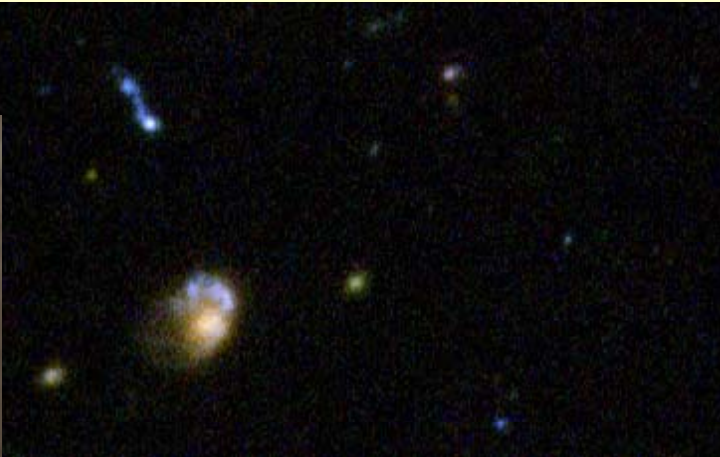
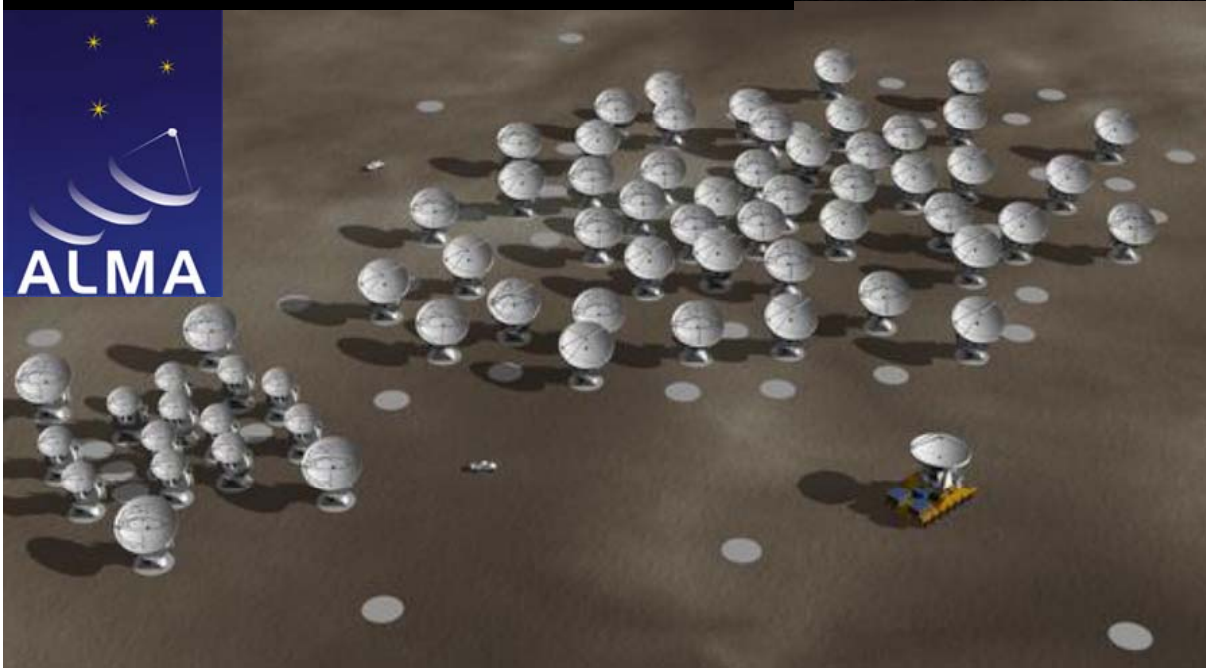


Les galaxies au début de l'Univers



Françoise Combes
Observatoire de Paris
8 Février 2012



Big-Bang

Recombinaison $3 \cdot 10^5$ an

Age Sombre

1^{ères} étoiles, QSO $0.5 \cdot 10^9$ an

Renaissance Cosmique

Fin de l'âge sombre

Fin de la reionisation 10^9 an

Evolution des Galaxies

Système solaire $9 \cdot 10^9$ an

Aujourd'hui $13.7 \cdot 10^9$ an

Pourquoi les premières galaxies?

Comment se forment-elles?

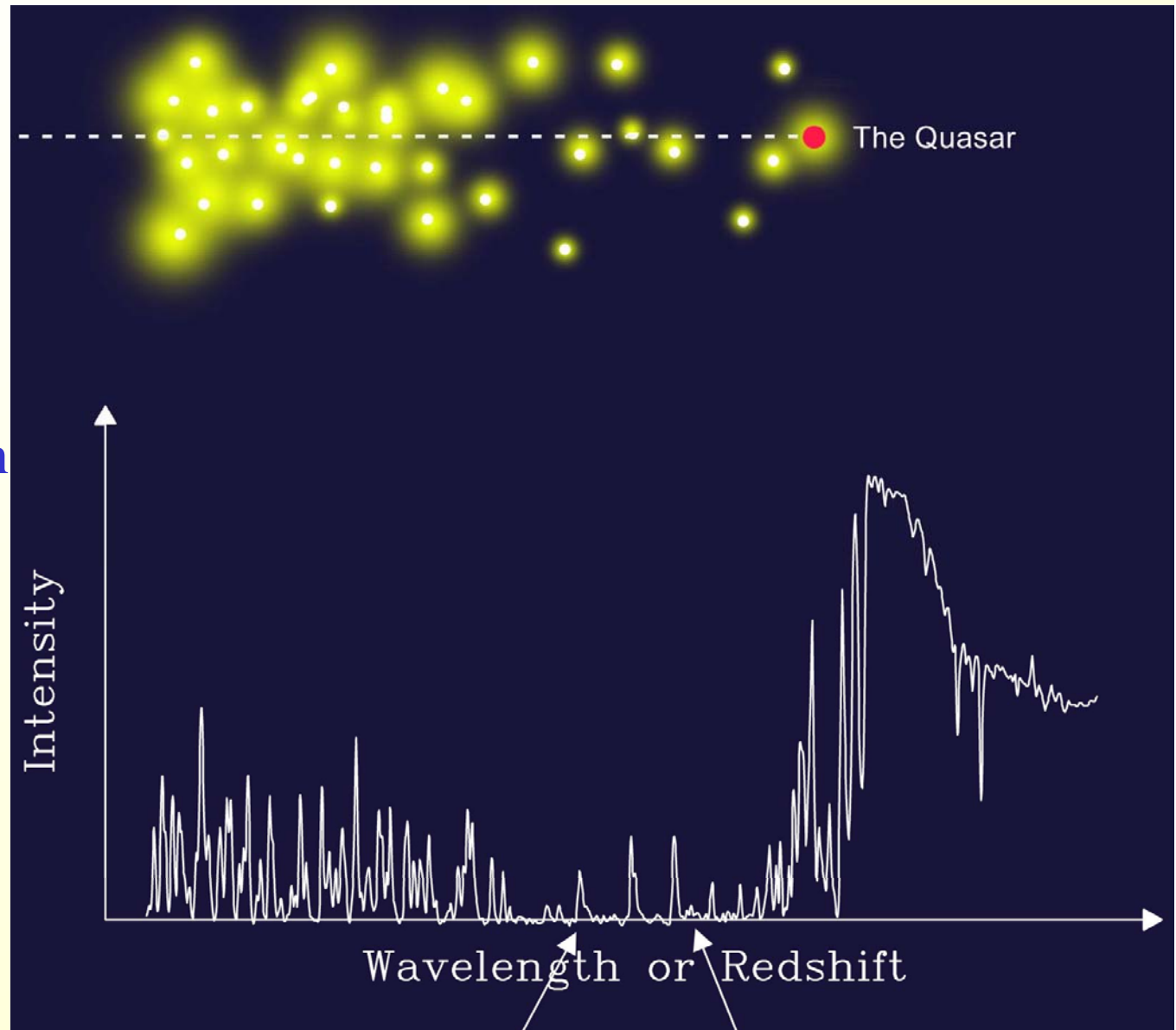
Réionisation de l'Univers

Faible métallicité,

→ Étoiles différentes?

Mesure de l'âge sombre de l'univers

Ligne de visée
devant un quasar



Spectre en absorption

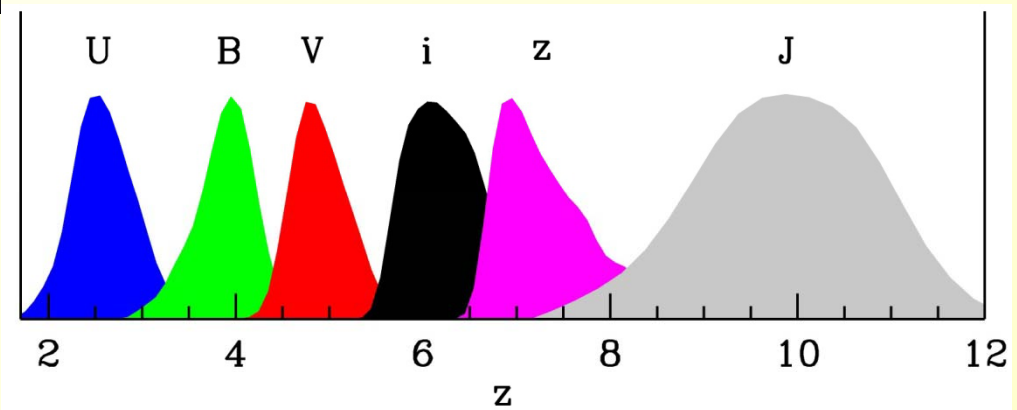
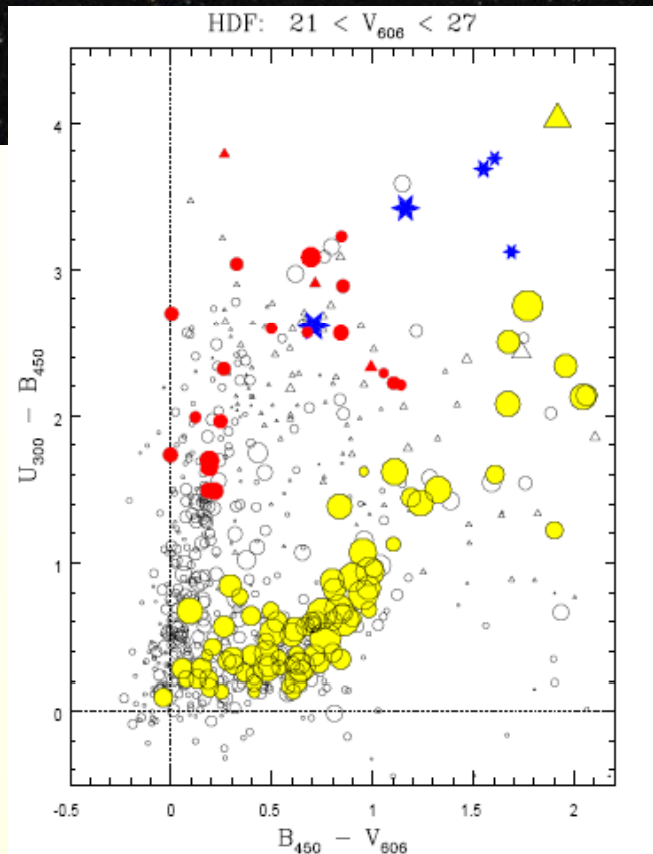
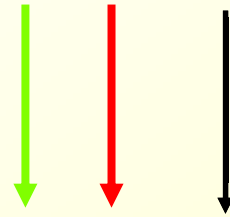
Forêt Lyman-alpha

ou absorption
continue totale

Techniques de Detection des galaxies

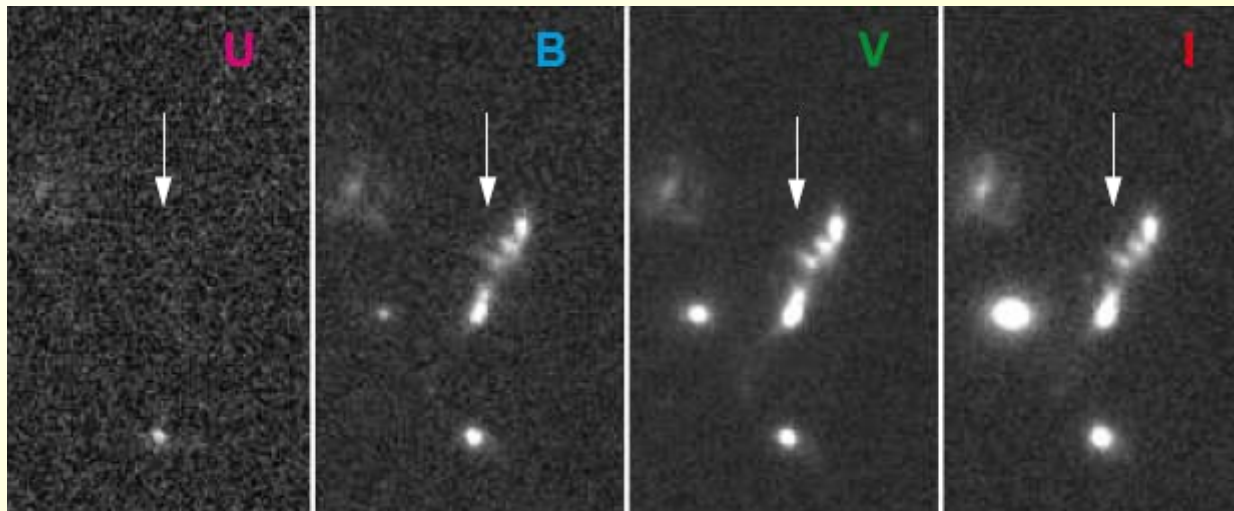
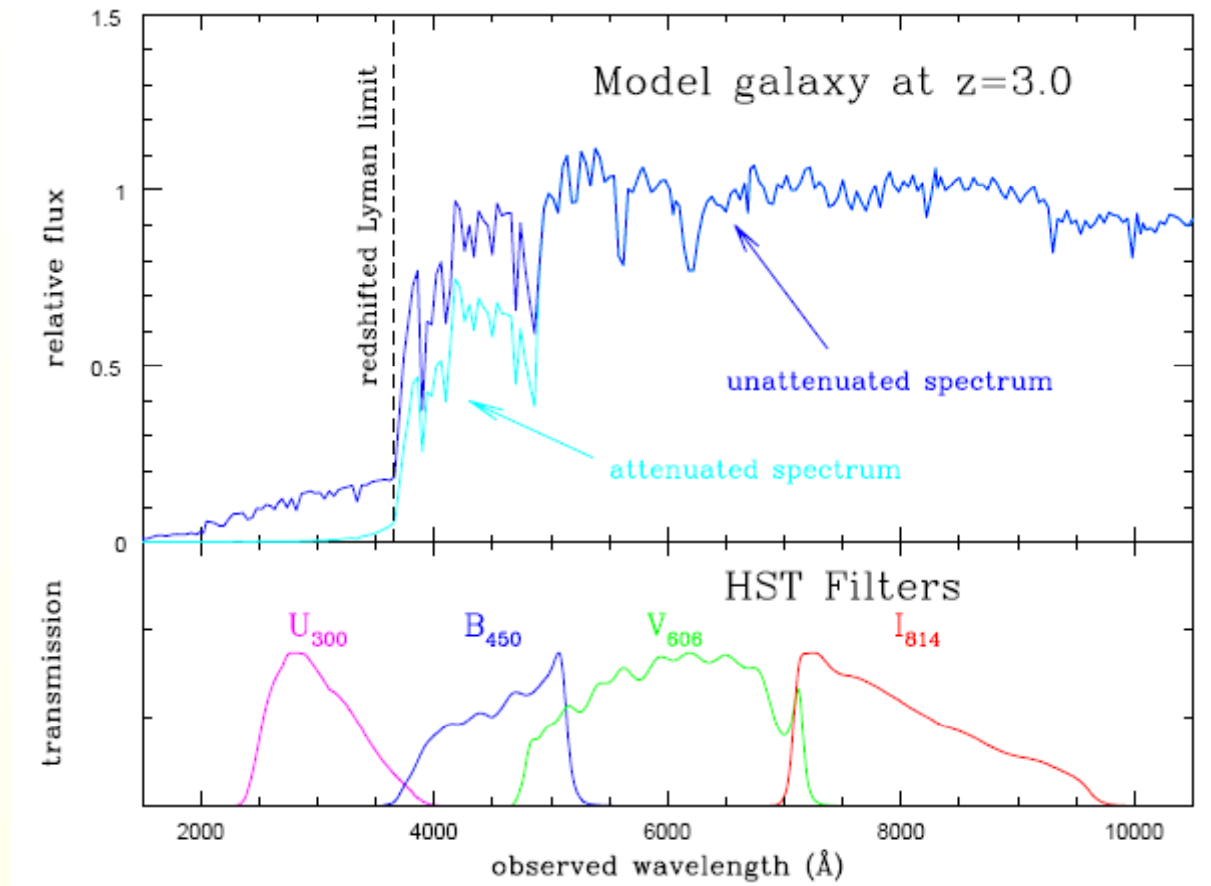
Galaxies à $z \sim 4, 5, \& 6$

(*B, V, i-dropouts*)

