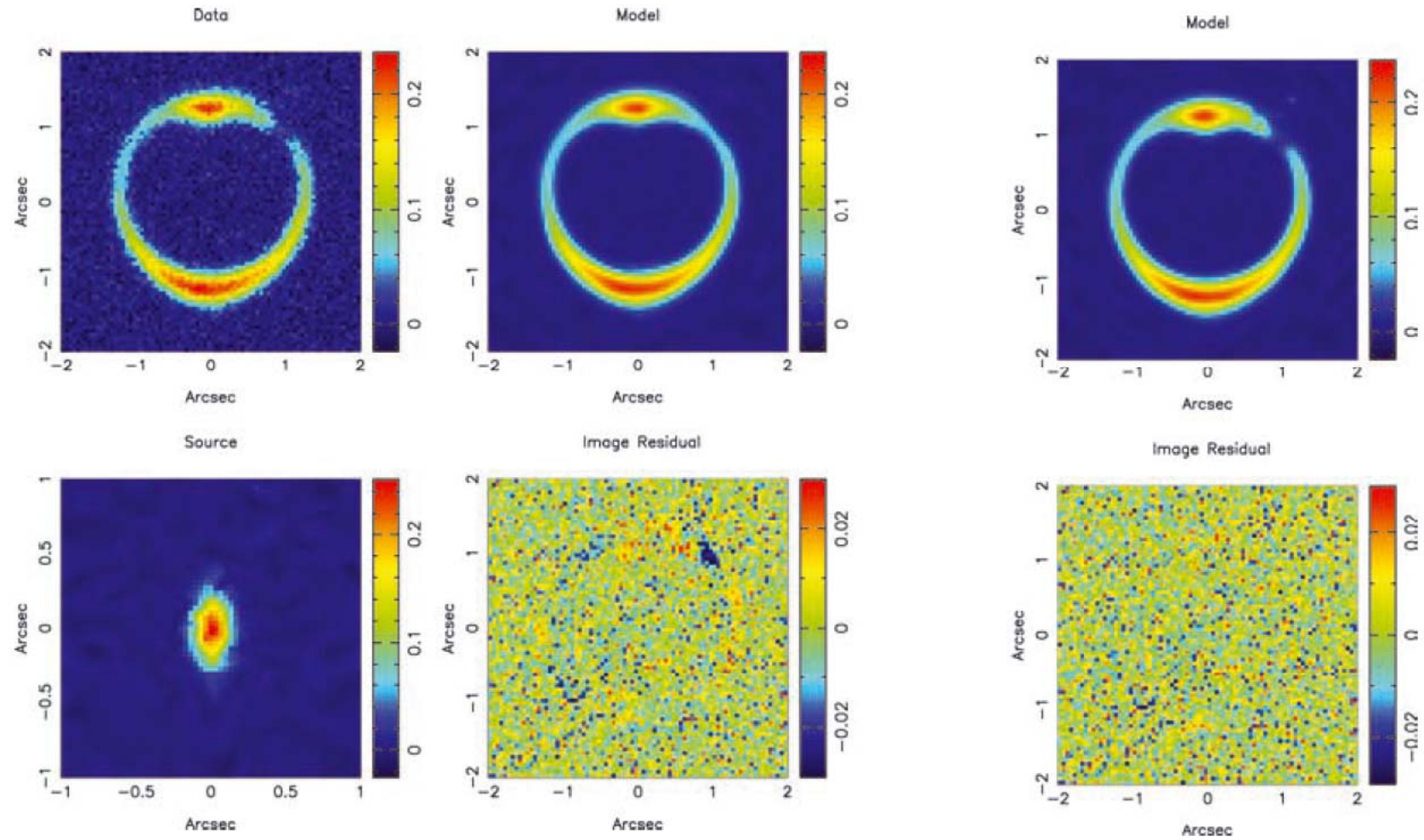


Potentiel lisse

$$M_{\text{sub}} = 10^7 M_{\odot}$$

*Vegetti et al 2009*

# Ajout d'une sous-structure (2)

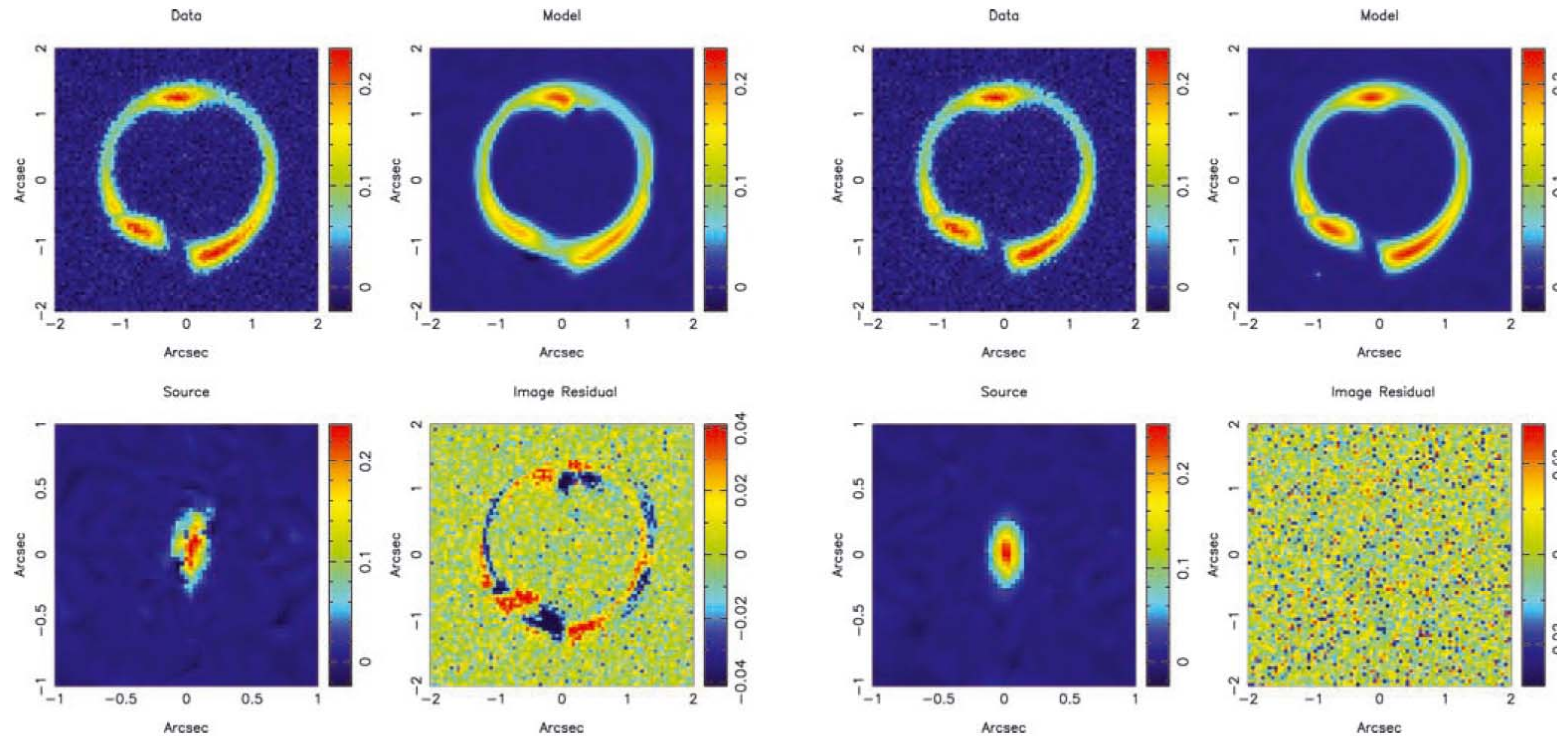


Potentiel lisse

$$M_{\text{sub}} = 10^8 M_{\odot}$$

*Vegetti et al 2009*

# Dégénérescence source-lentille



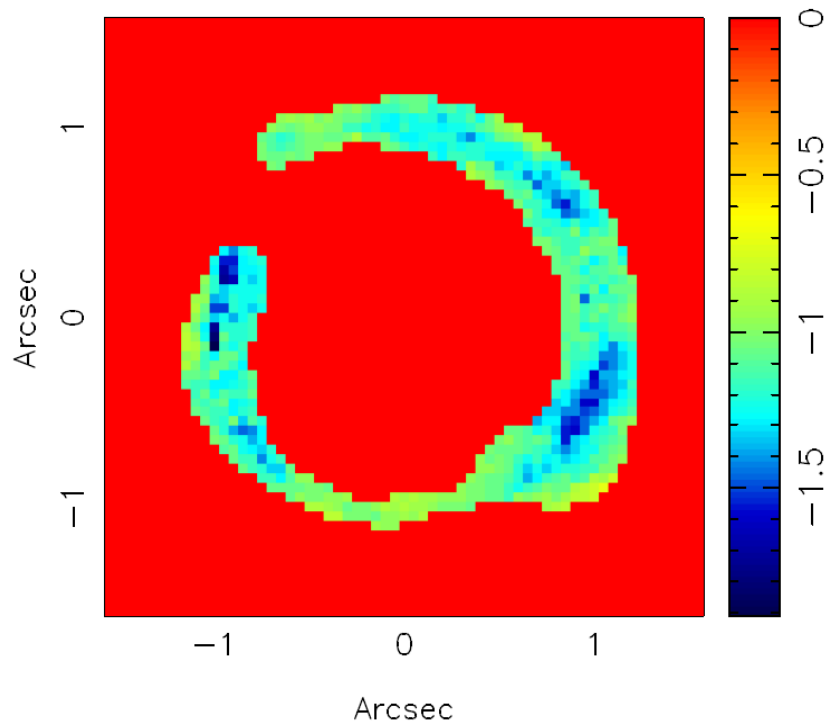
Potentiel lisse

$$M_{\text{sub}} = 10^9 M_{\odot}$$

Possible de détecter  $M > 10^7 M_{\odot}$  sur l'anneau d'Einstein, ou bien  $M > 10^9 M_{\odot}$  proche de l'anneau

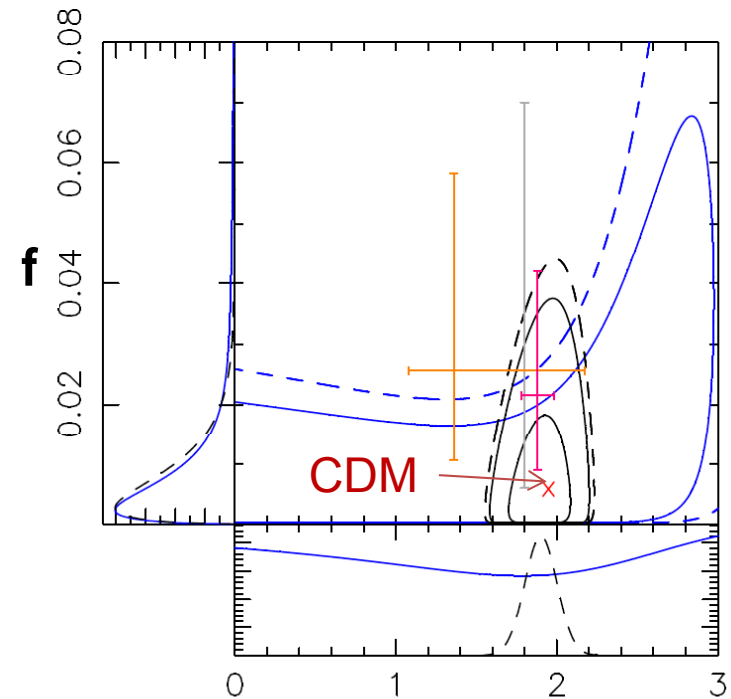
# Contraintes actuelles, 12 anneaux d'Einstein

