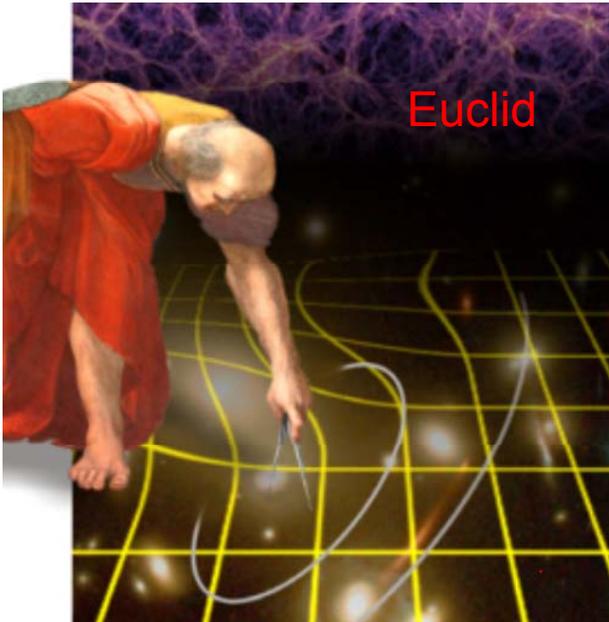




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —



Perspectives de solution: instruments futurs



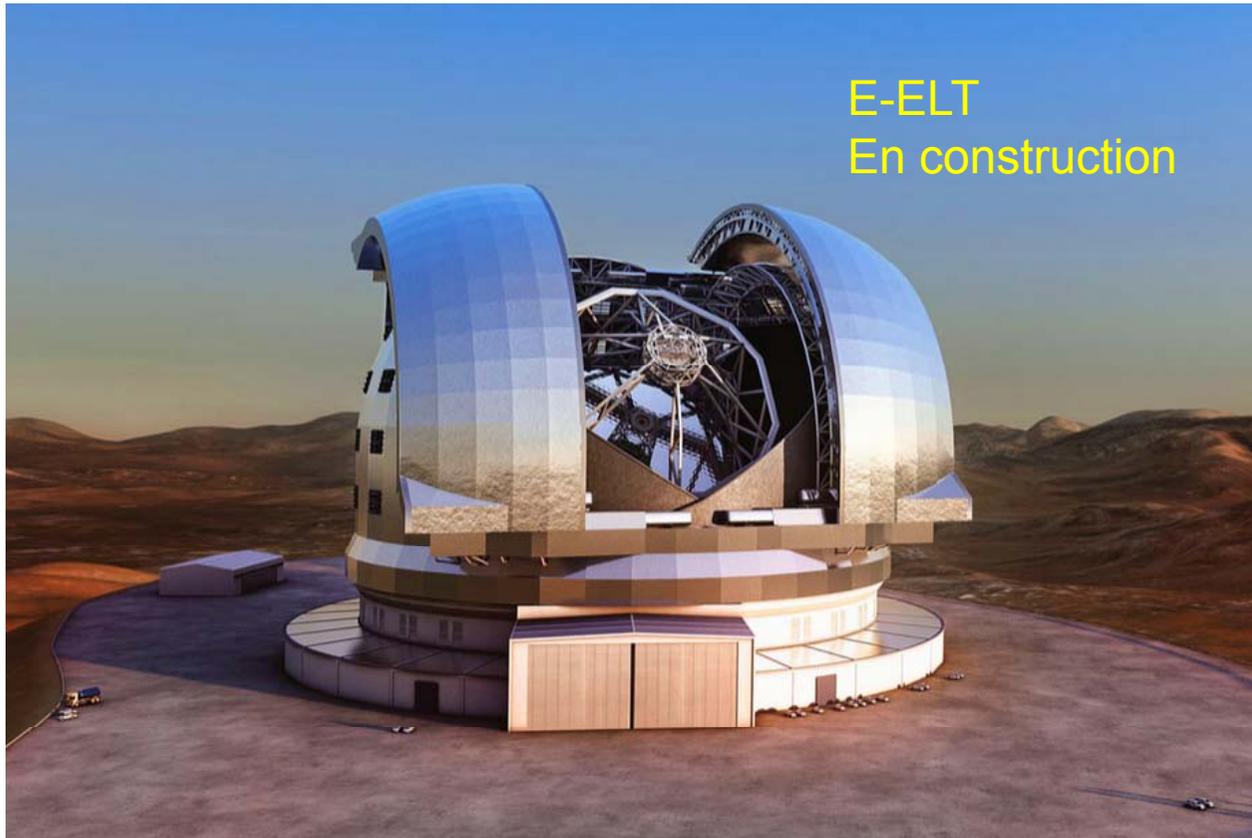
Françoise Combes



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

Les grands observatoires du futur

E-ELT
En construction

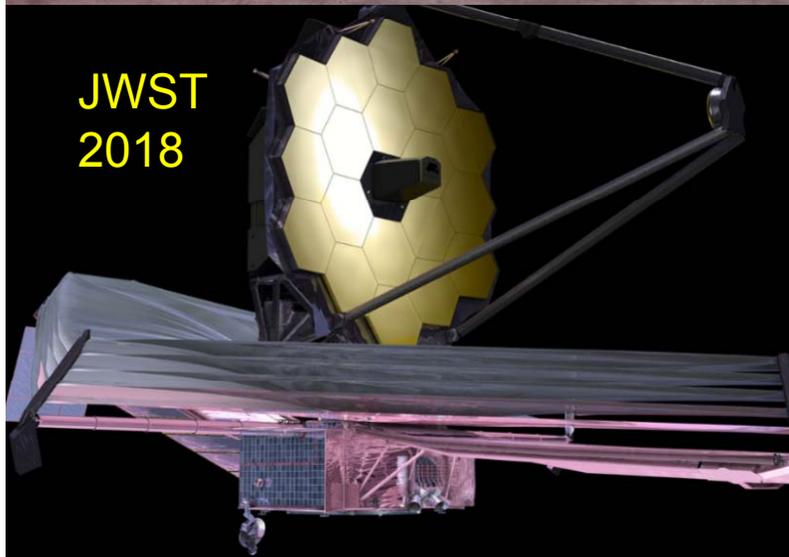


ALMA inauguré en 2013
Désert d'Atacama

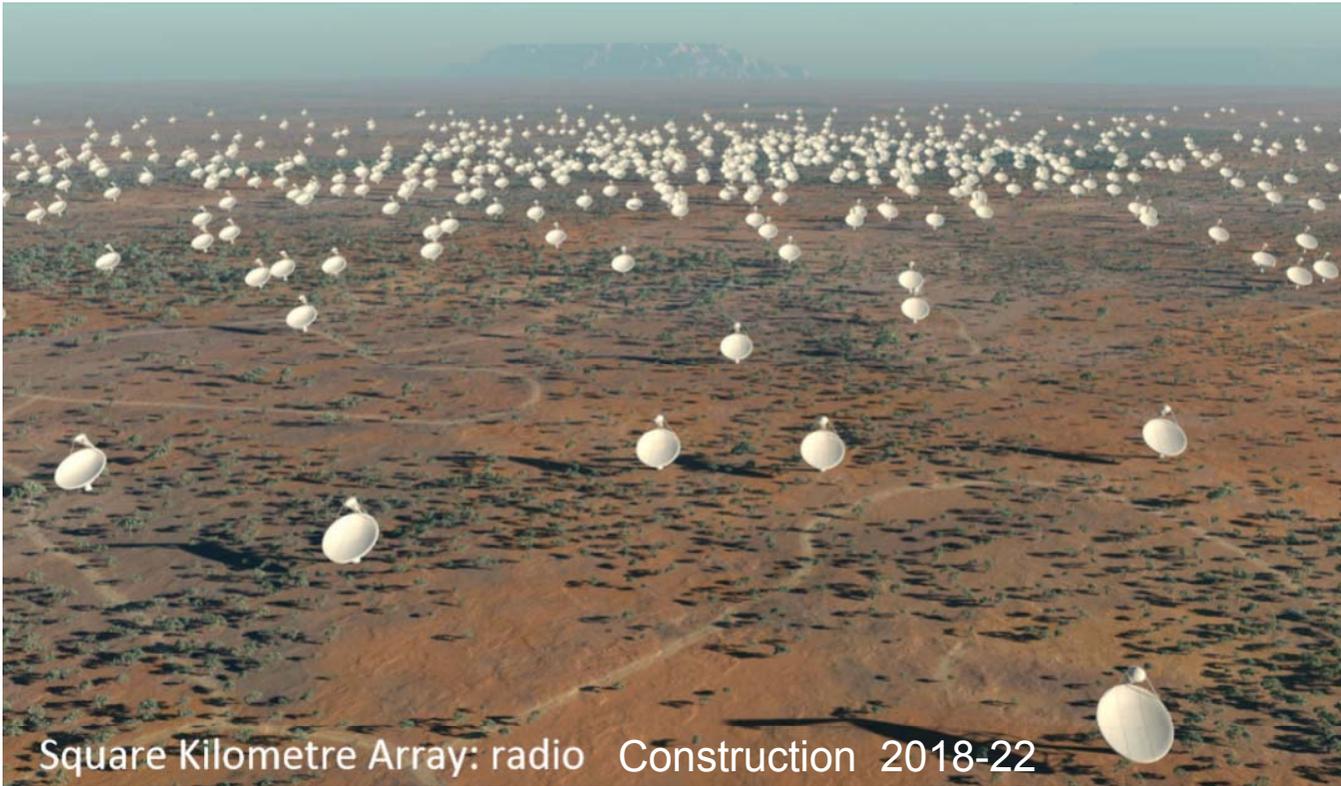
ALMA
En opération



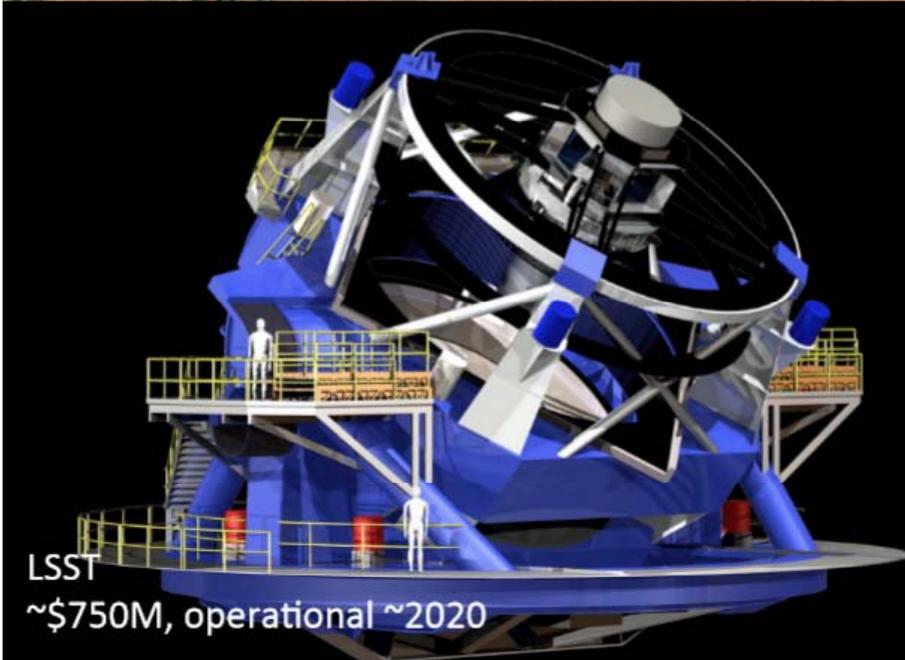
JWST
2018



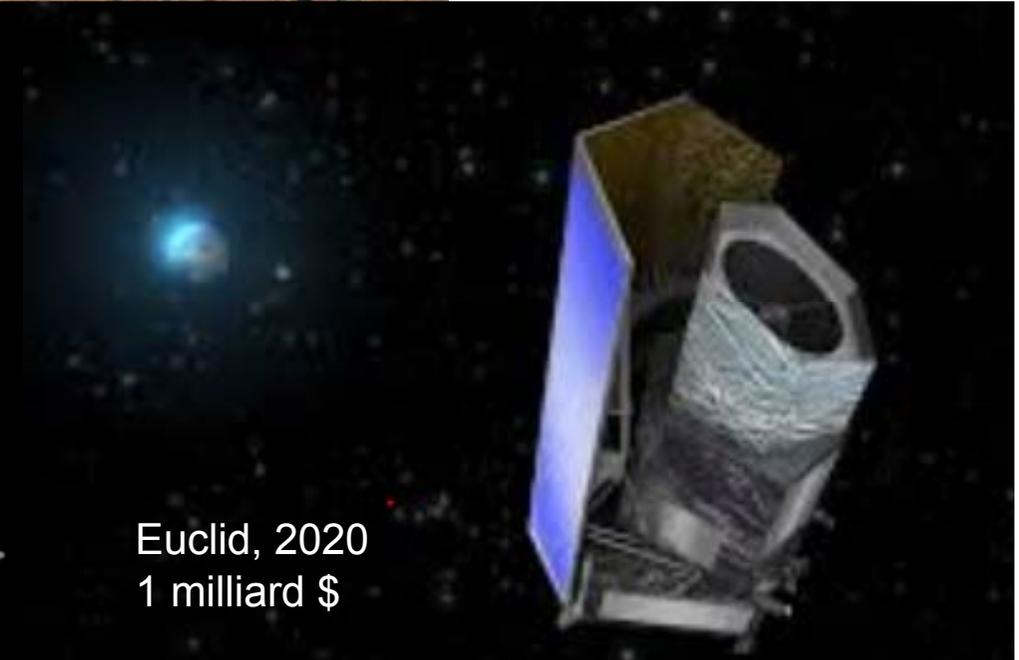
Grand champ et milliards de galaxies



Square Kilometre Array: radio Construction 2018-22

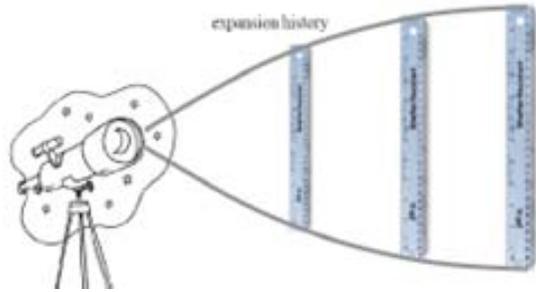


LSST
~\$750M, operational ~2020



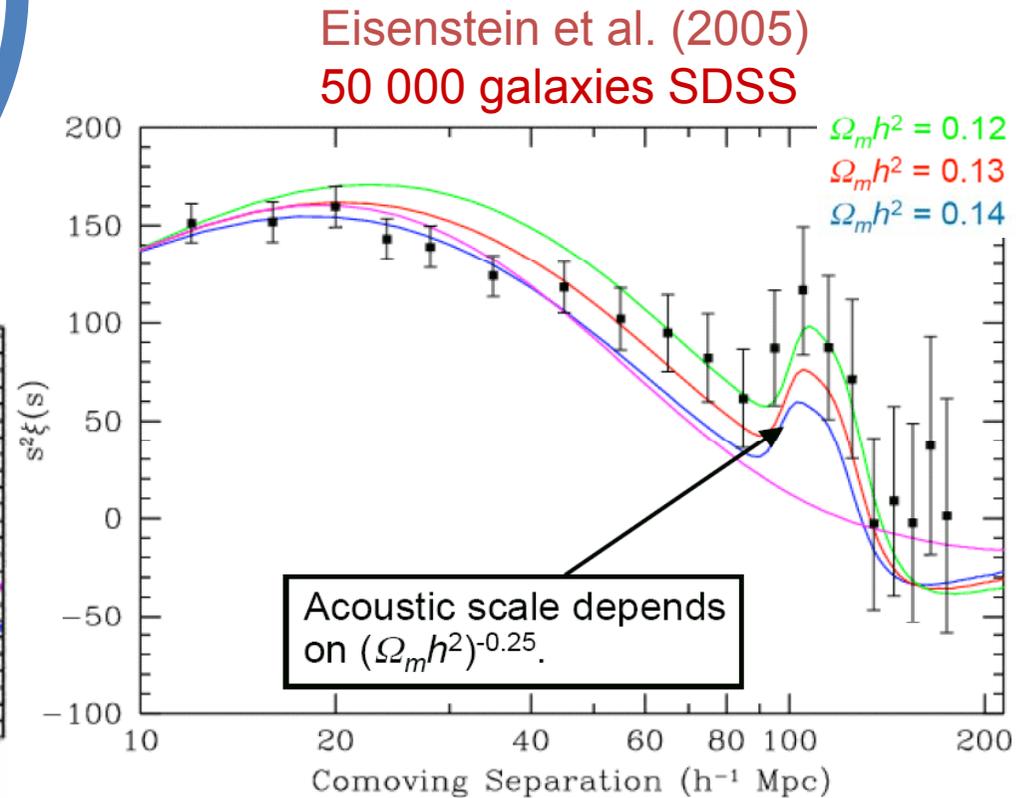
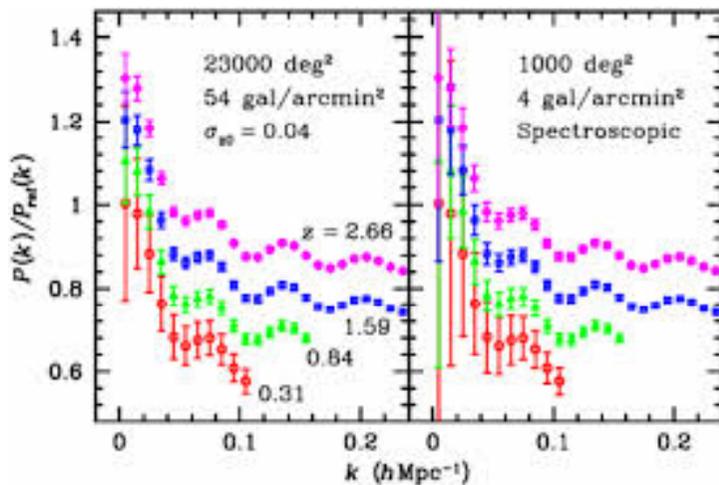
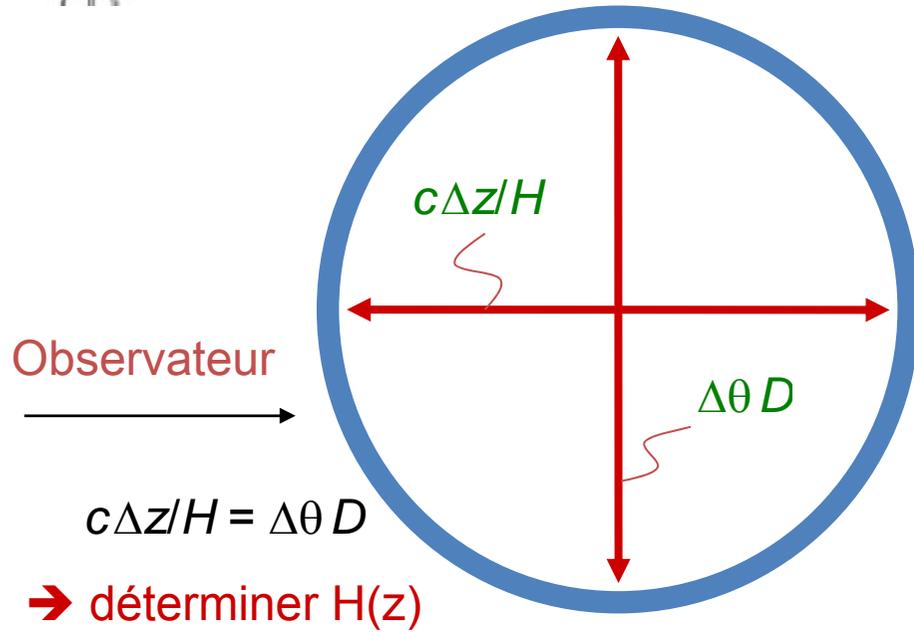
Euclid, 2020
1 milliard \$

Baryon features as a standard ruler



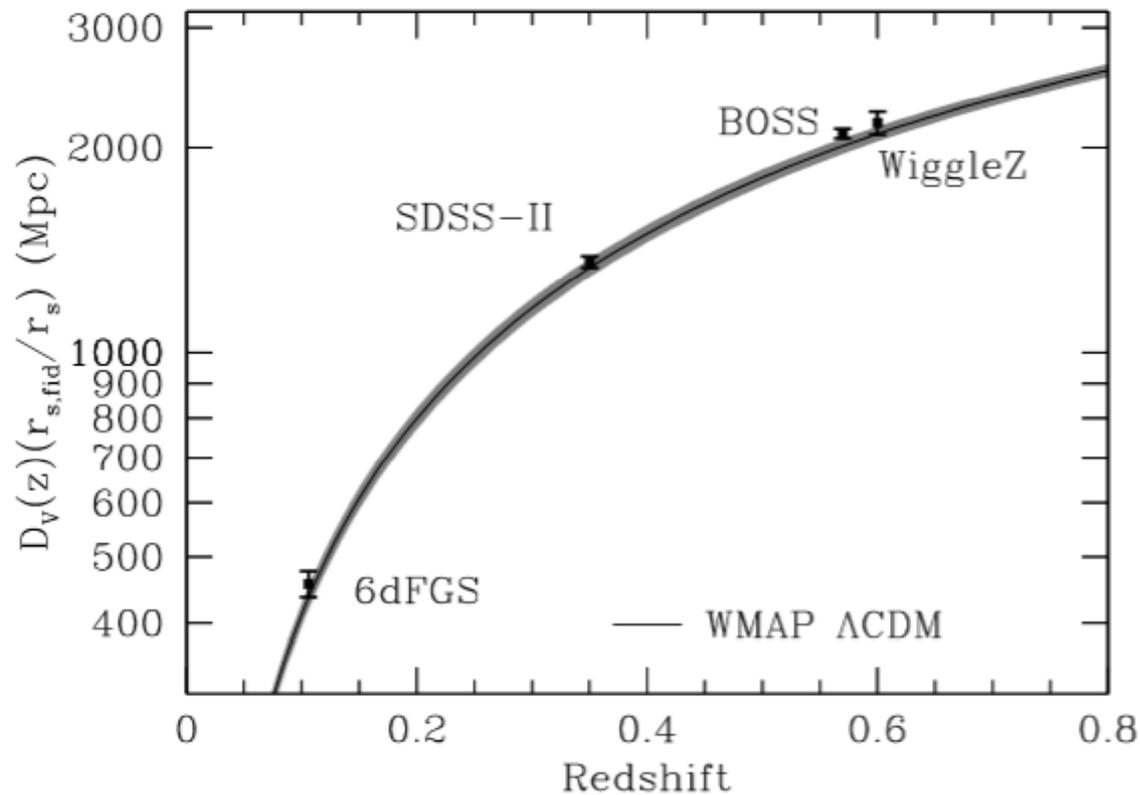
BAO: oscillations baryoniques Règle Standard

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



Résultats récents BAO avec spectro-z

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



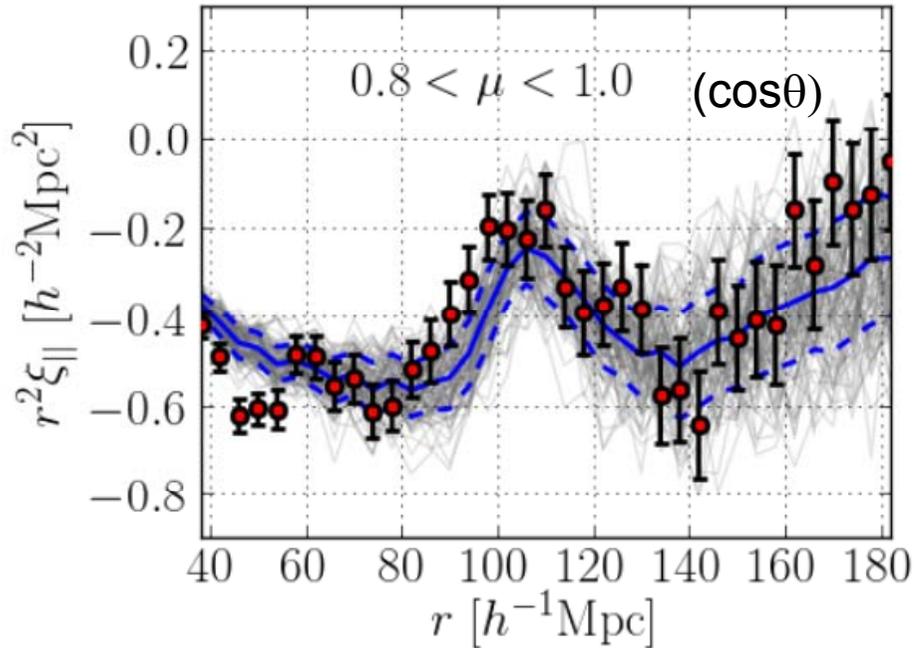
Excellent accord
avec Λ CDM (grey)