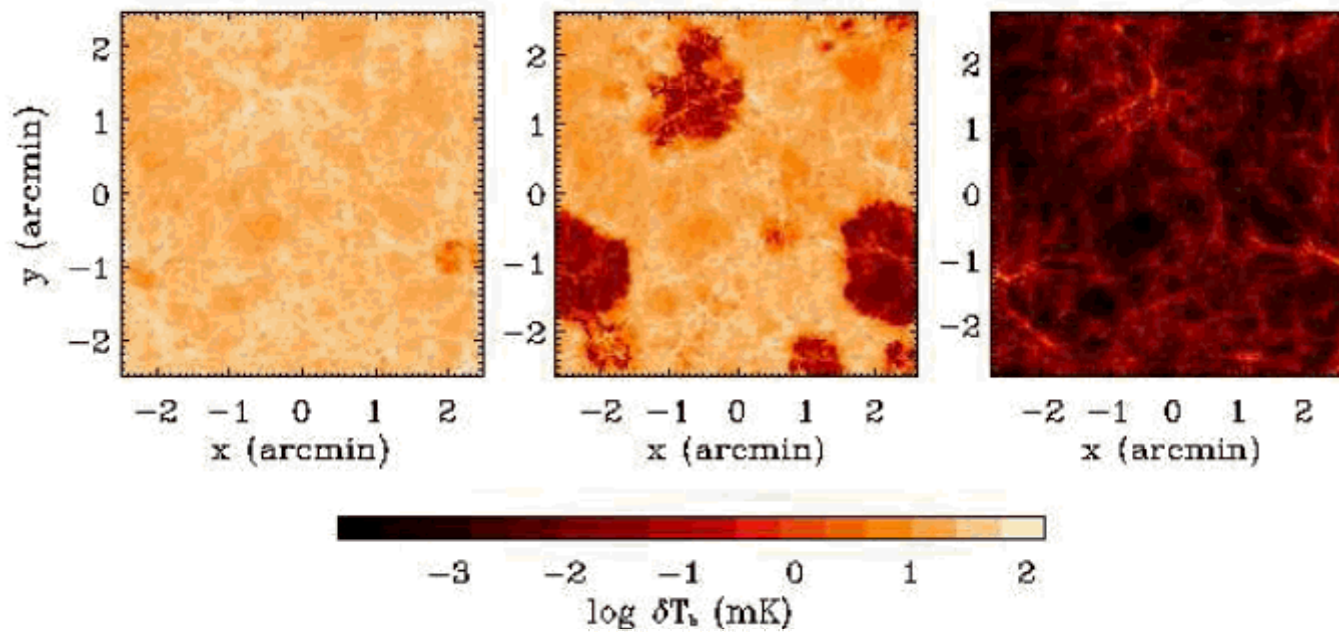
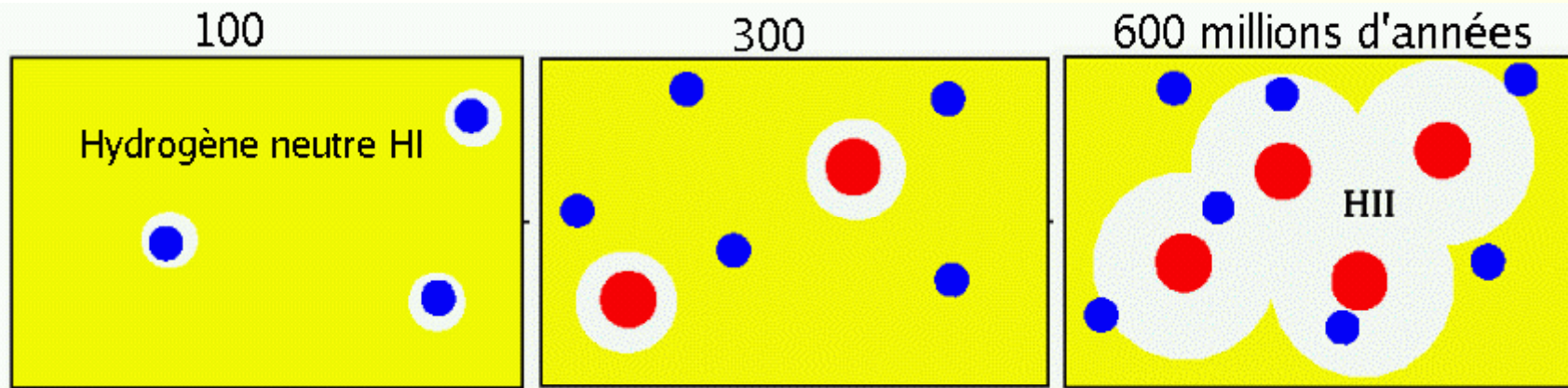


“Dropout “ Fonctions de selection par redshift

Technique de selection par couleur $z=3$

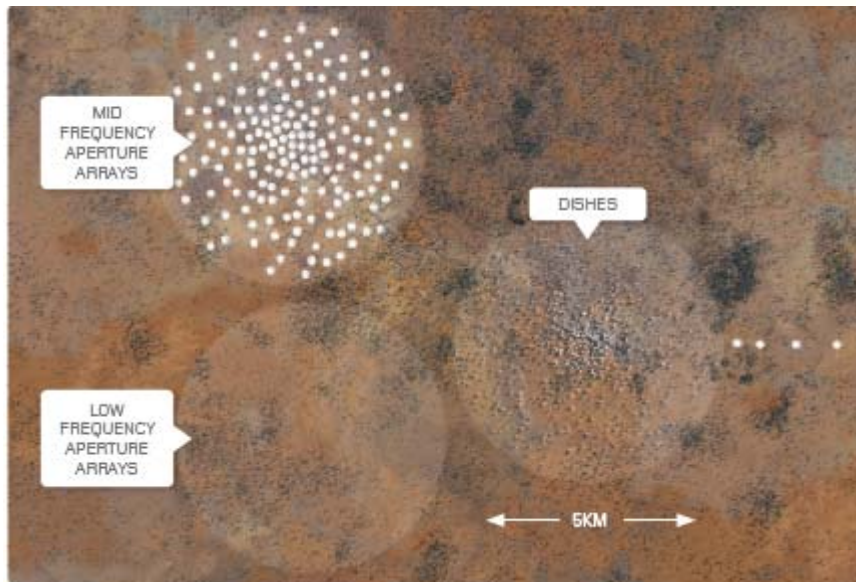


Réionisation



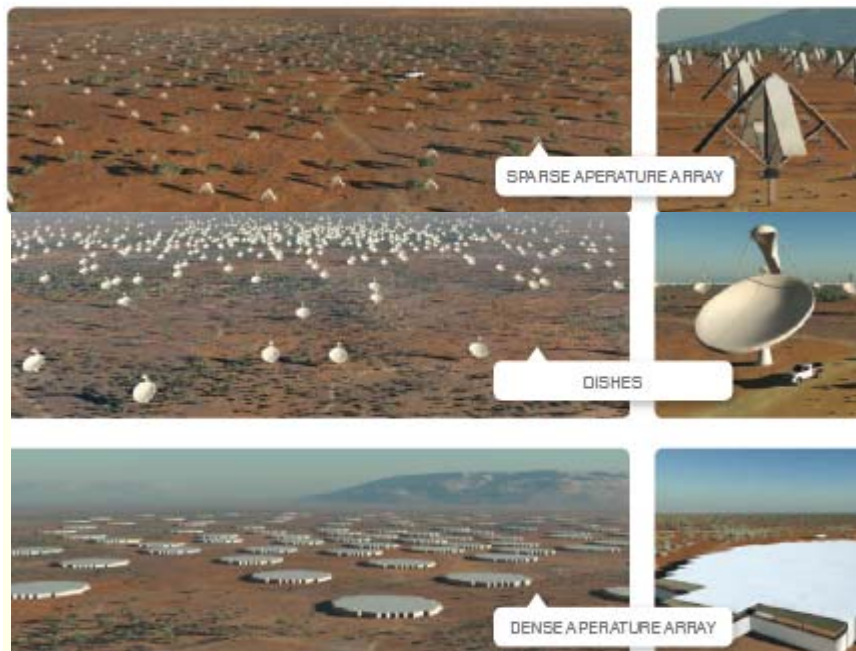
Percolation progressive des zones ionisées

Réionisation: vue de SKA



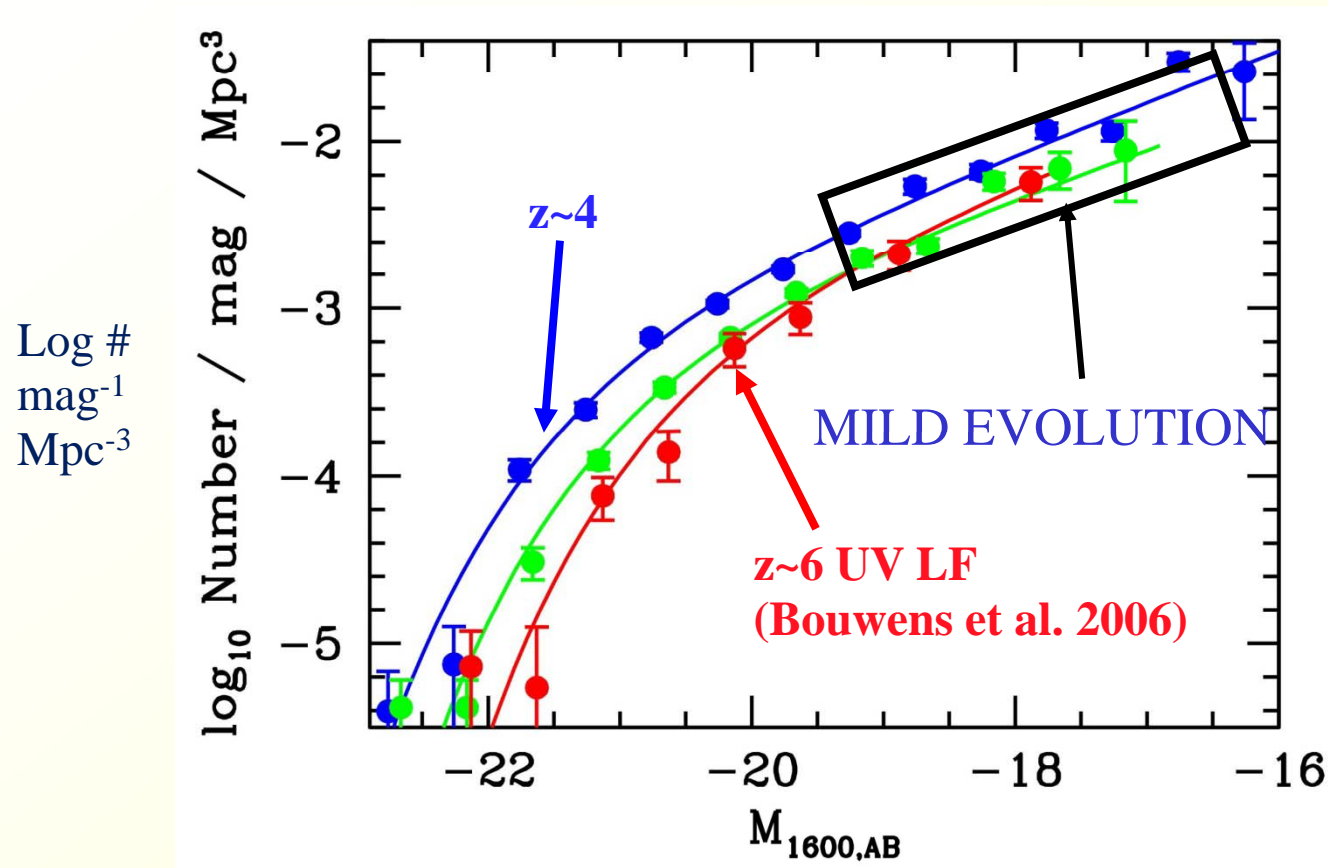
Surface: un million de m^2
3000km de ligne de base

Projet mondial ondes m/cm
→ verra le HI-21cm redshifté
durant la réionisation



Galaxies à $z \sim 4, 5, 6$ (*B, V, i-dropouts*)

Fonctions de Luminosité UV



Rest frame UV 1600 Å

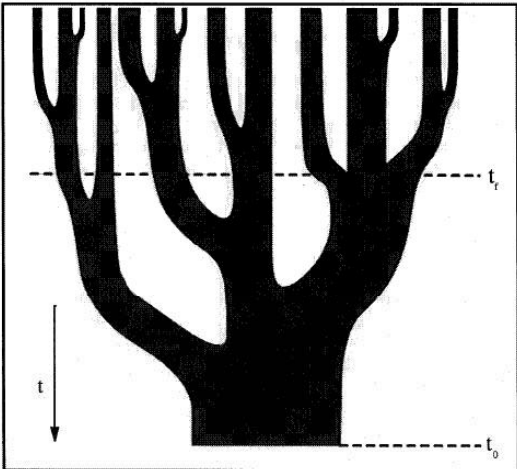
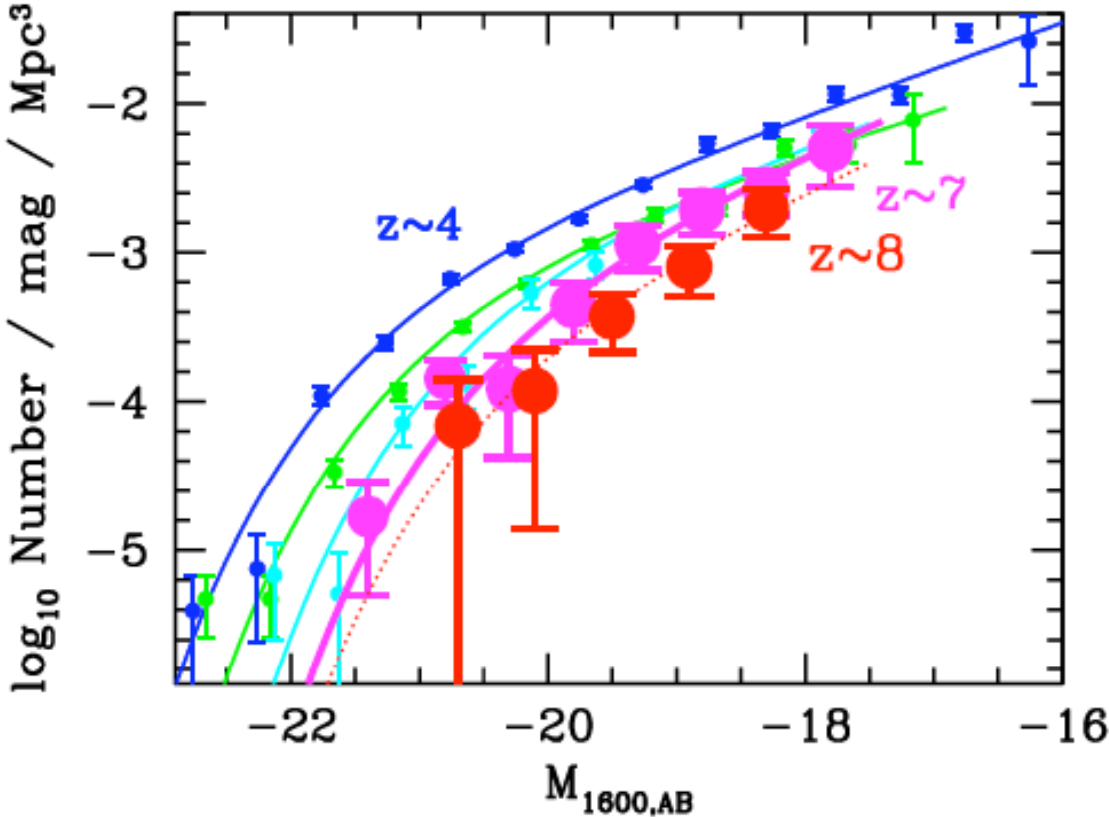
Bouwens, Illingworth, Franx, and Ford 2007

Large range in M_{1600} :
-16 to -22.5!

Same faint-end slope α
 ~ -1.75

Fonction de Luminosité à $z=7,8$

Log #
mag⁻¹
Mpc⁻³



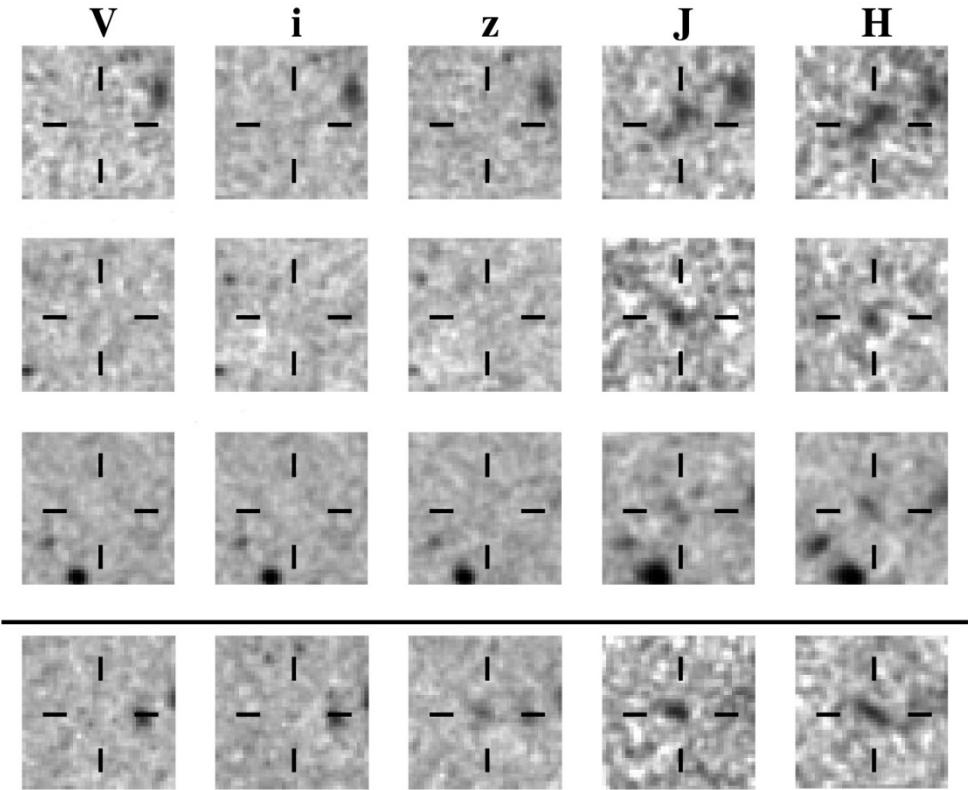
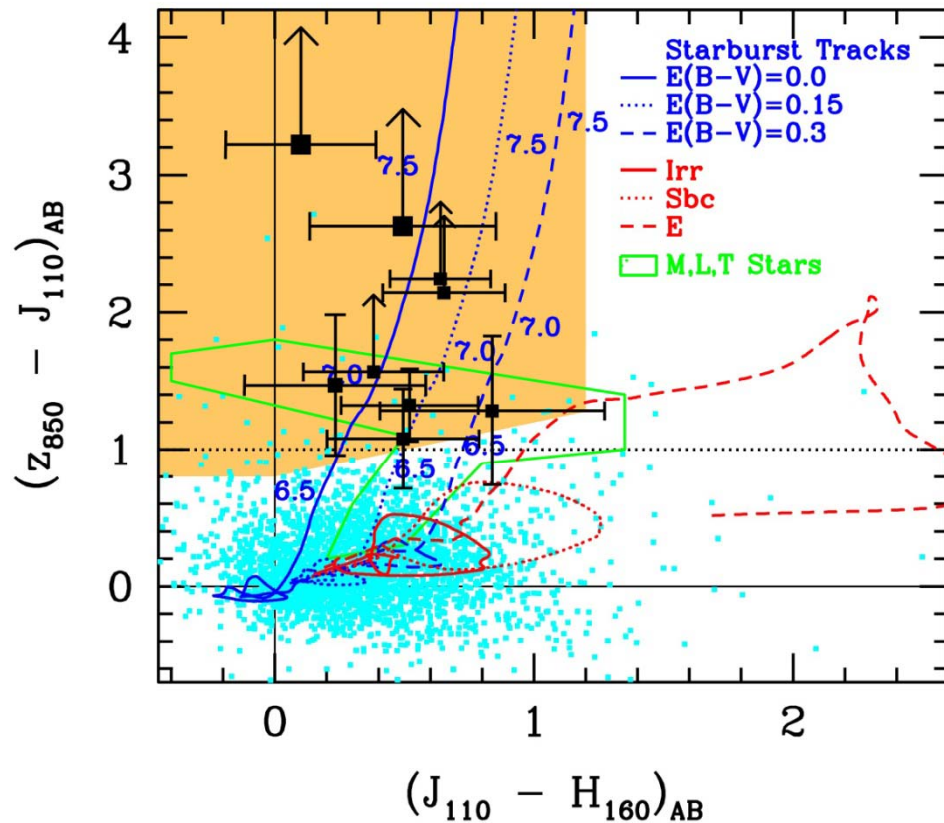
Brillant