Les plus faibles  $M$  détectables,  
unités  $10^{10}M_{\odot}$



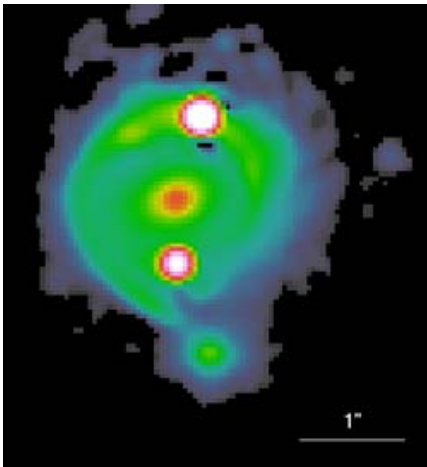
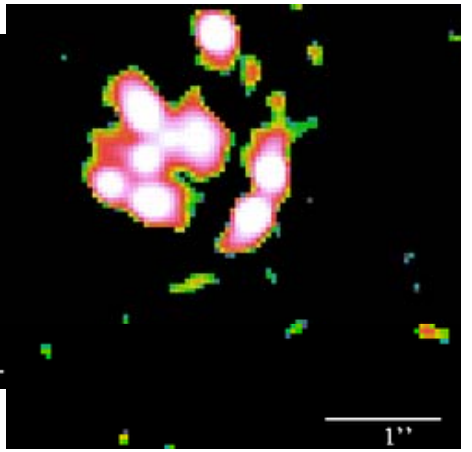
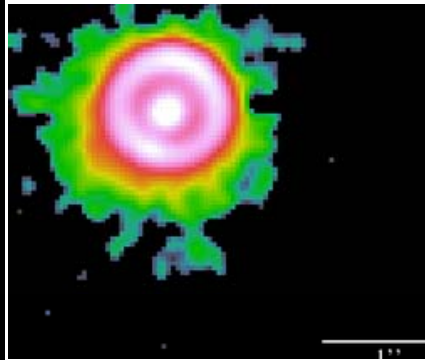
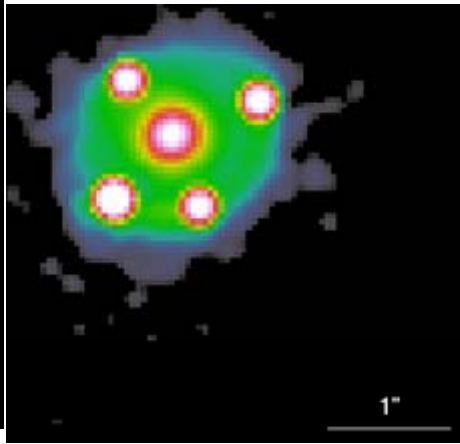
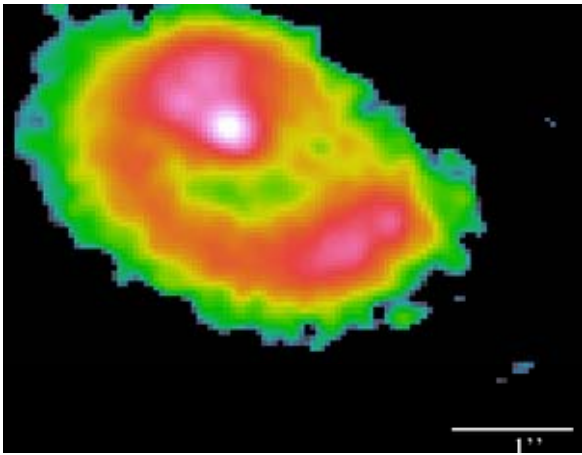
*SDSS J0252+0039, Vegetti et al 2014*

Aucune structure « noire » détectée,  
Une sous-structure visible détectée  
 $\langle z \rangle = 0.2$ ,  $\langle \sigma \rangle = 270 \text{ km/s}$



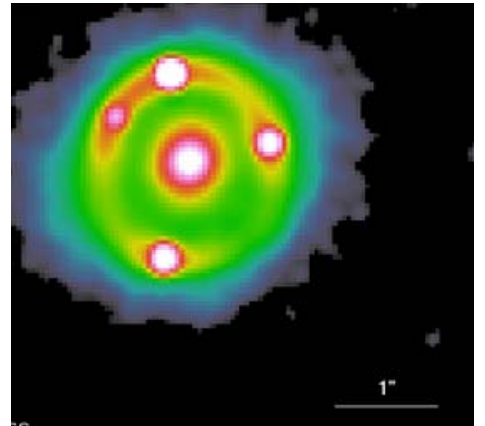
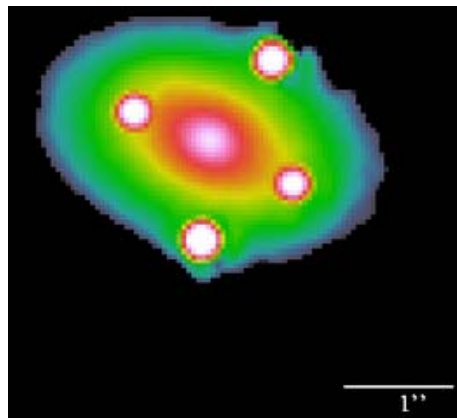
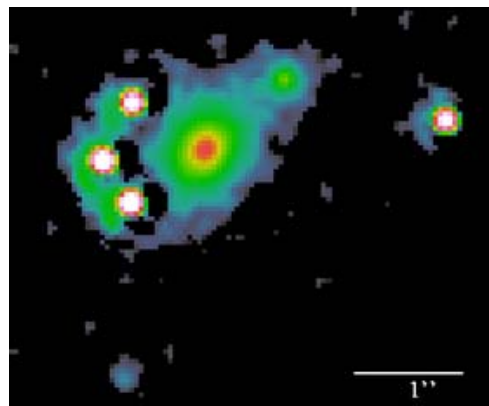
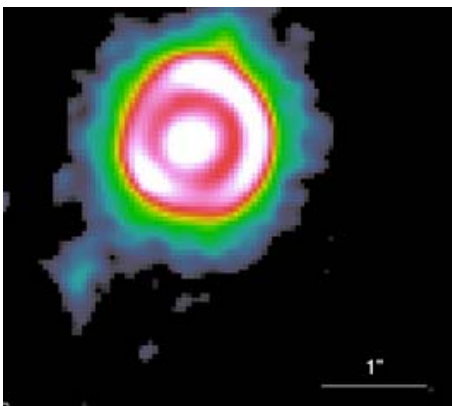
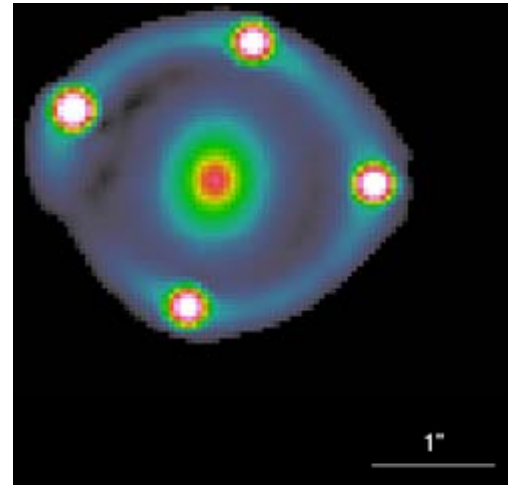
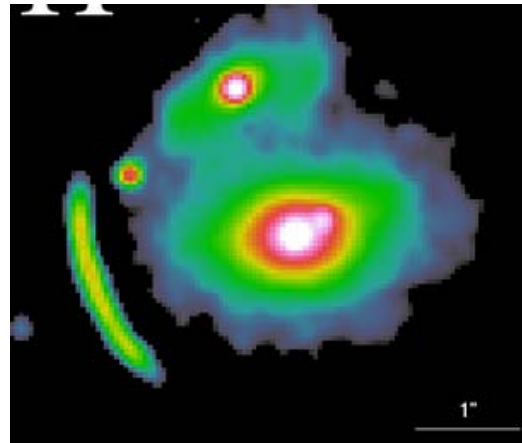
$\alpha =$  pente de la fonction de masse