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

Slosar et al 2013
Delubac et al 2014

Anderson et al 2012

BAO dans la forêt Ly α à z=2.3



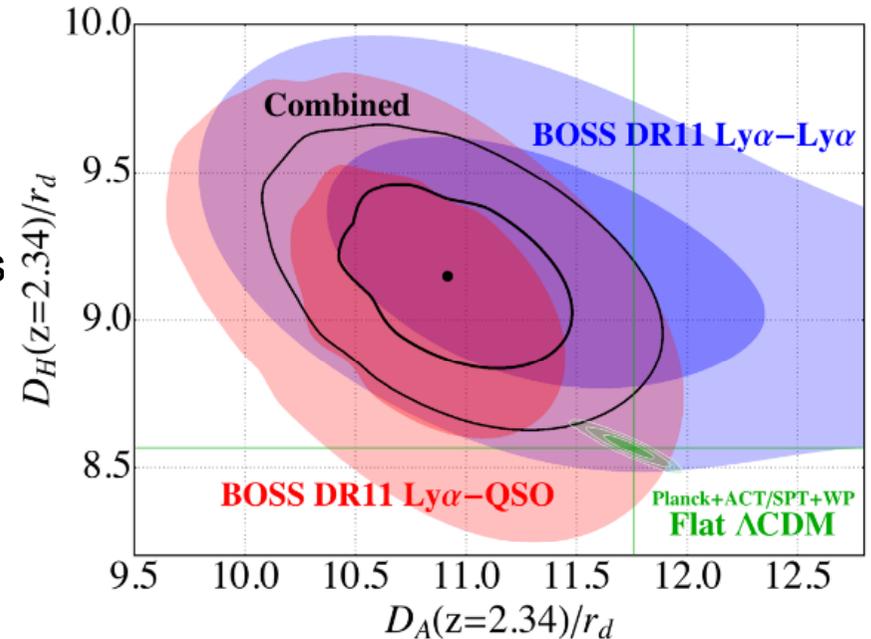
137 000 BOSS quasars
 2.1 < z < 3.5
 Bleu Ly α autocorrélation
 Rouge: Quasar-Ly α cross-correl
 (Font-Ribera et al 2013)
 Noir: combiné

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 2.5σ



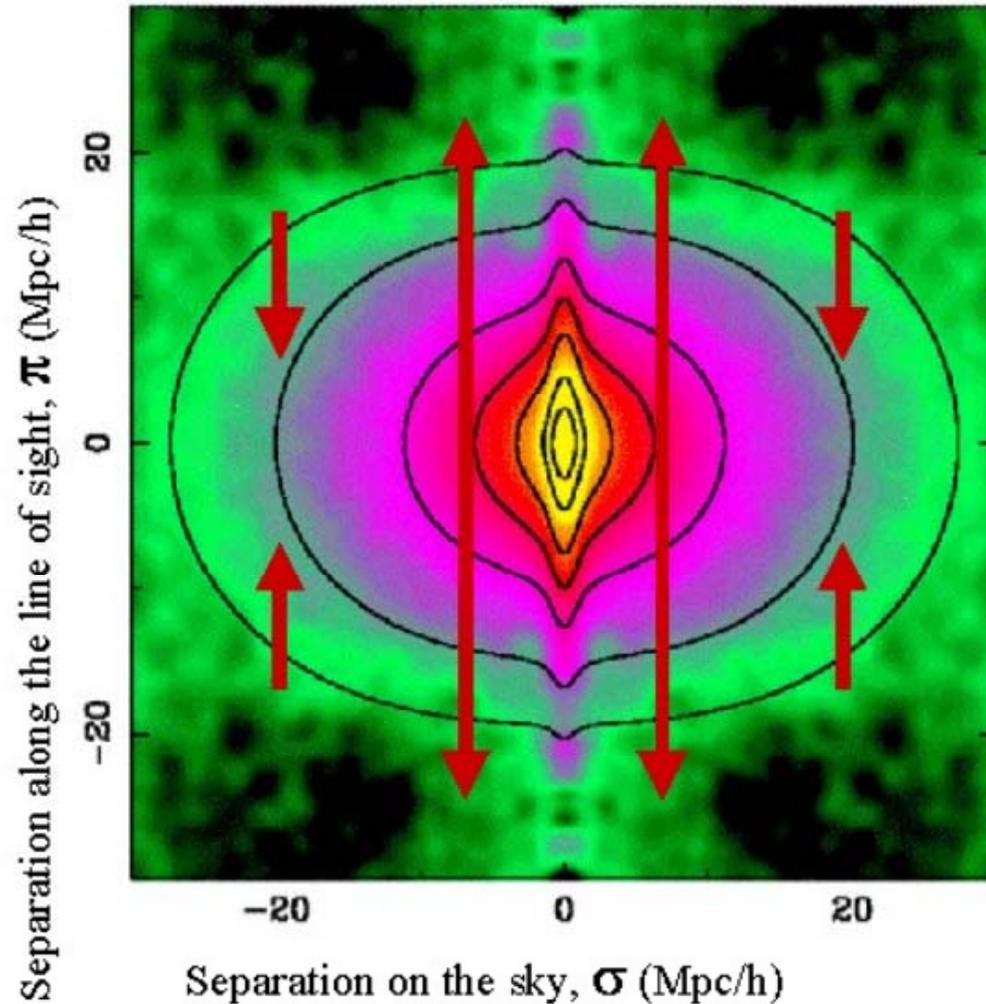
RSD « Redshift space distortions »

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 σ_{gal}



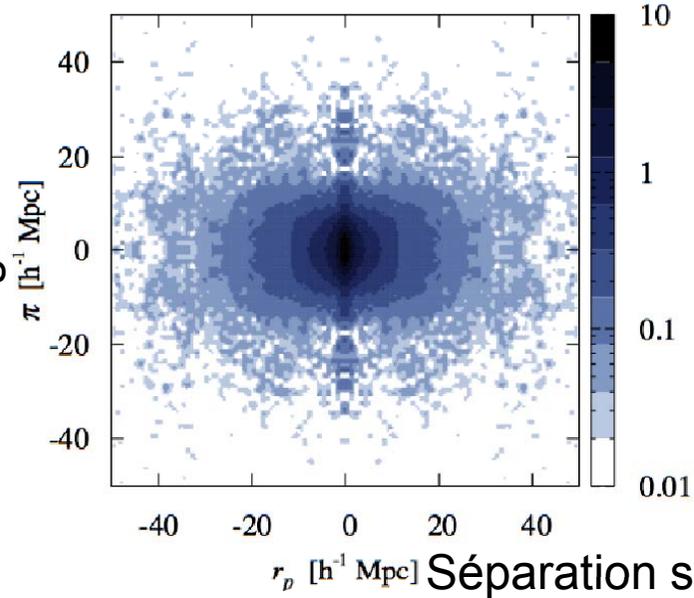
The 2dF Galaxy Redshift Survey Team (2001)



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

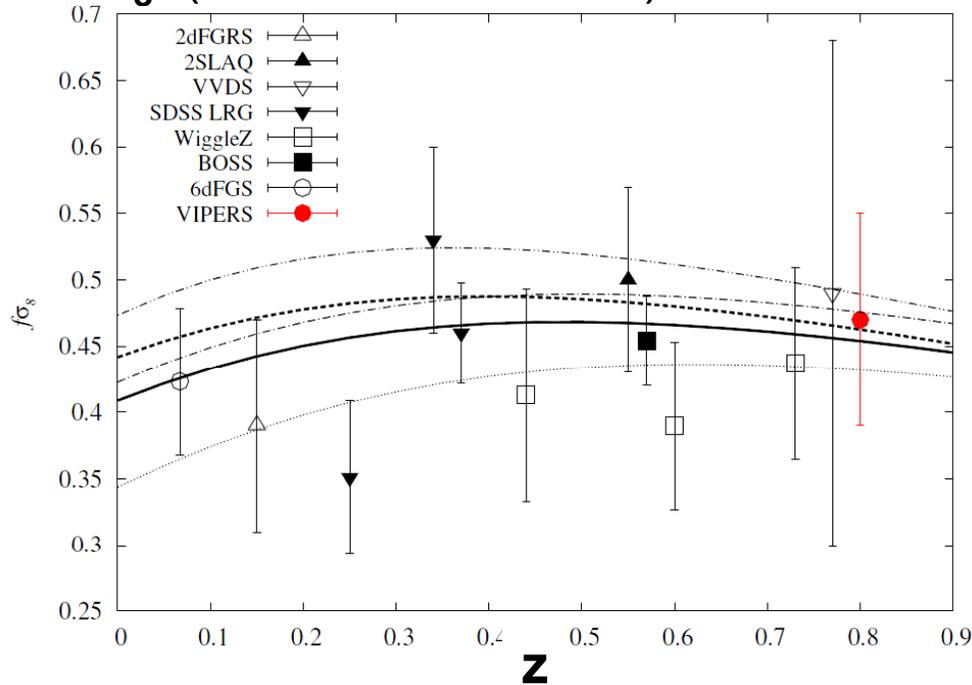
Etat des mesures RSD

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

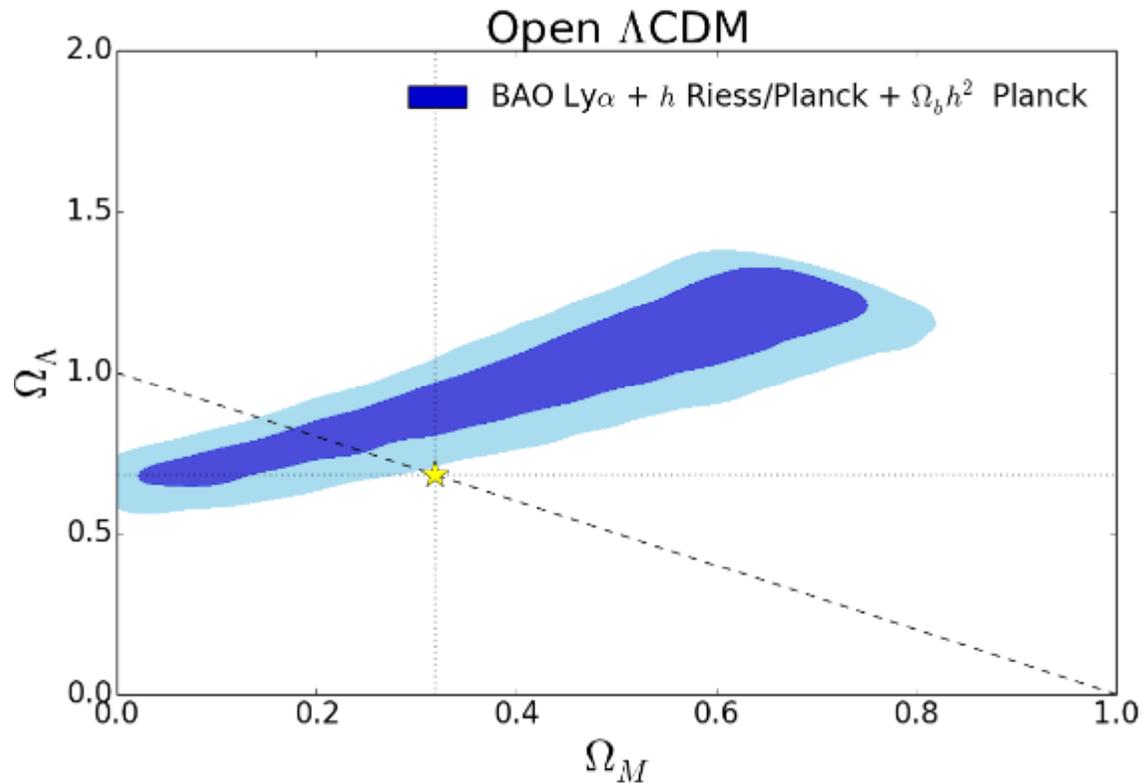
DGP (Dvali et al 2010)

Modèles f(R) etc..

Tension sur H_0 Planck, Cepheids, BAO ...

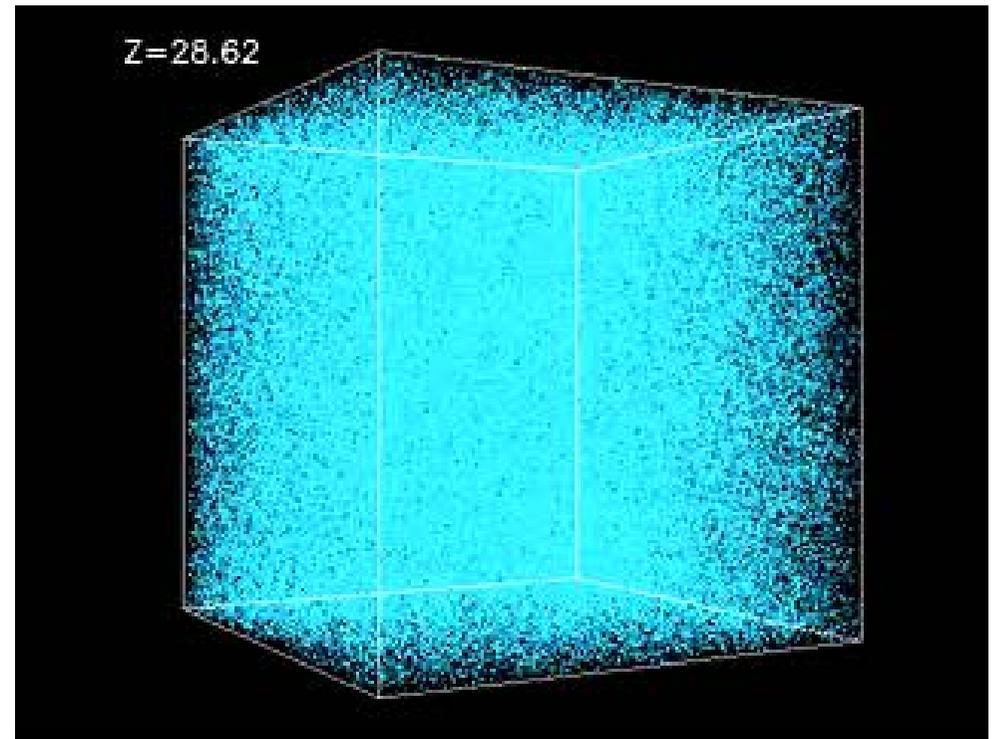
BAO à 68 et 95% de niveau de confiance (bleu)

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



Taux de croissance comme test de la gravité

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



Taux de croissance γ $f = d \log(\delta) / d \log(a) \sim \Omega_m^\gamma$
Cette croissance produit des vitesses particulières → 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 λ 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 »*

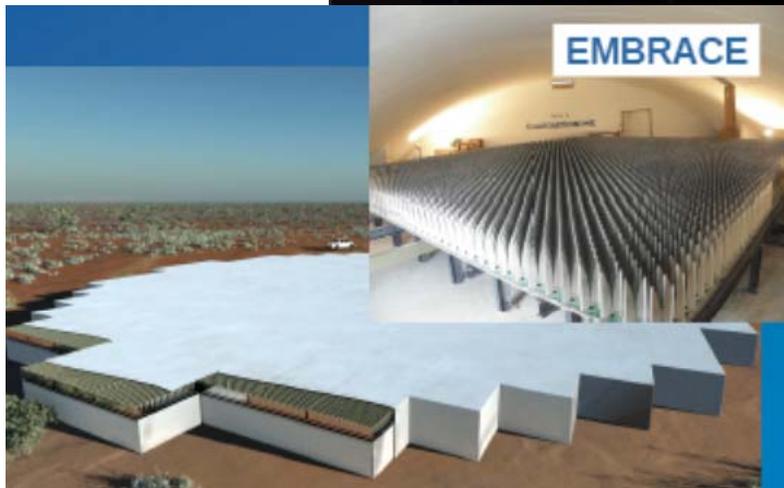
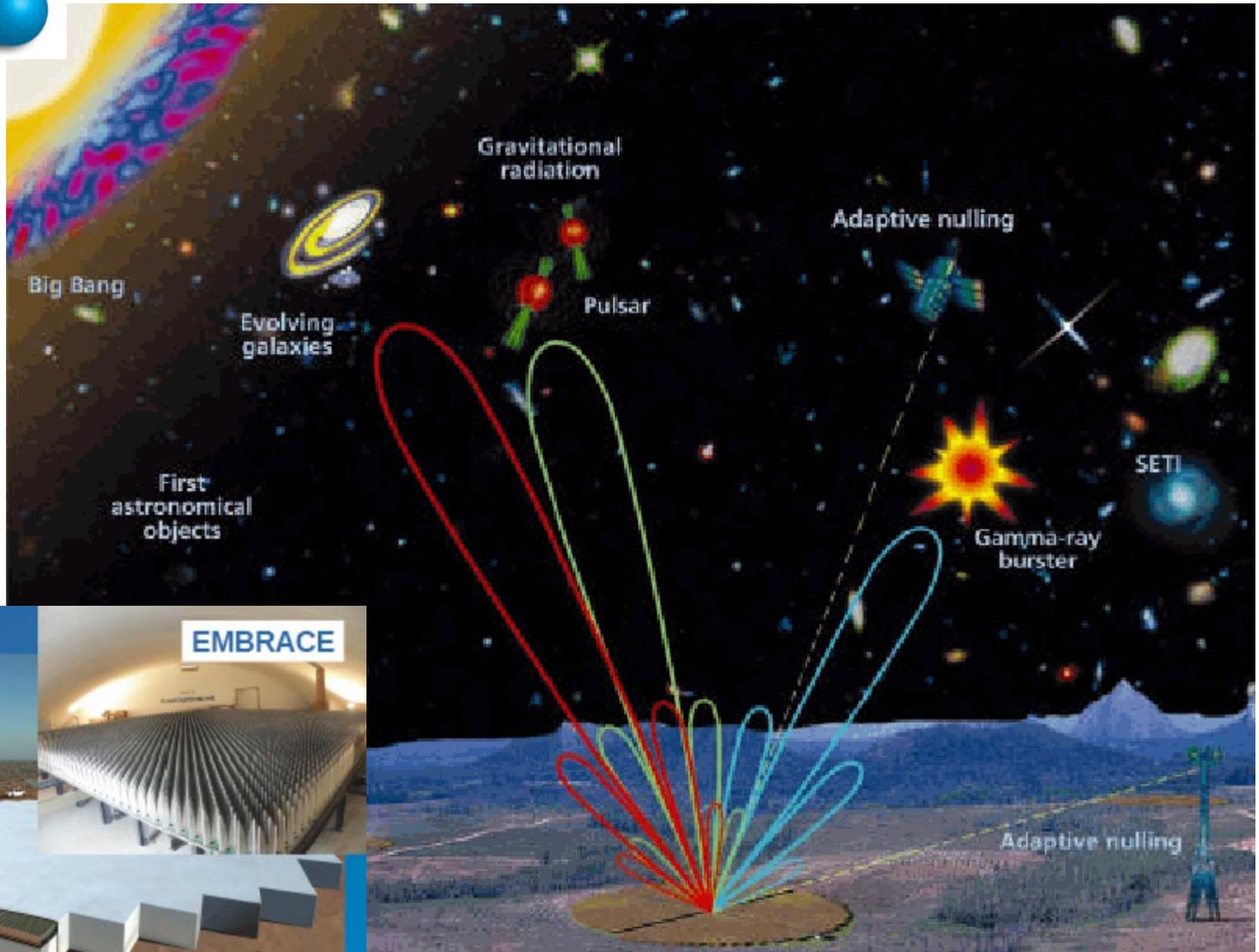
- fréquences: 70MHz – 25 GHz (λ 1.2cm – 4m)
- champ de vue: 1 (\rightarrow 100?) degrés carrés à λ 21 cm / 1.4 GHz
8 champs de vue indépendants
- résolution angulaire: 0.01 arcsec à λ 21 cm / 1.4 GHz
 \rightarrow lignes de base jusqu'à ~ 3000 km

En Australie et en Afrique du Sud

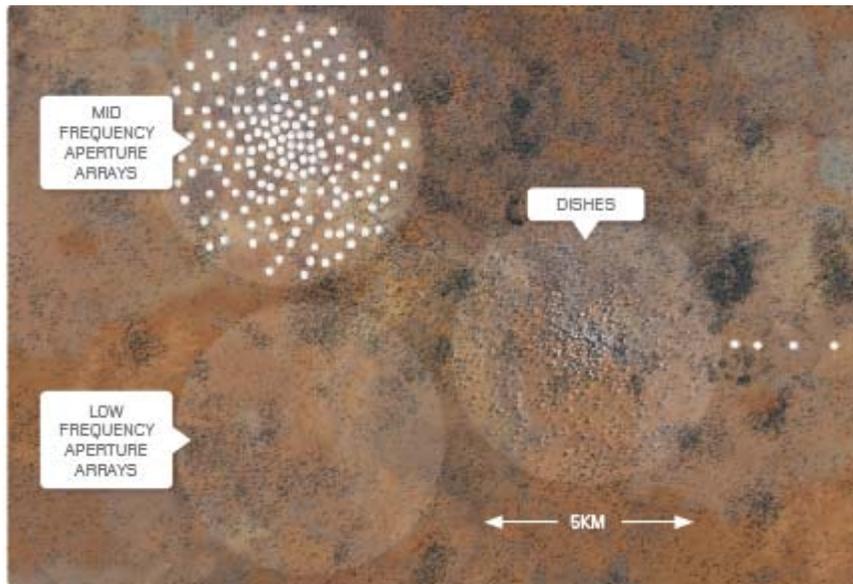


Multi-lobes d'observation

EMBRACE
Prototype
À Nancy



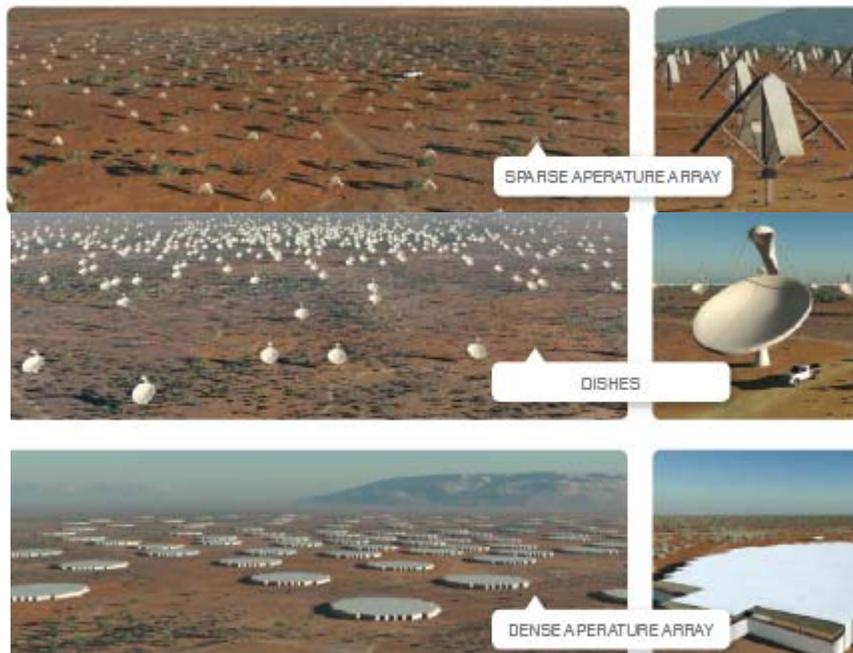
SKA: Square km Array



Surface: un million de m²
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)

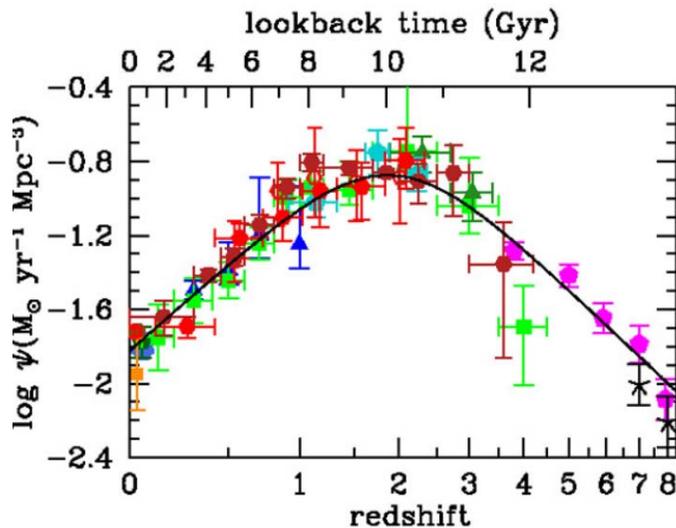
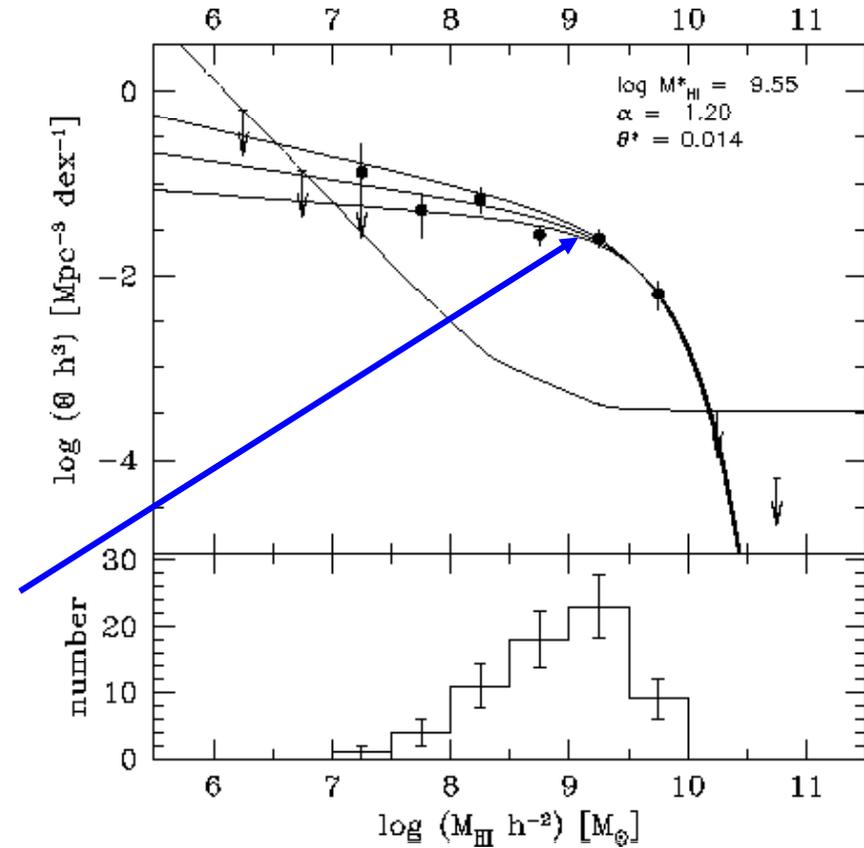
Suivre le contenu en MN des
galaxies
Dans toute l'histoire de l'Univers