Faible

Galaxies à $z=7, 8$

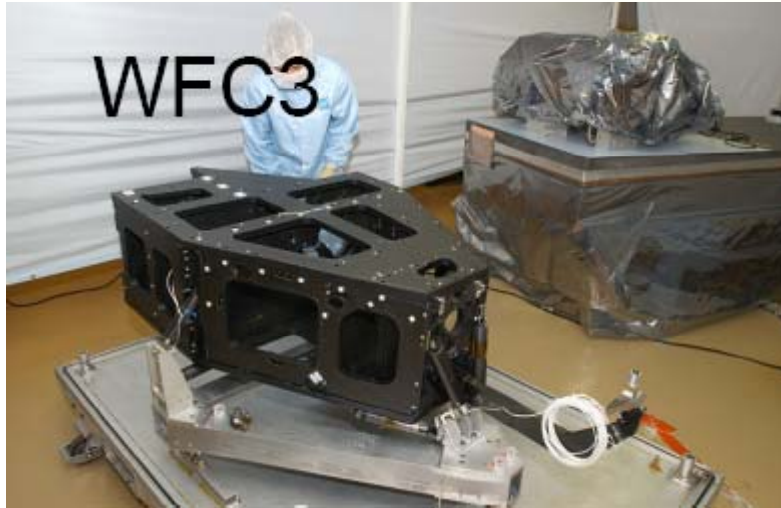
Sélection par couleurs

Et disparition du flux dans le bleu, par absorption du milieu intergalactique



Telescope Spatial Hubble

Moyens d'observations performants



Hubble telescope
WFC3 wider field
More sensitivity in IR
More resolution in IR

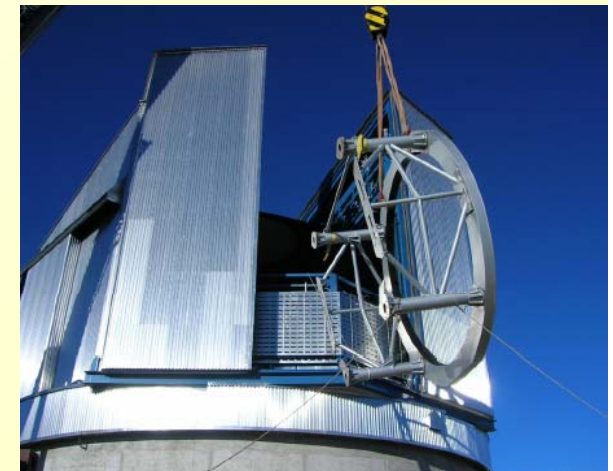
HAWK-I on VLT



Wide FOV 8x8'
Sensitivity 27 mag

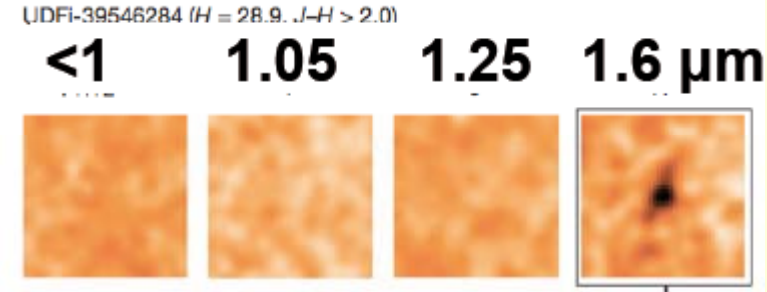


Ultra-wide field
VISTA



Quelle est la première galaxie?

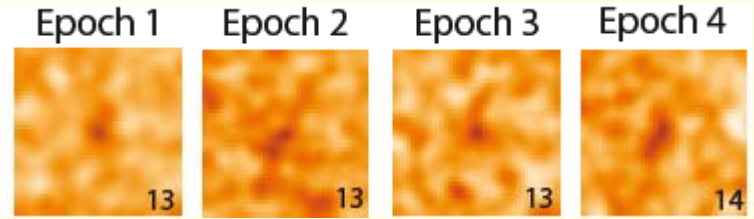
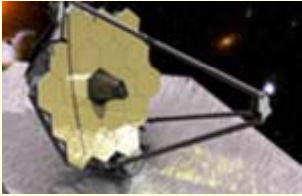
Z=10 candidate



Drops below $\lambda=1.4$ microns

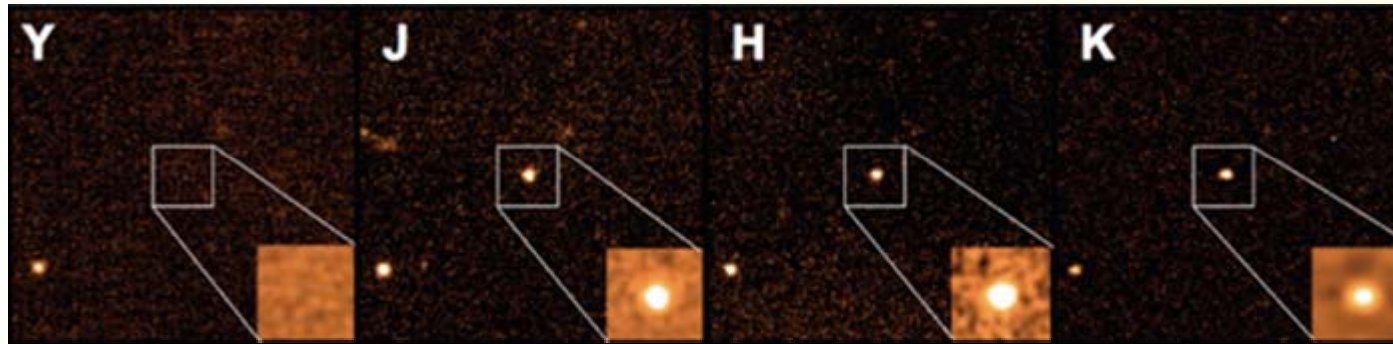
Very difficult observations, at the limit of telescopes

→ JWST
6.5m, 2018



Detected in each sub-grouping of the observations

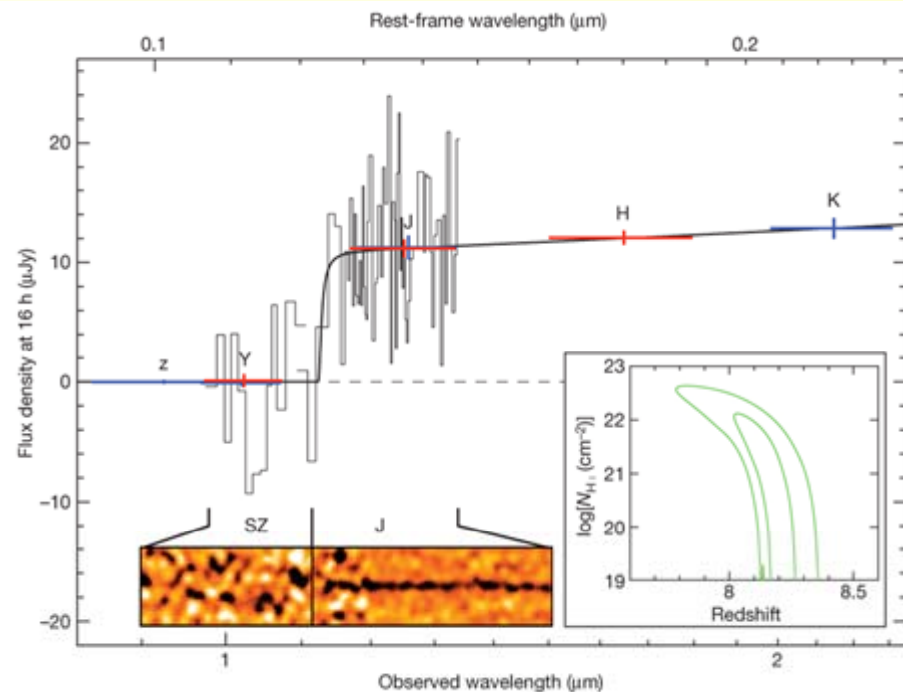
Les sursauts Gamma (GRB)



Objets les plus lumineux
Pendant 1-10 secondes

(dilatation du temps de $(1+z)$)

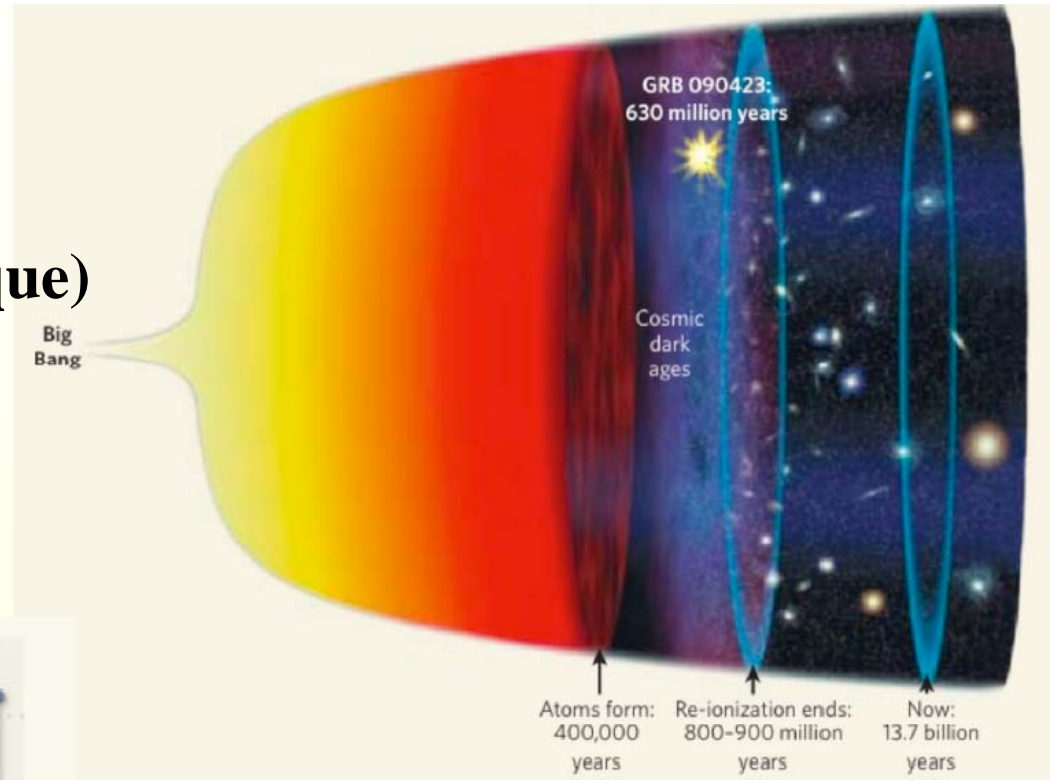
Effondrement d'une super-étoile
Ou bien fusion de deux objets
compacts (étoiles à neutrons)



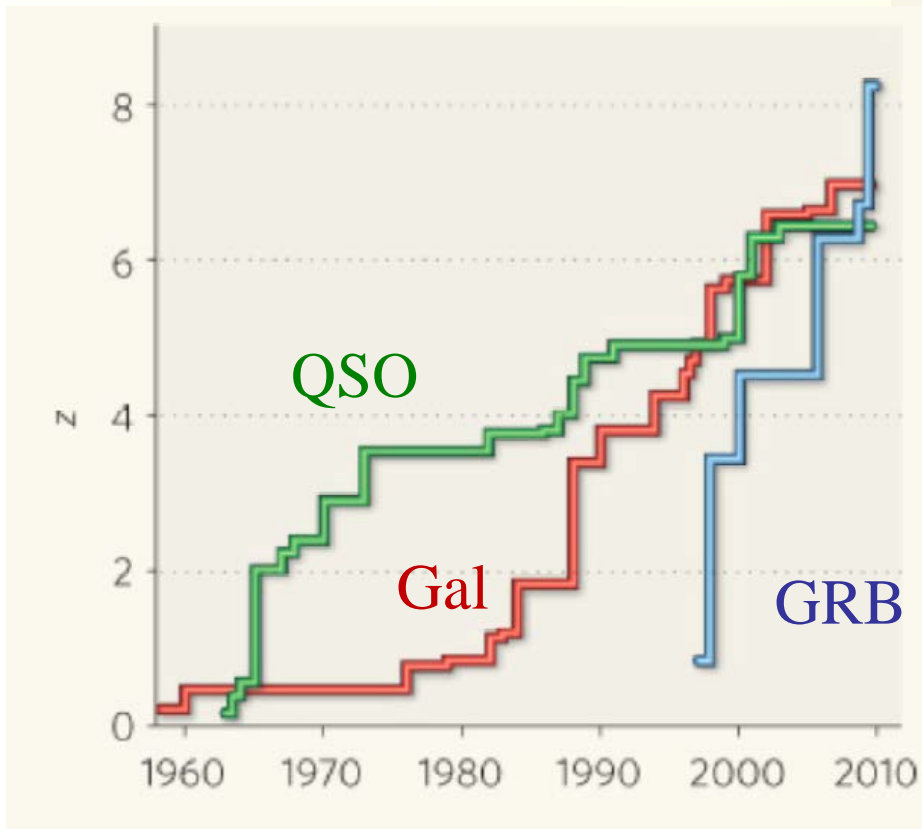
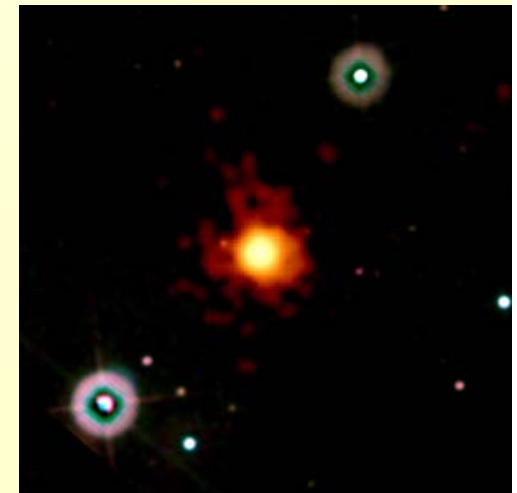
GRB

L'objet le plus lointain
un GRB à $z=9.4$ (z photométrique)

~500 Ma après le Big-Bang, ou
100 Ma après la recombinaison

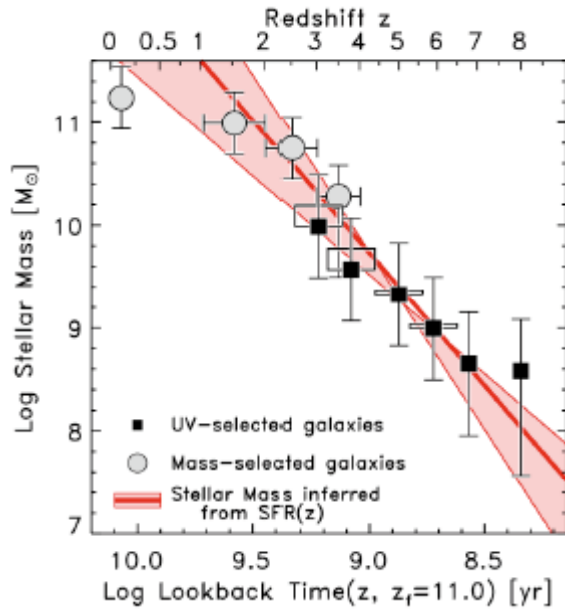


X-ray, optical, $z=8.2$
190 Myrs after recomb



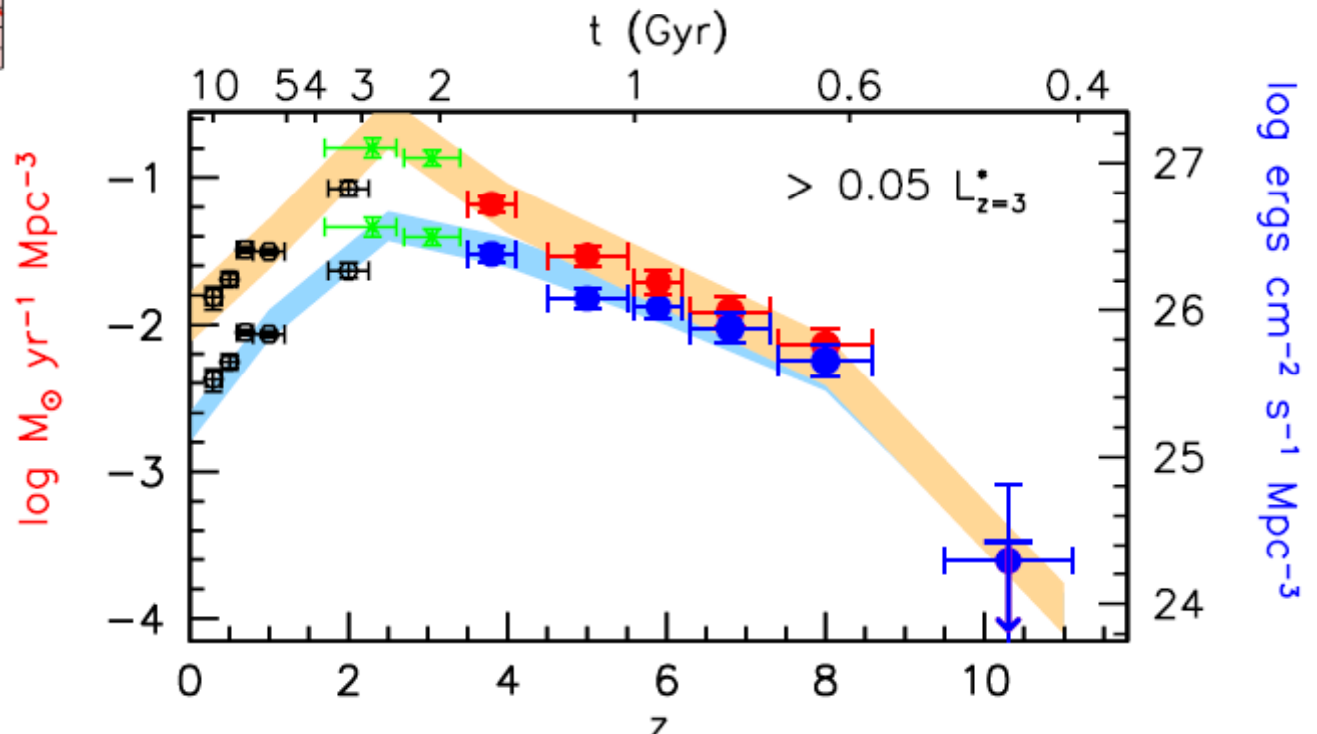
Histoire de la formation d'étoiles de l'Univers

Masse d'étoiles (t)



Quand se sont formées l'essentiel des étoiles dans la Voie Lactée et les galaxies proches?