$f < 0.006$  fraction de masse dans les  
sous-structures  $\alpha < 1.90$

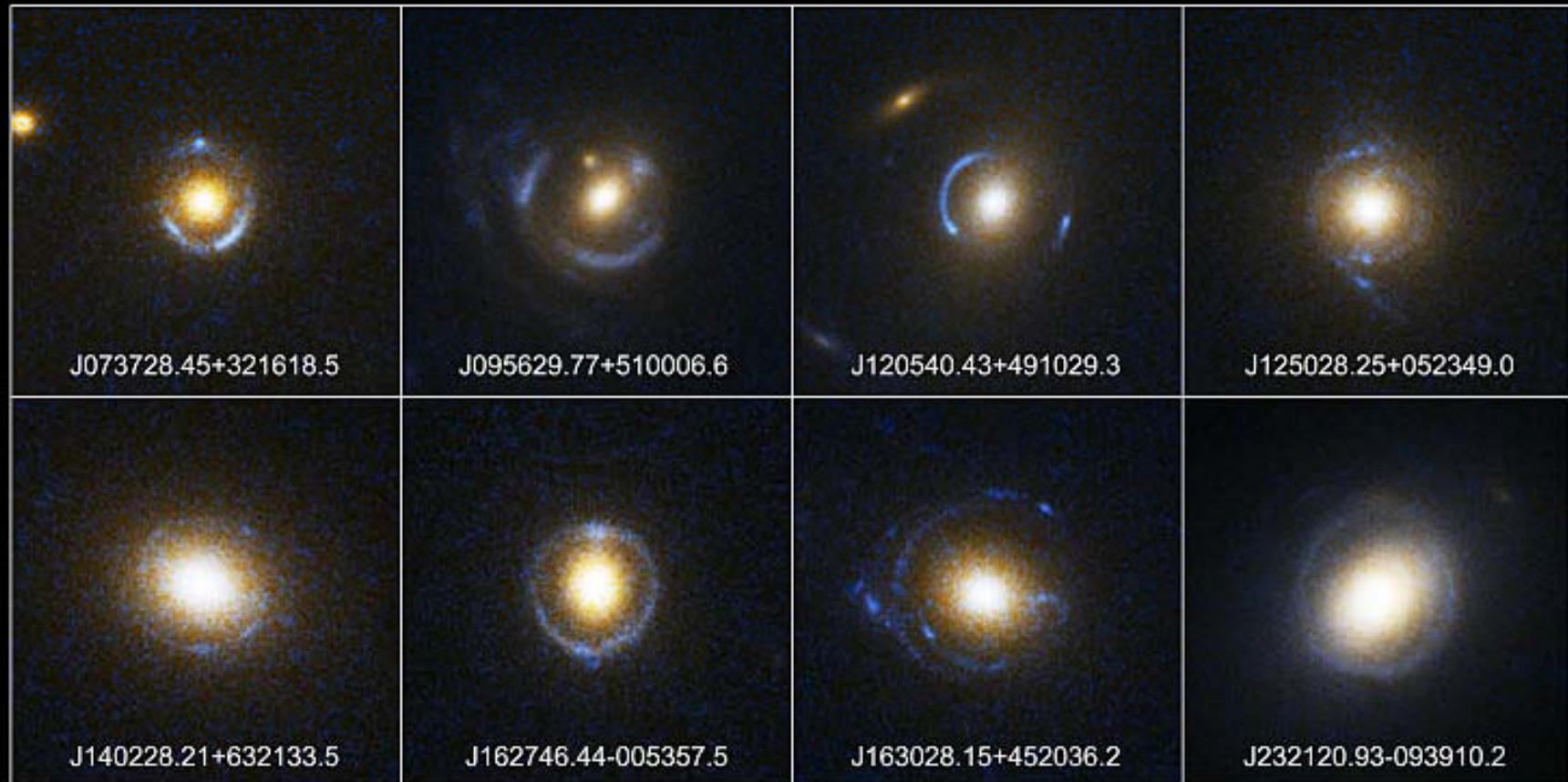


CASTLES

Proche IR



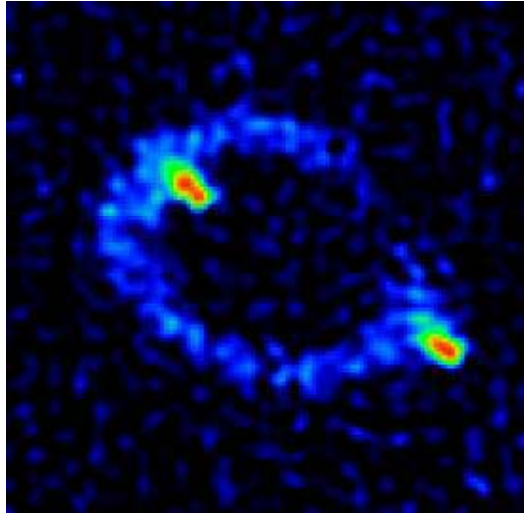
# Anneaux d'Einstein en optique



**Einstein Ring Gravitational Lenses**  
*Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys*

# Anneaux d'Einstein en radio

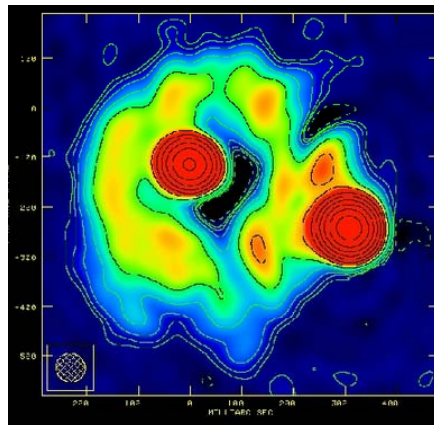
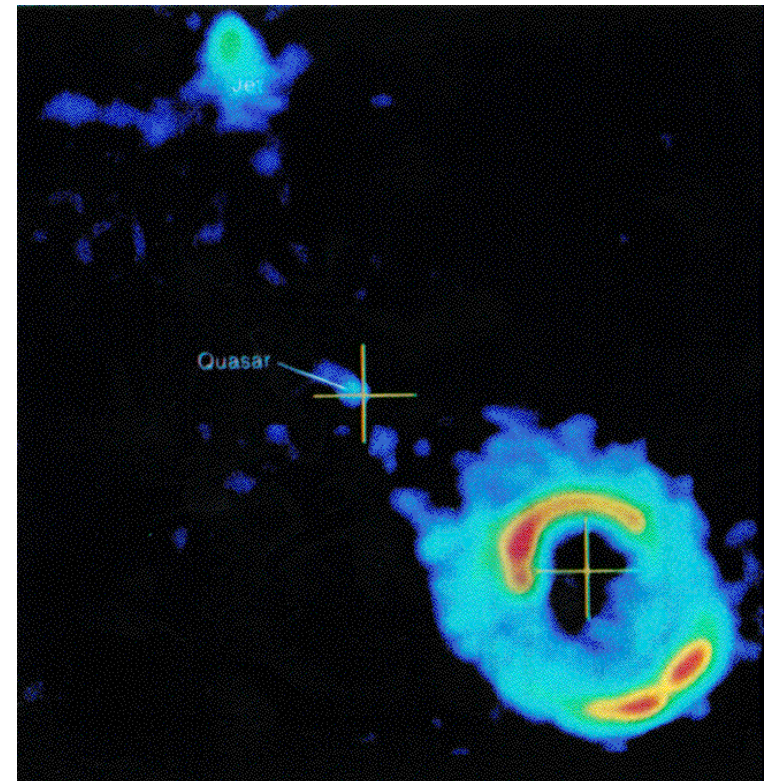
Les premières détections!  
50 ans après la prédiction  
d'Einstein



MG1131+0456, Hewitt 87 PKS1830, Jauncey 1991



MG1654+1346 Langston 1988



B0218, Merlin Biggs et al 2001

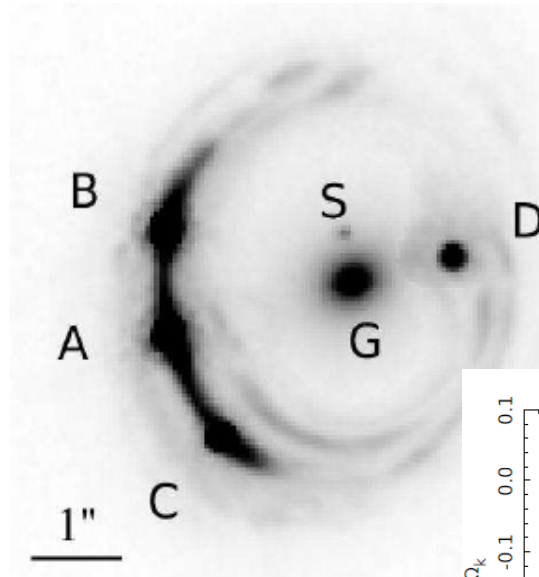
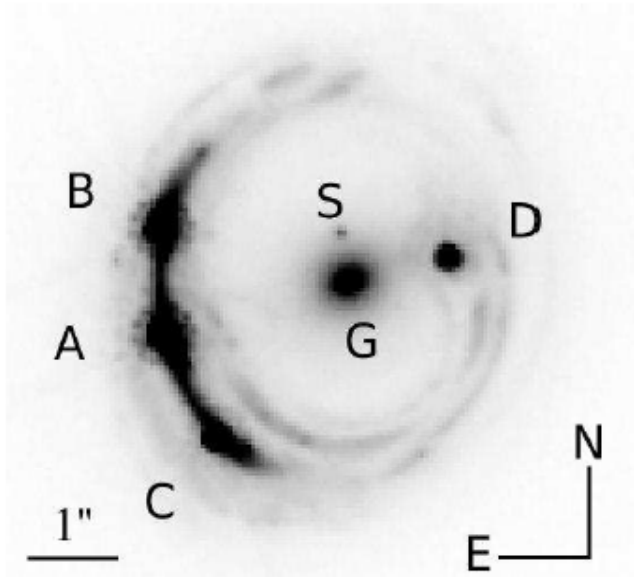




# Autres données: délai temporel

observed

reconstructed

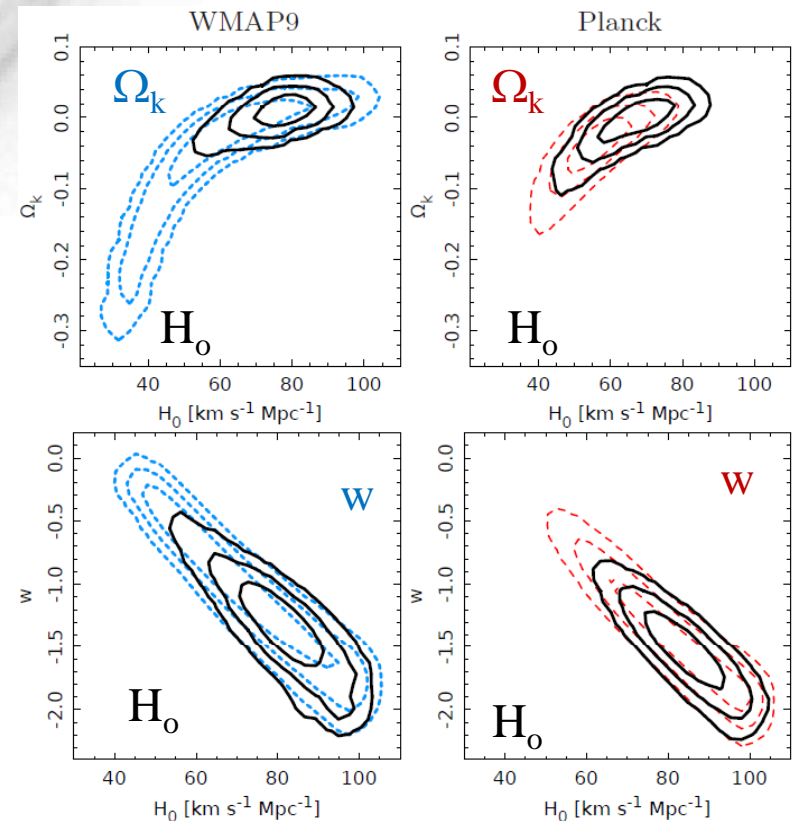


Lentille+ cinématique  
+délai

→ Courbure  $\Omega_k$

→  $H_0$ ,  $w$  (énergie noire)

$P = -w \rho$



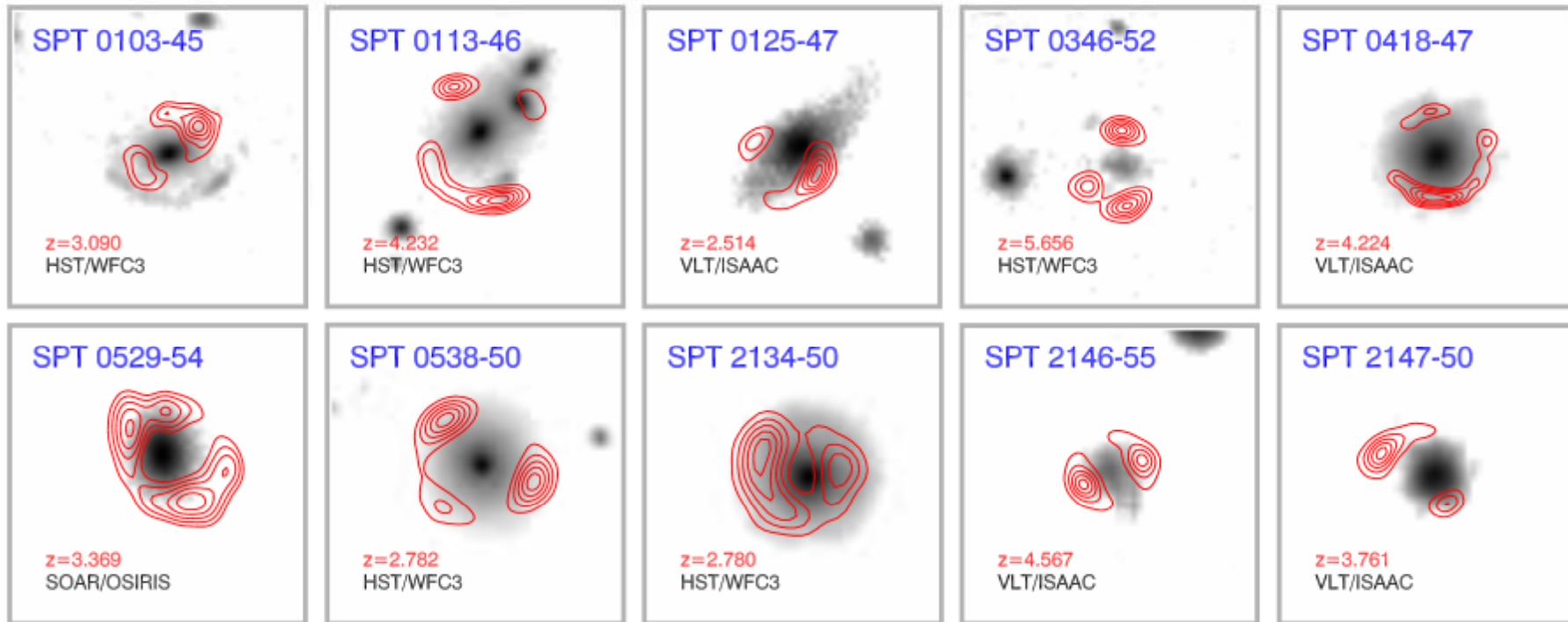
Pour un univers plat,  $H_0 = 82 \text{ km/s/Mpc}$

Et  $w = -1.5$

$H_0 = 65 \text{ km/s/Mpc}$ , si univers ouvert

RXJ1131-1231, *Suyu et al 2014*

# Observations de lentilles avec ALMA



Gris: images proche-IR avec HST, VLT, SOAR

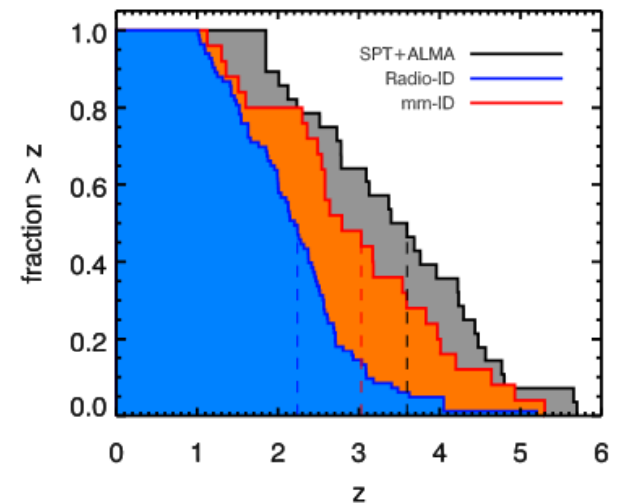
*Vieira et al 2013 (23/26 détectées)*

*10 sources  $z > 4$*

Rouge=870 mm contours ALMA, 2min, 0.5''