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	$1.6 \cdot 10^{10}$	$7.0 \cdot 10^3$

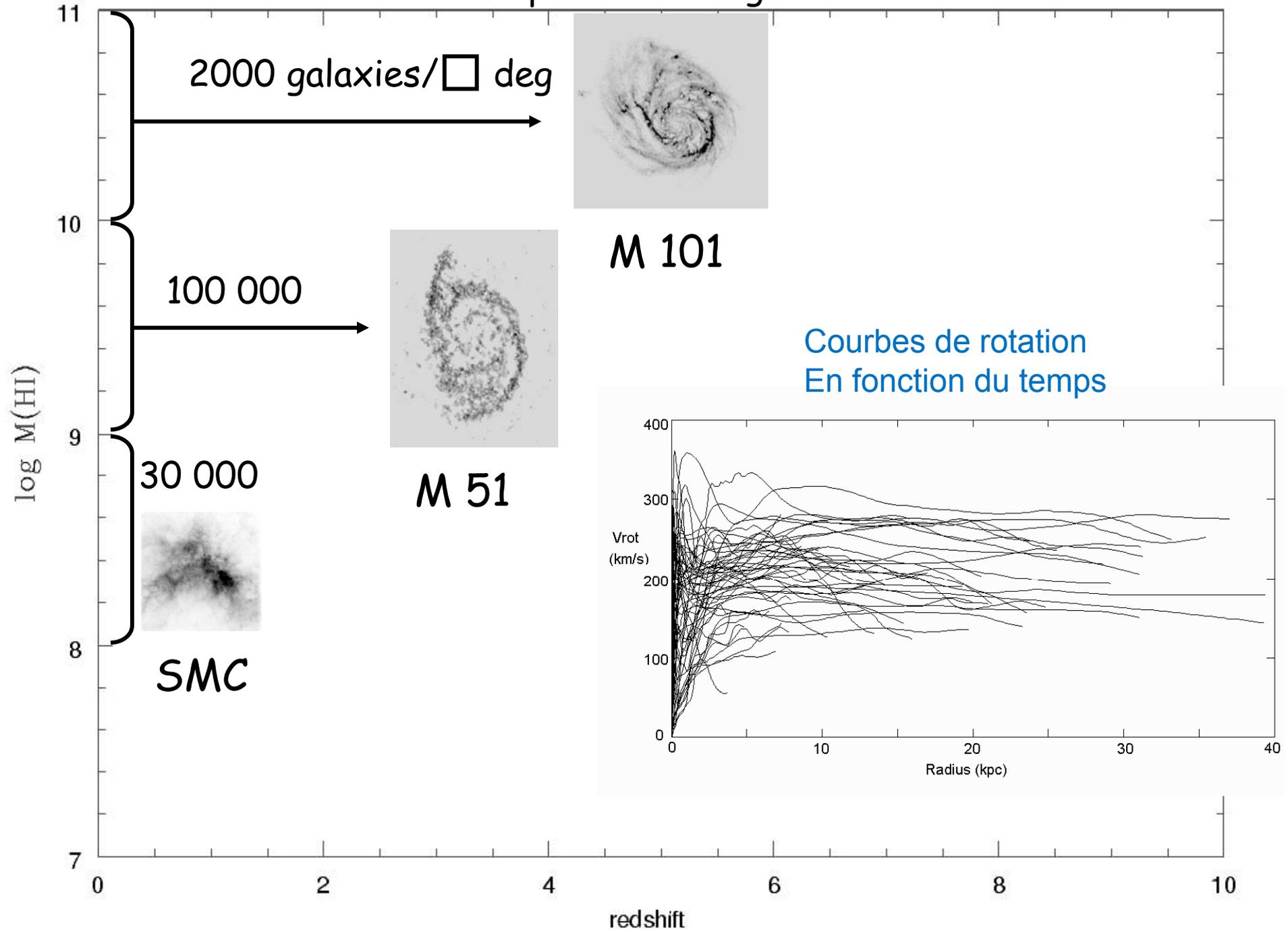
Fonction de masse HI



Formation d'étoiles vs z

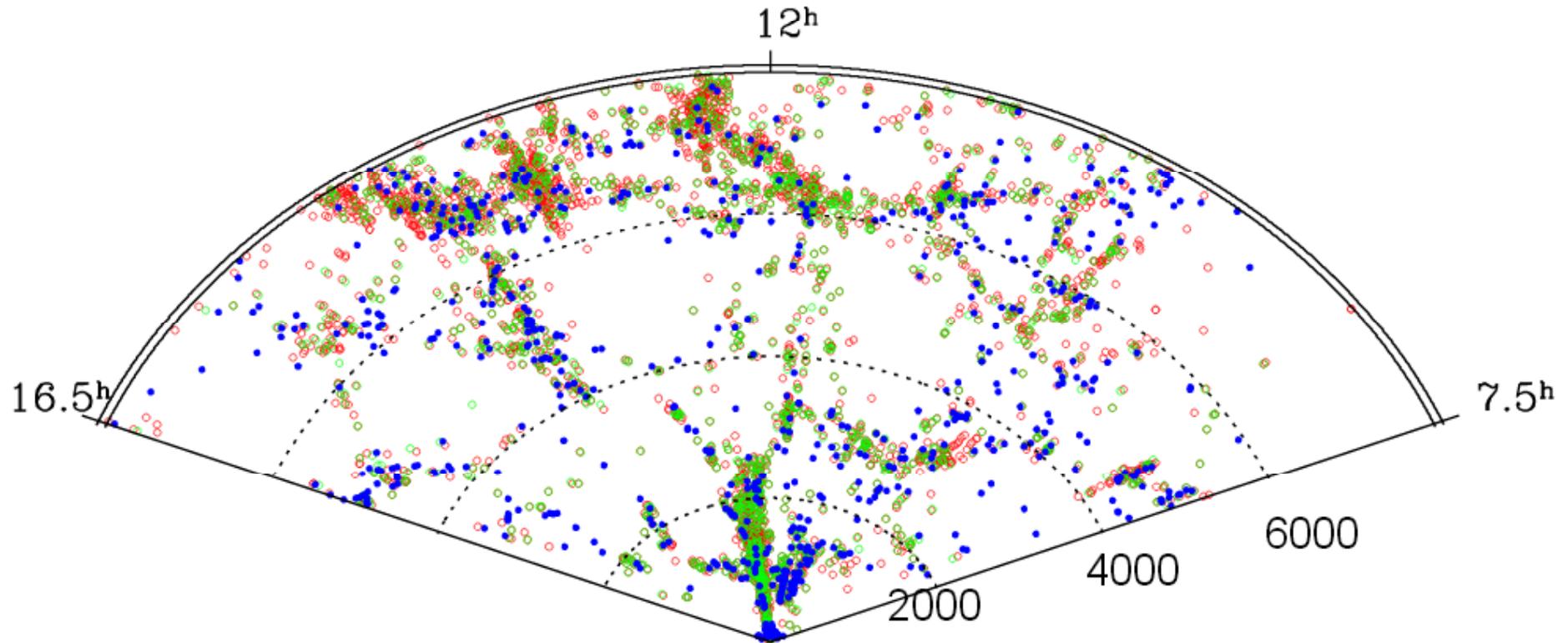


Maximum redshift pour une intégration de 360 h avec SKA



Recherche naines noires en HI

ALFALFA: Arecibo (300m)



Rouge: optique

Bleu HI

Vert: les deux

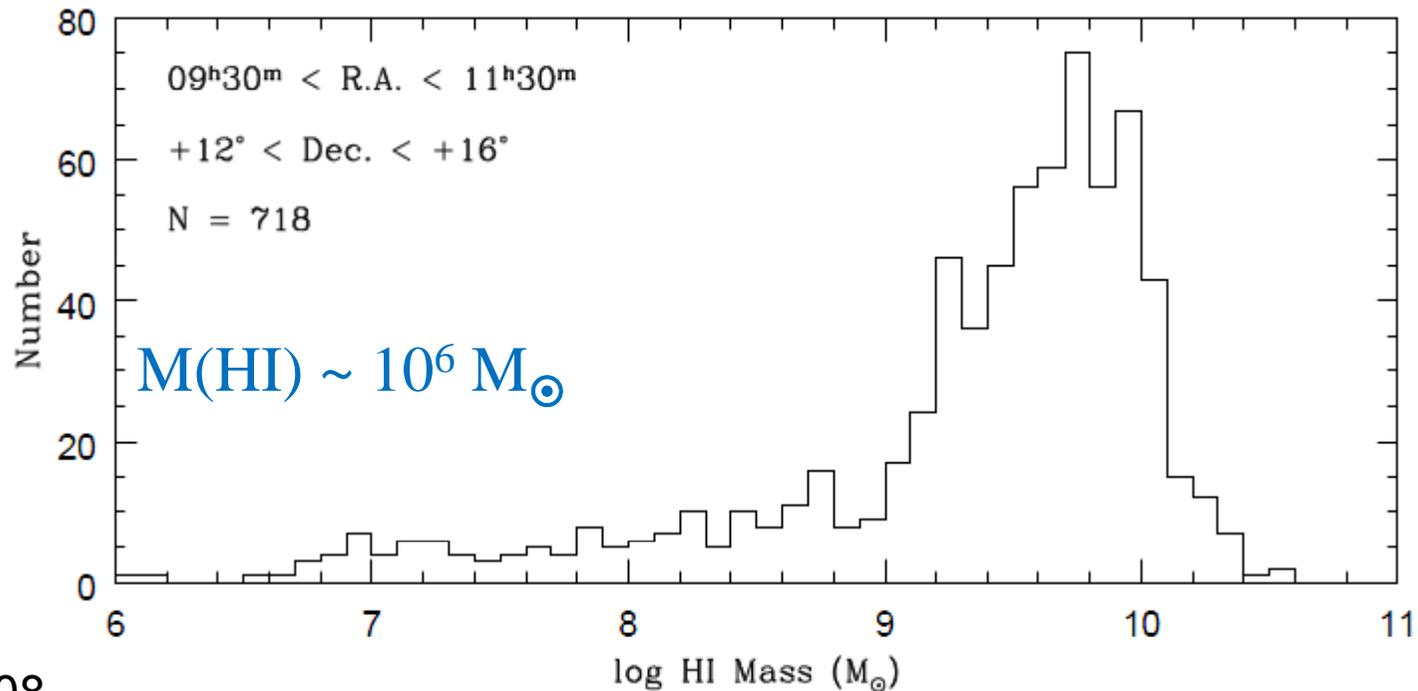
Recherche dans les vides:
Négative jusqu'à présent

ALFALFA: Nuages HI à grande vitesse

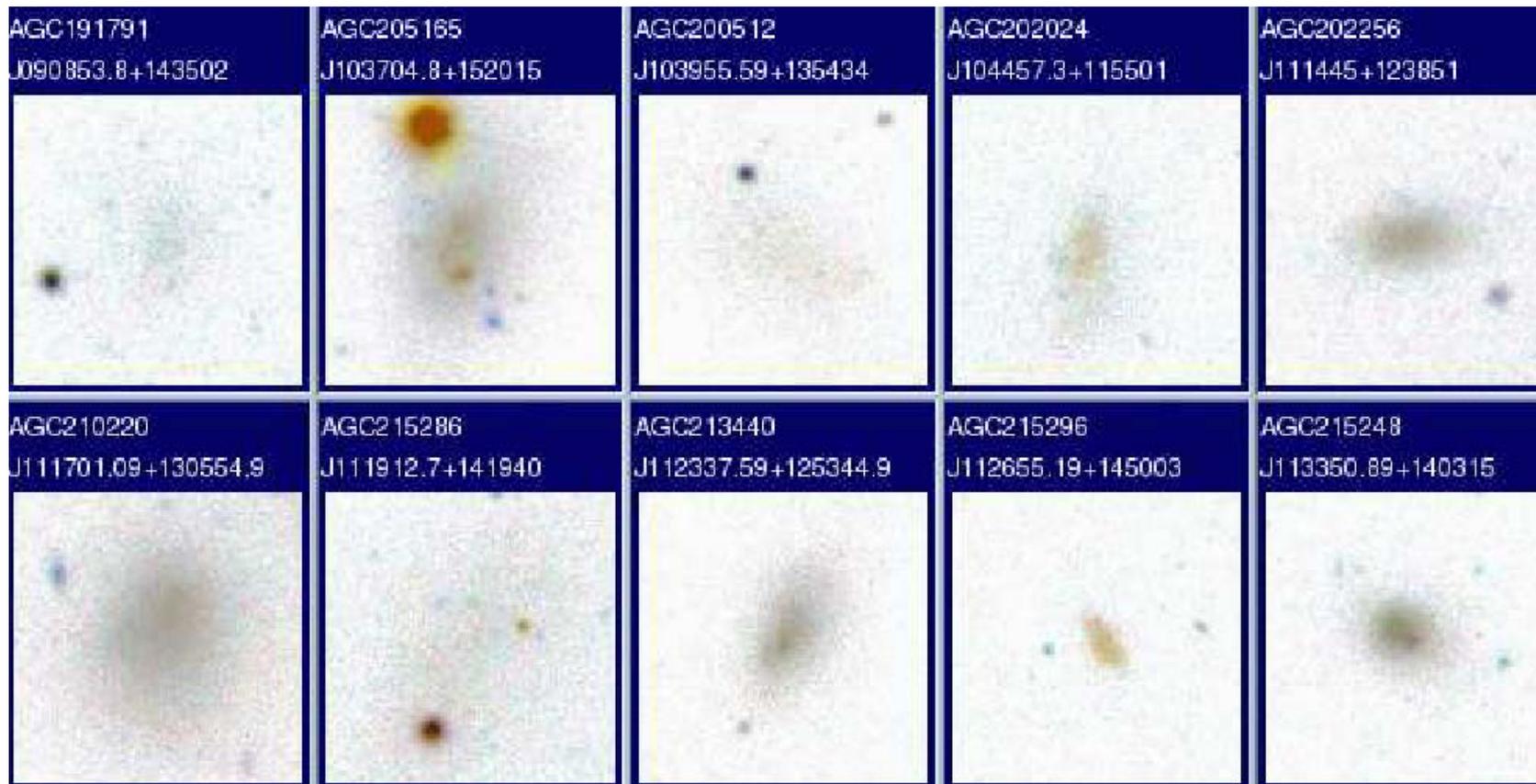
Recherche d'étoiles en optique: Toujours trouvé un signal

→ Découvertes de naines normales

→ Pas de naines noires



Toujours des étoiles, faible Σ



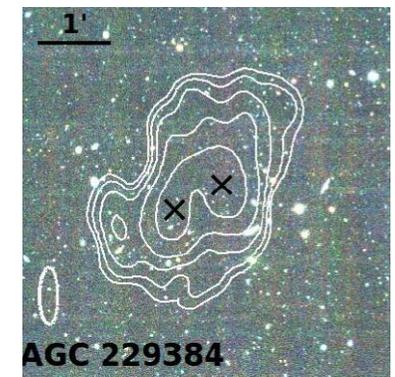
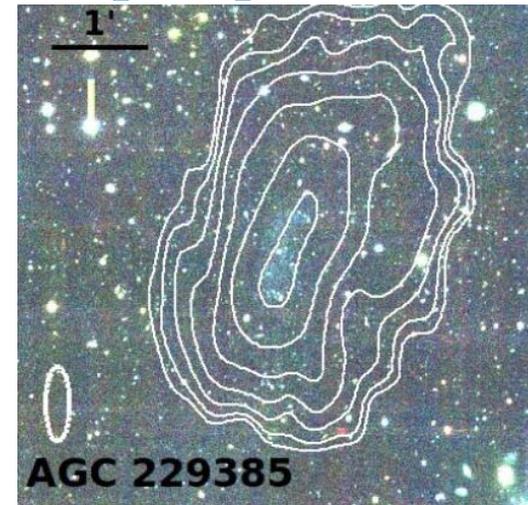
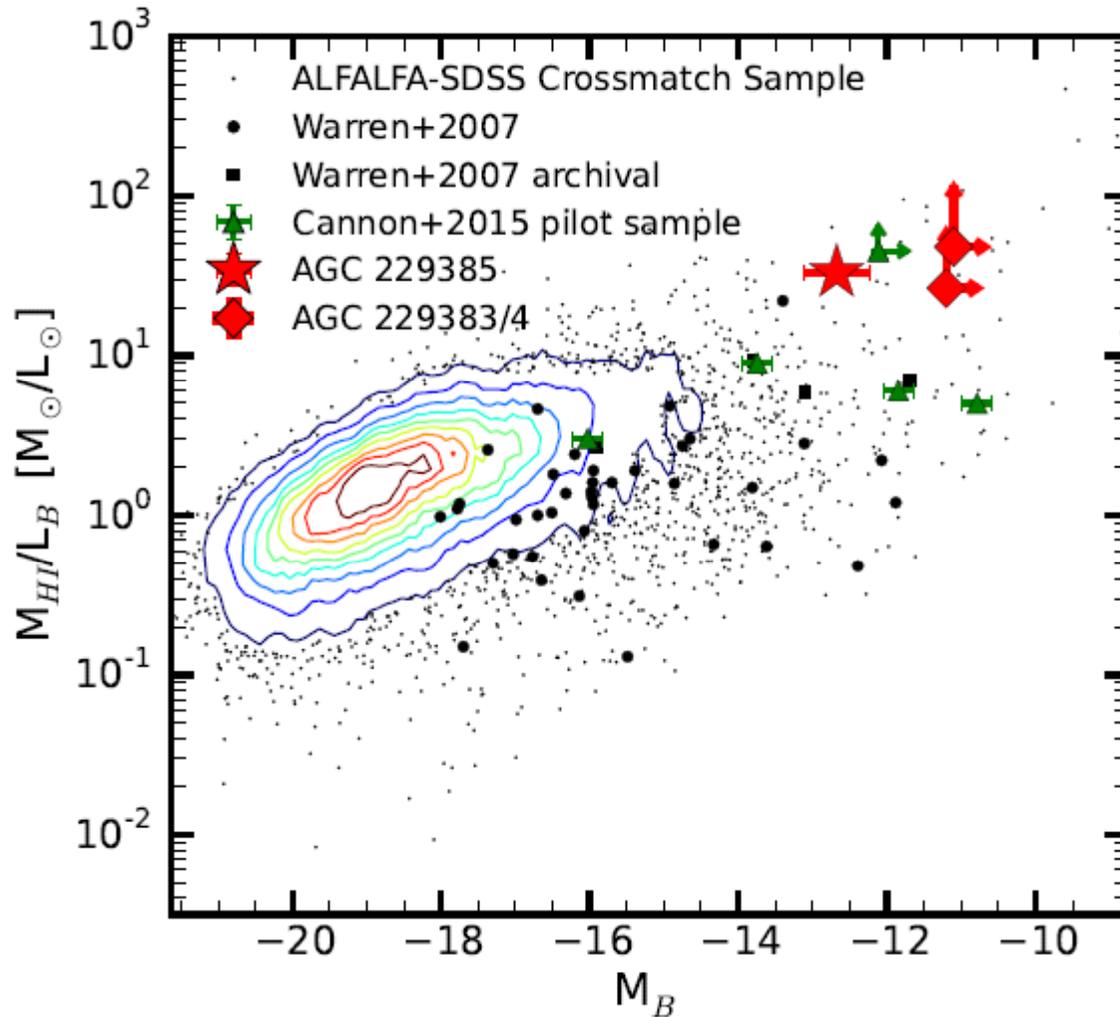
$$M(\text{HI}) < 10^{7.2} M_{\odot}$$

Images SDSS

Haynes 2008

Découverte de 2 candidats?

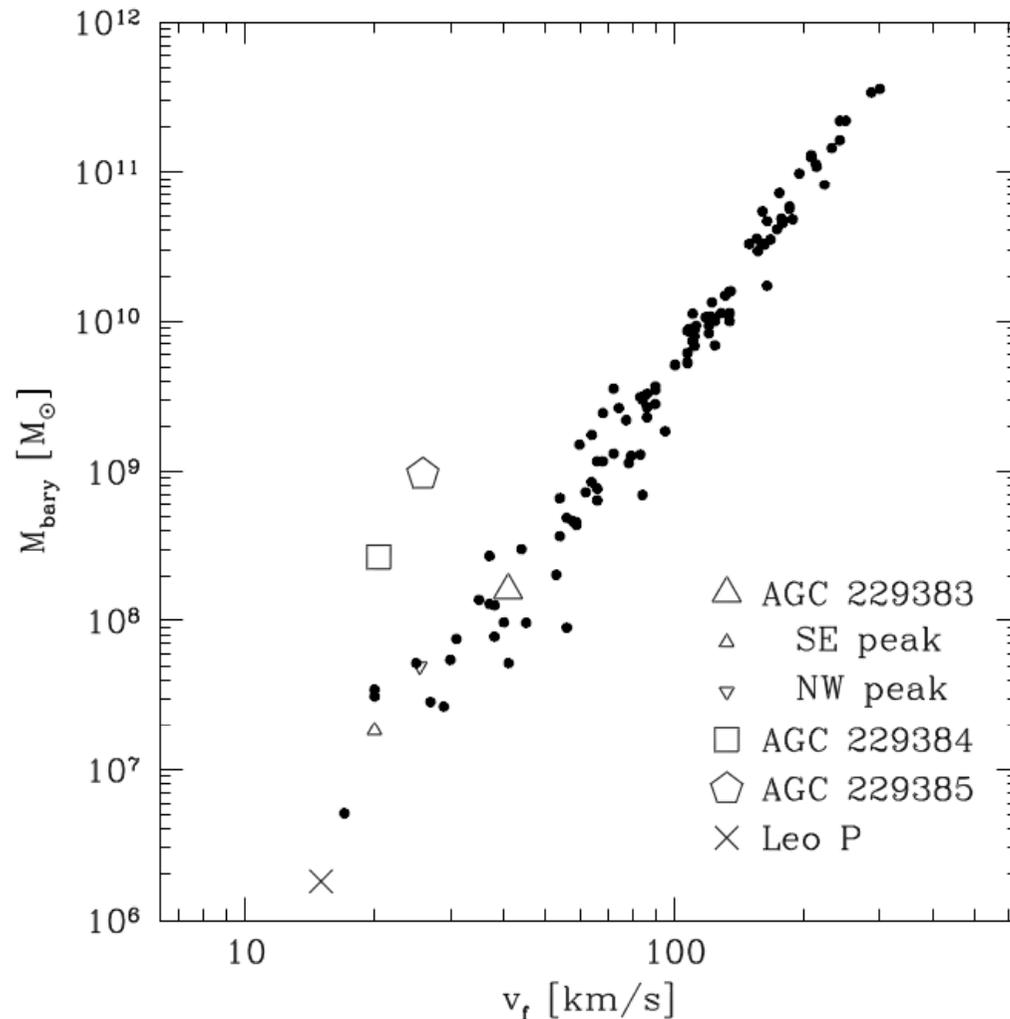
0.4% de systèmes presque sombres



Janowiecki et al 2015

Cinématique des nuages HI

Juste en dehors de l'amas de Virgo



Un des systèmes est composé de 2 clumps

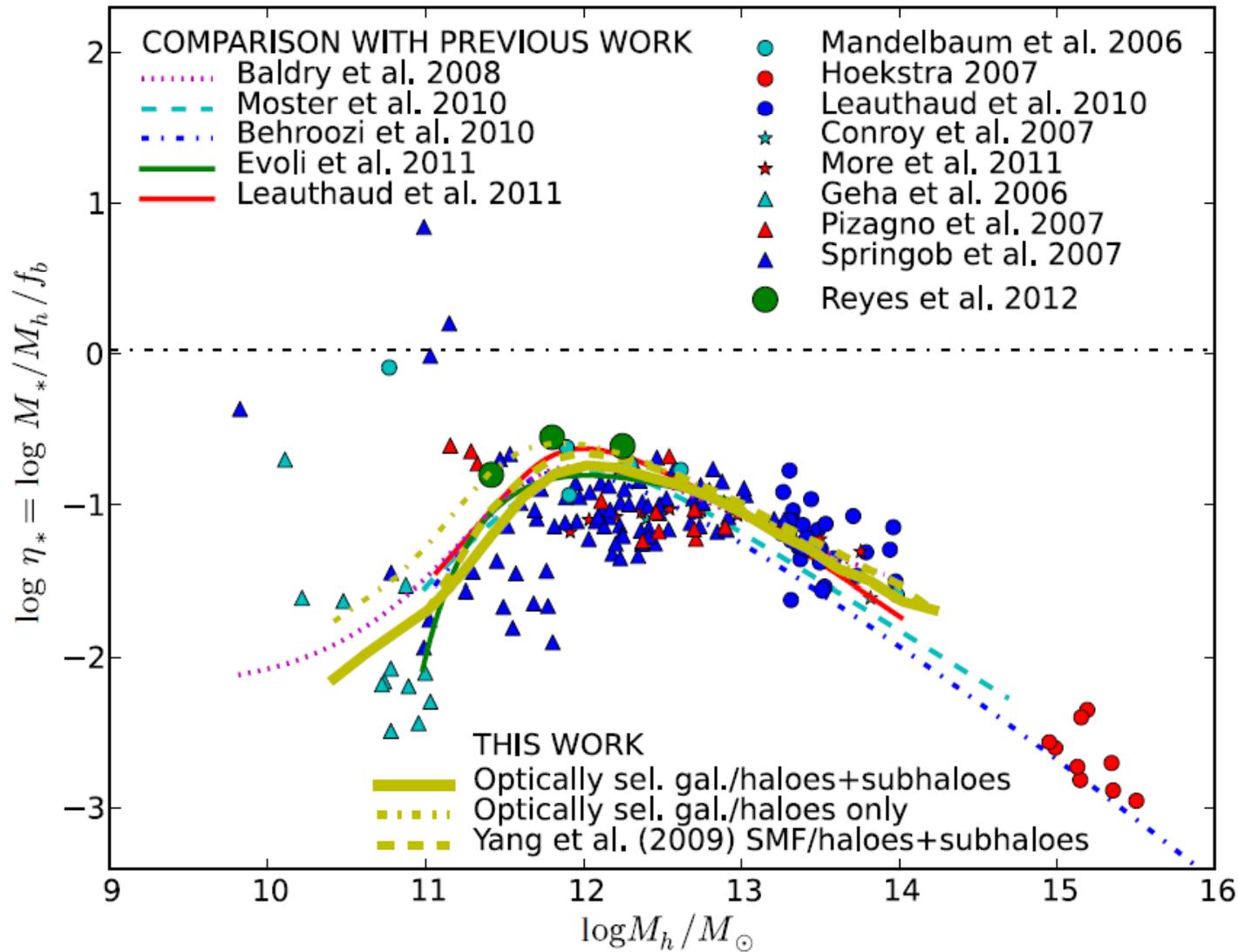
Faut-il prendre le DV entre les 2?