Taux de formation:
 → Bleu: optique
 → Rouge IR, FIR obscurci par la poussière



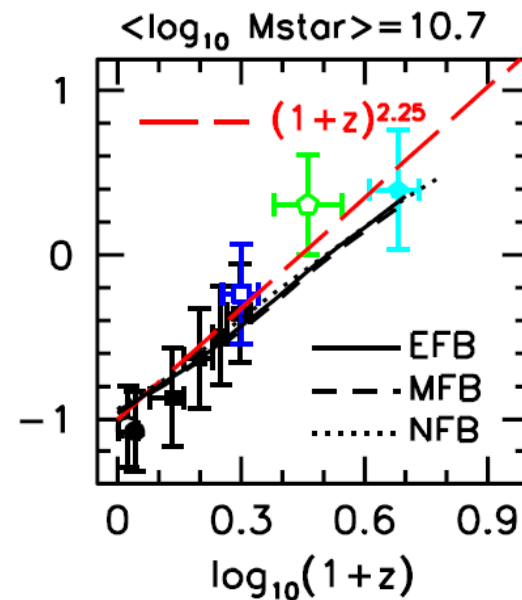
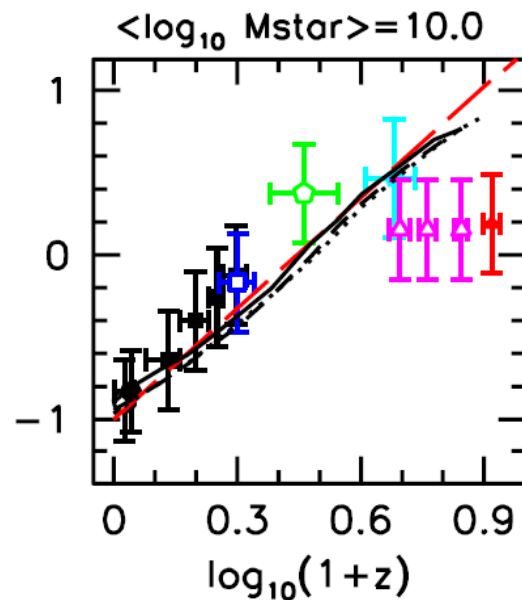
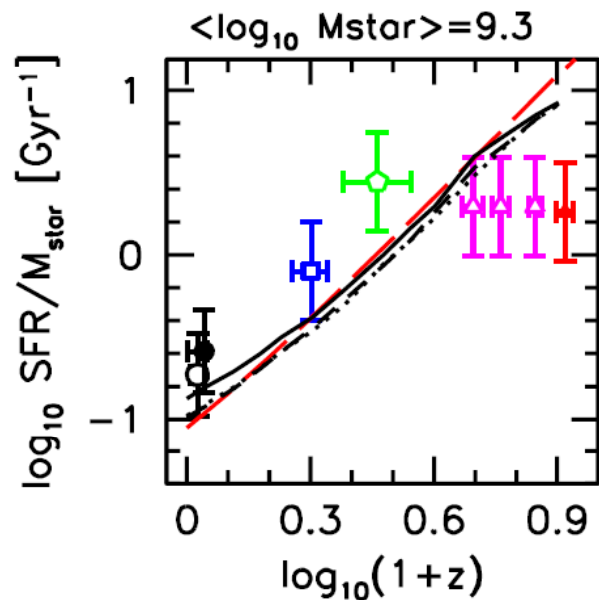
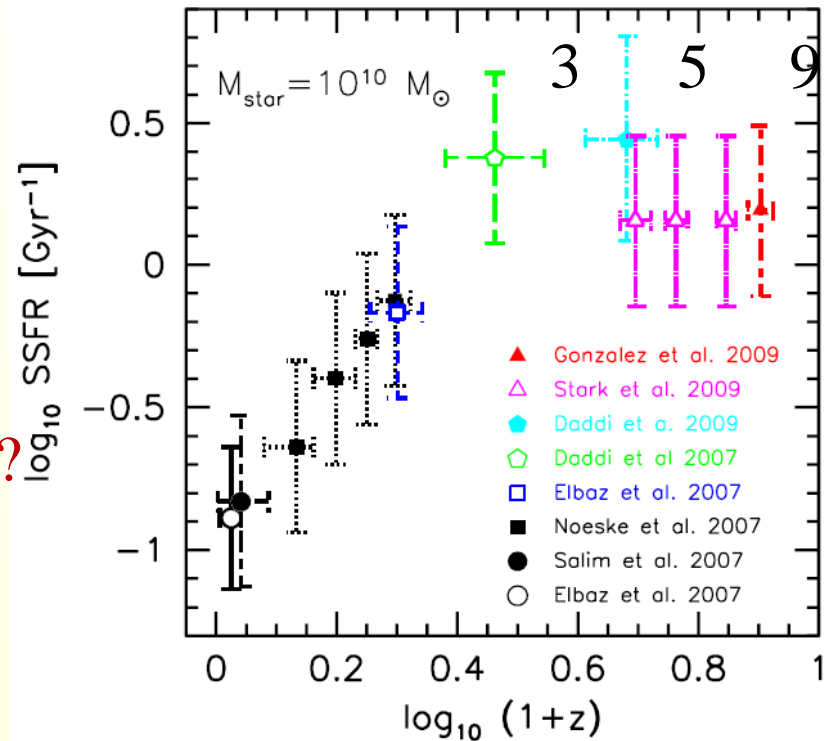
Taux SF spécifique

SFR/Masse

Accretion pour M donné en $(1+z)^{2.25}$

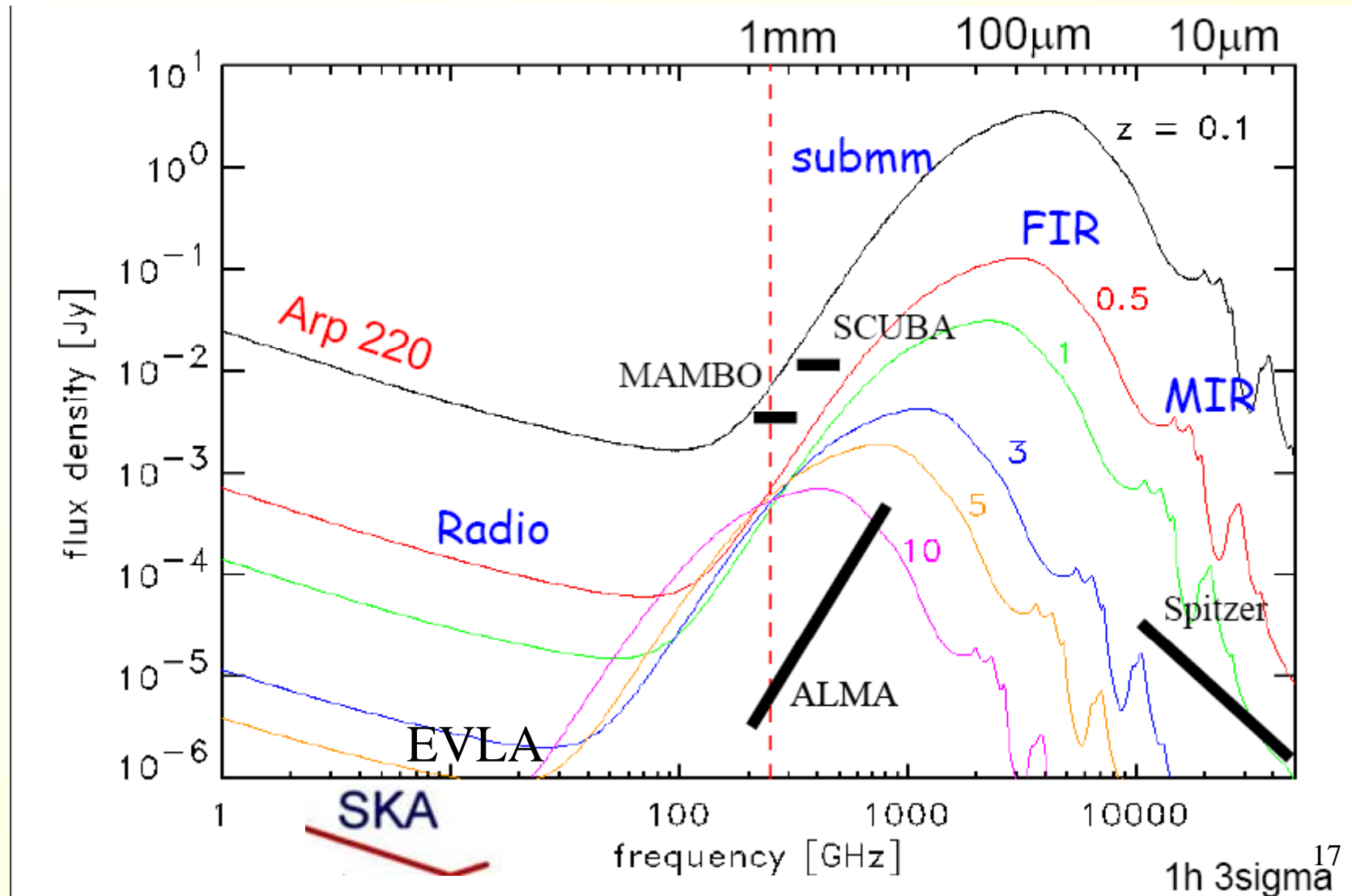
Pourquoi un plateau à gd z: métallicité?

Ou bien fusions de galaxies
dominantes à grand z?



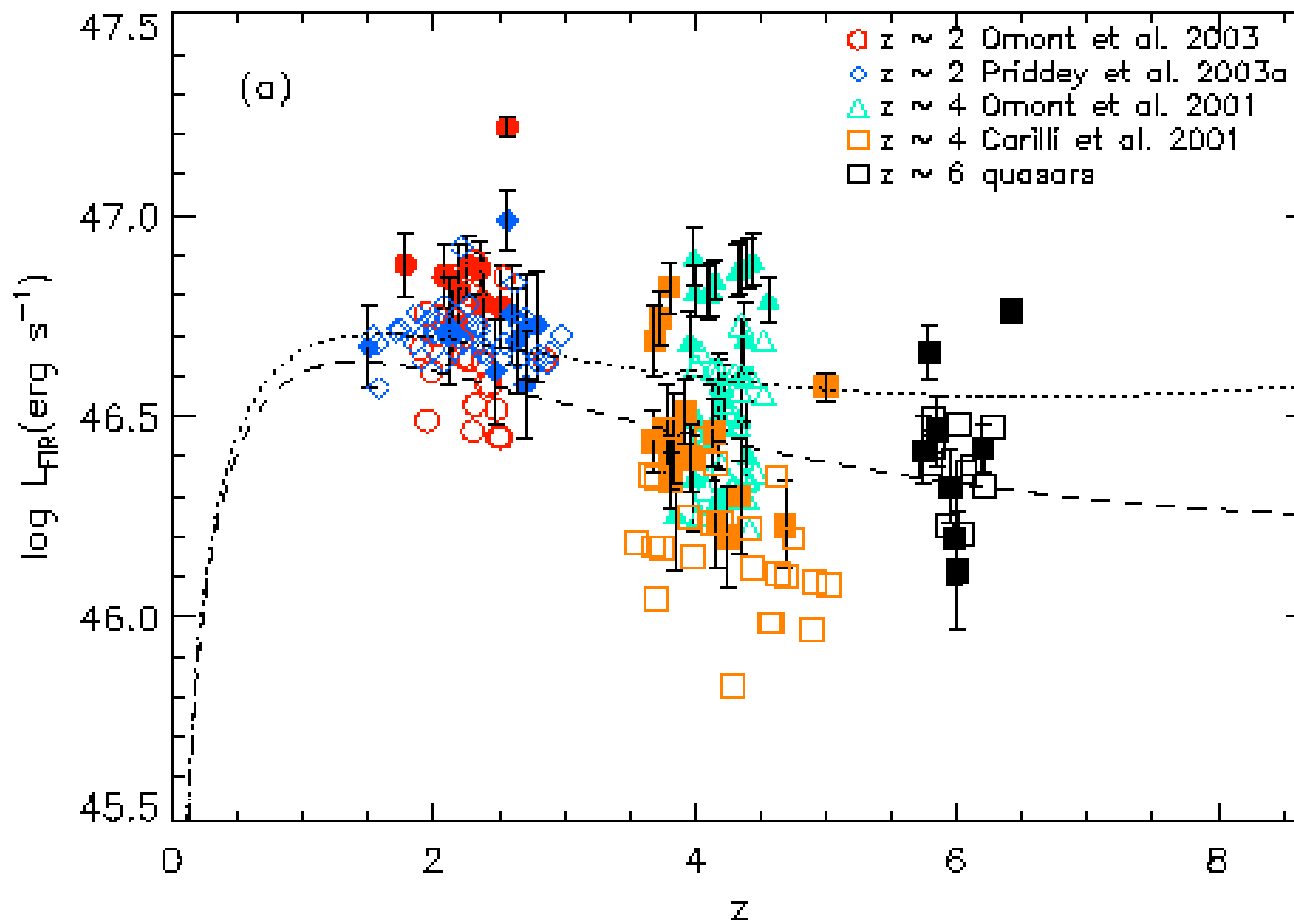
Privilège du domaine mm/submm

Negative K-correction: example of Arp 220



Detections en continuum

30% Quasars @ $z=6$ détectés en continuum \rightarrow HLIRG $> 10^{13}L_{\odot}$
M_{dust} $\sim 10^8 M_{\odot}$, surprise, la poussière se forme très tôt dans
L'Univers



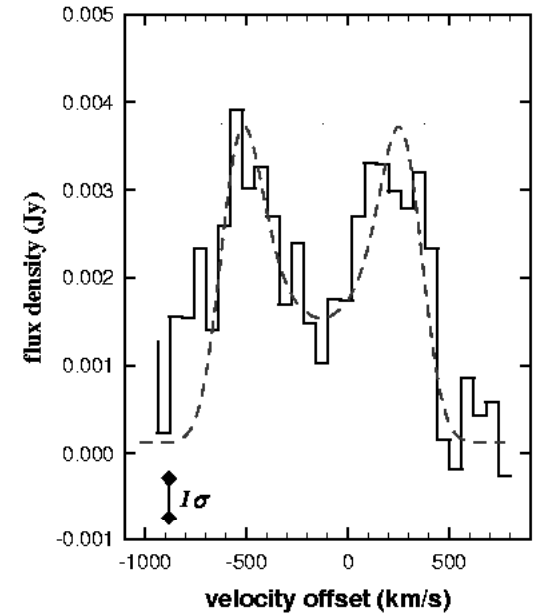
Observations des raies CO

CO emission: ~70 sources at high z (2011)