Redshift spectro obtenu avec ALMA

Cycle 0 (16 antennes au lieu de 60)



# Contraintes statistiques avec ALMA

On ne peut détecter un halo individuel que si  $M > 10^8 M_\odot$ , mais  
Contrainte statistique sur une multitude de halos  $M \sim 10^6 M_\odot$

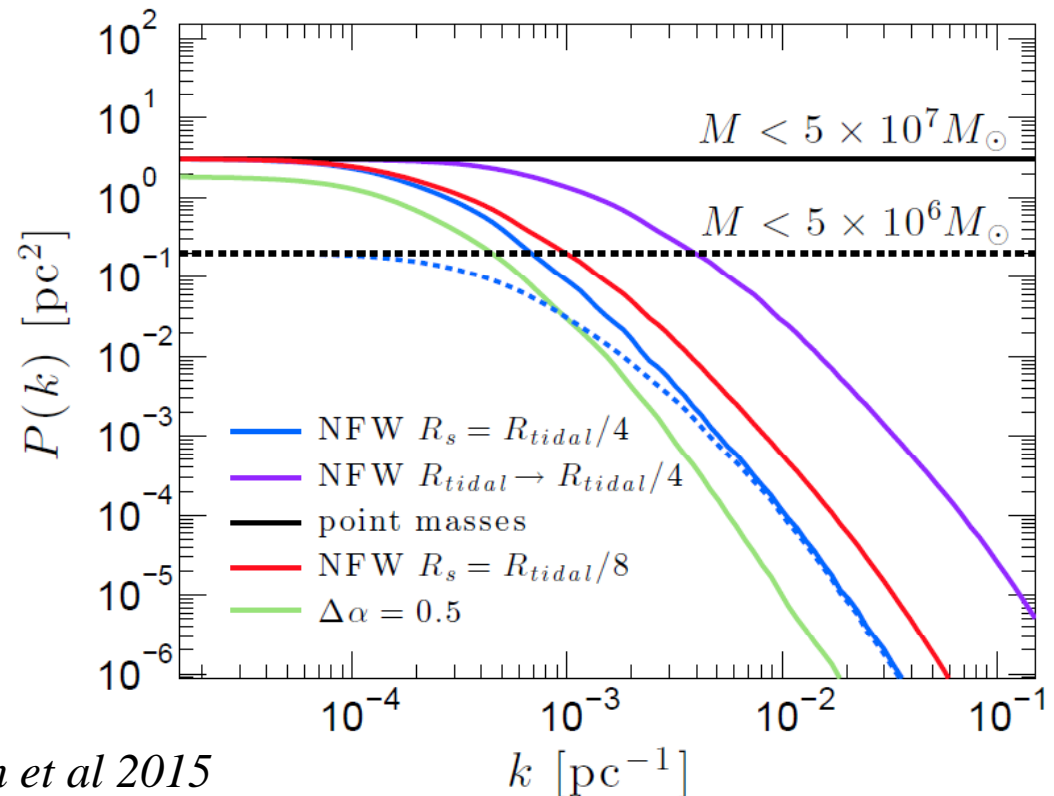
*Dalal & Kochanek 2002, Hezaveh et al 2015*

Spectre de puissance des résidus

La puissance de la lentille  
dépend de la concentration de masse

Sources ponctuelles = cste

Courbe verte: la pente  $\alpha$  de la fonction  
de masse est changée de 0.5  
 $dn/dM \propto M^{-\alpha}$



# Perspectives Lentilles fortes

Square Kilometre Array (**SKA**), **ALMA**

Large Synoptic Survey Telescope (**LSST**)

**Euclid** + telescopes de suivi au sol avec haute-fidélité,

Nombre de lentilles  $\gg 10^4$

200 lentilles d'excellente qualité

Sous-structures  $M > 10^8 M_{\odot}$ ,

La fraction de MN dans les sous-structures pourra

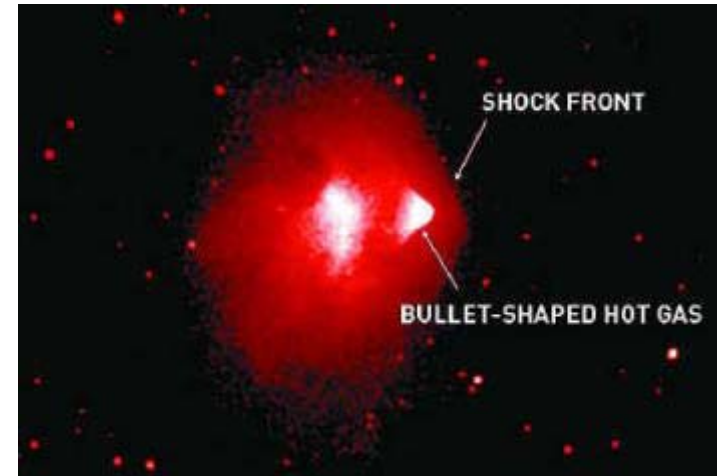
être contrainte à  $f < 0.005_{\pm 0.001}$  (inférieure aux prédictions CDM)

Anomalies de rapports de flux entre images, cinématique

Aussi méthode des délais temporels entre images (QSO variable)

# L'amas du boulet

Gaz X



Cas rare de collision violente, permettant de séparer les composants

→ Limite sur  $\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} < 1 \text{ cm}^2/\text{g}$

En gravité modifiée, besoin de matière non-collisionnelle:  
neutrinos ou baryons noirs

$V=4700\text{km/s}$  (Mach 3)

# Abell 520

$z=0.201$

Rouge = gaz X

Contours = lentilles

→ Matière noire

coïncide avec le gaz X

mais vide de galaxies

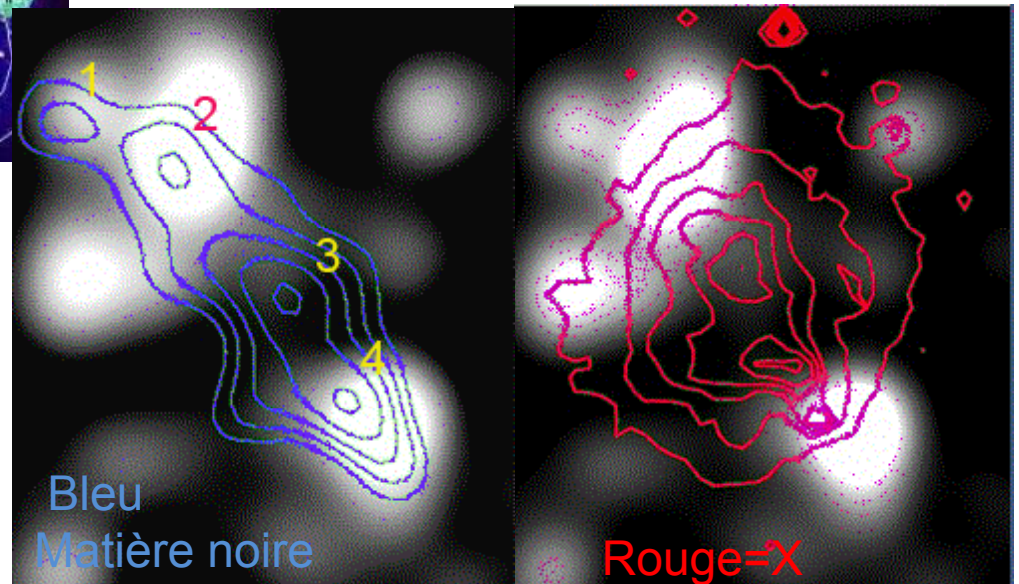
Collisions  $\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} \sim 4\text{cm}^2/\text{g}$



Ou bien existence de galaxies en 3?