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

Inclinaison?

Peut-être vu de face

Fraction de baryons (étoiles)

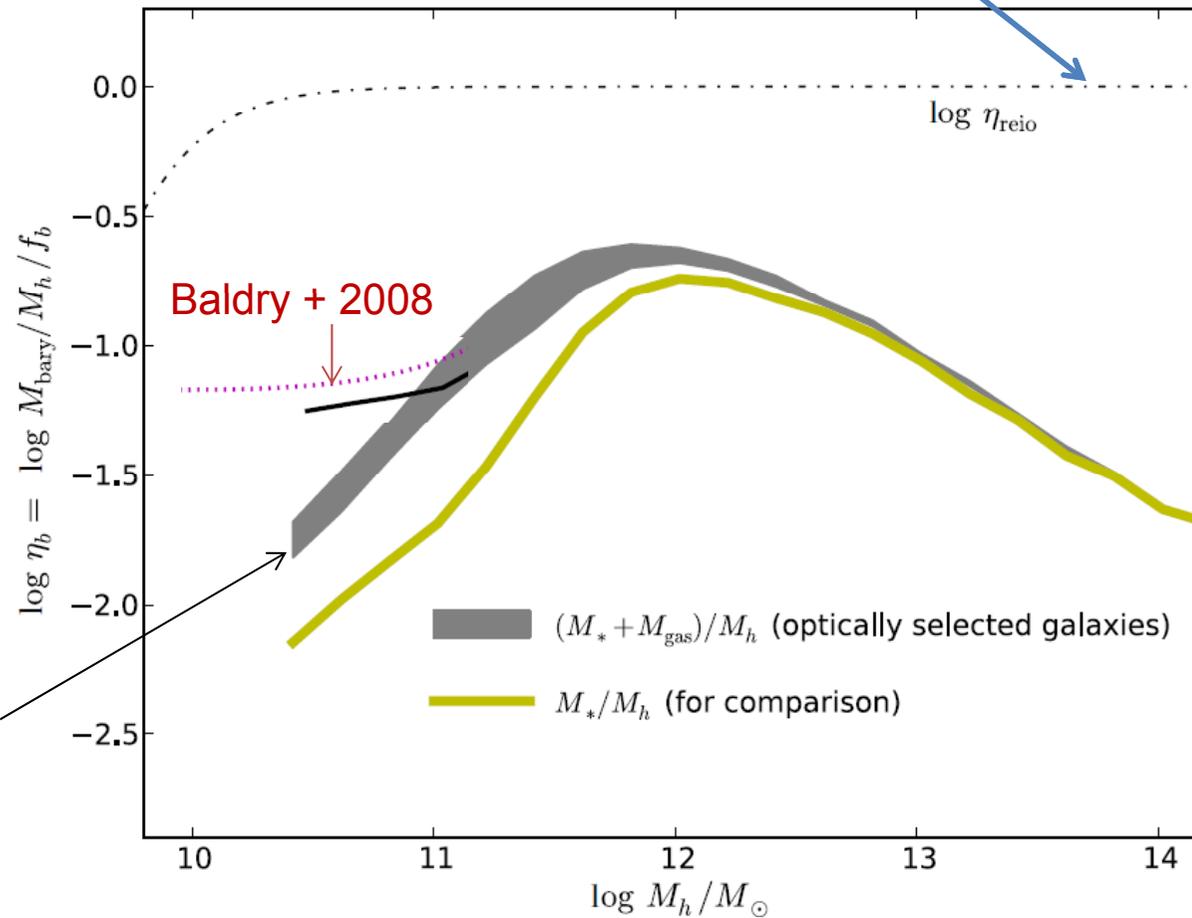


Match
d'abondance
des halos

et des 8000
galaxies
sélectionnées

Fraction de baryons (étoiles+gaz)

η_{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: γ

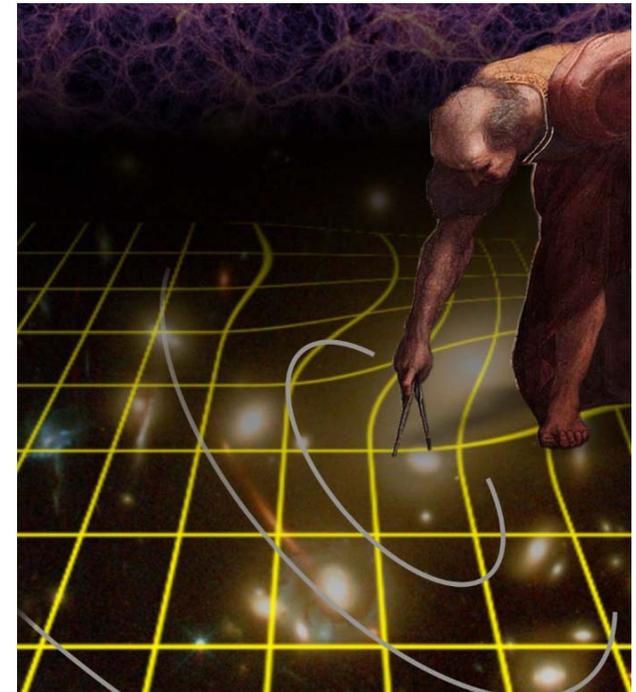
Tester la gravité modifiée, en mesurant le taux de croissance γ

3-La nature de la matière noire, m_ν

Tester le modèle Λ CDM et mesurer
la masse des neutrinos

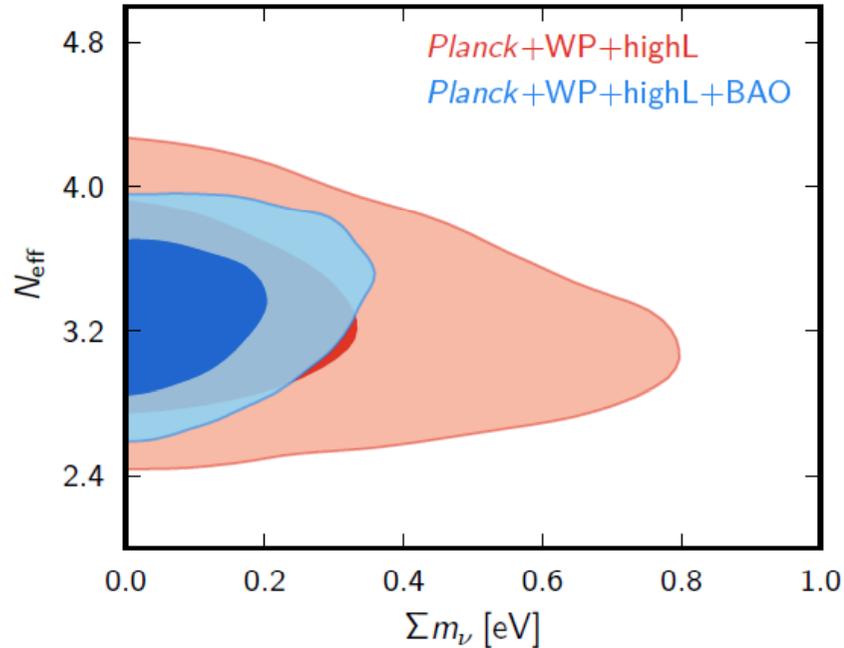
4- Les graines des structures cosmiques

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

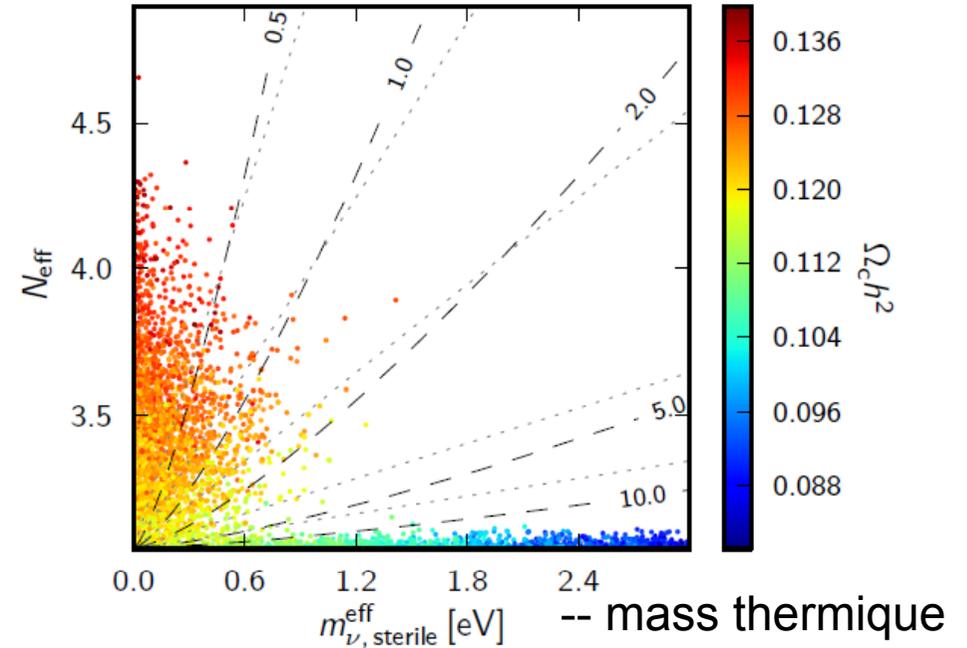


Masse et nombre des neutrinos

Avec d'autres neutrinos faible masse



avec un neutrino stérile massif



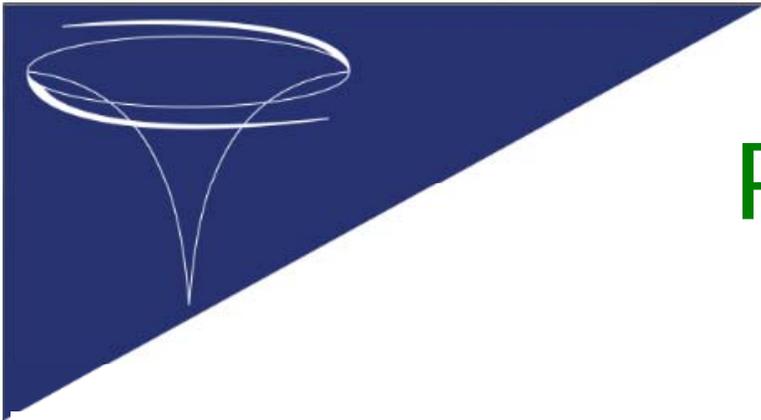
Planck coll (2013) Paper XVI

La masse du neutrino contrainte par le spectre de puissance

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

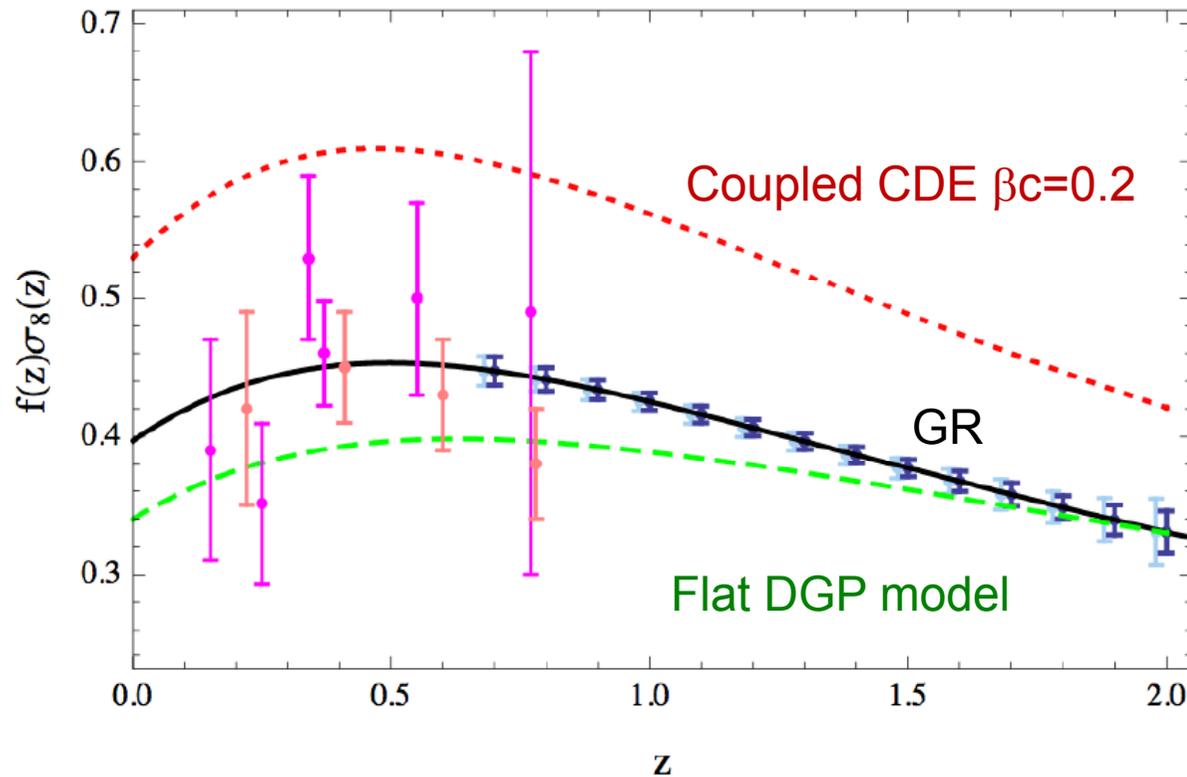
Ou à l'existence d'un neutrino stérile

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

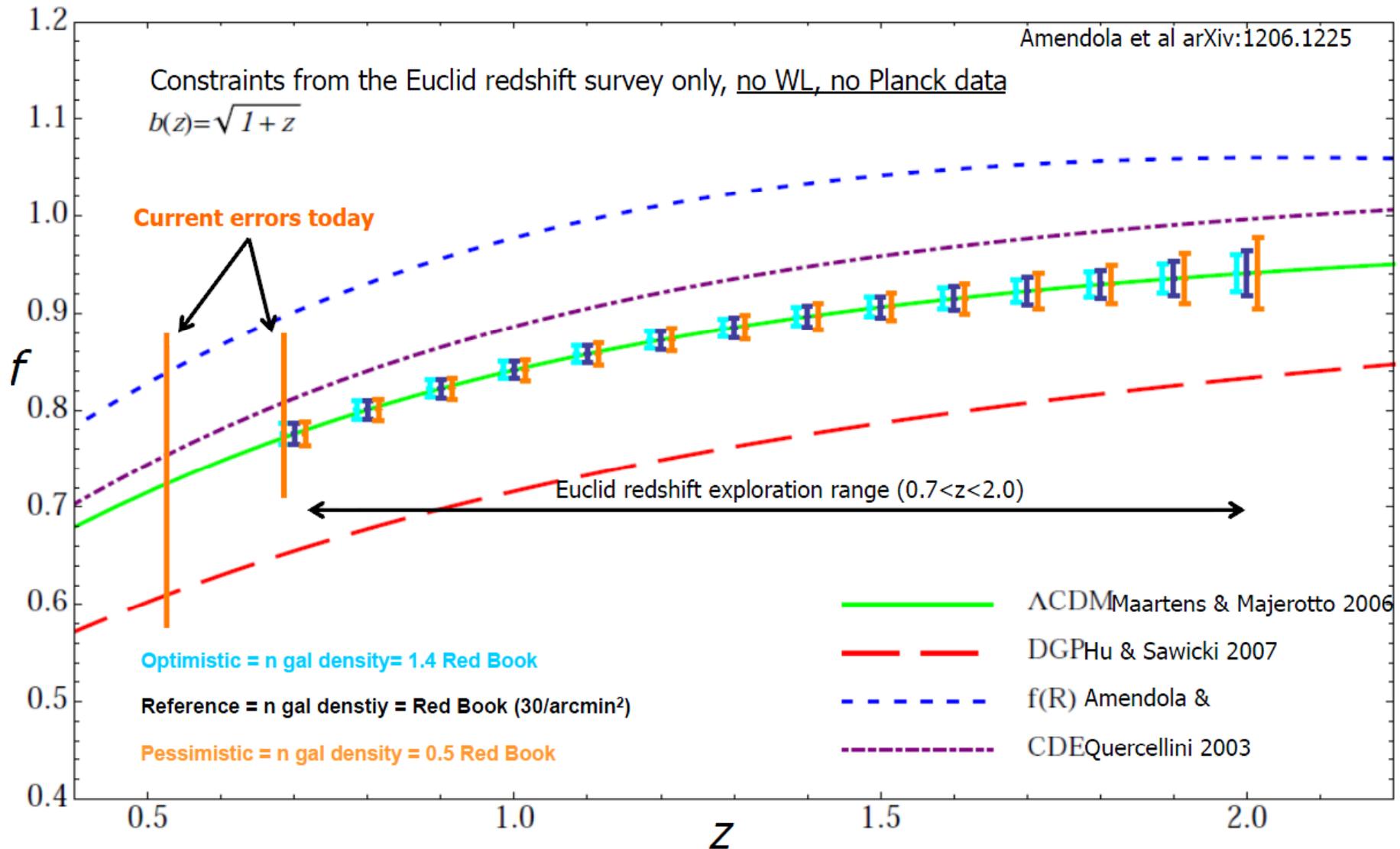
σ_8 variance amplitude
des structures
(normalisation)

$f\sigma_8$ 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)





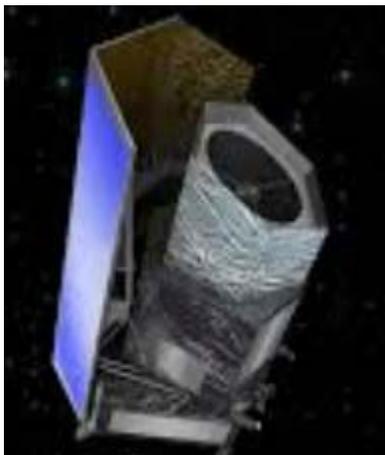
EUCLID Legacy

Survey étendu 15 000 deg²
 Survey profond 40 deg² (+2mag)

12 milliards de sources (3 σ)

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 α 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 _{eff} ~ 400 K Y dwarfs	$\sim \text{few } 10^2$	< 10
Lensing galaxies with arc and rings	$\sim 300,000$	$\sim 10-100$
Quasars at $z > 8$	~ 30	None

Strong Lensing: 60 SLACS

SLACS (~2010 - HST)



SLACS: The Sloan Lens ACS Survey

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)

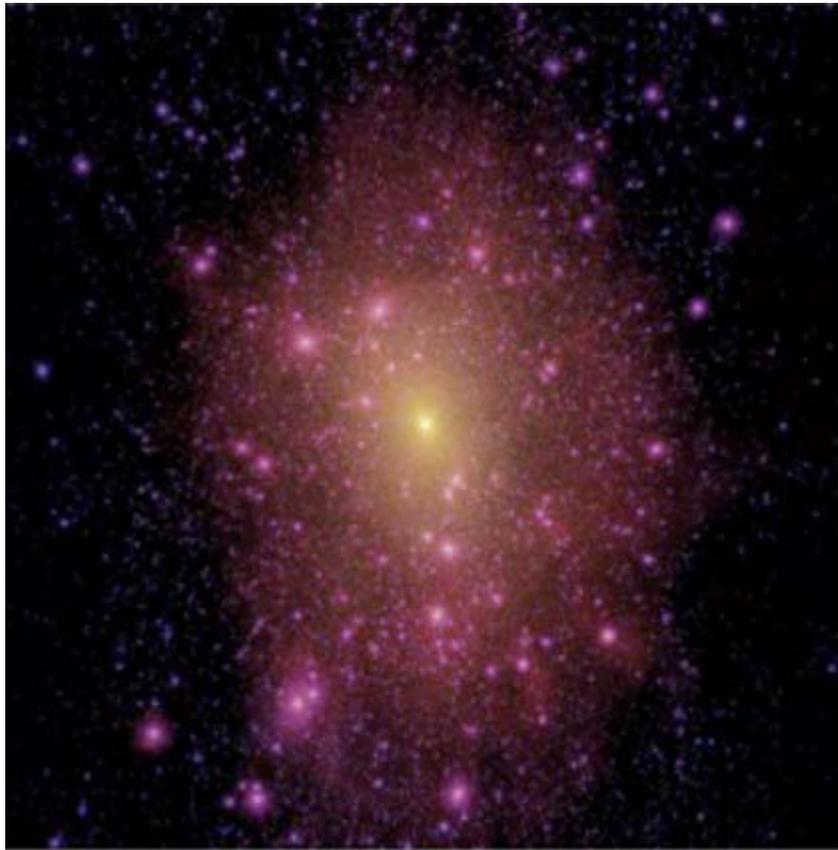
Va devenir une industrie

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

→ Nombre similaire par unité de surface avec SKA 100 000



Matière Froide ou tiède?



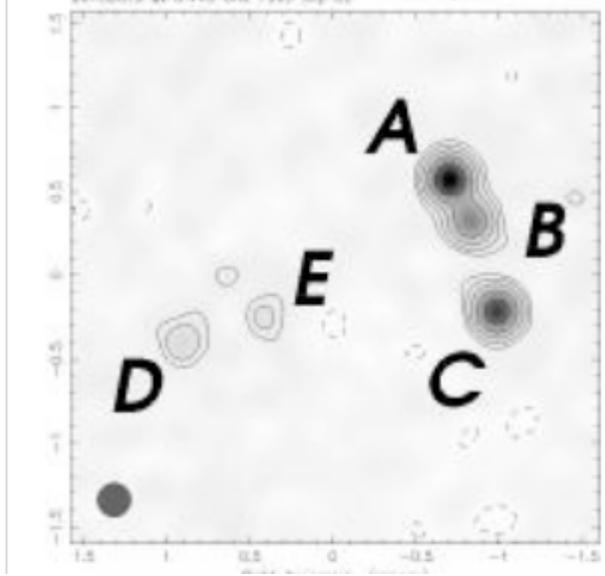
CDM



WDM

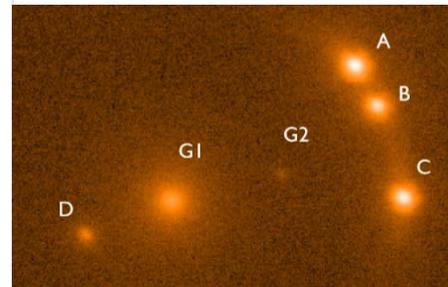
Faire des images avec des lentilles

CLASS B2045+265, VLA 15GHz

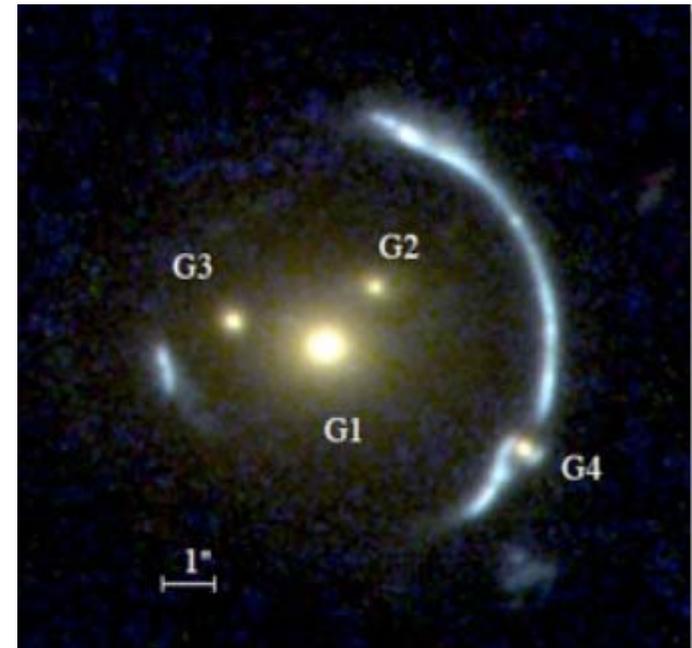


E=G1

NIR, Keck



Dwarf G2: lens



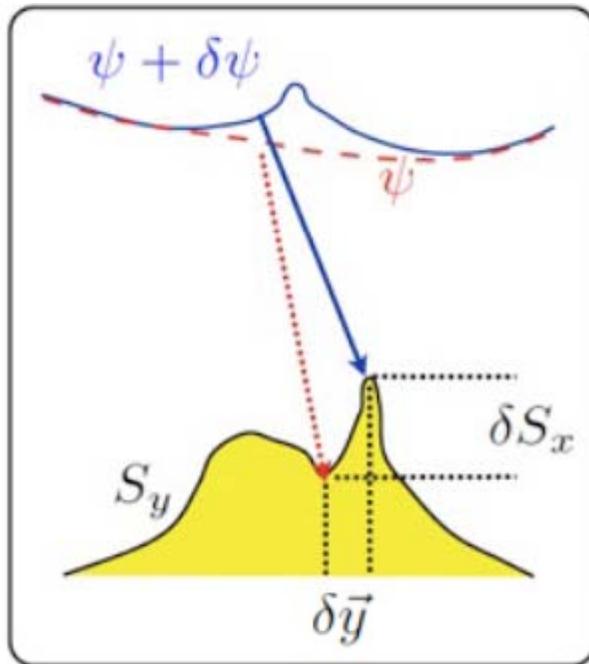
Detector des sous-structures comme des anomalies de rapports de flux entre images

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

sous-structures comme des anomalies de brillance

Sous-structure:
source ou lentille?