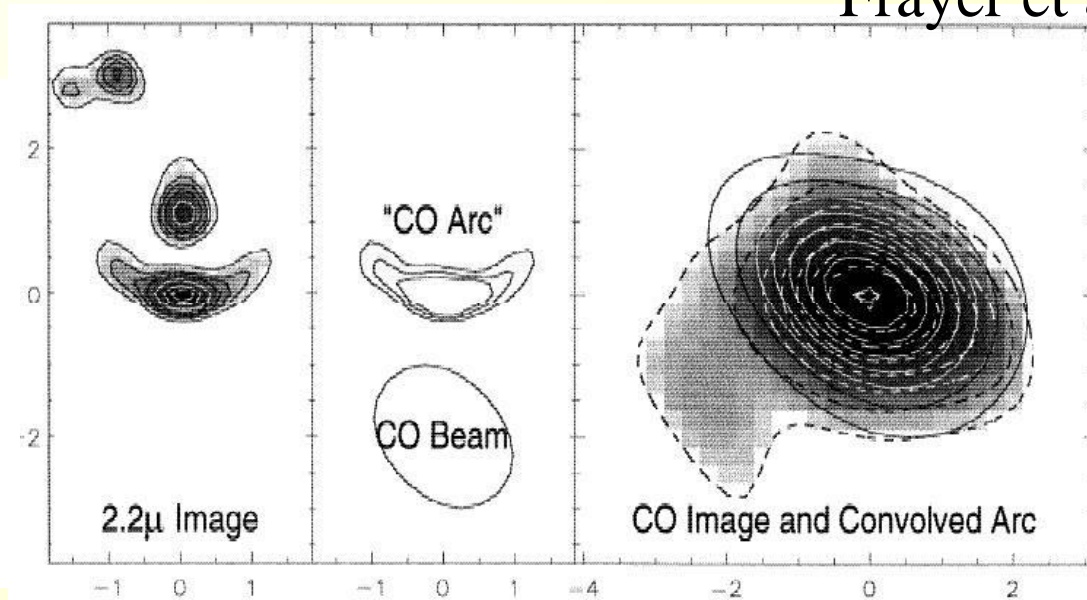
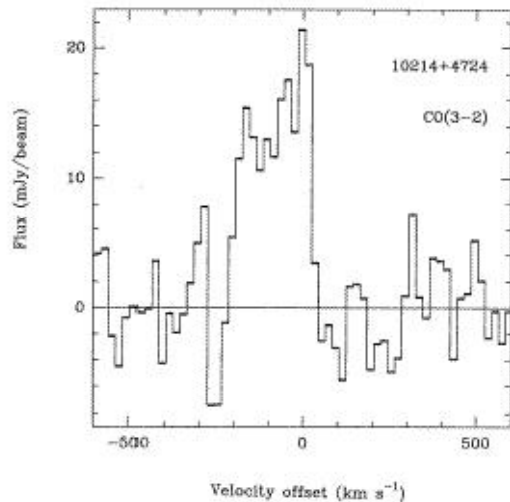
Advantages: kinematics and mass

1st historical detection: Faint IRAS source

F10214+4724 à $z=2.3$ (Brown & van den Bout 92,
Solomon et al 92)



SMM J2399-0136
Frayer et al 98



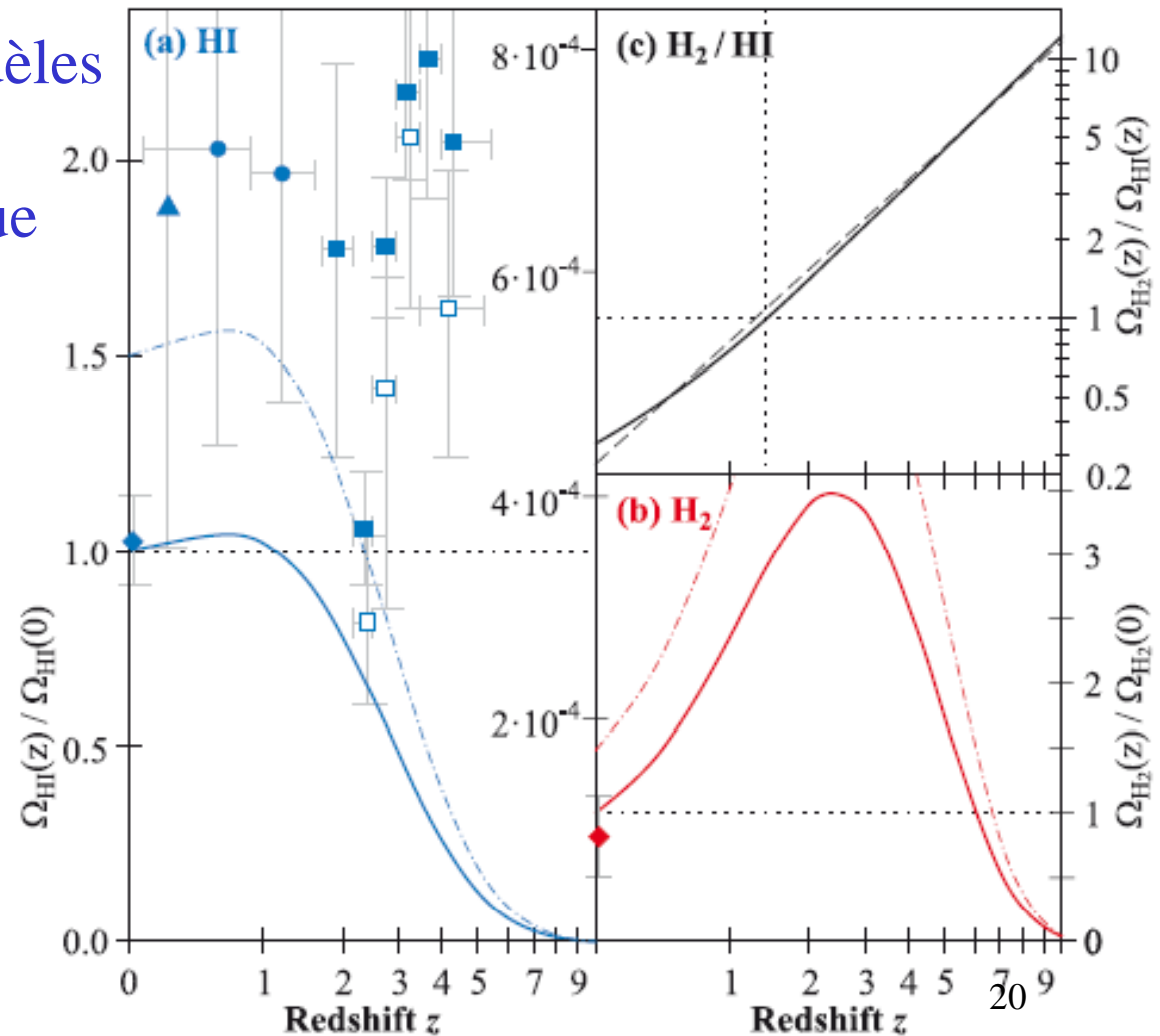
Evolution cosmique du rapport H2/HI

L'évolution du gaz atomique HI est connue par les absorbants devant les QSO

Pour H2, provient de modèles

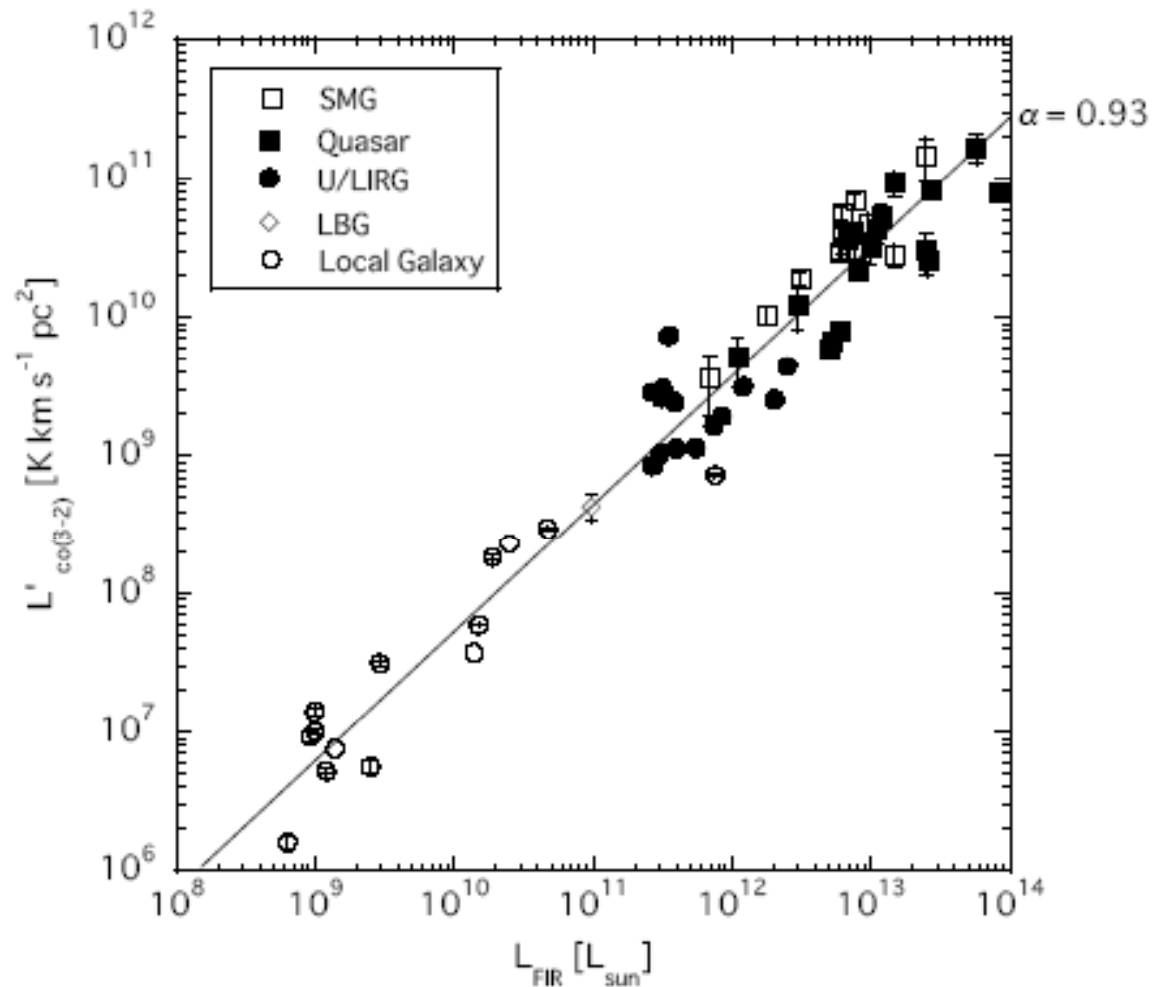
Simulations d'un catalogue
du Millenium + SAM

$$H2/HI \sim (1+z)^{1.6}$$



Propriétés des galaxies à grand z

Iono et al 2009 **Bonne corrélation LFIR/LCO (même pour les QSO)**

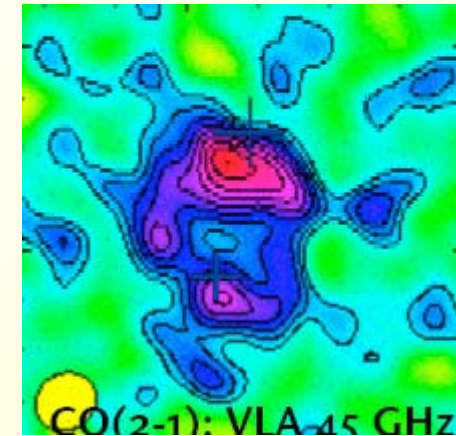


Molécules CO galaxies $z > 4$

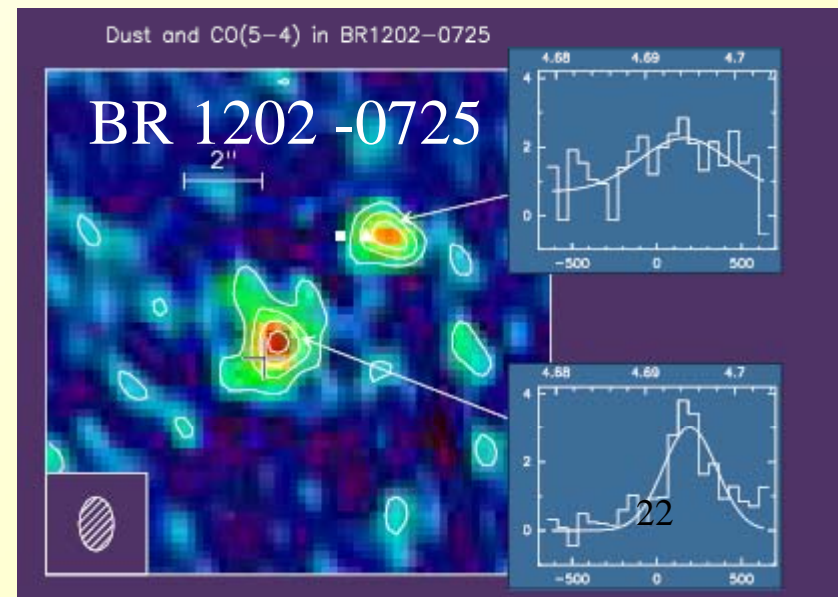
Pratiquement toutes amplifiées !

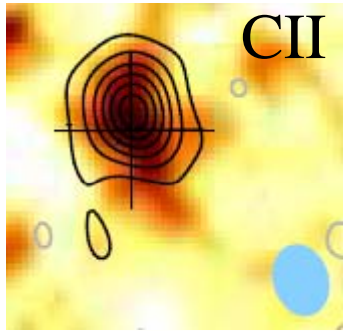
		z
PSS J2322 +1944	QSO	4.12
BRI 1335 -0417	QSO	4.41
BRI 0952 -0115	QSO	4.43
BR 1202 -0725	QSO	4.69
TN J0924 -2201	QSO	5.19
SDSSJ1148+5251	QSO	6.419

+ 6 $z=6$ QSO (Wang et al 2010)



PSS J2322 +1944

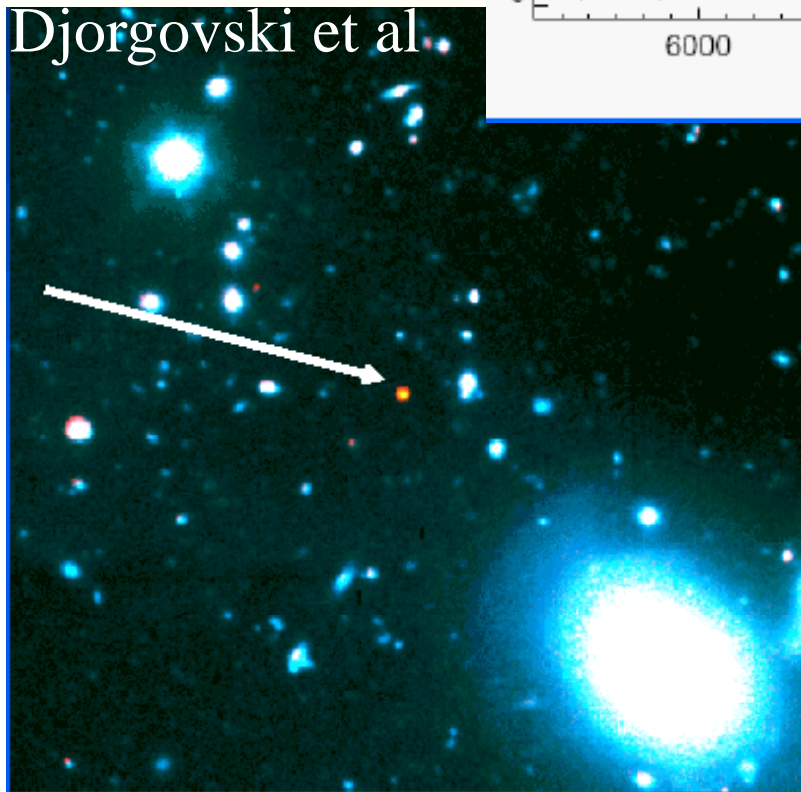




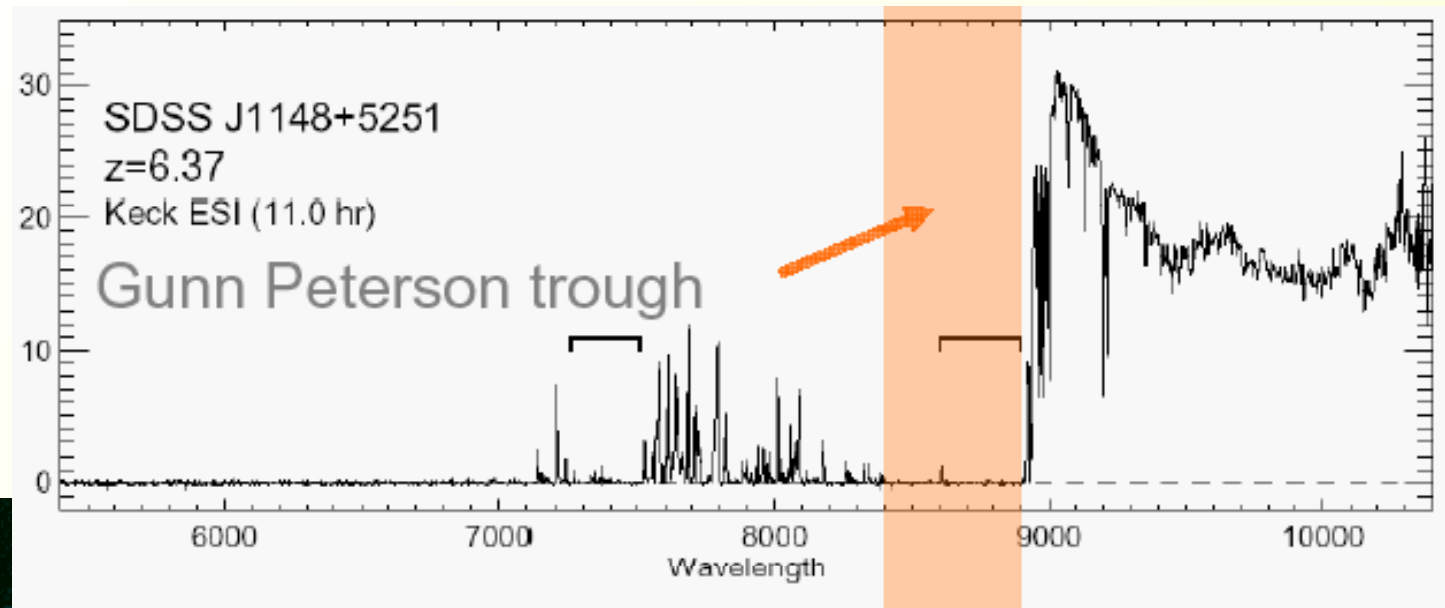
Beam 0.3" PdB

Age ~ 1 Gyr
Keck z-band

Djorgovski et al



Le QSO le plus distant à $z=6.4$



Fan et al 2003, White et al 2003

$M_{\text{dust}} \sim 10^8 M_{\odot}$ (Bertoldi et al 2003)