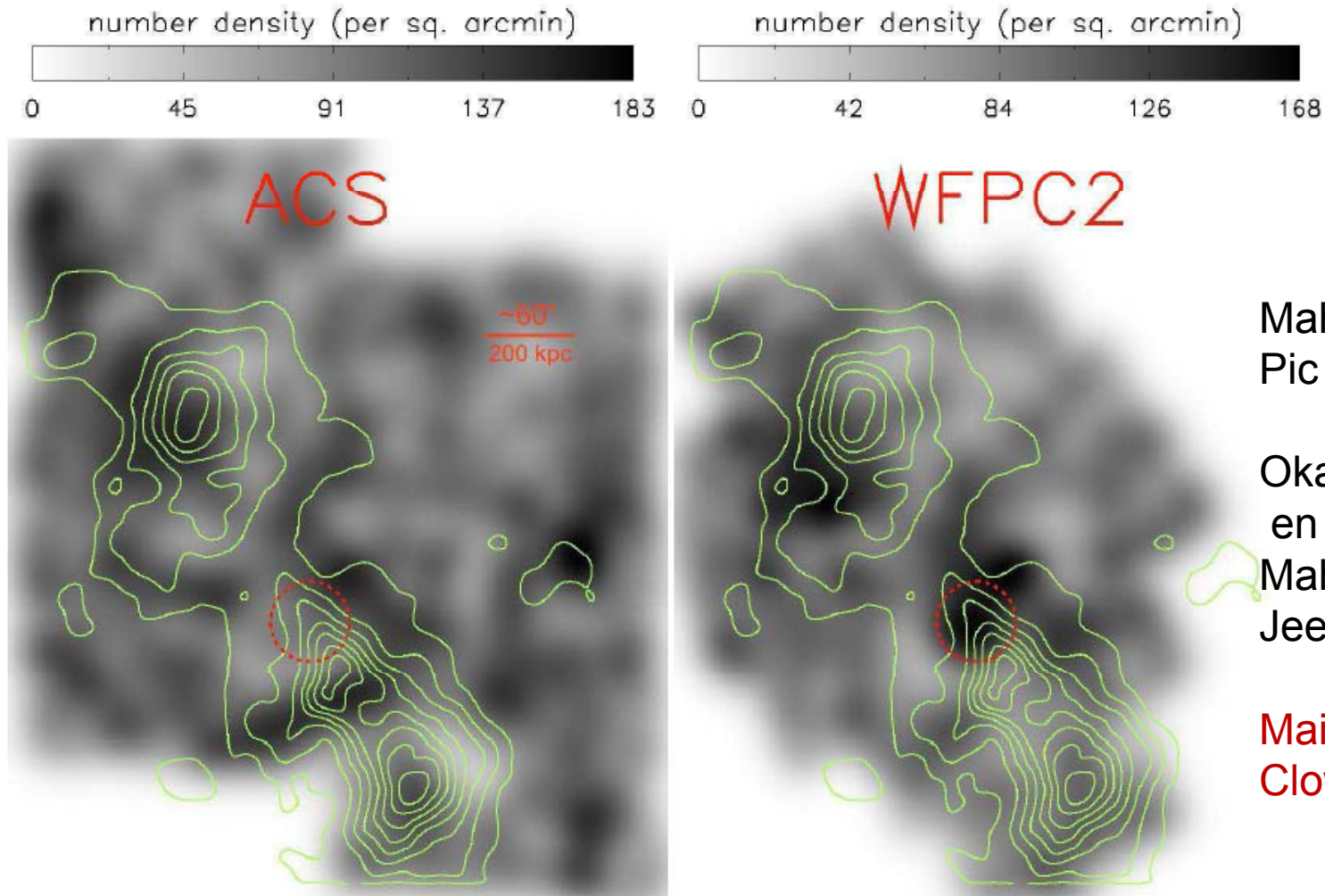
*Mahdavi et al 2007, Clowe et al 2012*

*Jee et al 2012, Jee et al 2014*



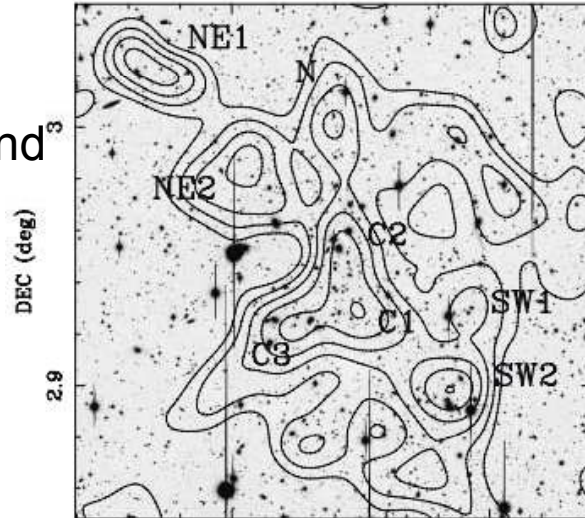
# Controverse: A520, $z=0.199$

La dérivation de la masse totale faite avec différentes cartes

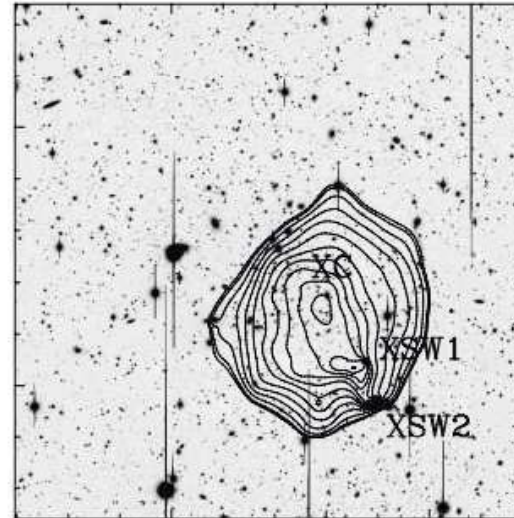


# Okabe & Umetsu 2008

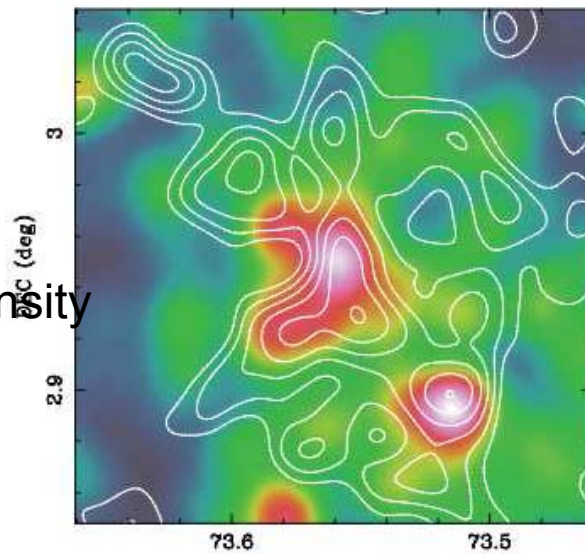
Subaru I band  
+ lensing



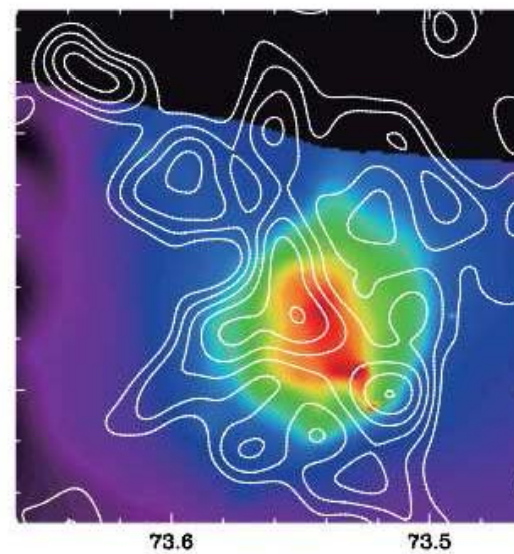
Subaru I band  
+ X-ray



Galaxy density  
+ lensing

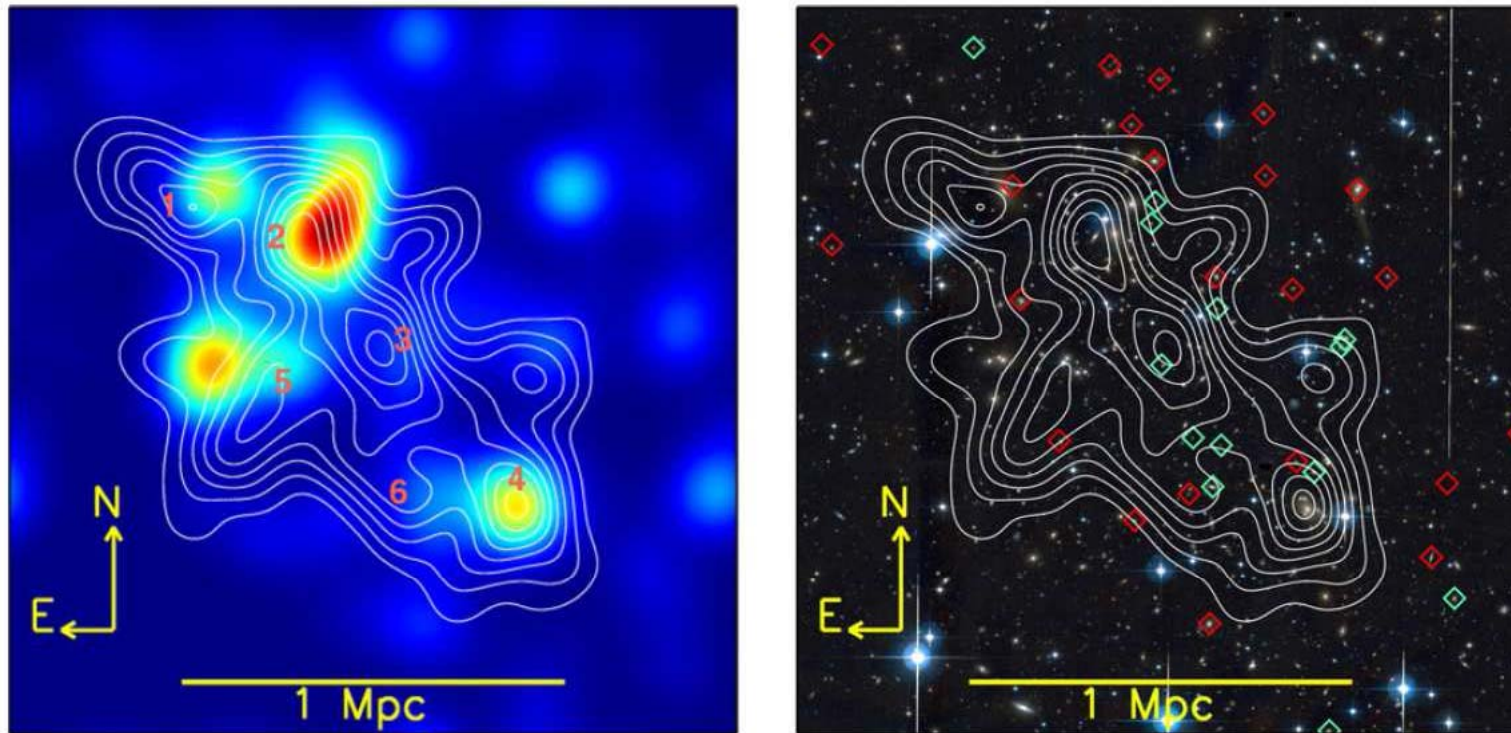


X-ray  
+ lensing





## Jee et al 2012

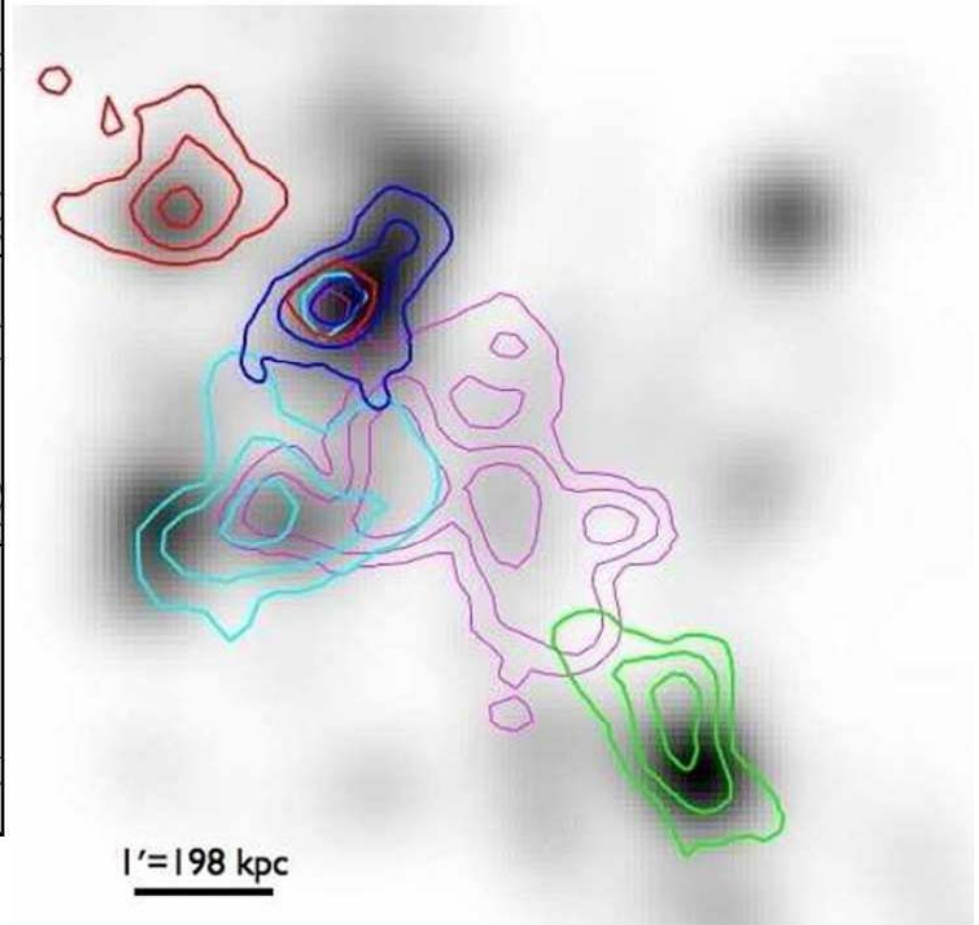
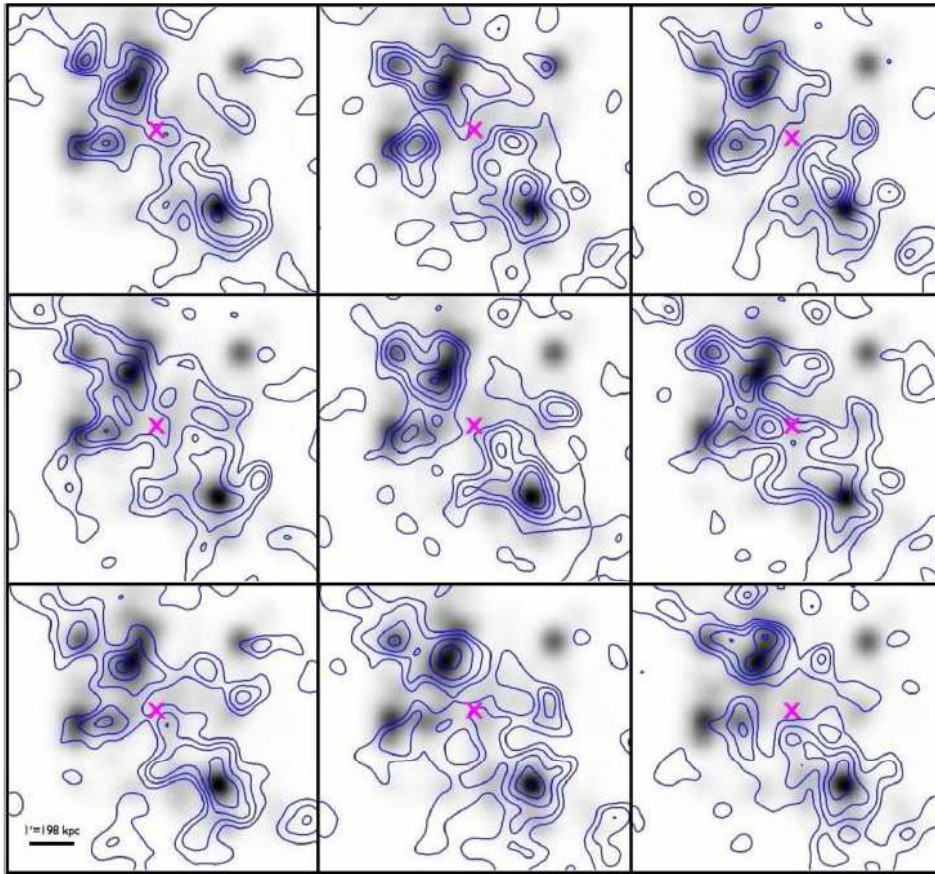