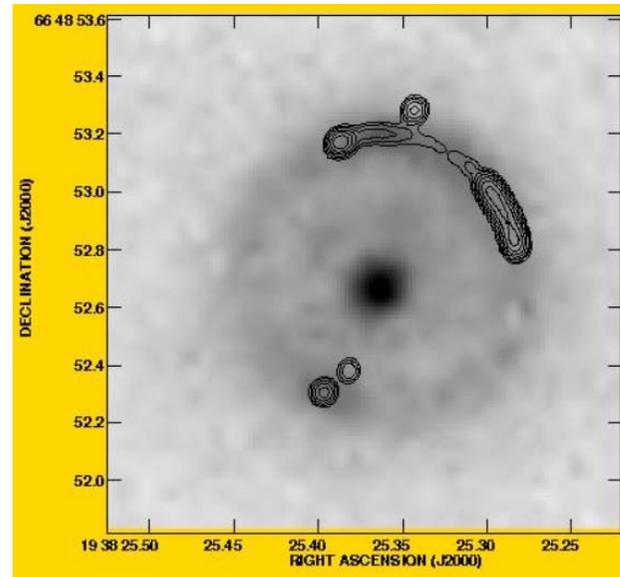
Outil des lentilles fortes



Potentiel

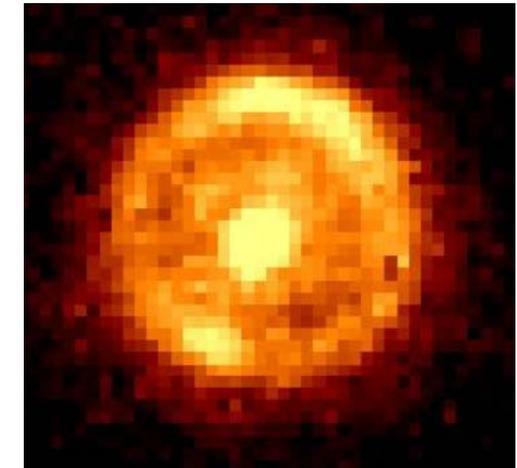
$$\psi = \psi \text{ lisse} + \delta\psi \text{ (pixel)}$$

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

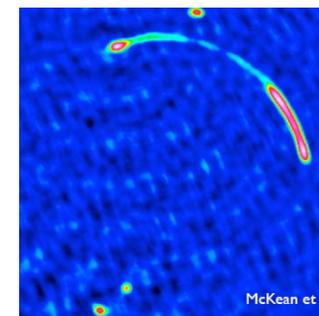


Radio (Merlin)

B1938+666

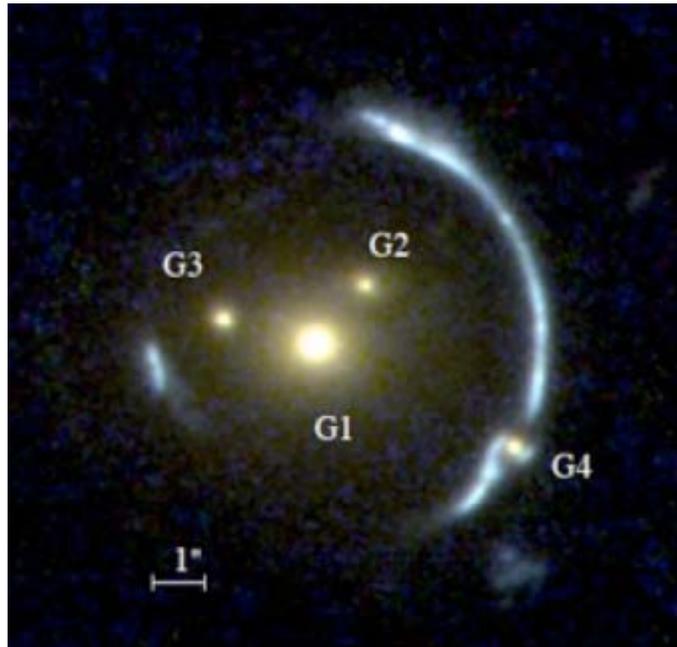


HST NIR

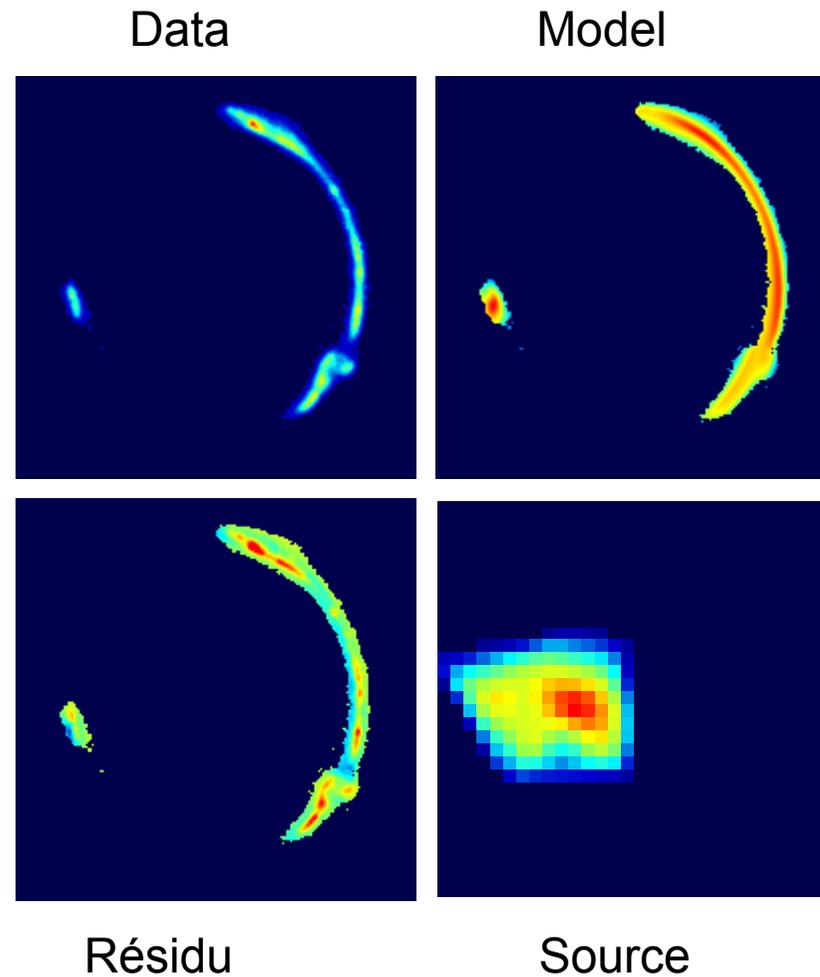


EVN
3mas
McKean

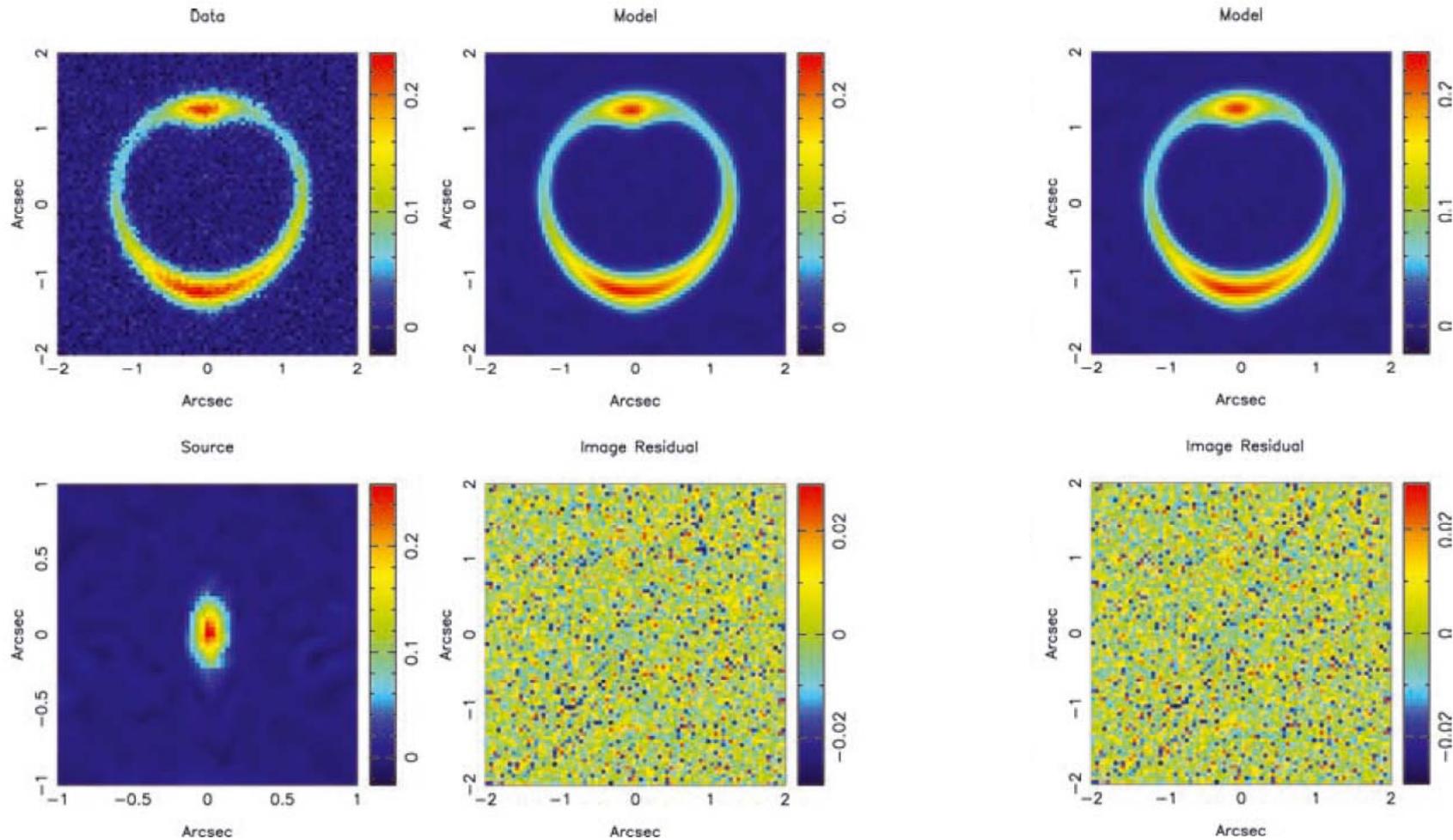
Modèle simple source lisse $\rho \sim r^{-\alpha}$



SDSSJ120602.09+514229.5
Vegetti et al 2010



Ajout d'une sous-structure

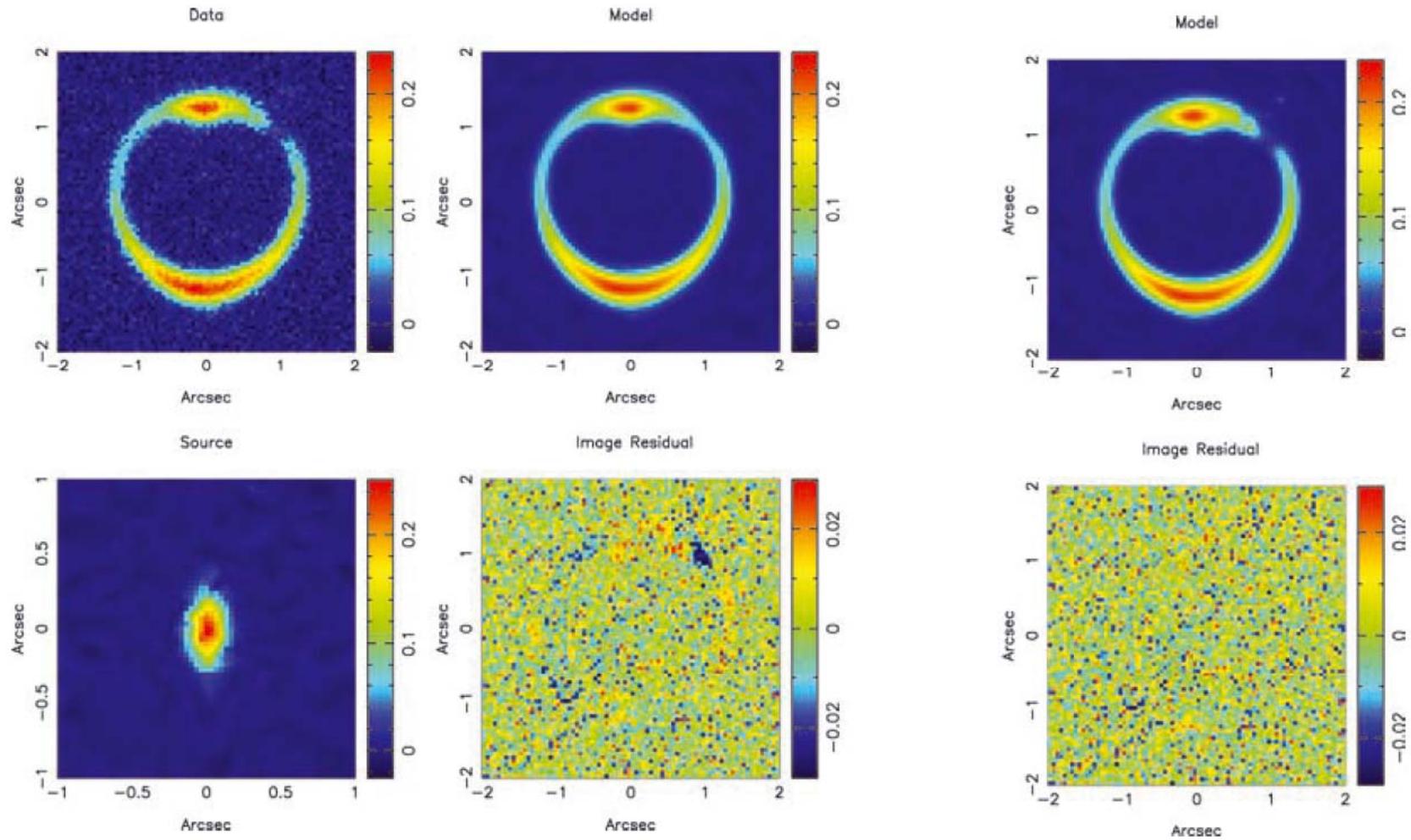


Potentiel lisse

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

Vegetti et al 2009

Ajout d'une sous-structure (2)

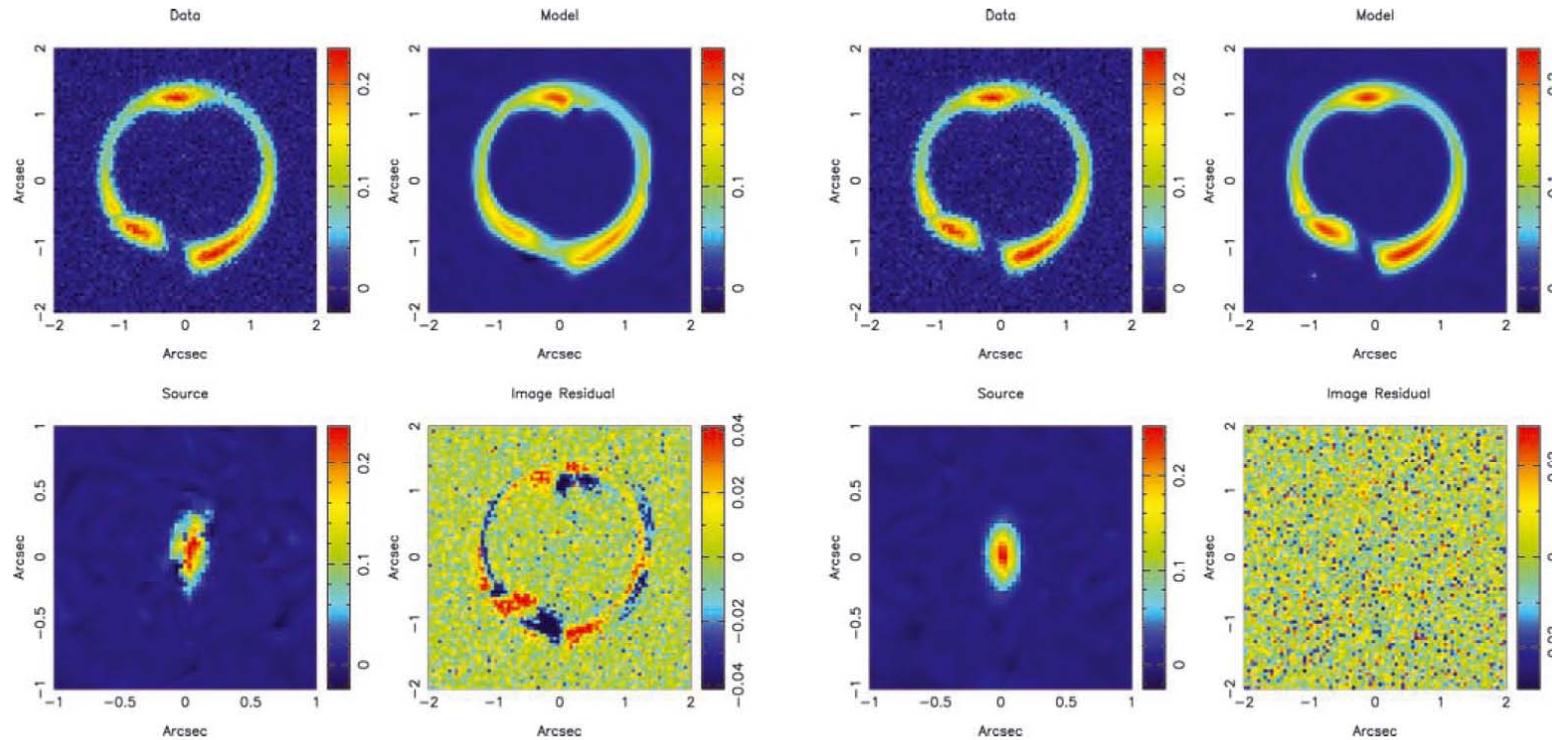


Potentiel lisse

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

Vegetti et al 2009

Dégénérescence source-lentille



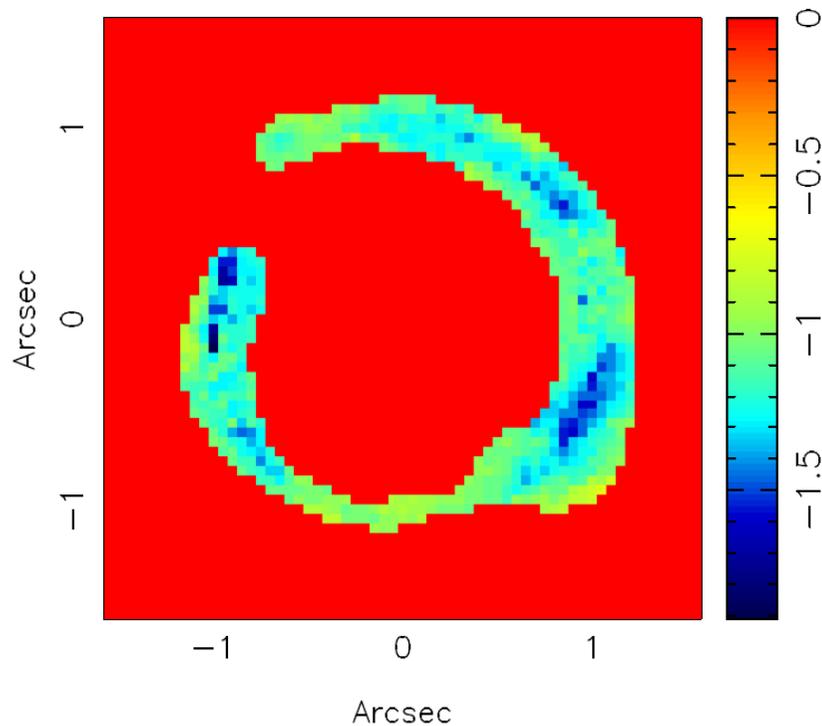
Potentiel lisse

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

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

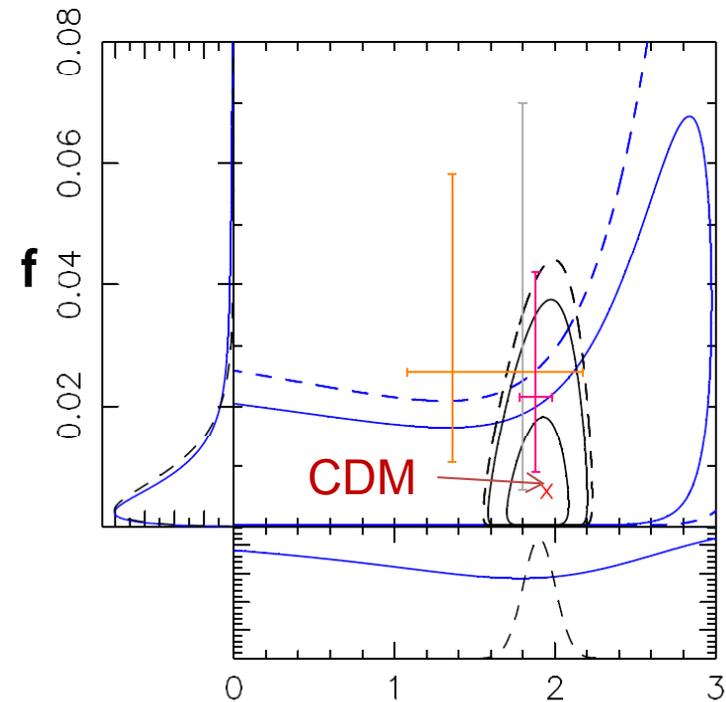
Contraintes actuelles, 12 anneaux d'Einstein

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



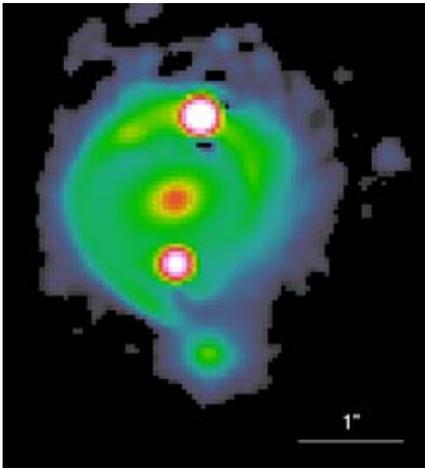
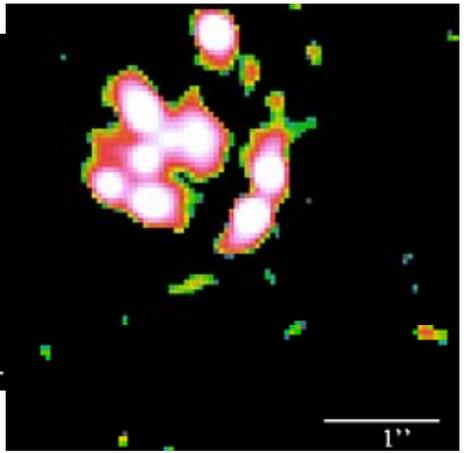
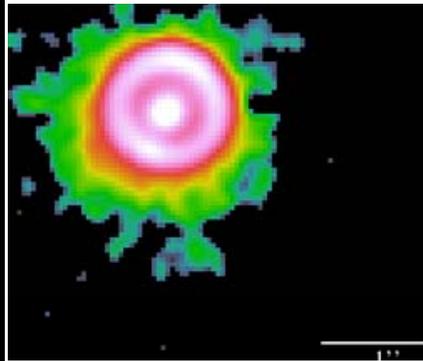
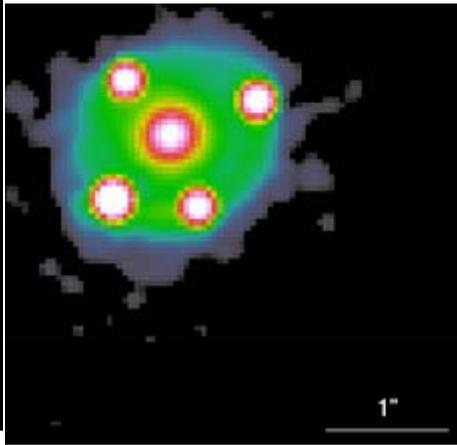
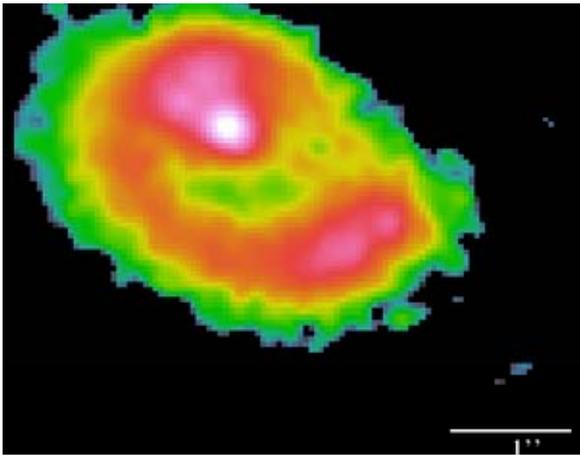
SDSS J0252+0039, Vegetti et al 2014