$M_{\text{BH}} = 1.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$ (Willoot et al 2003)

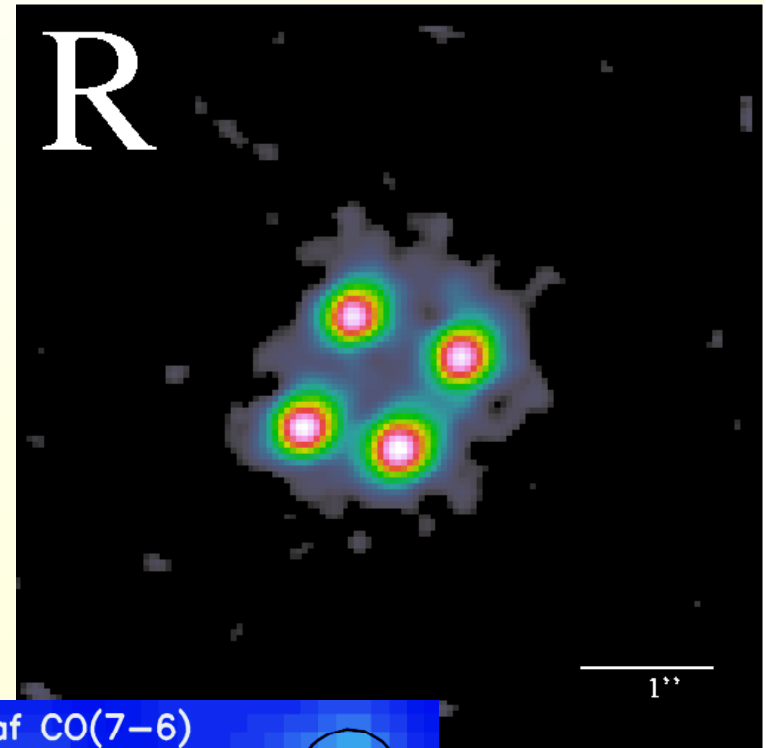
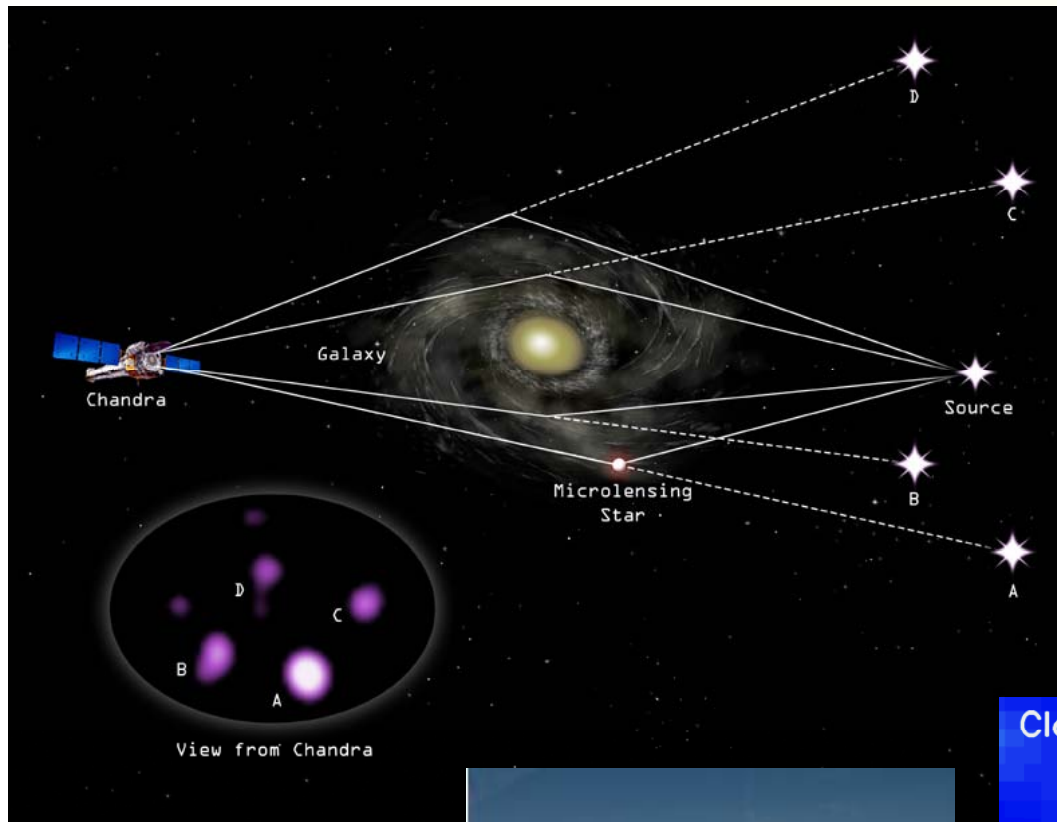
No HCN detected

CII, Walter et al 2009

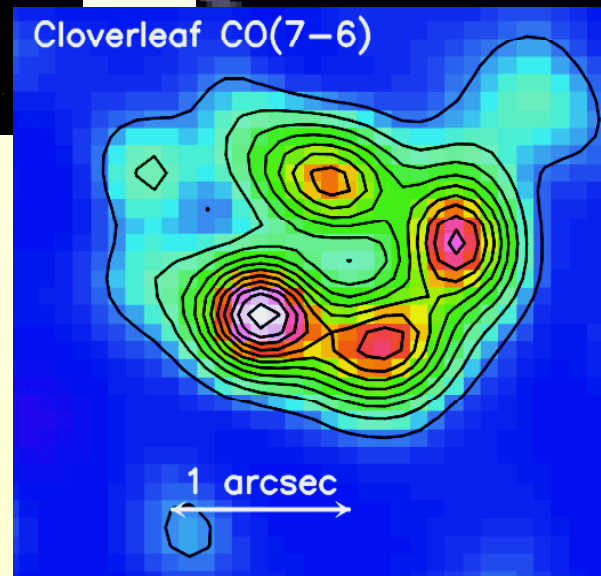
1kpc scale starburst, $1000 M_{\odot}/\text{yr}/\text{kpc}^2$

➔ Mortlock et al (2011) $z=7.1$

Le quasar trèfle à quatre feuilles



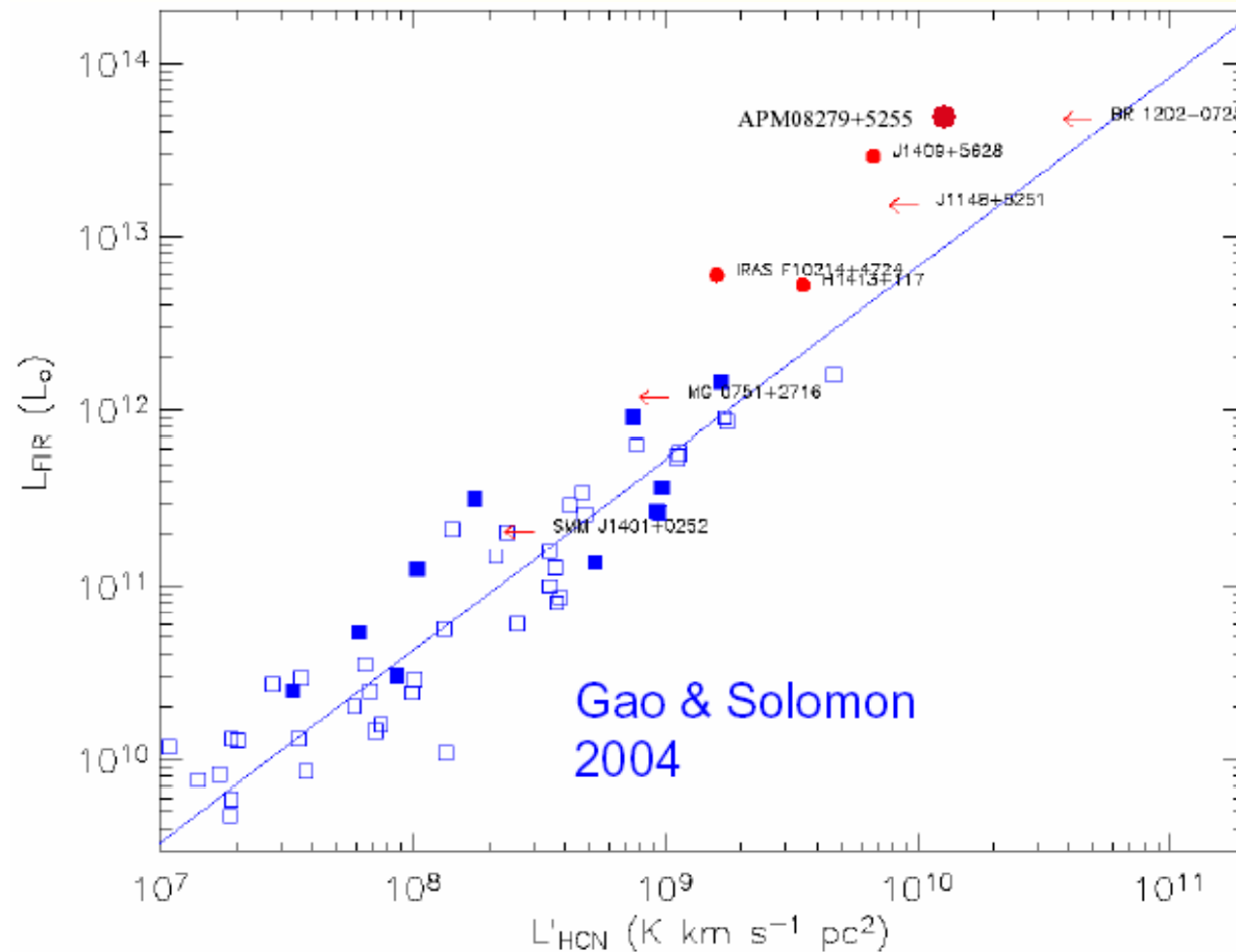
IRAM
Plateau de
Bure
Interferometer



Gaz de très haute densité

HCN trace le gaz dense

Mieux corrélé à la formation d'étoiles que le CO



Haute densité à grand z

HCN détecté à grand z , trace $n_{\text{H}_2} \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$

Cloverleaf $z=2.56$: dominé par un starburst

CO, HCN, HCO⁺ trace le gaz dense et chaud formant des étoiles

Le quasar n'est pas visible

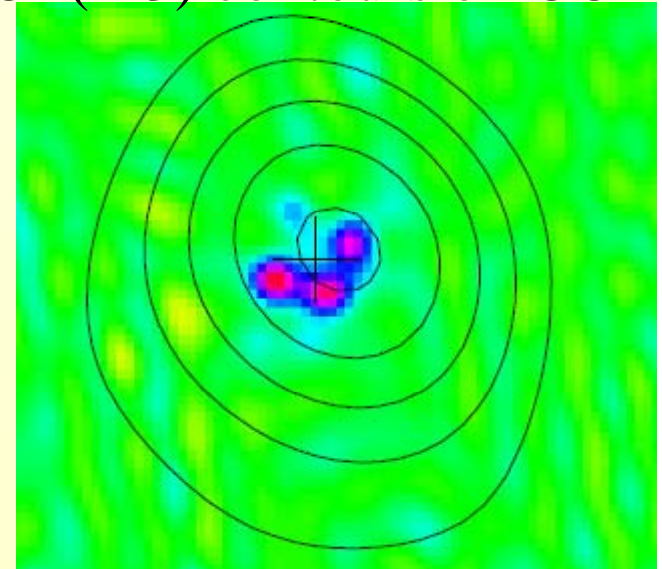
Dans APM08279+5255, excitation radiative + collisionnelle

→ Trou noir ($z=3.91$)

HCN (green) on optical

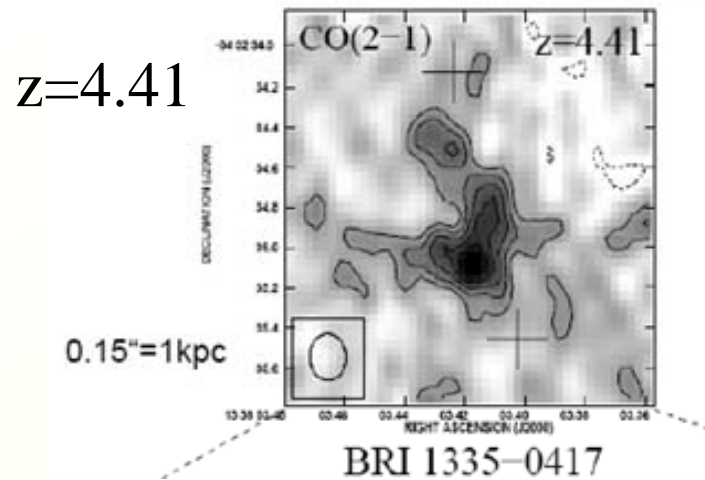


HCO⁺(4-3) contours on CO

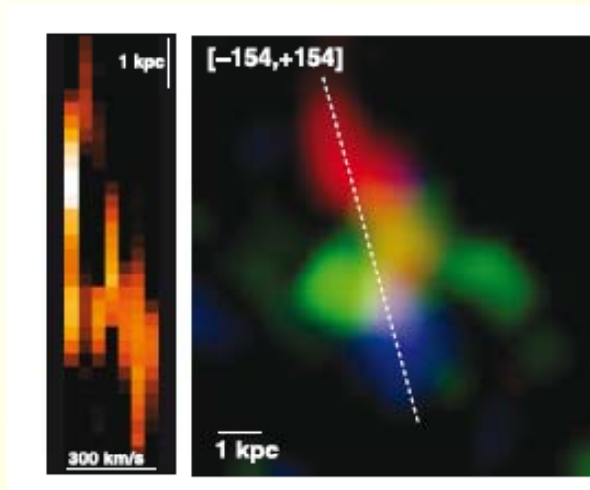


Gaz Moléculaire à l'échelle du kpc

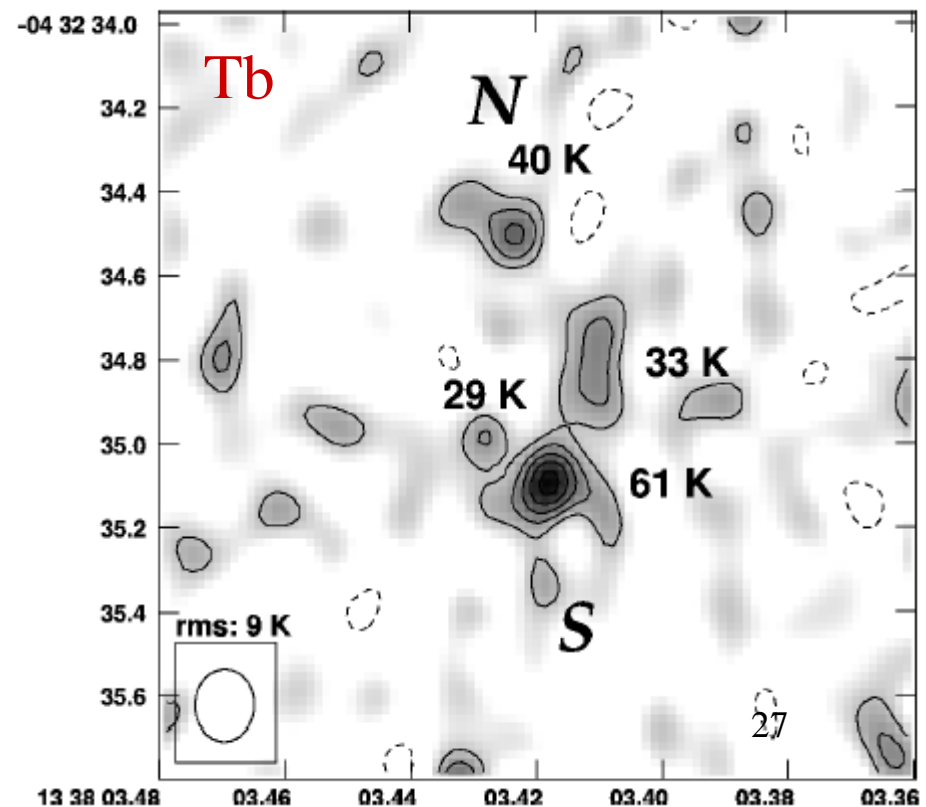
Fusions de galaxies, 1.4 Ga après le Big-Bang



$M_{H_2} = 9.2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$
 $M_{dyn} = 1.0 \cdot 10^{11} / \sin^2 i M_{\odot}$
 $M_{bh} = 6 \cdot 10^9 M_{\odot}$ (Edd limit)



VLA, CO(2-1) Riechers et al 2008



Gaz Moléculaire dans un anneau d'Einstein

Galaxies en interactions?