Plusieurs cas (e.g. Abell 1942, Erben+00 et Miralles+02);  
La détection de matière noire n'est pas forcément significative

Des observations plus profondes mesurent des galaxies plus faibles  
avec une orientation/déformation différente,

**Avec plus de signal/bruit → des structures noires disparaissent**

# Clowe et al 2012



9 réalisations possibles au hasard

# MCC: Merging cluster collaboration

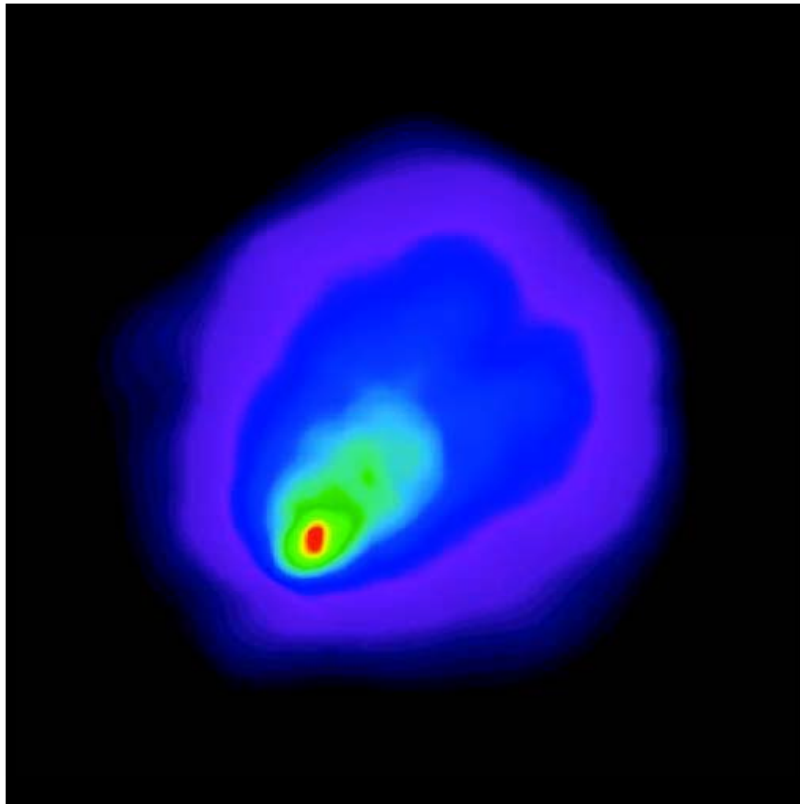
Combien de cas observés? Seulement 5-6 à présent!



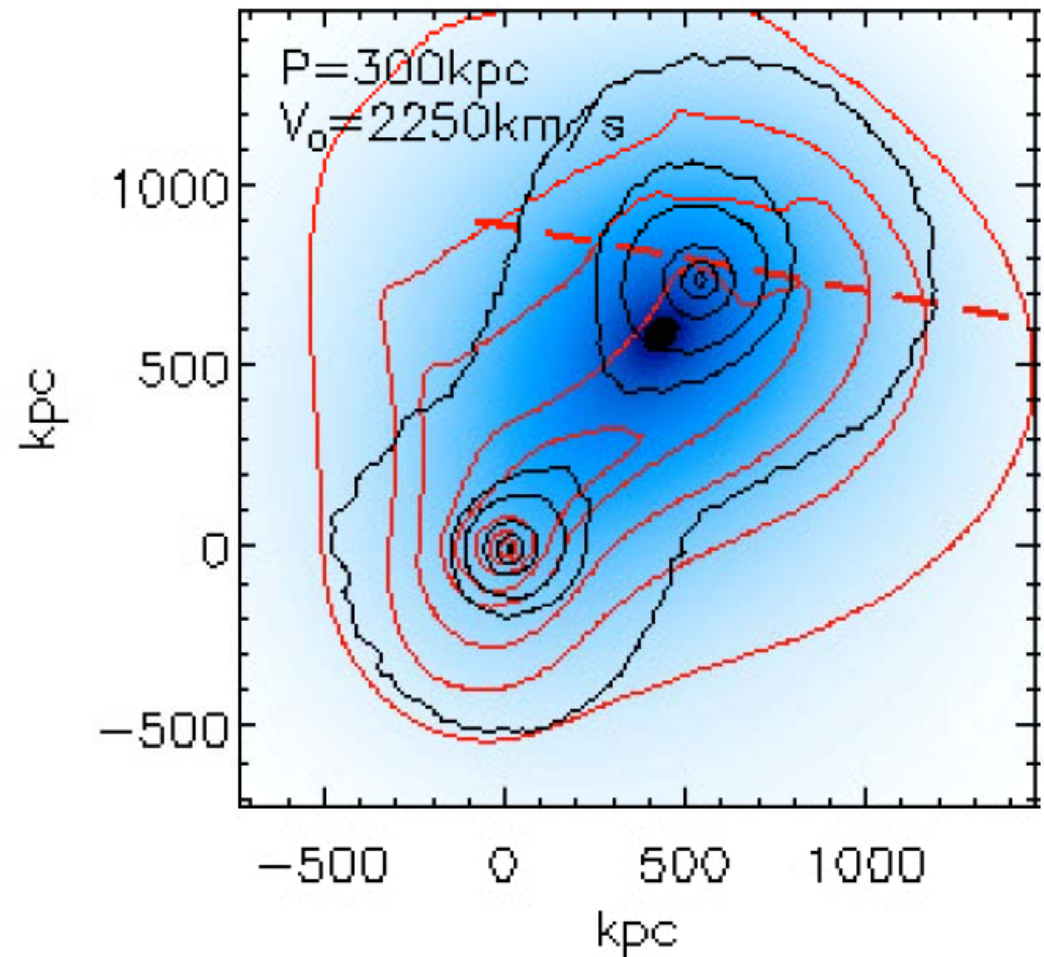
➔ Perspectives de beaucoup plus de cas significatifs dans le futur

# El Gordo, massif et très rare pour $\Lambda$ CDM $z=0.87$

2 amas de  $M = 1.4$  et  $0.7 \cdot 10^{15} M_{\odot}$



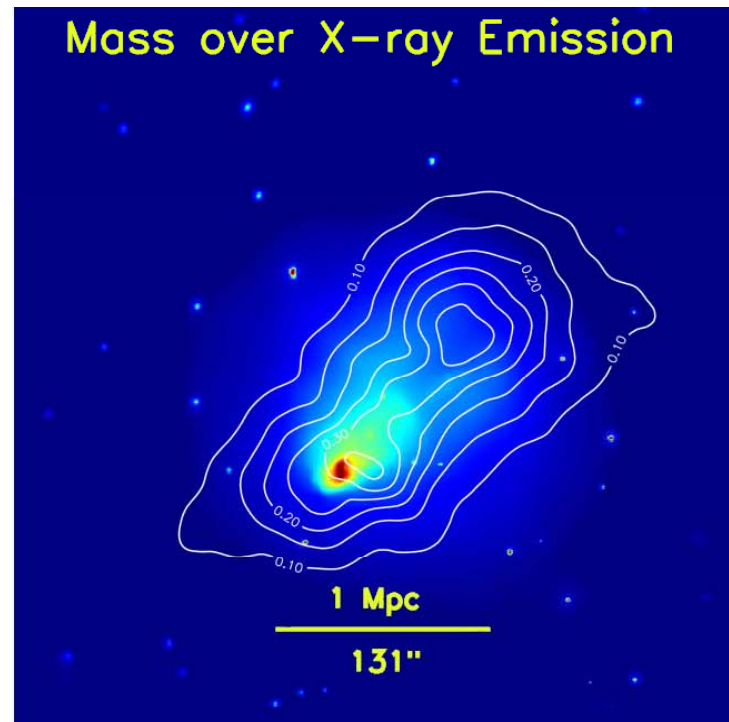
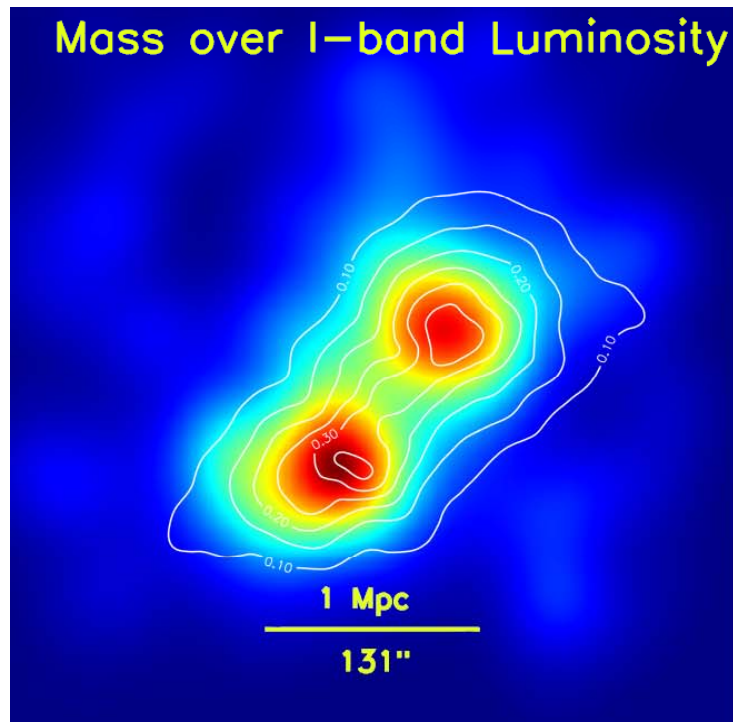
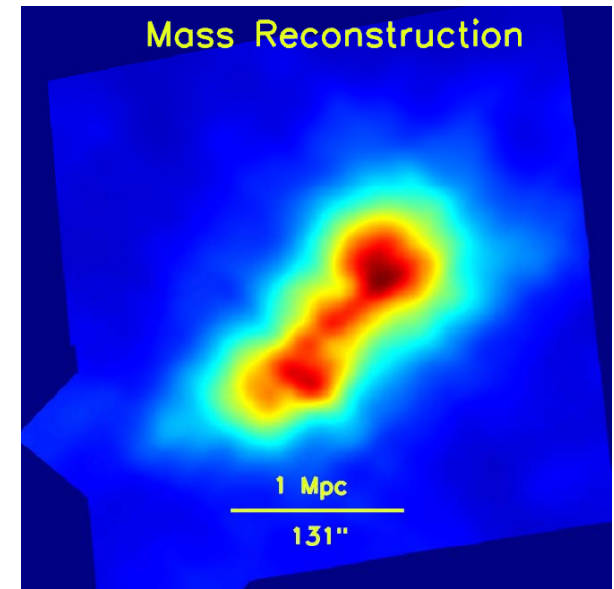
Jee et al 2014



# El Gordo, masse totale

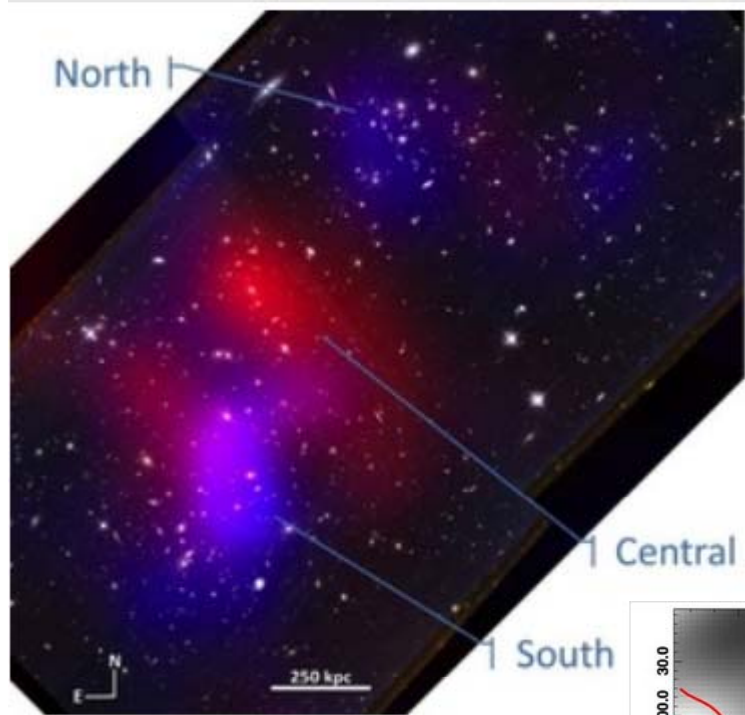
Le pic de gaz chaud est déplacé  
à l'extérieur des galaxies, à 62kpc