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



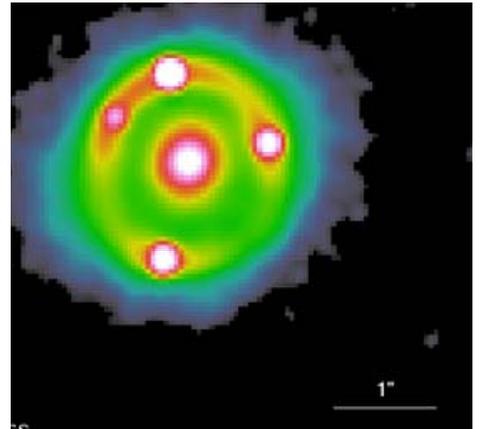
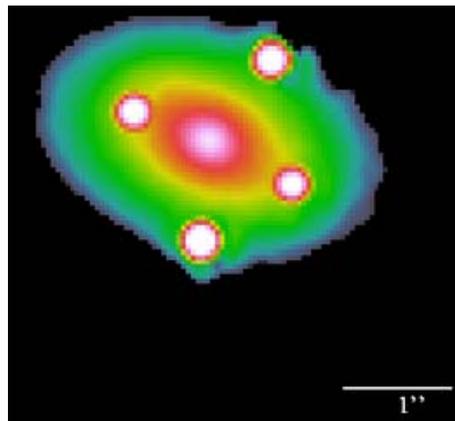
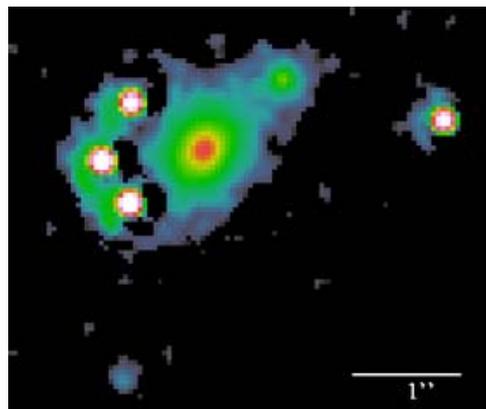
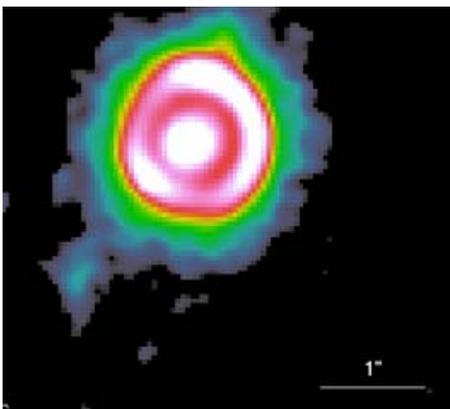
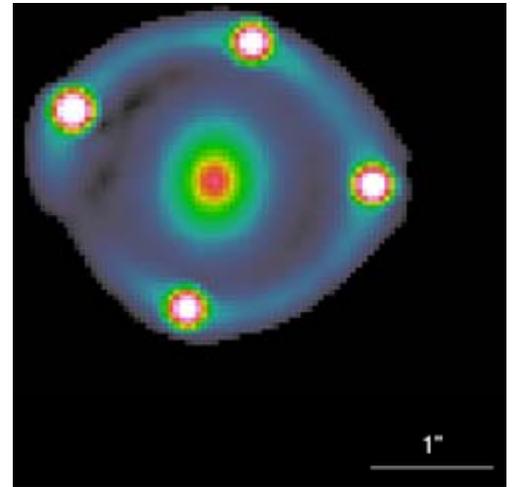
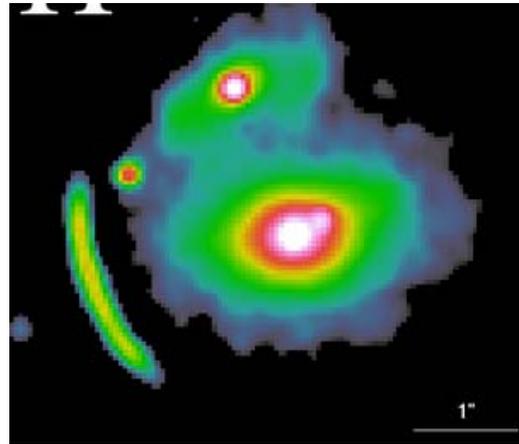
$\alpha =$ pente de la fonction de masse

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

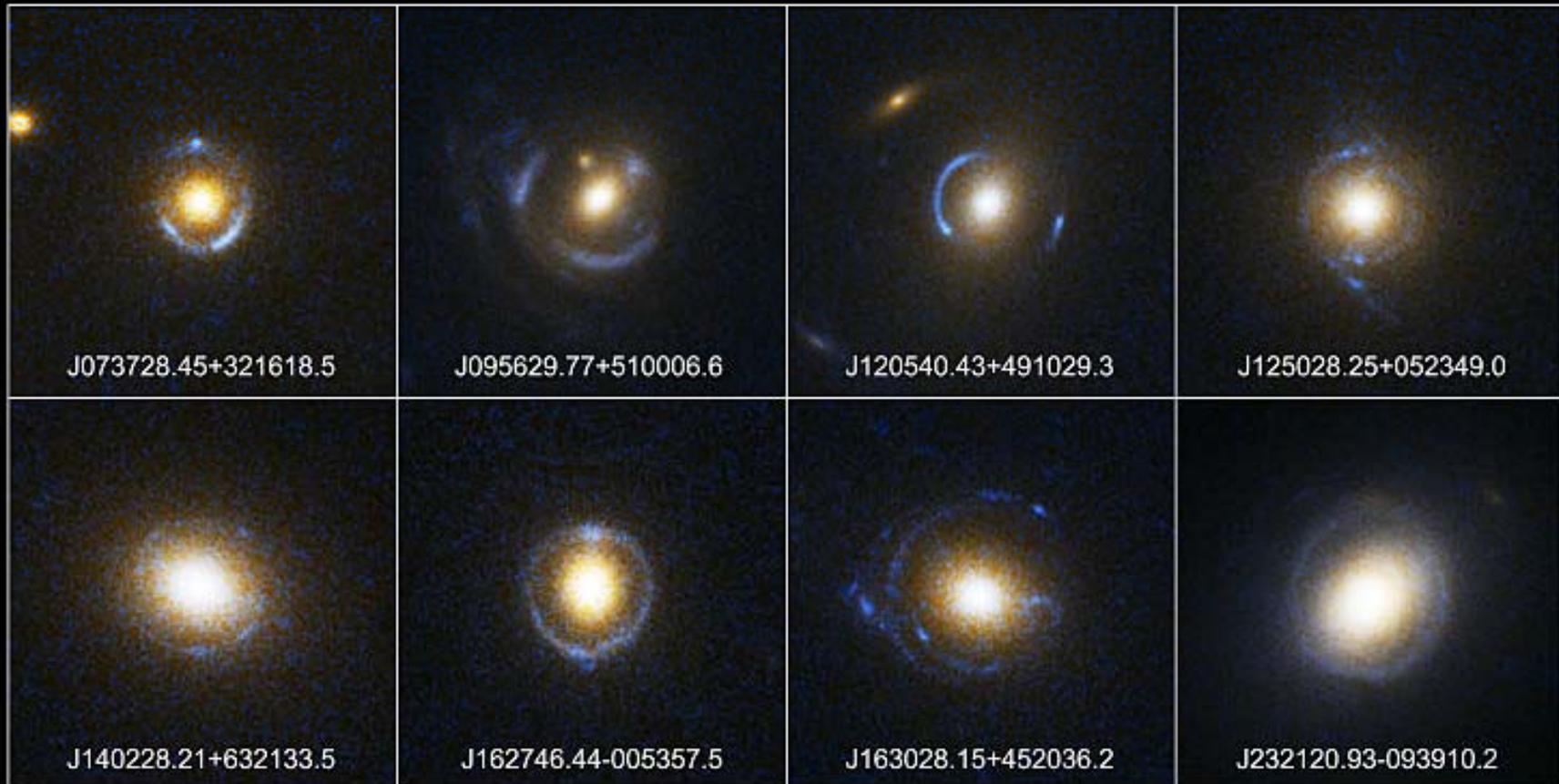


CASTLES

Proche IR



Anneaux d'Einstein en optique



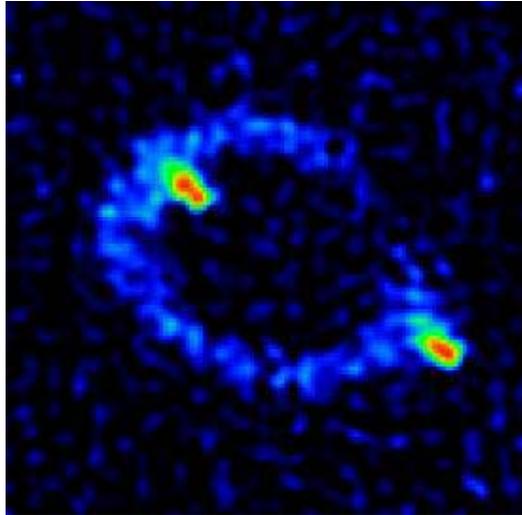
Einstein Ring Gravitational Lenses
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

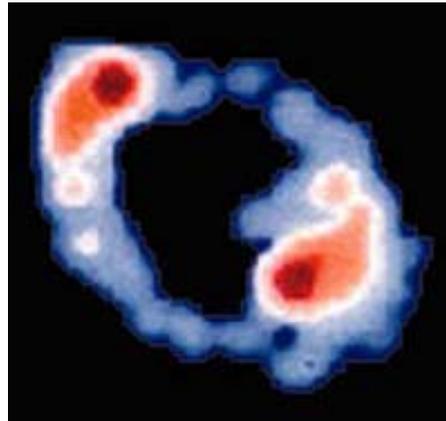
STScI-PRC05-32

Anneaux d'Einstein en radio

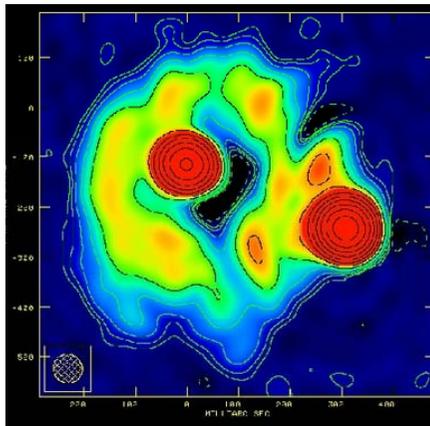
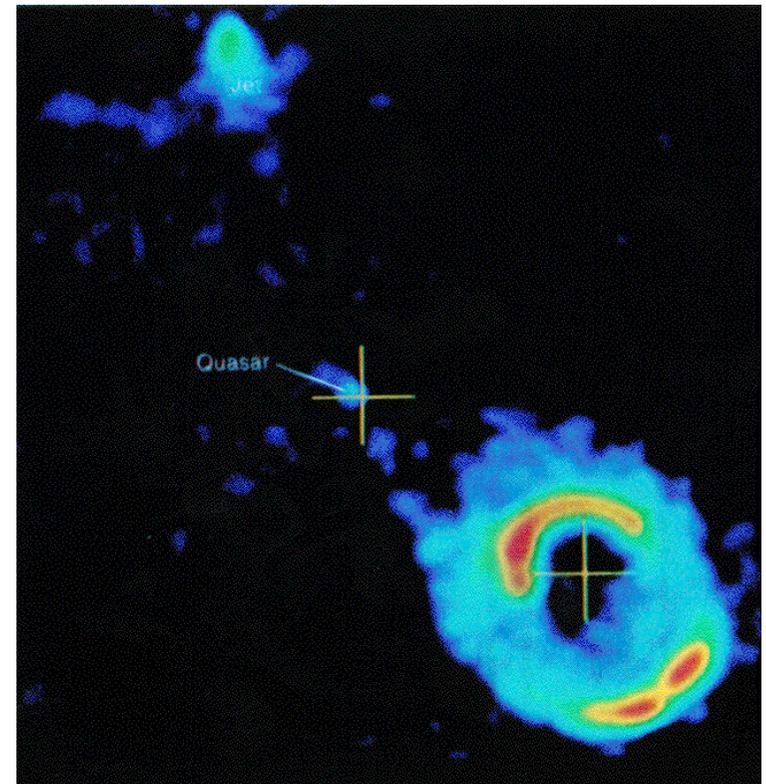
Les premières détections!
50 ans après la prédiction
d'Einstein



MG1131+0456, Hewitt 87 PKS1830, Jauncey 1991



MG1654+1346 Langston 1988



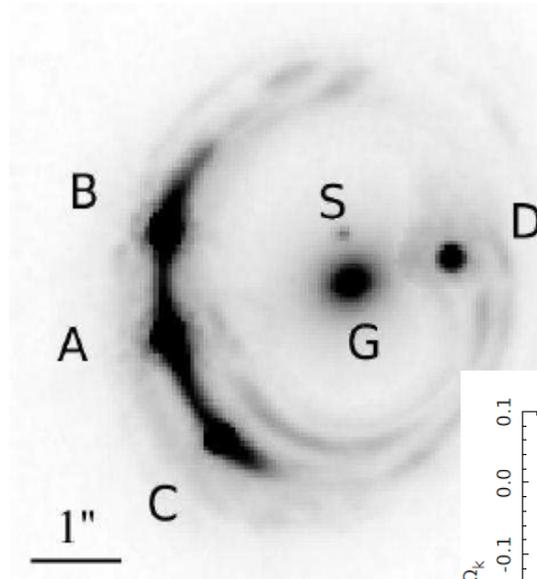
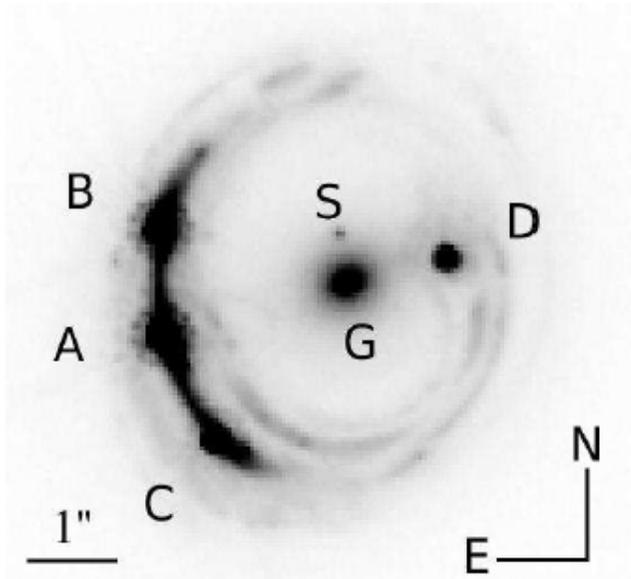
B0218, Merlin Biggs et al 2001



Autres données: délai temporel

observed

reconstructed

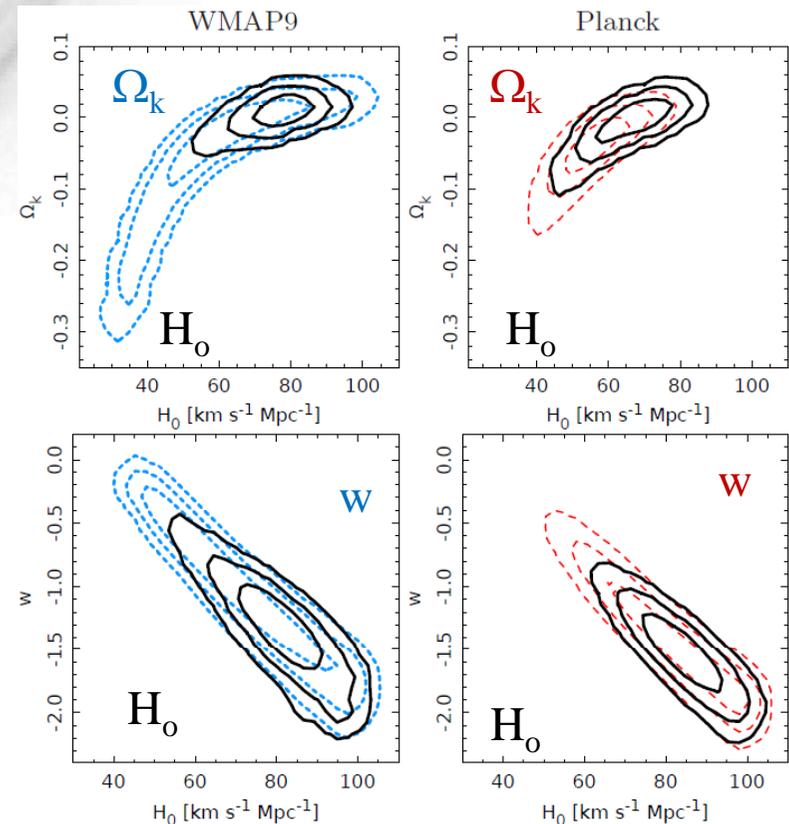


Lentille+ cinématique
+délai

→ Courbure Ω_k

→ H_0 , w (énergie noire)

$P = -w \rho$



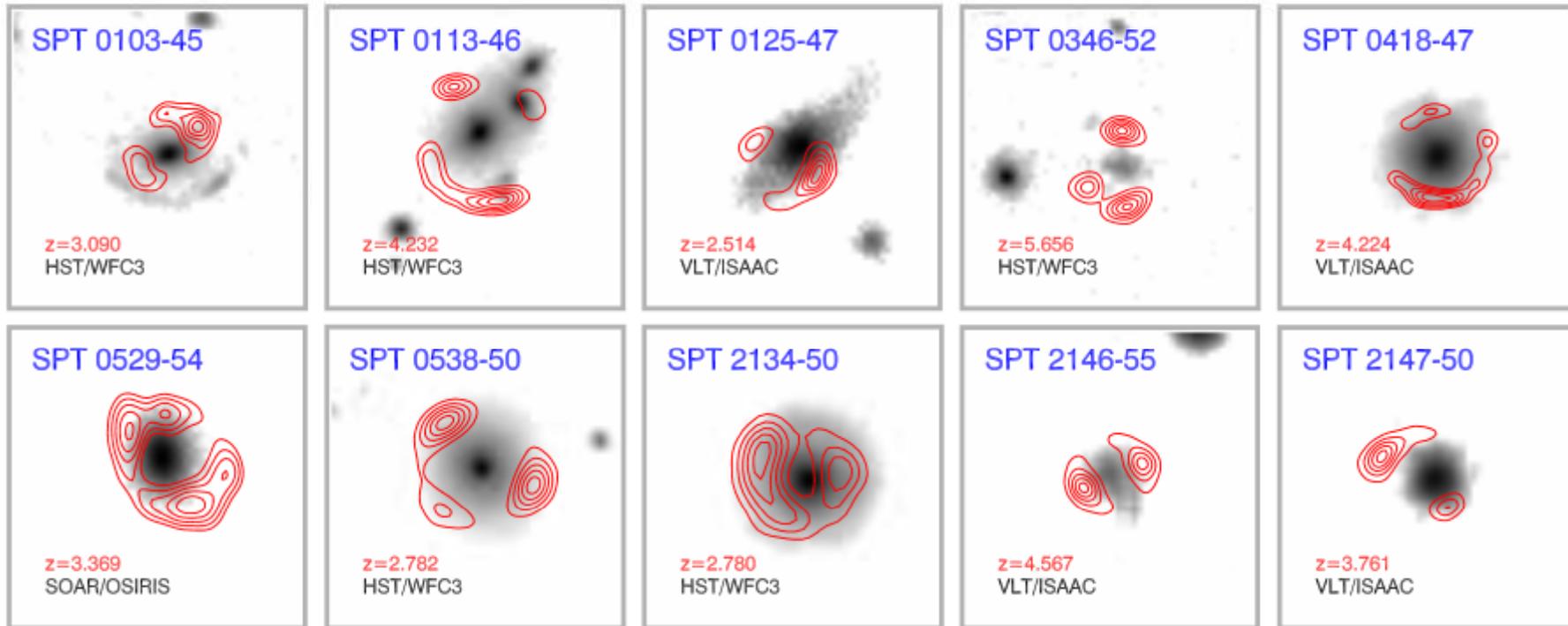
Pour un univers plat, $H_0 = 82 \text{ km/s/Mpc}$

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

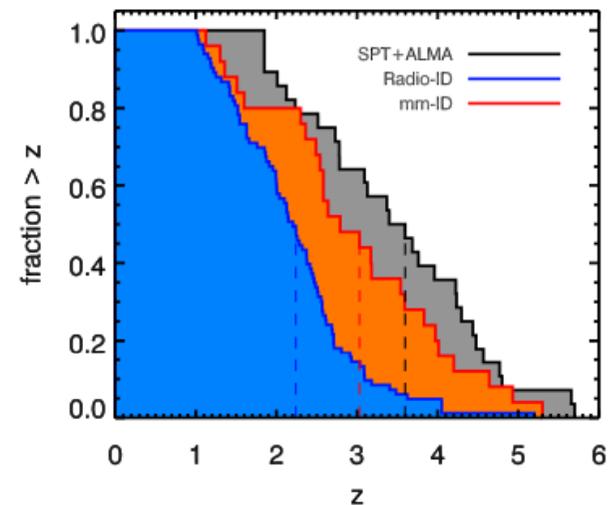
Vieira et al 2013 (23/26 détectées)

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 $M \sim 10^6 M_\odot$

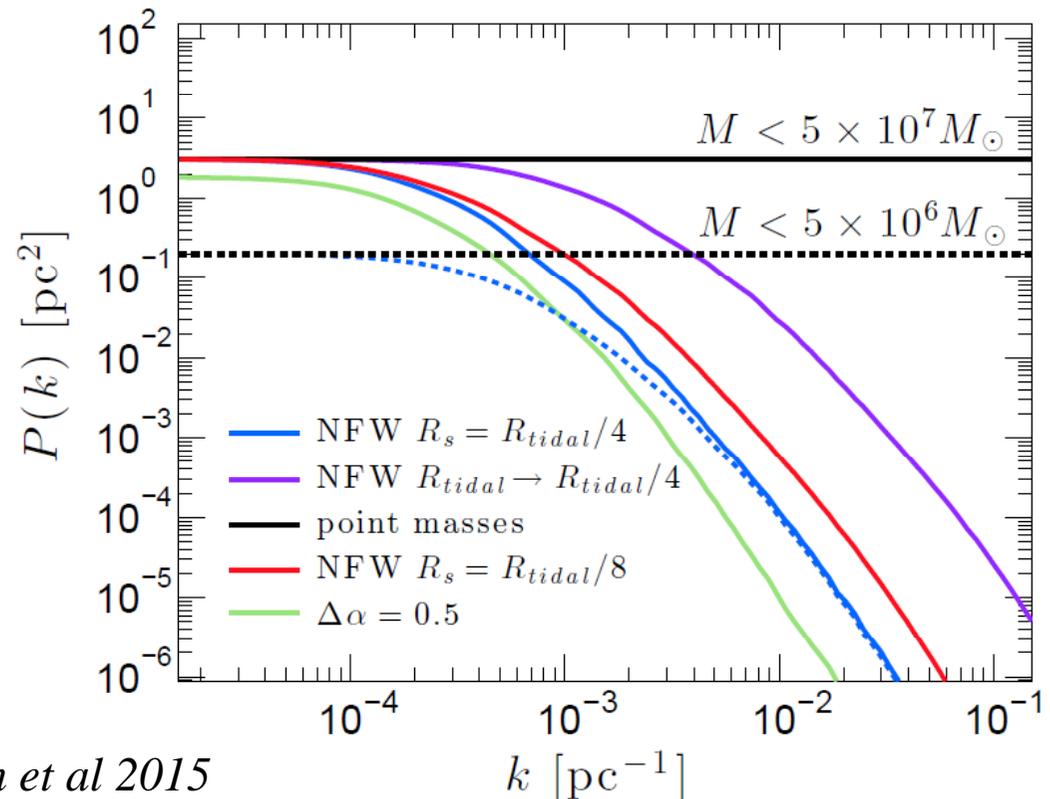
Dalal & Kochanek 2002, Hezaveh et al 2015