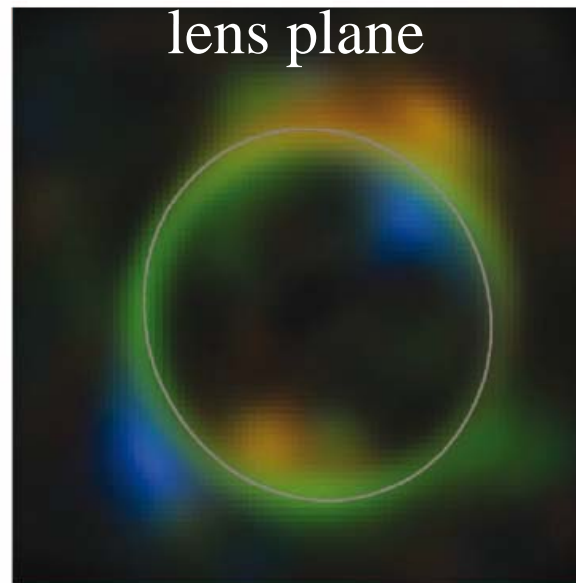
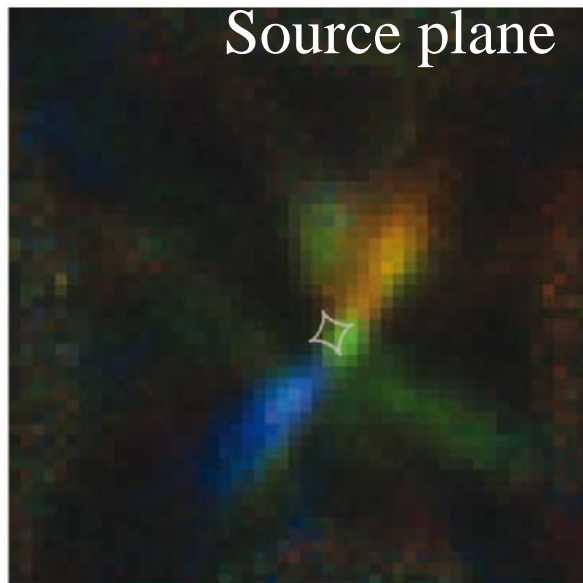
$z=4.12$, 5kpc extent

BH offset

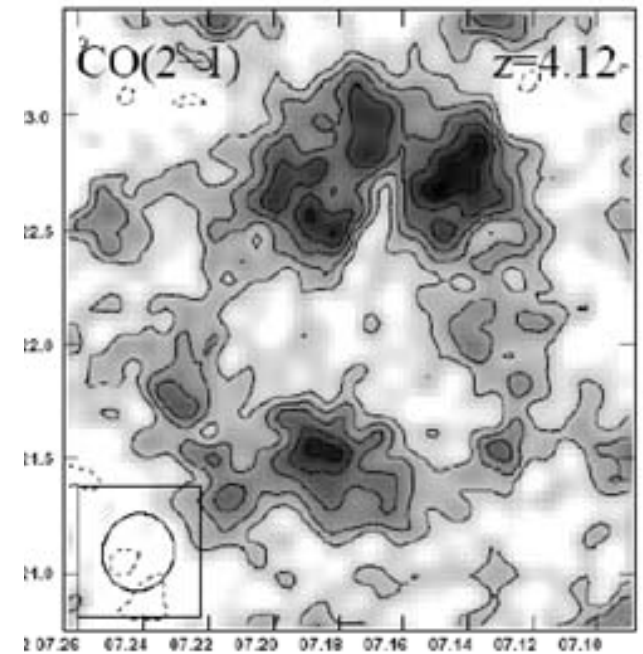
$$M_{H_2} = 1.7 \cdot 10^{10} \text{ Mo}$$

$$M_{\text{dyn}} = 4.4 \cdot 10^{10} / \sin^2 i \text{ Mo}$$

$$M_{\text{bh}} = 1.5 \cdot 10^9 \text{ Mo (Edd limit)}$$



8.5 kpc



PSS J2322+1944 (Einstein Ring)

VLA, CO(2-1), SFR= 680 Mo/yr

Riechers et al 2008

$M_{\text{bulge}} = 30 M_{\text{bh}}$

Too high BH masses!

Formation d'étoiles limitée par la pression de radiation

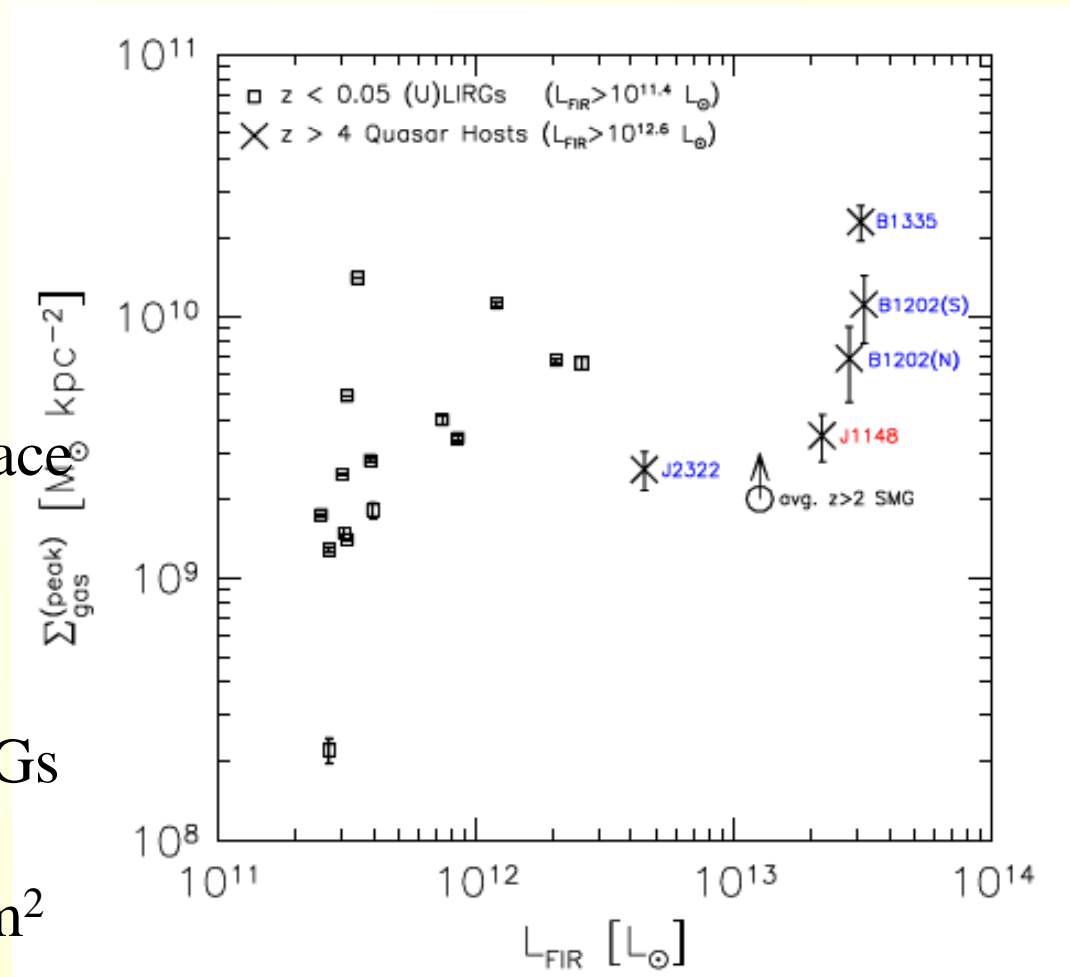
SFR $\sim 500-1000 \text{ Mo/yr/kpc}^2$

$z > 4$ QSO, 5kpc scale

Disque limité en densité de surface par la pression de radiation sur la poussière

Comparable aux galaxies ULIRGs

GMC $\sim 200 \text{ Mo/pc}^2 = 10^{22} \text{ H}_2/\text{cm}^2$
 $\sim 2 \cdot 10^8 \text{ Mo/kpc}^2$



$\text{NH}_2 \sim 10^{24} \text{ cm}^{-2}$

$n\text{H}_2 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$

Taux * Modéré: « Cosmic eye »

$z=3.07$ IRAM interferomètre CO(3-2)
 $M_{H2} = 2.4 \cdot 10^9 \text{ Mo}$ $M^* = 6 \cdot 10^9 \text{ Mo}$ (Spitzer)

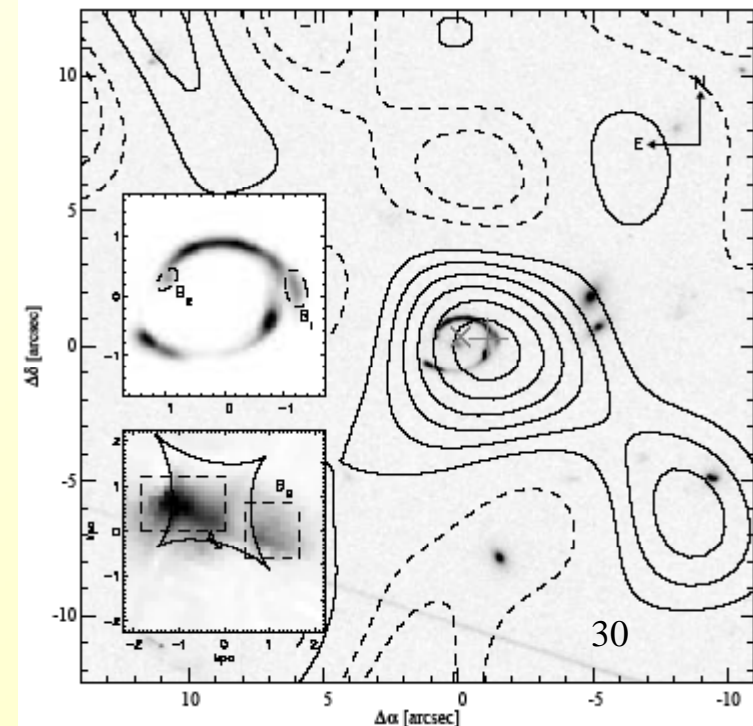
SFR = 60 Mo/yr durée de vie = 40 Myr
Galaxie lumineuse

Amplification d'un facteur **28**
2 composantes UV, 3 kpc séparation

Masse dynamique $\sim 10^{10} \text{ Mo}$
Mais inclinaison incertaine



HST ACS

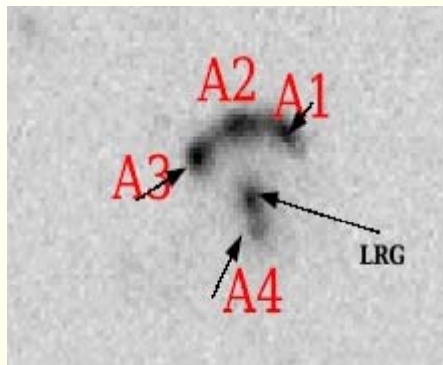


Taux de formation d'étoiles plus faible

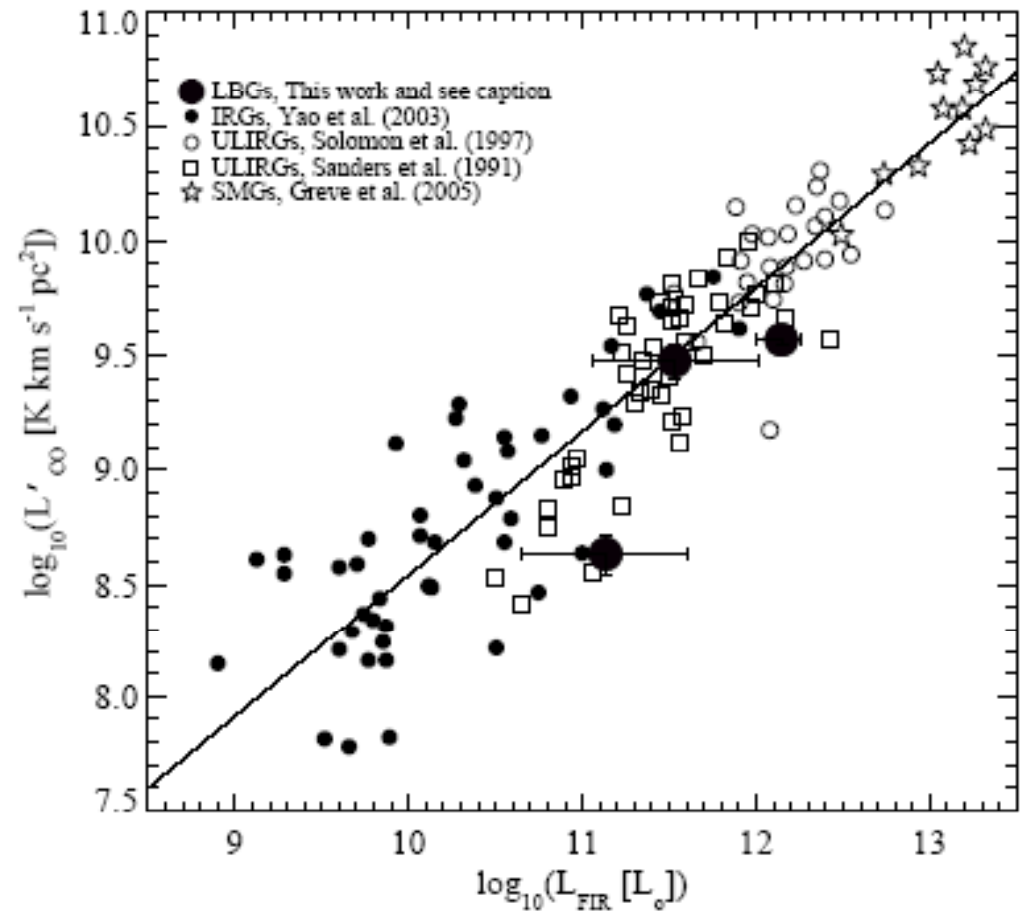
SFE $\sim 140 M_{\odot}/L_{\odot}$

LCO \rightarrow masse de gaz

$z=2.73$

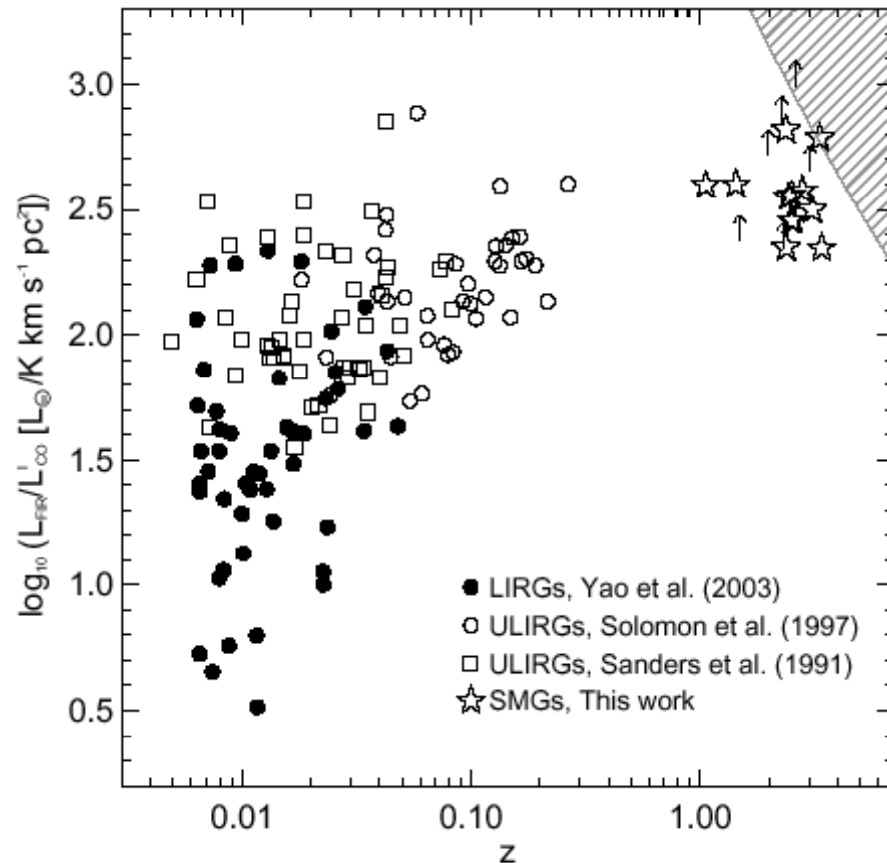


8 o'clock arc
Allam et al 2007



SMGs: Submillimeter Galaxies

Efficacité de formation d'étoiles $L_{\text{IR}}/L'_{\text{CO}}$ vs z



6 SMGs non
detectées en CO

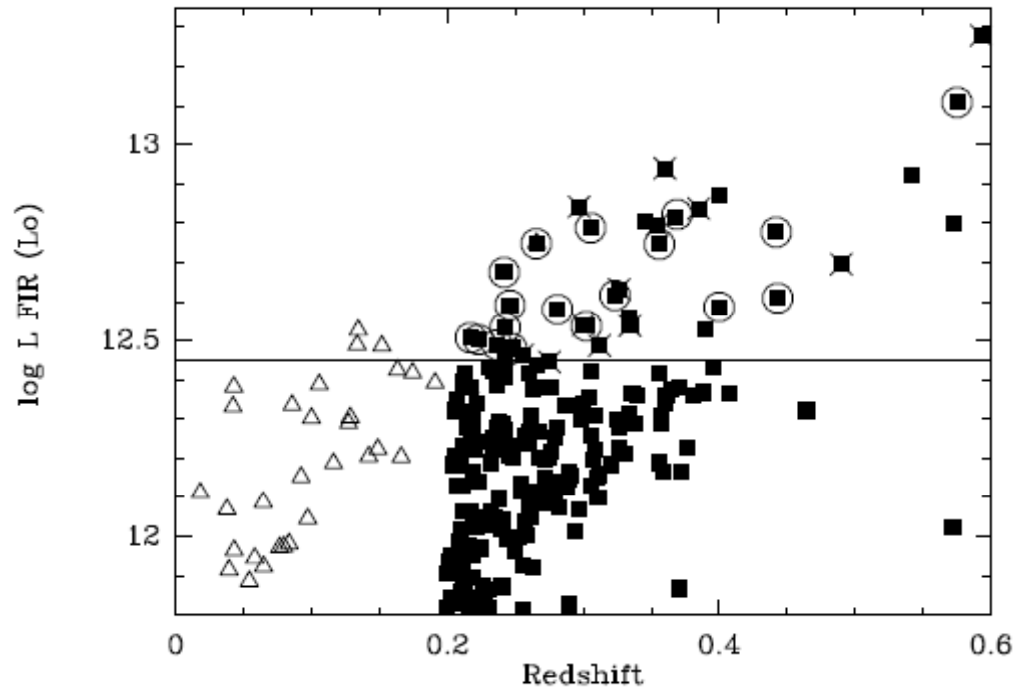
40- 200 Myr phase starburst
SFR ~ 700 Mo/yr
Plus efficace que les ULIRGs

Fusions sans bulbes?