**La masse totale** est décentrée par rapport  
aux amas stellaires



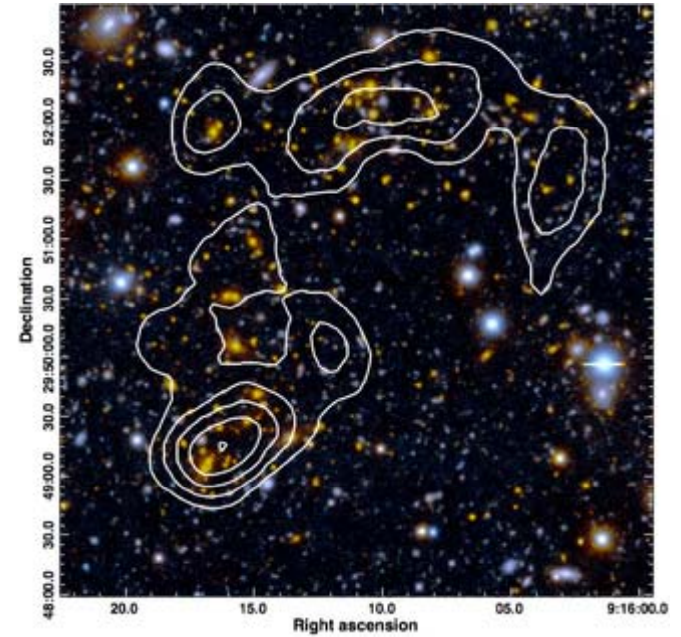
*Jee et al 2014*

# L'amas de la balle de mousquet (0.7 Gyr)



Rouge: gaz chaud  
(rayons X)

Contours blanc:  
Masse stellaire

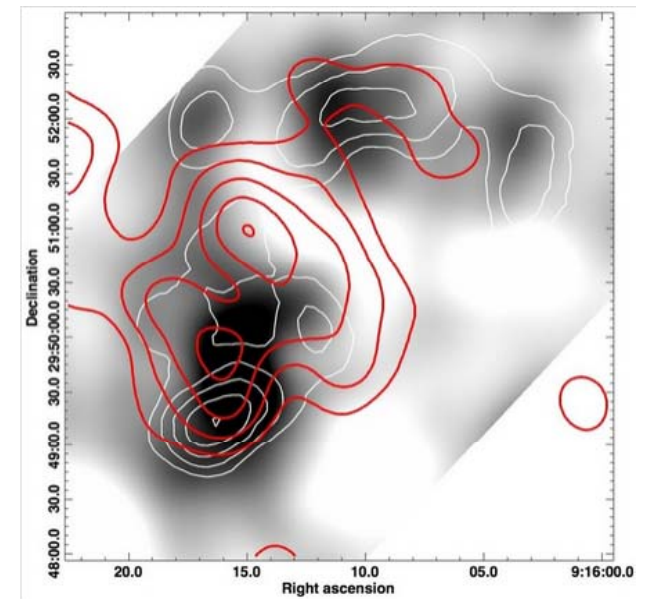
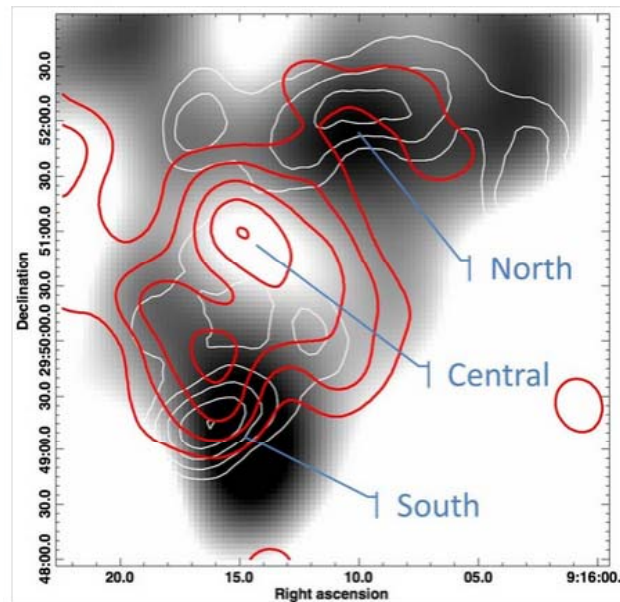


Subaru (sol)

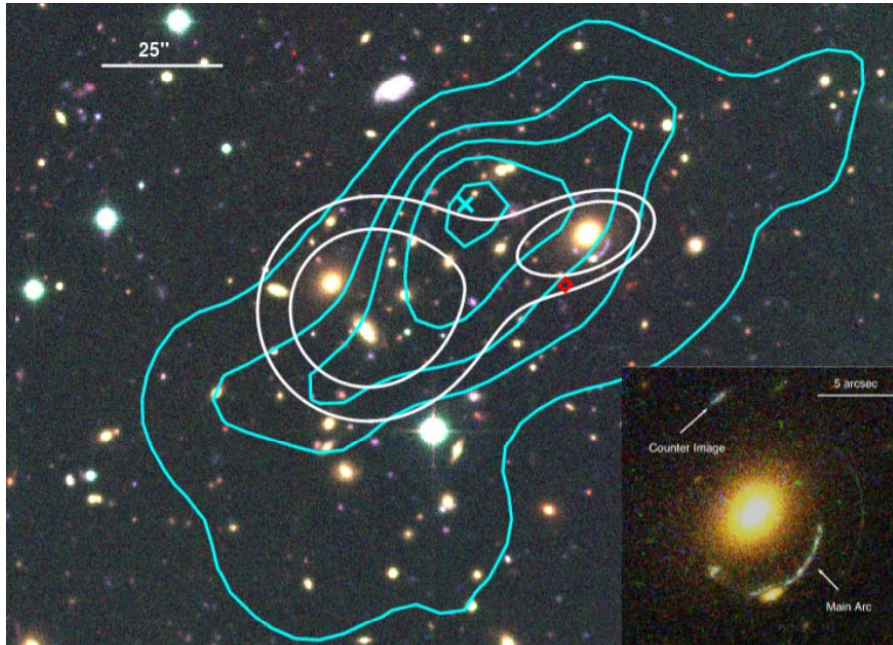
HST (espace)

Images en grisé:  
Masse totale à partir  
des lentilles

$$\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} < 7 \text{ cm}^2/\text{g}$$



# Petits boulets



**Groupe de galaxies,**  
Lentille forte, modèle à 2 composantes

Contours blancs

$M \sim 2 \cdot 10^{14} M_{\odot}$

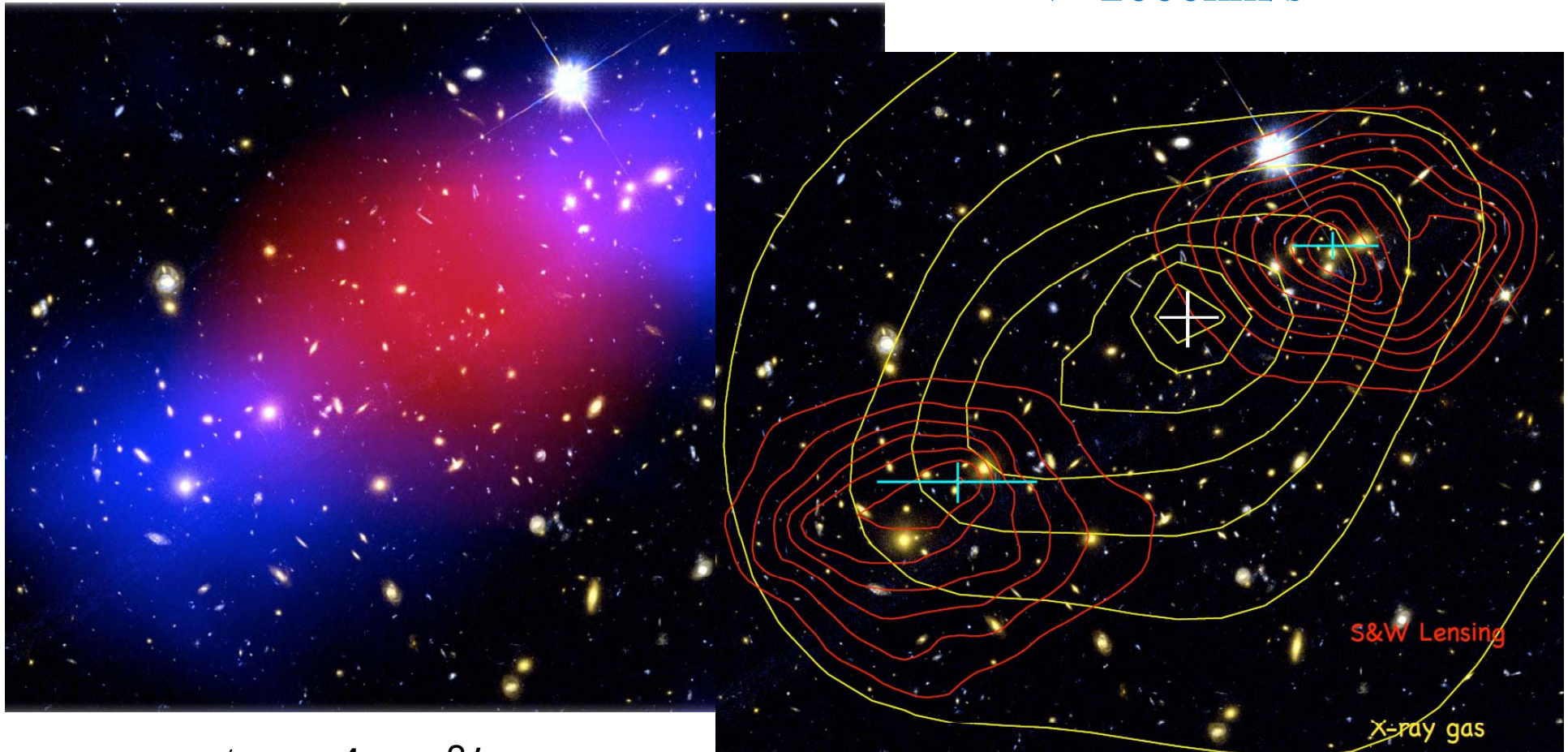
$\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} < 10 \text{ cm}^2/\text{g}$

**Gaz chaud X en bleu**

*Gastaldello et al 2014*

# MACS J0025-1222: « Baby bullet »

$z = 0.586$  Finalement très massif aussi!  $M = 6 \cdot 10^{14} M_{\odot}$ ,  
 $V = 2000 \text{ km/s}$