Spectre de puissance des résidus

La puissance de la lentille
dépend de la concentration de masse

Sources ponctuelles = cste

Courbe verte: la pente α 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

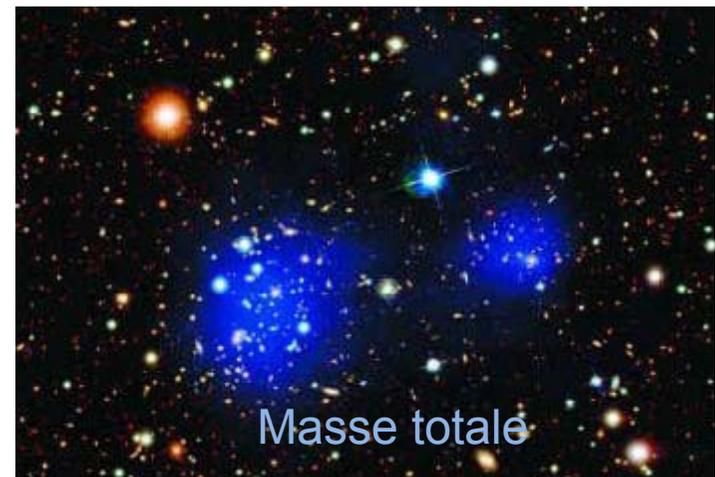
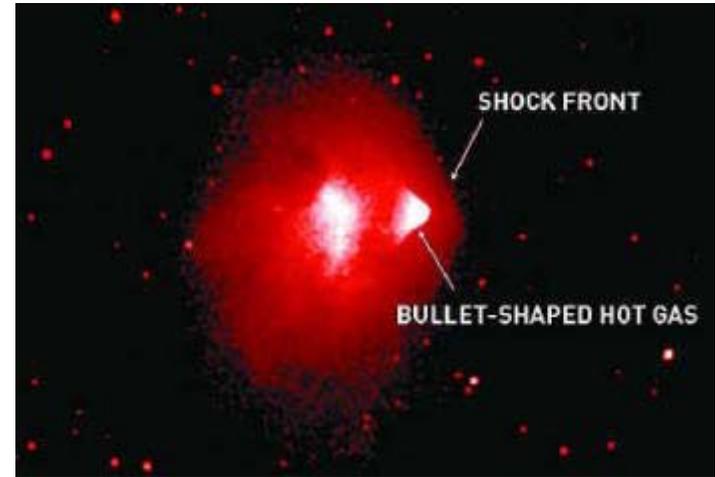
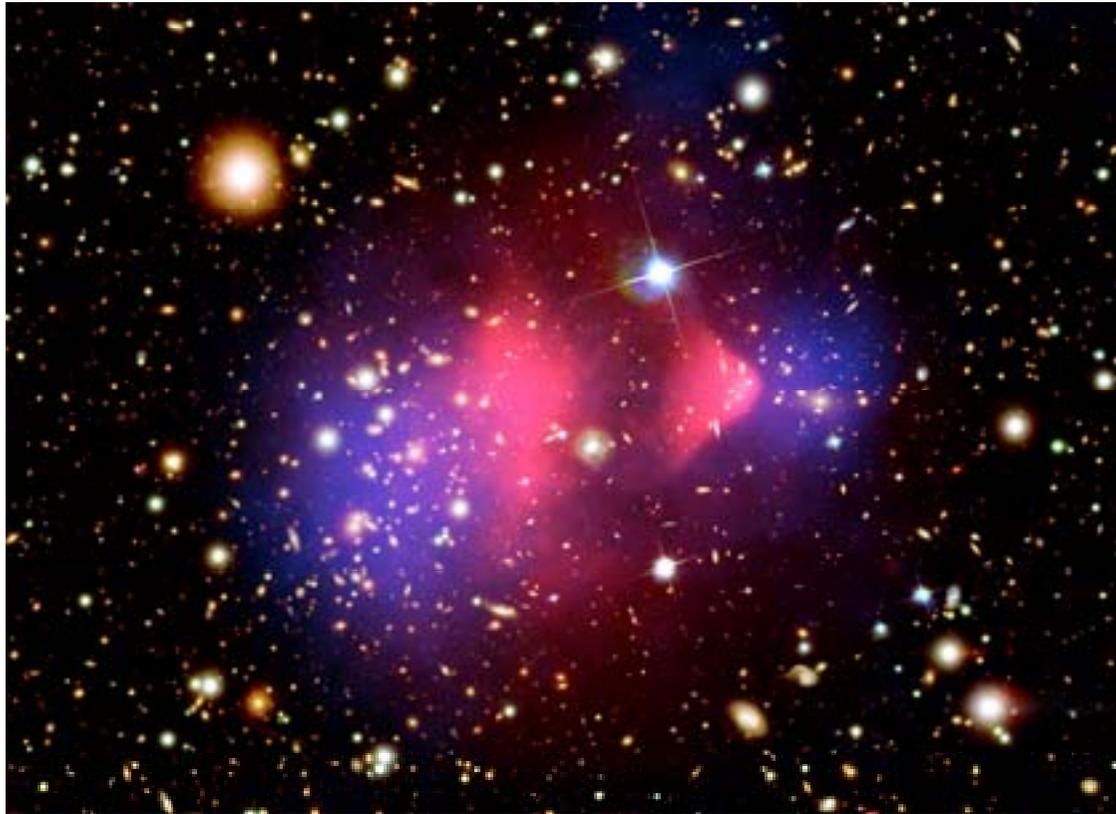
être contrainte à $f < 0.005_{\pm 0.001}$ (inférieure aux prédictions CDM)

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

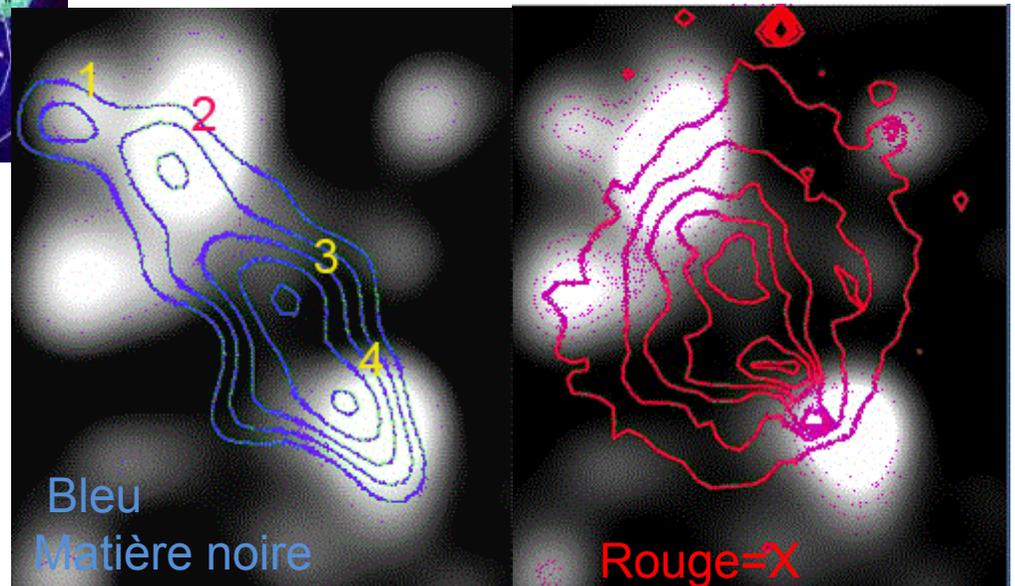
Collisions $\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} \sim 4\text{cm}^2/\text{g}$



Ou bien existence de galaxies en 3?

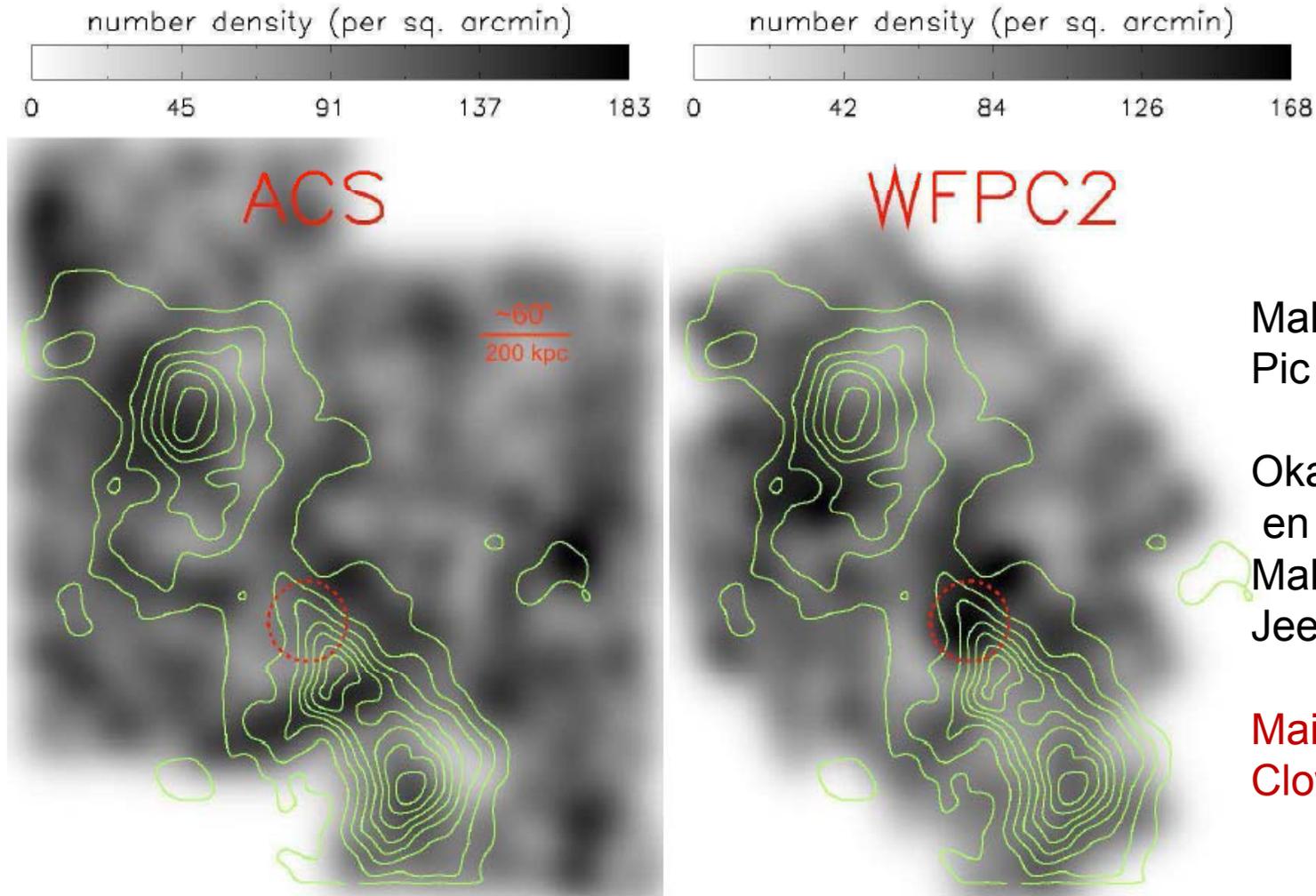
Mahdavi et al 2007, Clowe et al 2012

Jee et al 2012, Jee et al 2014



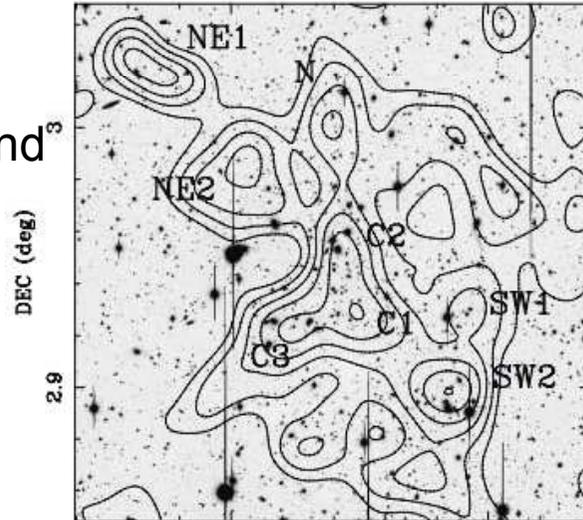
Controverse: A520, $z=0.199$

La dérivation de la masse totale faite avec différentes cartes

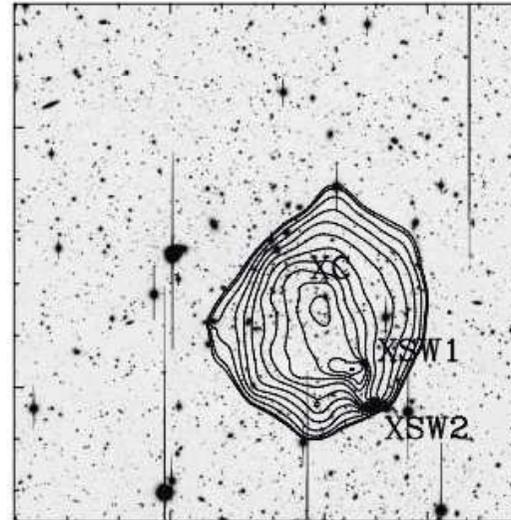


Okabe & Umetsu 2008

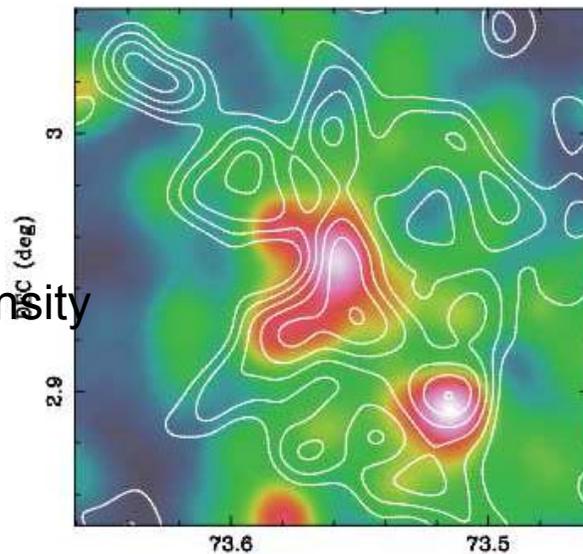
Subaru I band
+ lensing



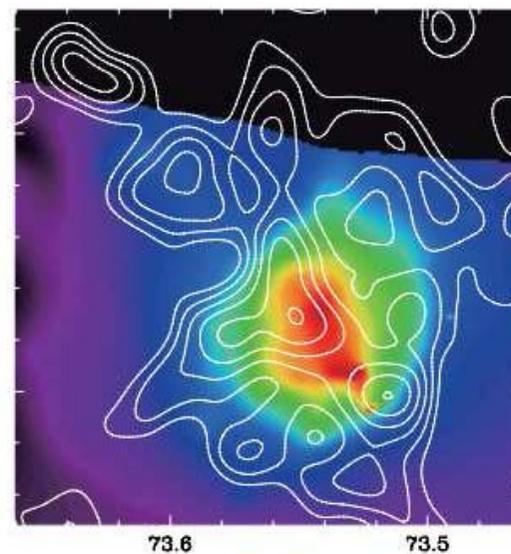
Subaru I band
+ X-ray



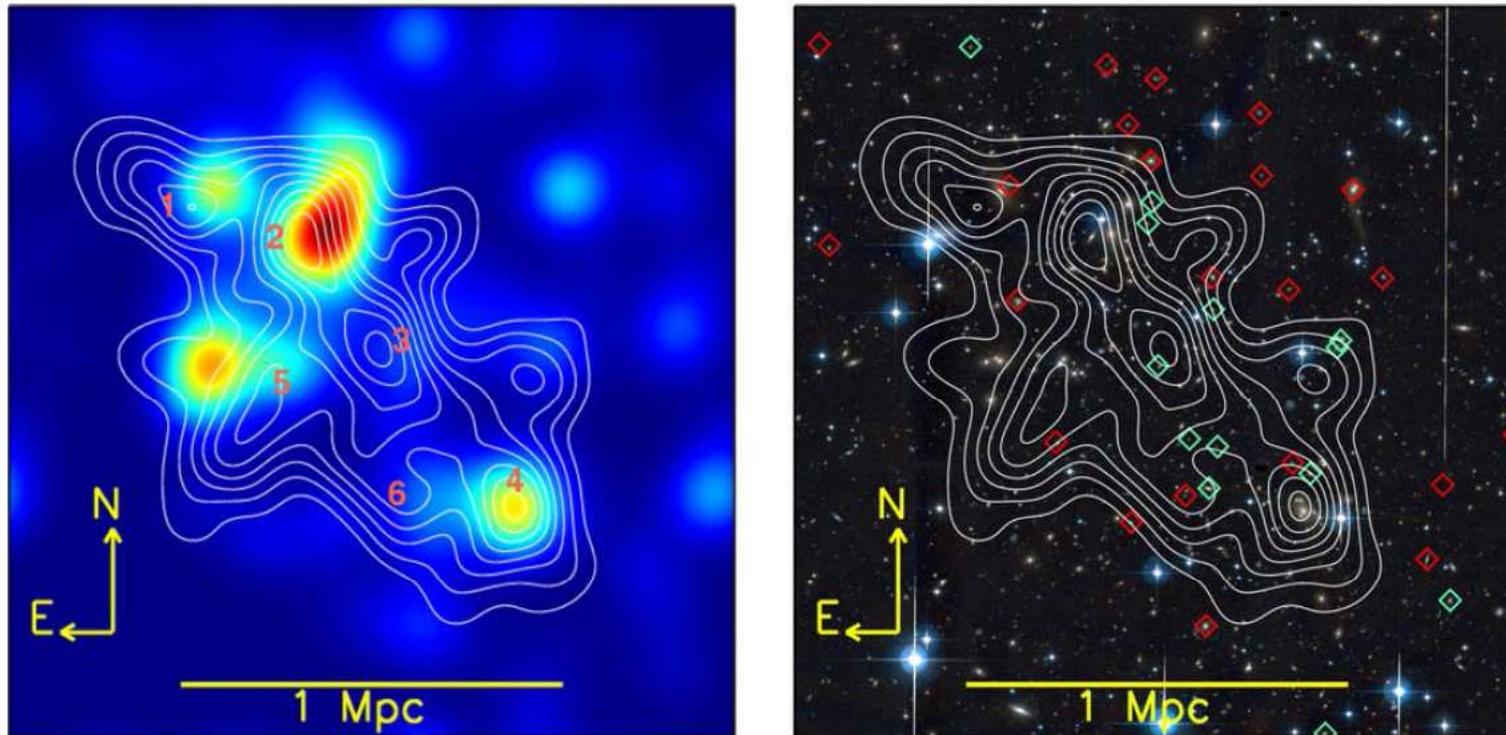
Galaxy density
+ lensing



X-ray
+ lensing



Jee et al 2012

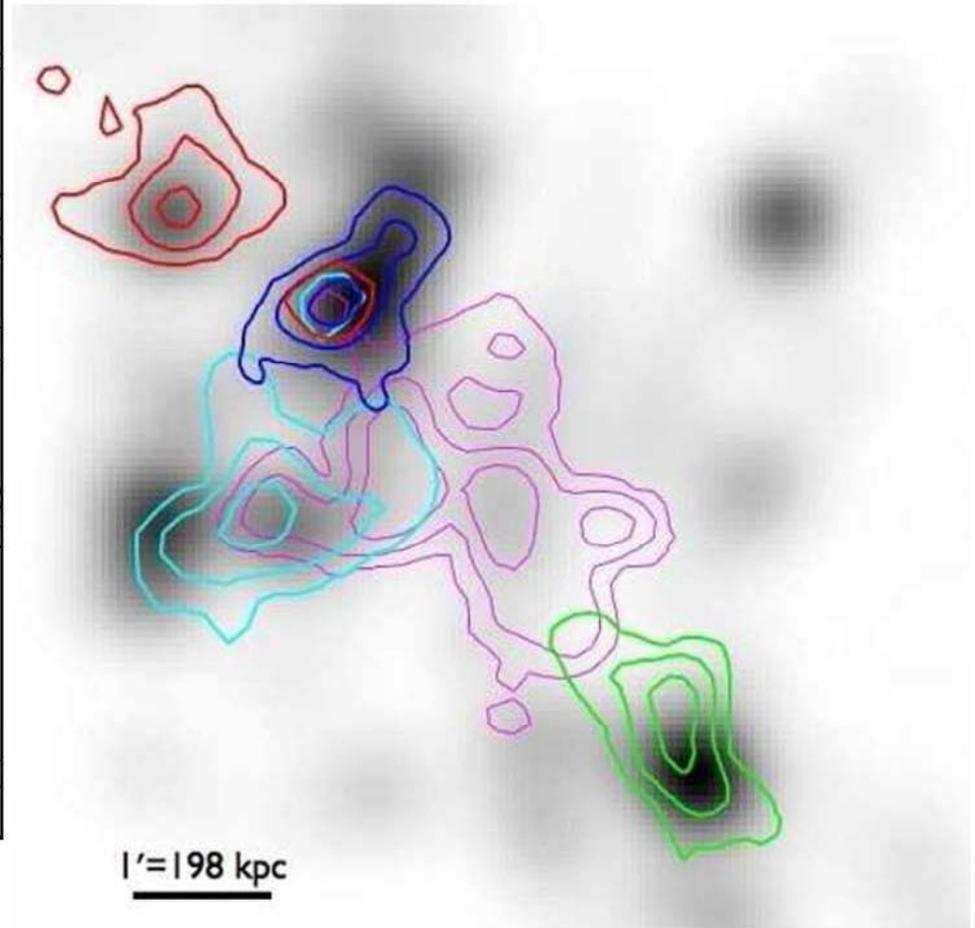
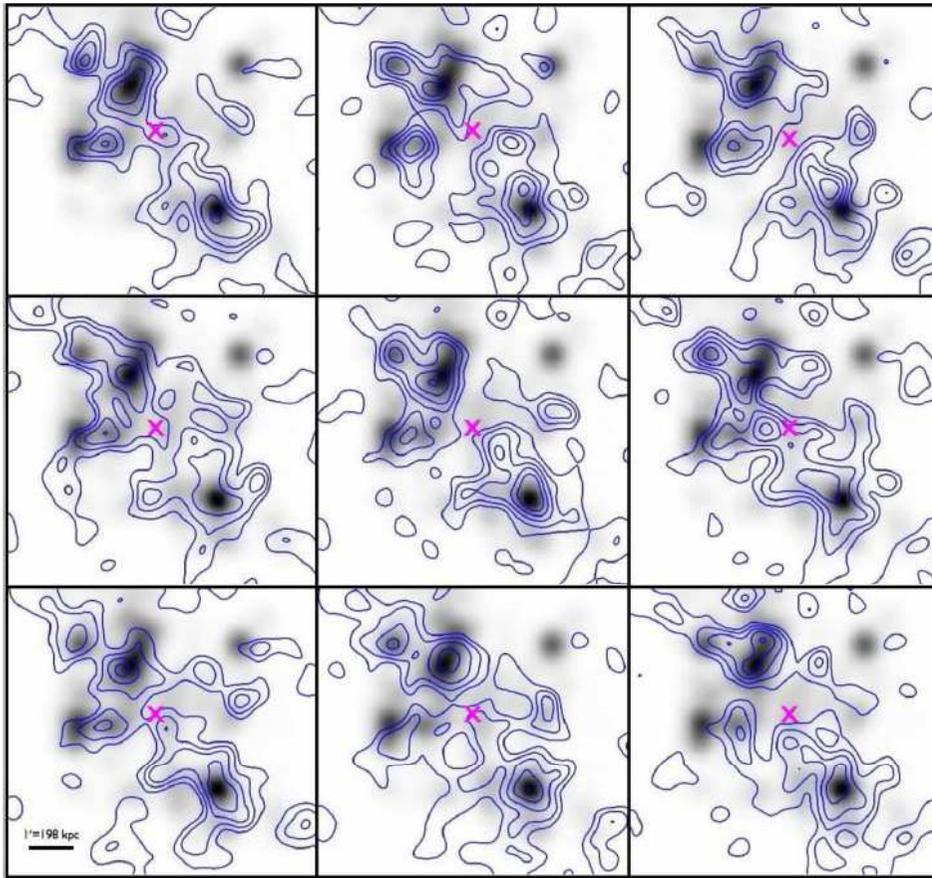


Plusieurs cas (e.g. Abell 1942, Erben+00 et Miralles+02);
La détection de matière noire n'est pas forcément significative

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

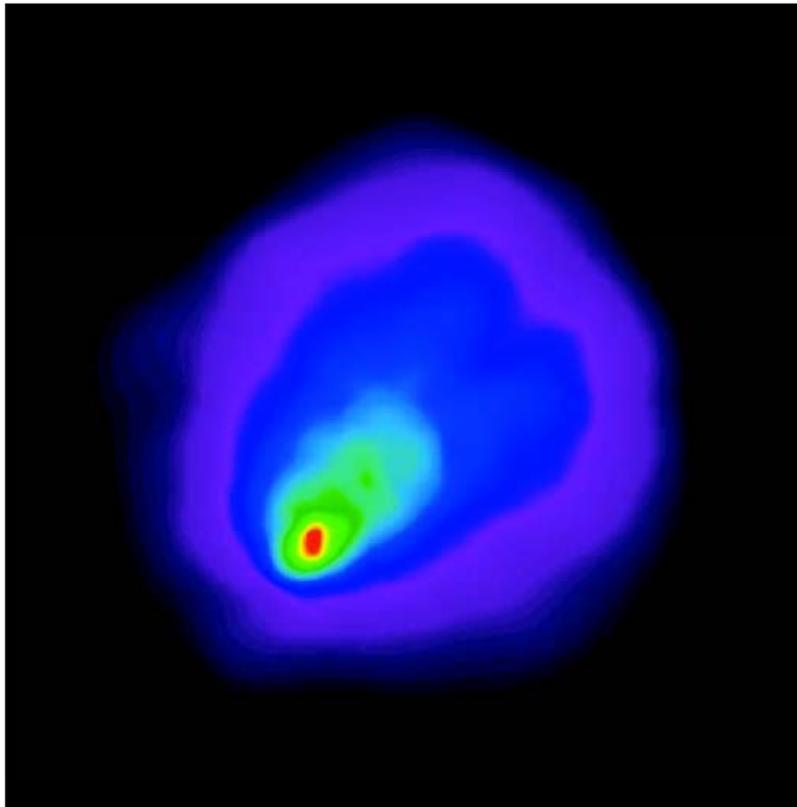
Combien de cas observés? Seulement 5-6 à présent!