$\sigma/m < 4 \text{ cm}^2/\text{g}$   
Bradac et al 2008



# Pandora cluster: Abell 2744

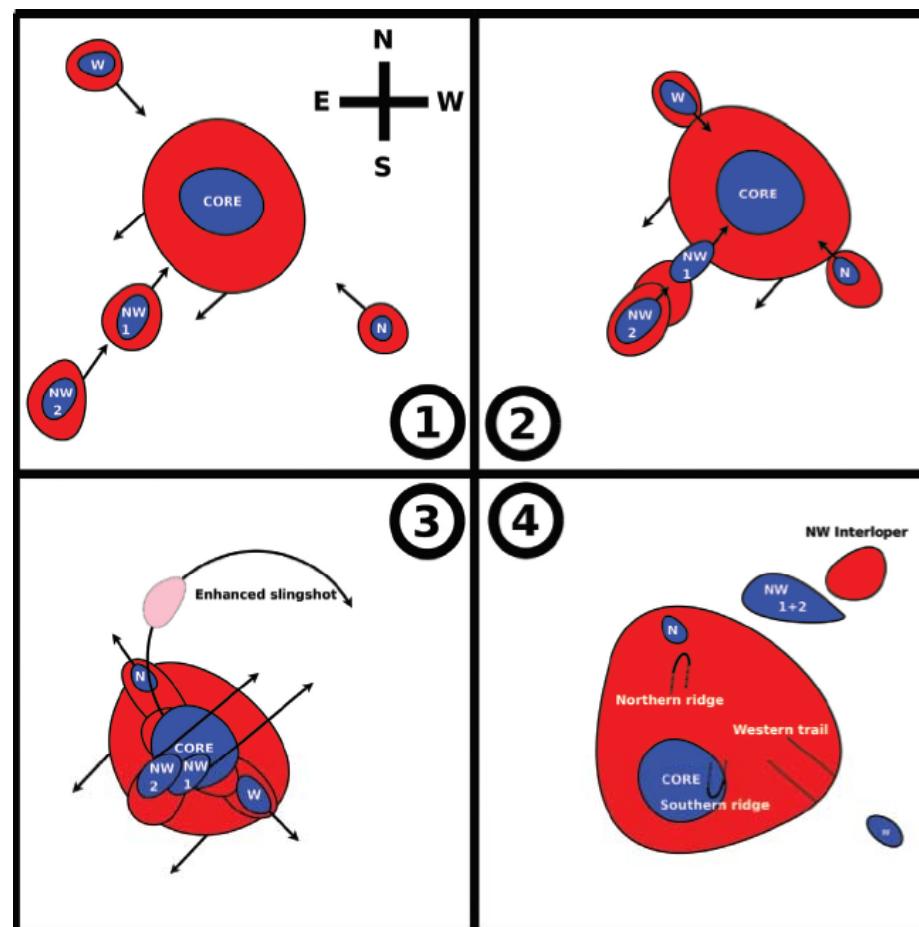
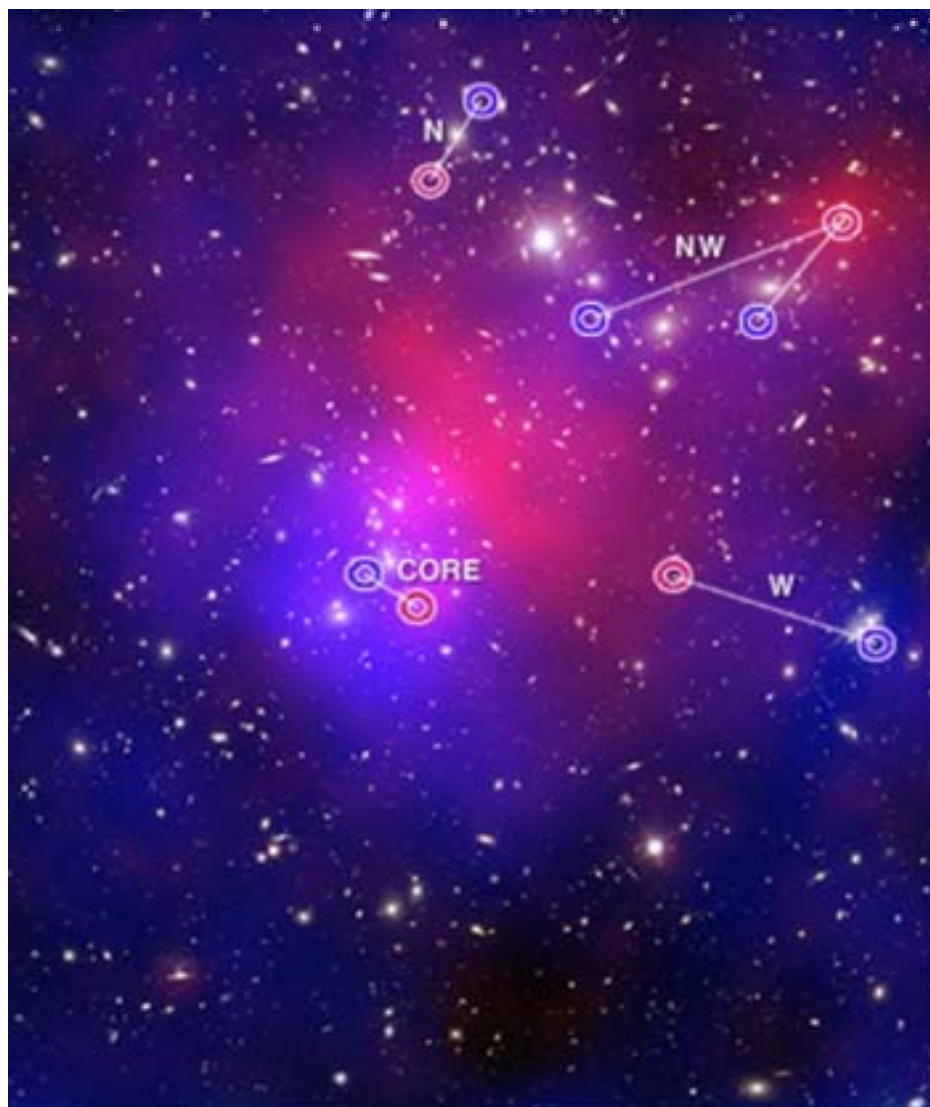
$z=0.308$  Merten et al 2011

Lentilles fortes 11 galaxies  
Shear HST, VLT, Subaru

*Au moins 5 composantes*

Gaz chaud parfois plus loin  
du centre que les galaxies

Effet de fronde  $\sigma/m < 3 \text{ cm}^2/\text{g}$



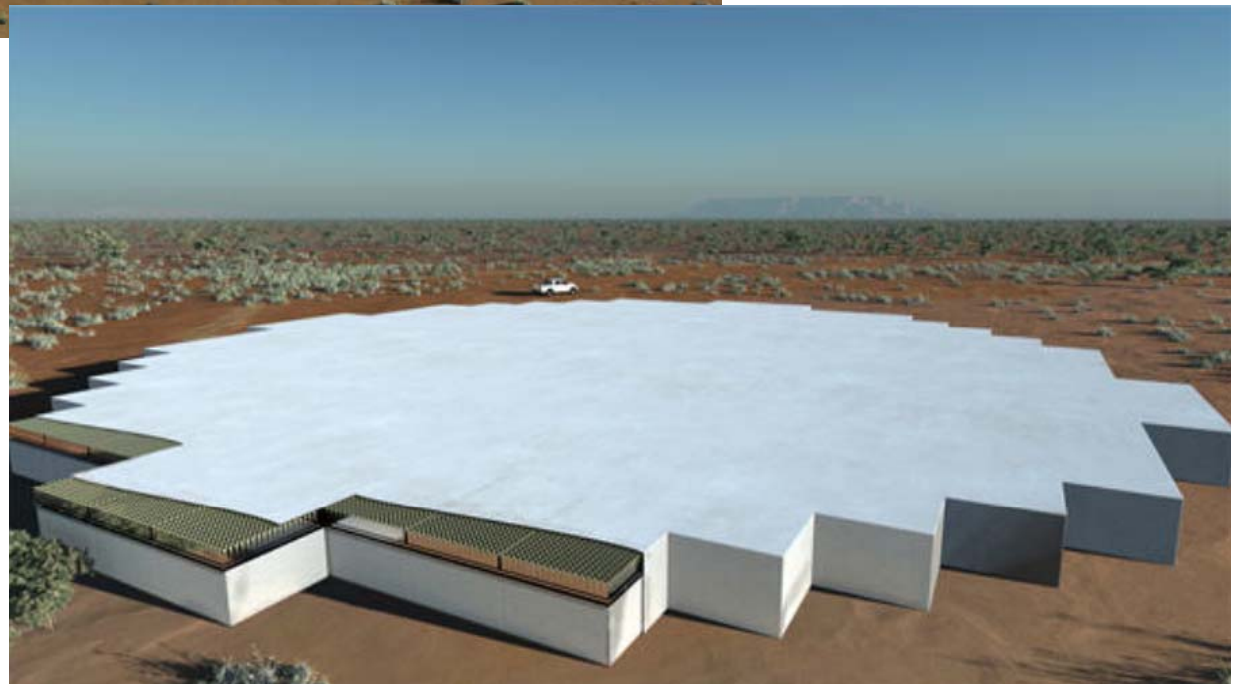


Paraboles

**Hautes fréquences  
(Afrique du Sud)**



**Moyenne Fréquence  
Réseaux phasés**





## Basses Fréquences (Australie)

Plus de **900 stations**, chacune contenant environ **300 antennes individuelles dipolaires**, plus **96-paraboles**  
Télescope 'SKA1-Survey', incluant le réseau actuel de ASKAP à 36 paraboles

[www.skatelescope.org](http://www.skatelescope.org)



# LSST Large Synoptic Survey Telescope

LSST observe tout le ciel austral à  $\delta=+15^\circ$  avec des poses de 10 sq.deg

**Deux surveys planifiés:**

**Le principal**

Survey étendu profond: 18 000 degrés carrés à une profondeur de  
u: 26.1 g: 27.4 r: 27.5 i: 26.8 z: 26.1 y: 24.9

**Survey très profond, focalisés**

10% du temps: ~30 champs sélectionnés  $300^\circ 2$   
Continuellement poses 15sec. 1heure/nuit

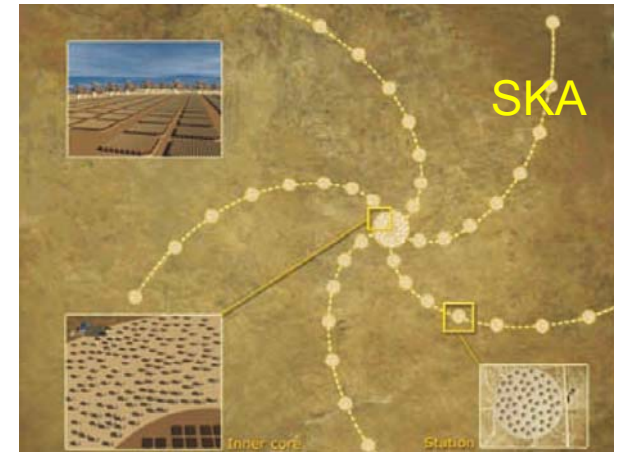


**Tout le ciel visité 800 fois avec des poses de 30s**

**Alertes sur les objets variables relayées partout dans les 60s.**

# Traitement des données

**Un énorme défi, pour SKA: qqs Petabytes/sec**  
Machines Petaflops travaillant en continu ( $\sim 10^8$  PC)  
Qq Exabytes/heure, paraboles=10x débit internet global,  
Réseaux Phasés =100x le trafic internet global!

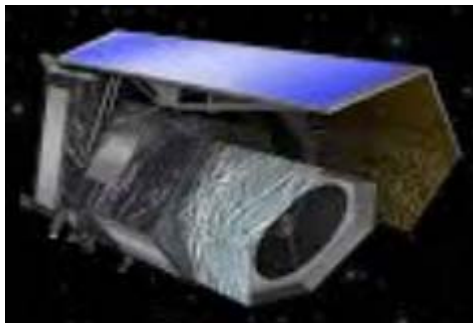


**LSST: plus de la moitié du coût est dû aux data processing!**  
1-2 millions d'alertes par nuit, disponibles à tous en 60sec

**15 Tbytes /nuit**

**Tous les 3 jours on observe tout le ciel 20 000 degrés carrés**  
**Camera 3200 Megapixels, 10 sq deg, 15sec /pose**

**Euclid: 100Gbytes /jour**



# Conclusion: perspectives

→ **SKA**: observations du HI et de la courbe de rotation étendue des galaxies jusqu'à  $z=5$ , Evolution de la matière noire

→ **Euclid et SKA**: découverte de  $10^4$ - $10^5$  lentilles fortes, caractérisation de la fraction de MN dans les sous-structures

→ **Euclid + LSST**: lentilles faibles et tomographie, cartographie MN

→ **Euclid**, taux de croissance des structures (RSD)  
Contraintes sur la gravité modifiée