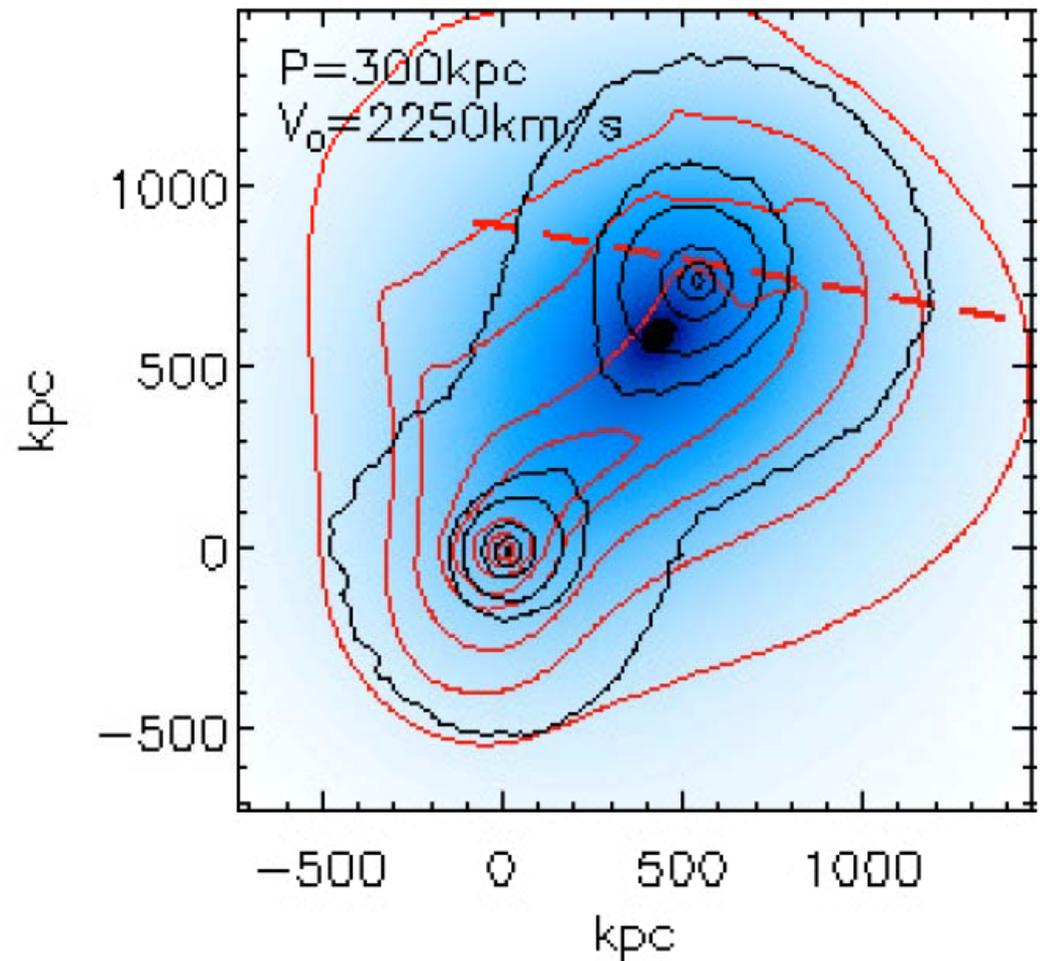
➔ Perspectives de beaucoup plus de cas significatifs dans le futur

El Gordo, massif et très rare pour Λ CDM $z=0.87$

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



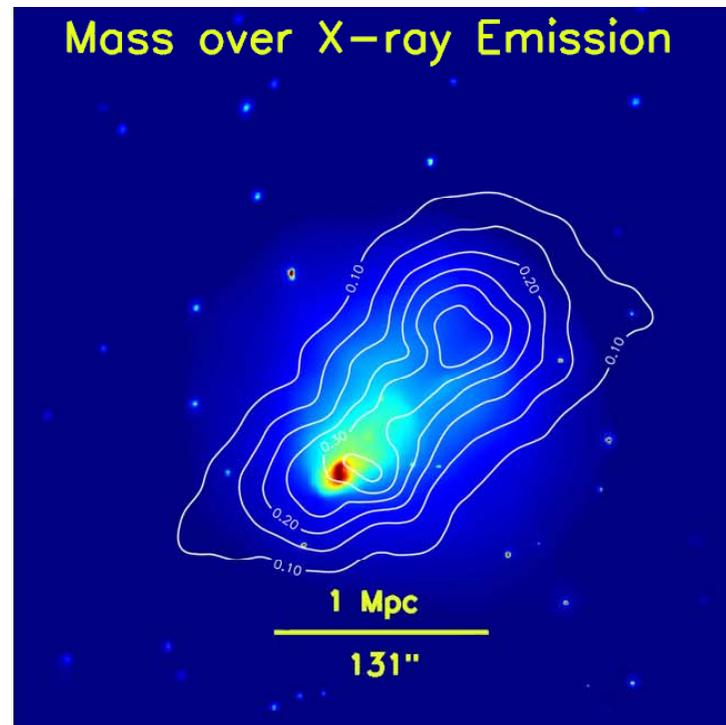
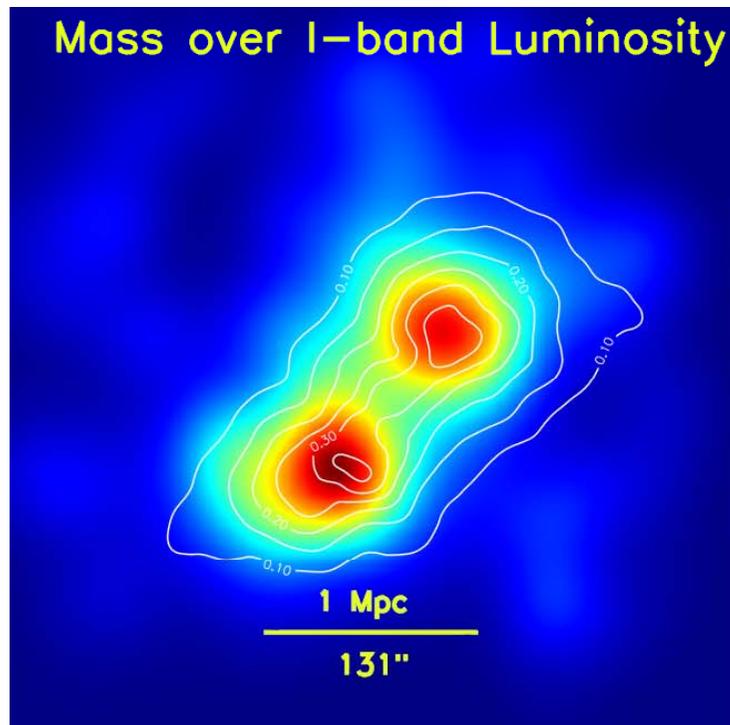
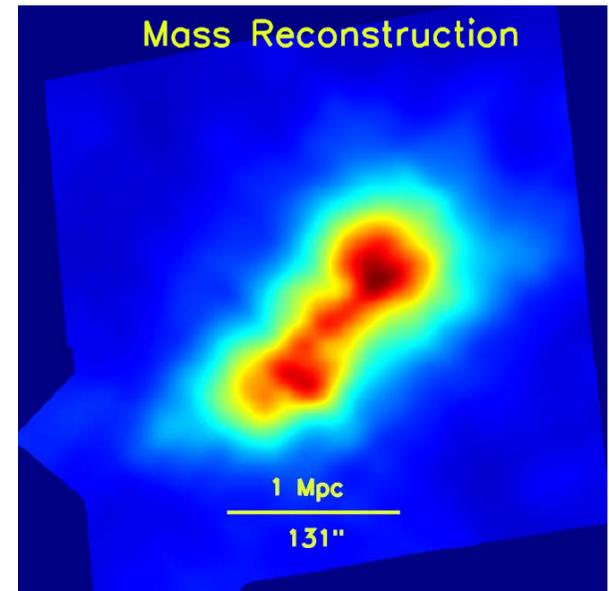
Jee et al 2014



El Gordo, masse totale

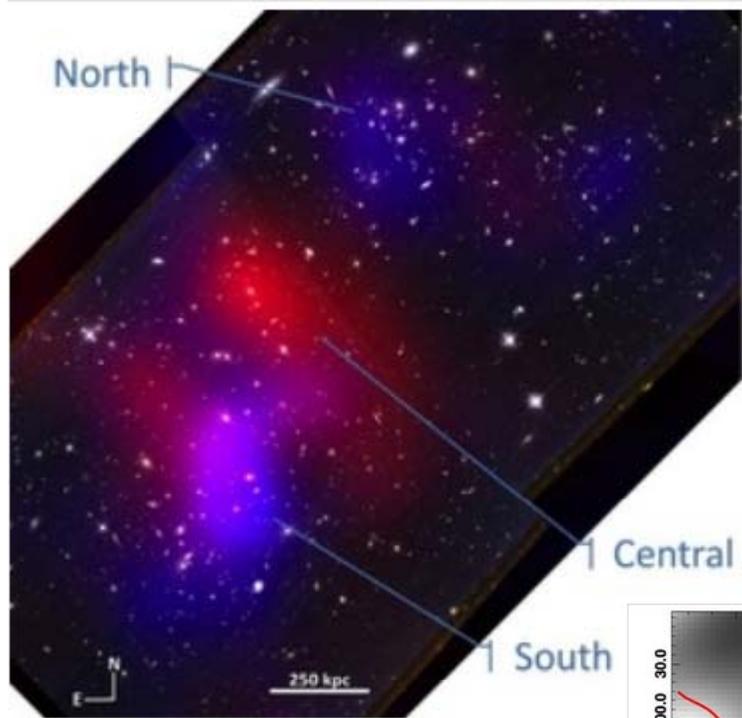
Le pic de gaz chaud est déplacé
à l'extérieur des galaxies, à 62kpc

La masse totale est décentrée par rapport
aux amas stellaires



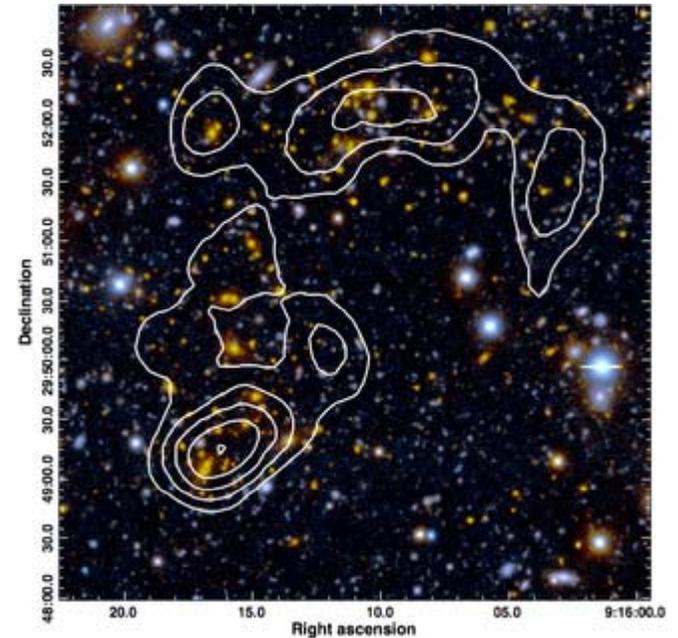
Jee et al 2014

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



Rouge: gaz chaud
(rayons X)

Contours blanc:
Masse stellaire

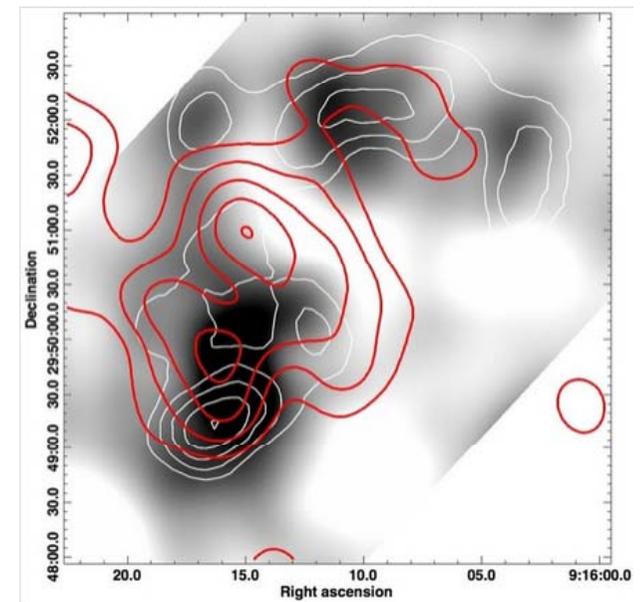
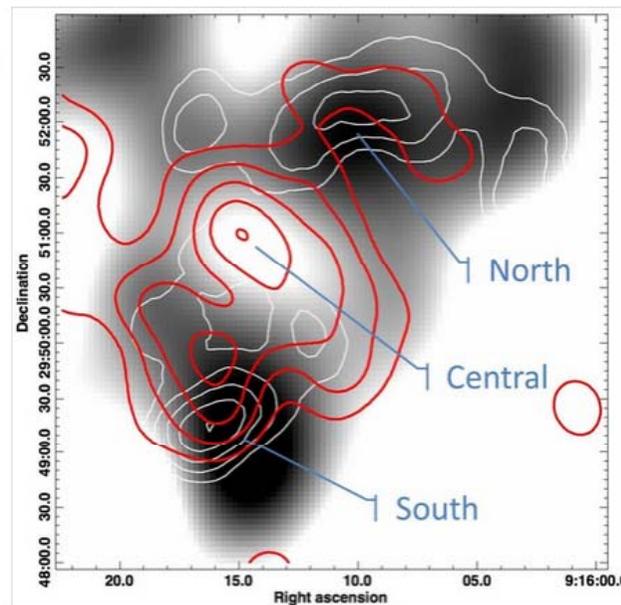


Subaru (sol)

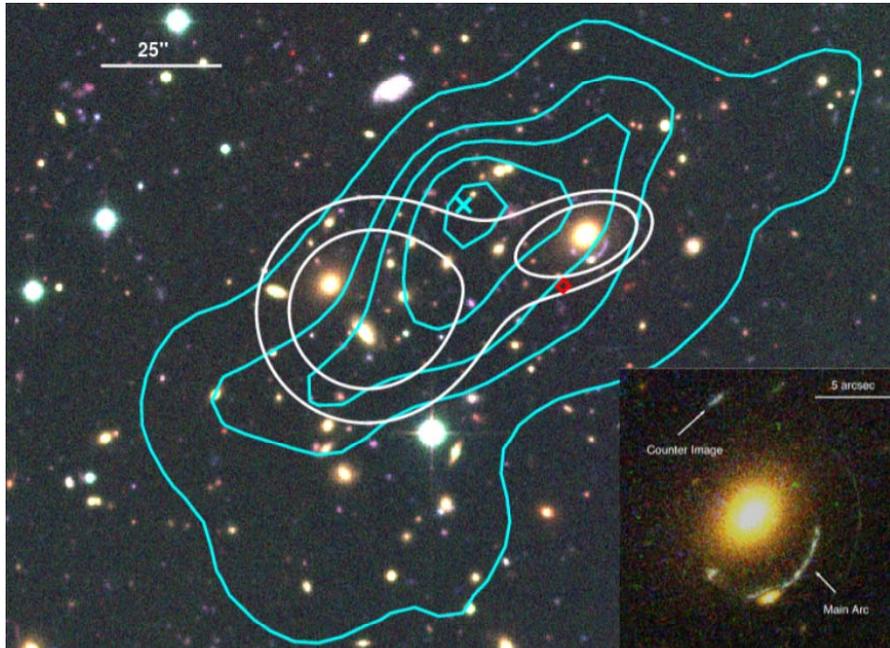
HST (espace)

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

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

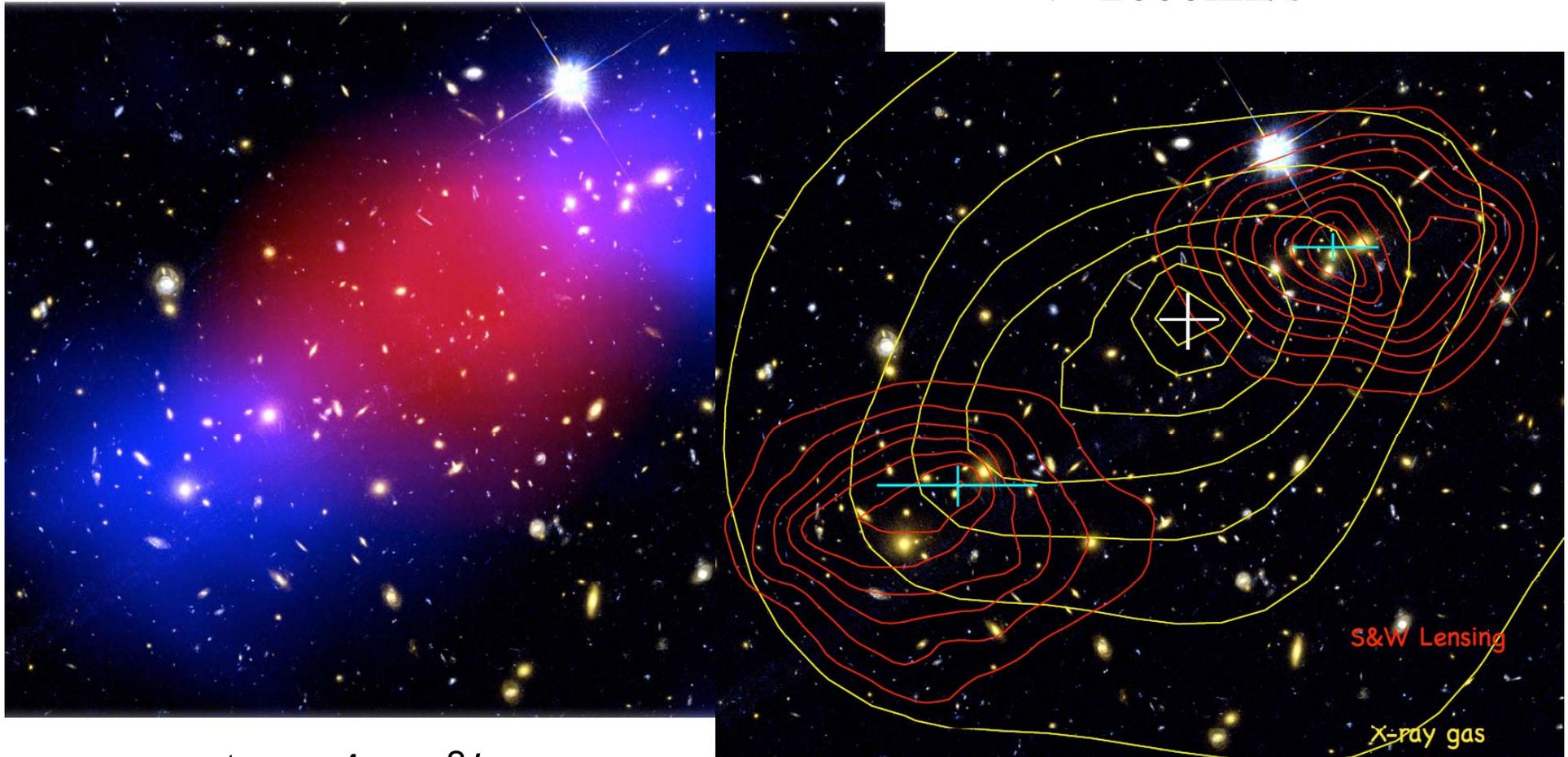
$\sigma_{\text{DM}}/m_{\text{DM}} < 10 \text{ cm}^2/\text{g}$

Gaz chaud X en bleu

Gastaldello et al 2014

MACS J0025-1222: « Baby bullet »

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



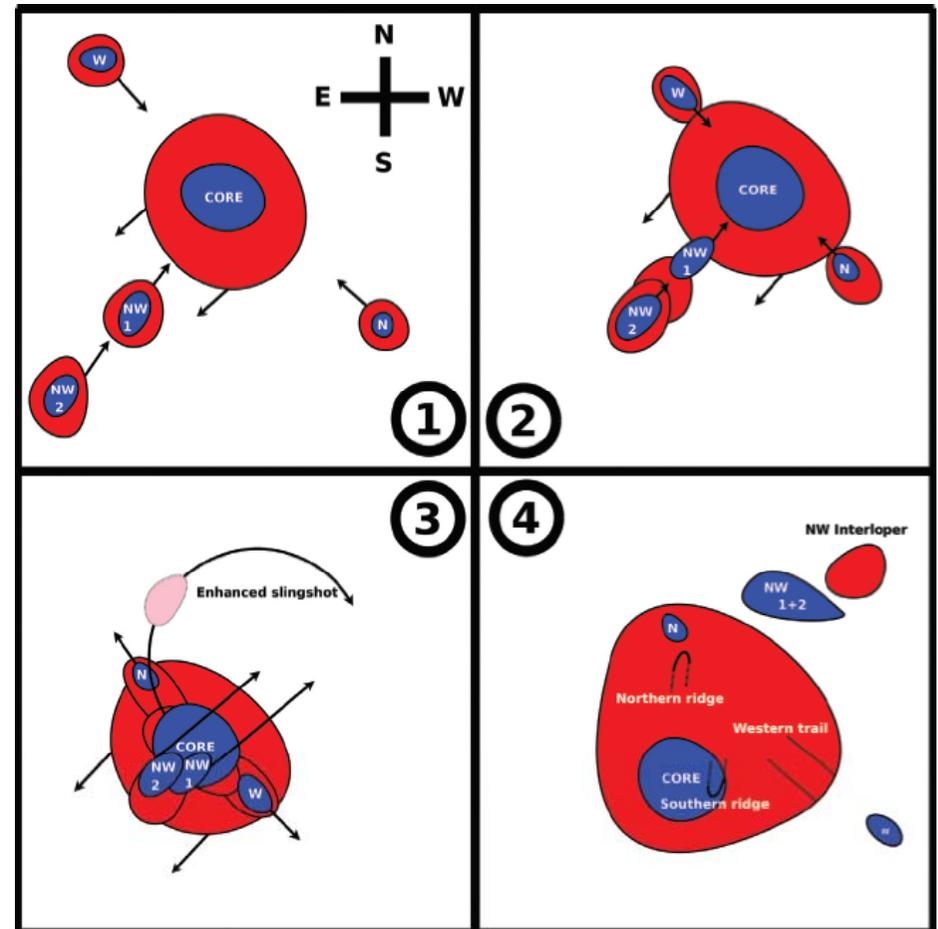
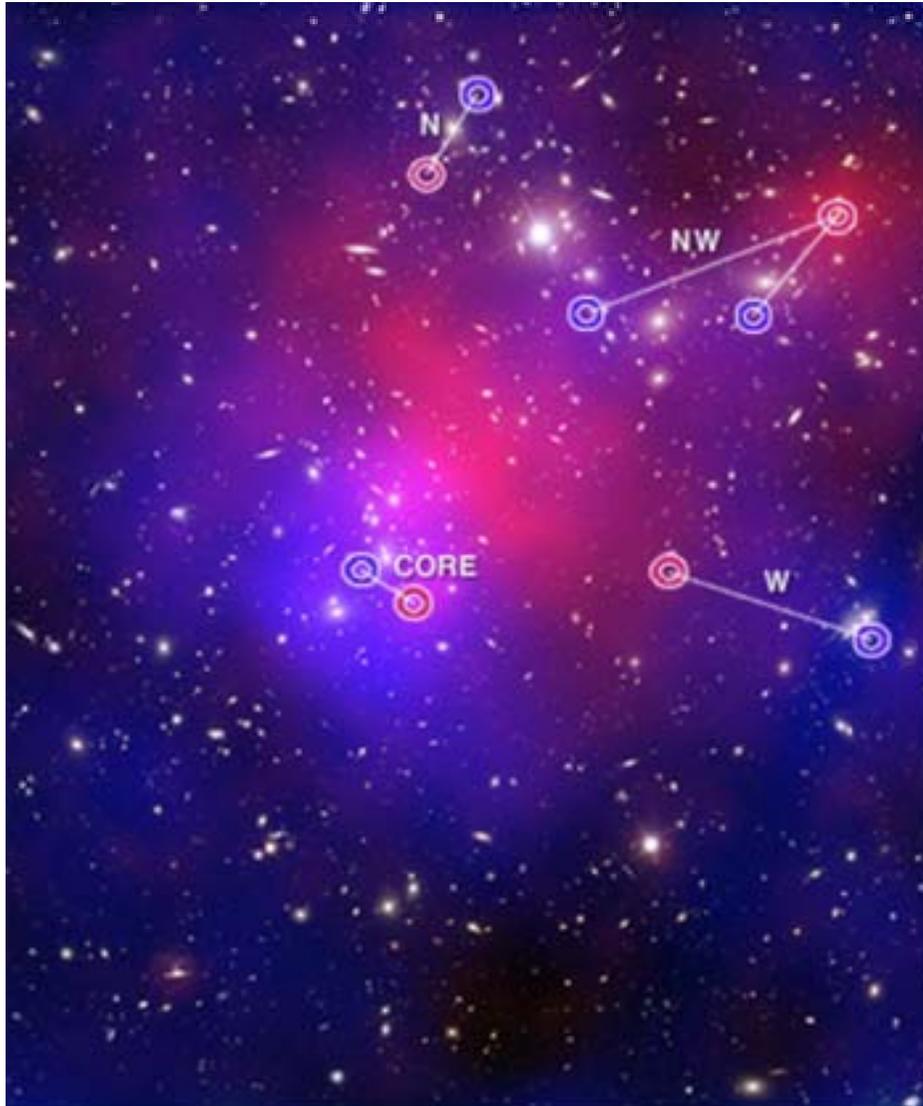
$\sigma/m < 4 \text{ cm}^2/\text{g}$
Bradac et al 2008

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



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

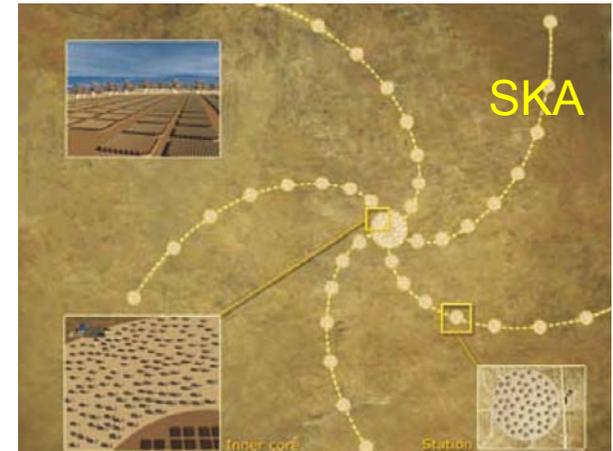


Tout le ciel visité 800 fois avec des poses de 30s

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!

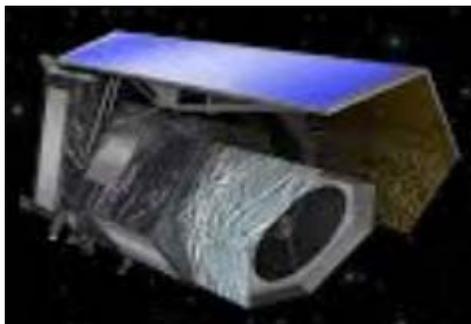


LSST: plus de la moitié du coût est dû aux data processing!
1-2 millions d'alertes par nuit, disponibles à tous en 60sec

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