Masses de gaz $\sim 0.6 M_*$

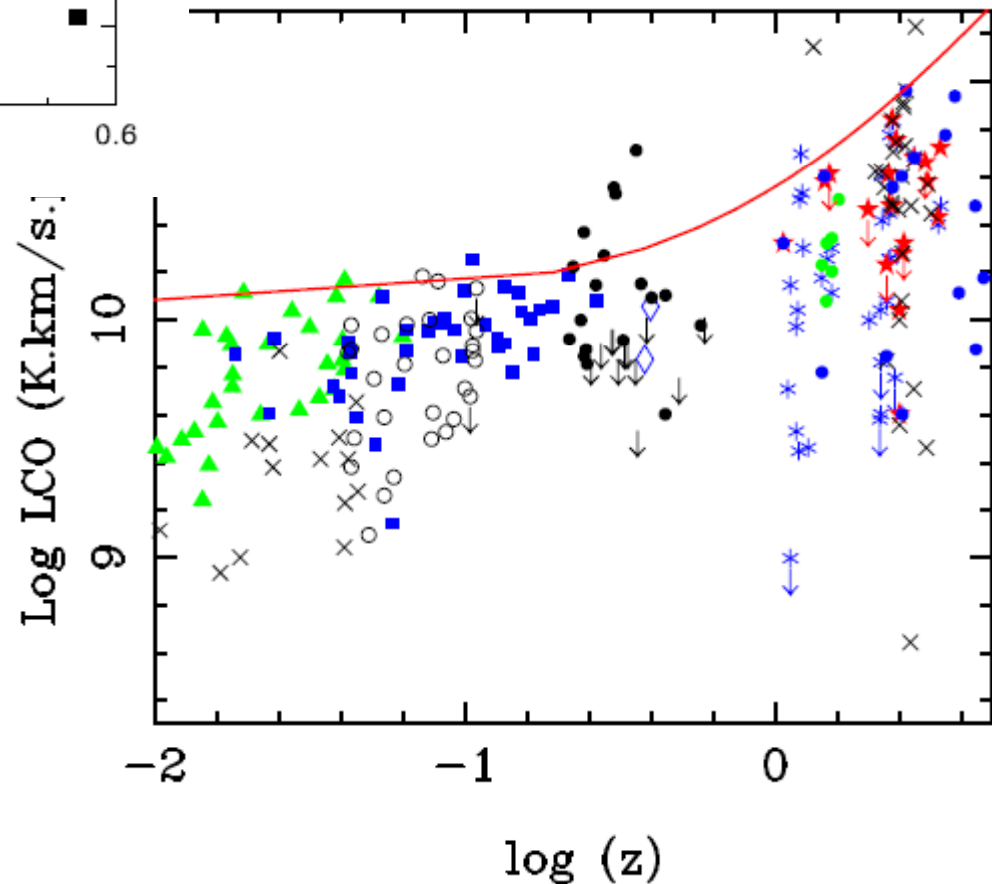
ULIRGs aux z intermediaires

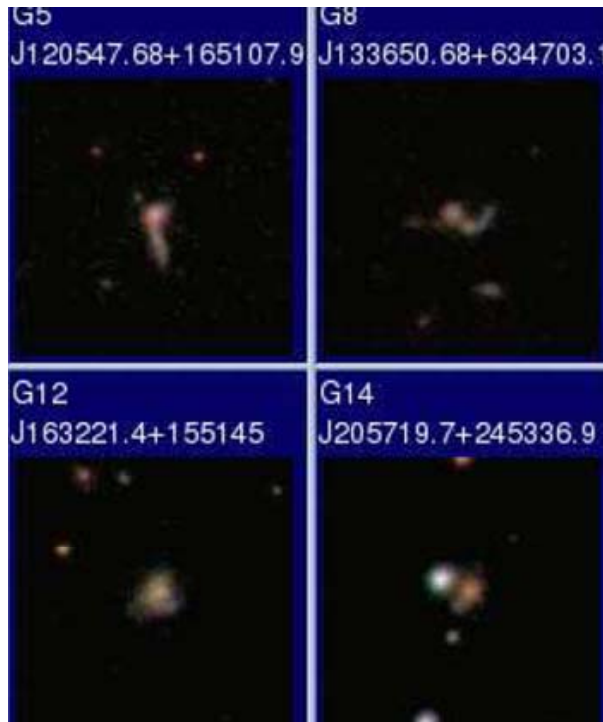
Le contenu en gaz croît avec z



Selection des galaxies les plus
lumineuses

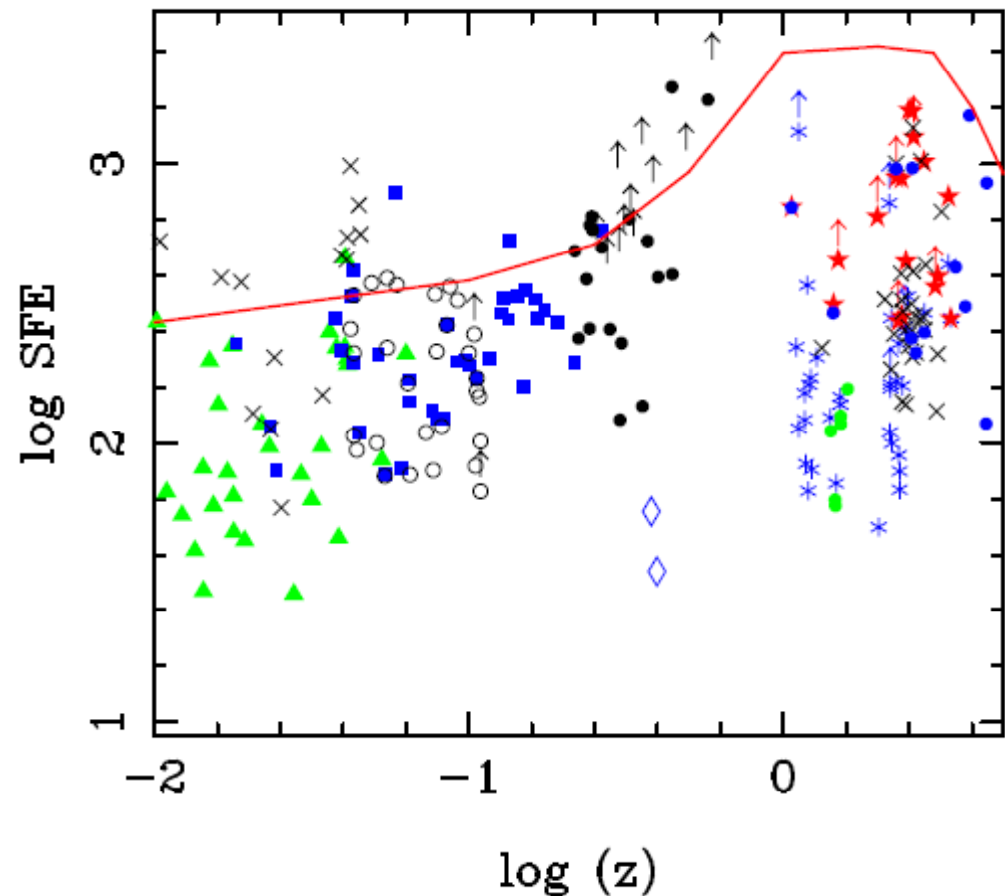
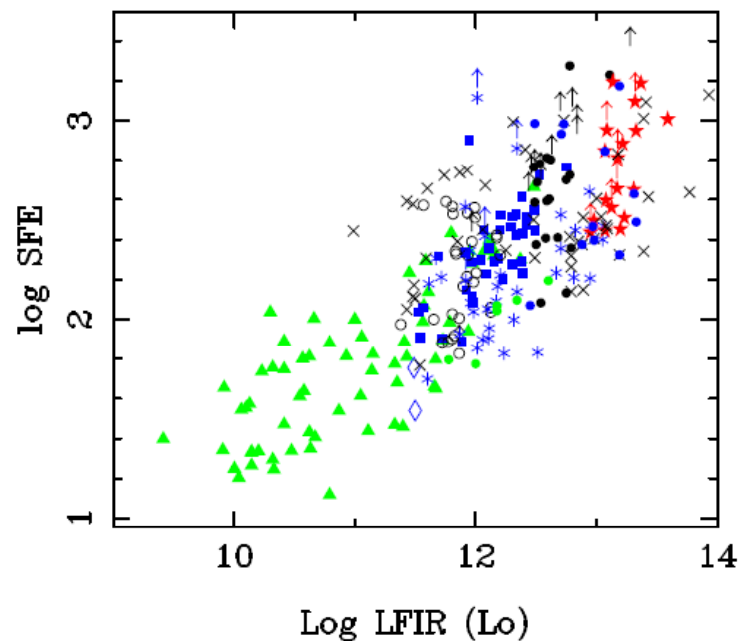
Combes et al 2011





Efficacité de formation d'étoiles versus z

Suit l'histoire de formation d'étoiles
En amplitude relative



Galaxies à faible efficacité de formation d'étoiles

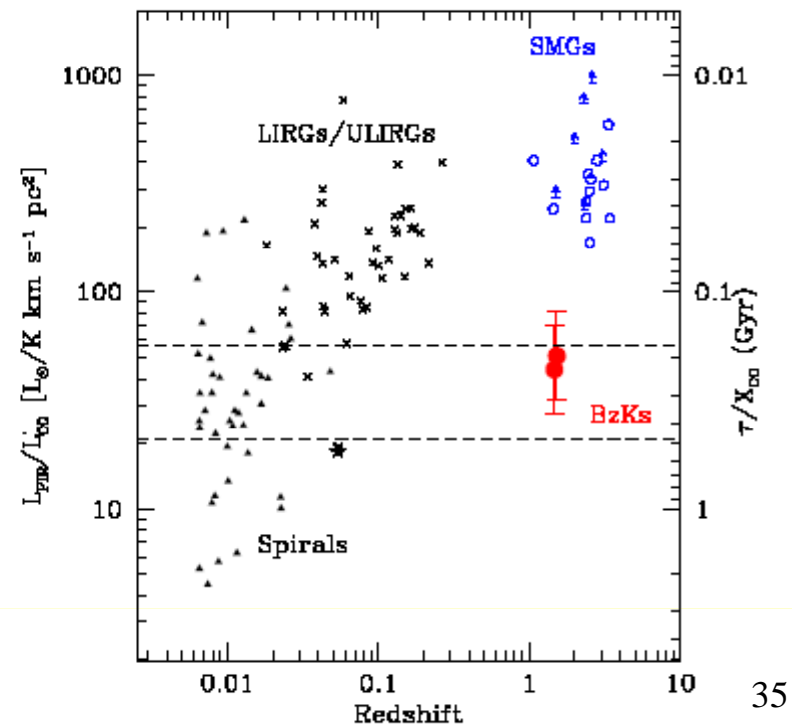
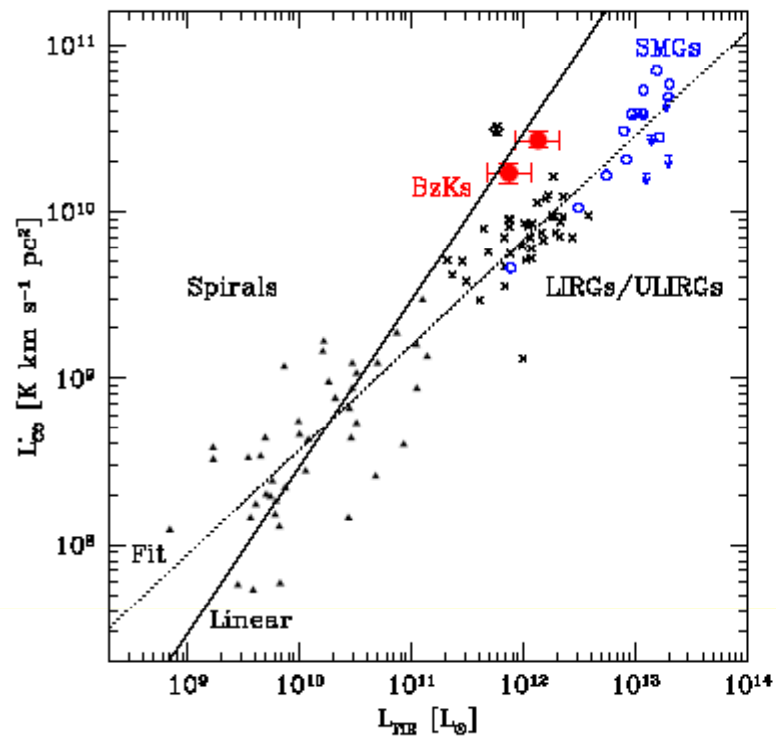
Dans ces galaxies, plus de gaz détecté que prévu

Galaxies massives, tailles 10kpc? $L(\text{FIR}) \sim 10^{12} L_{\odot}$

Taux SF normal, $M(\text{H}_2) \sim 2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ $\tau \sim 2 \text{ Gyr}$

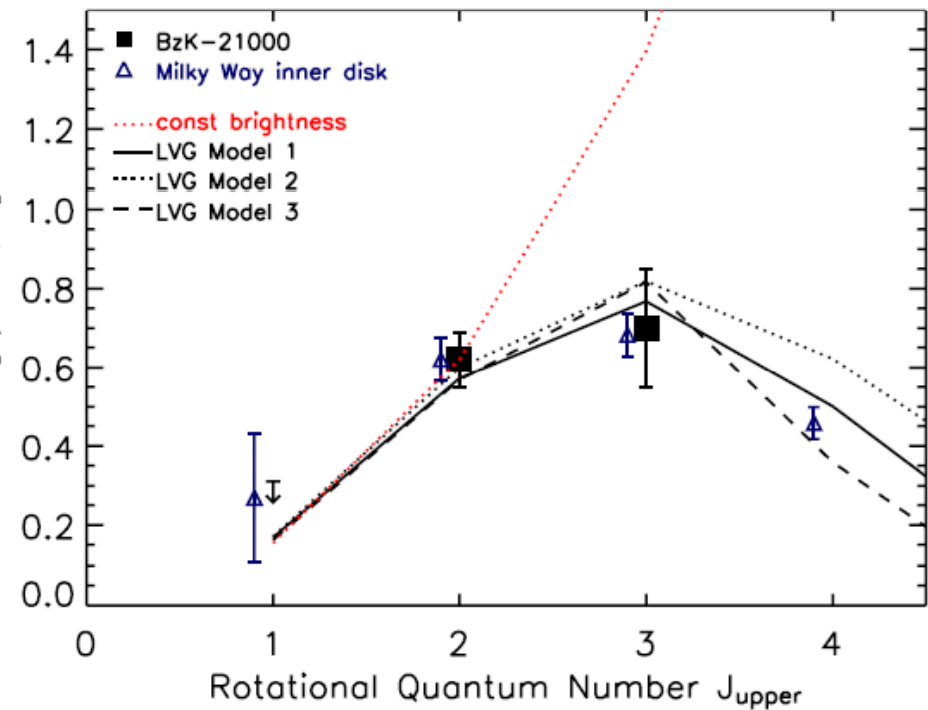
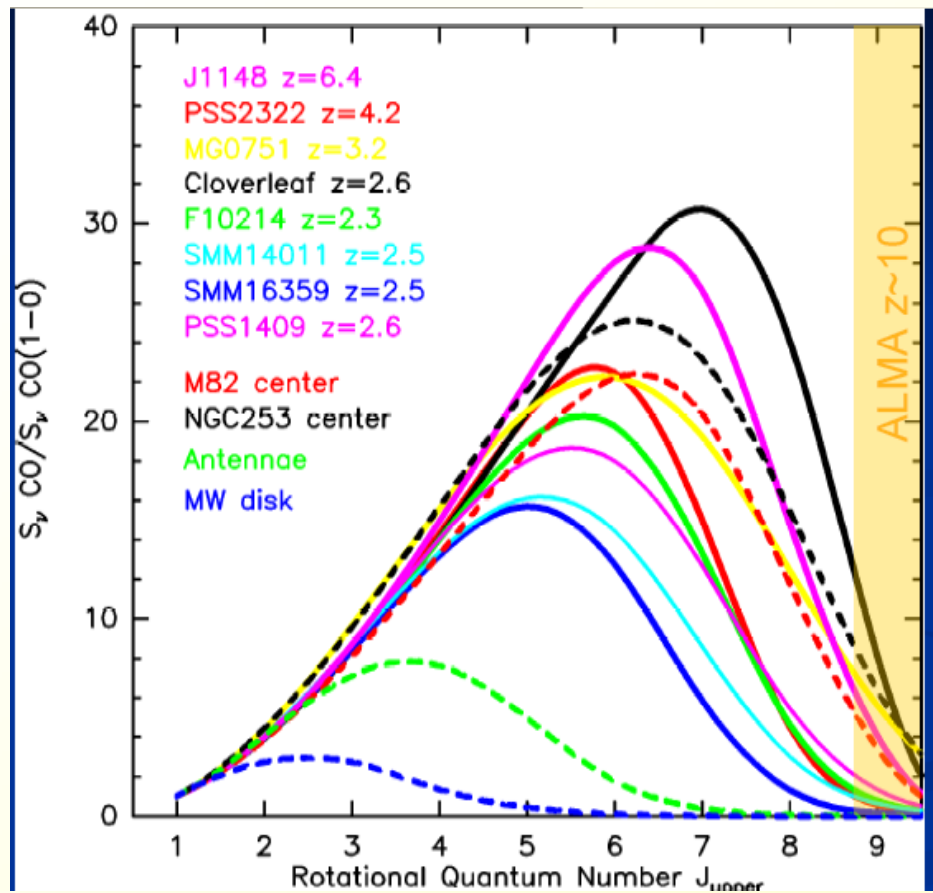
→ Il existe une population de galaxies riches en gaz à grand z

Daddi et al 2008



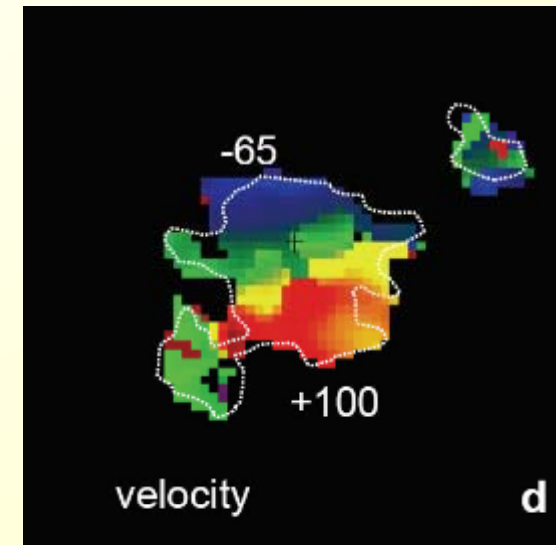
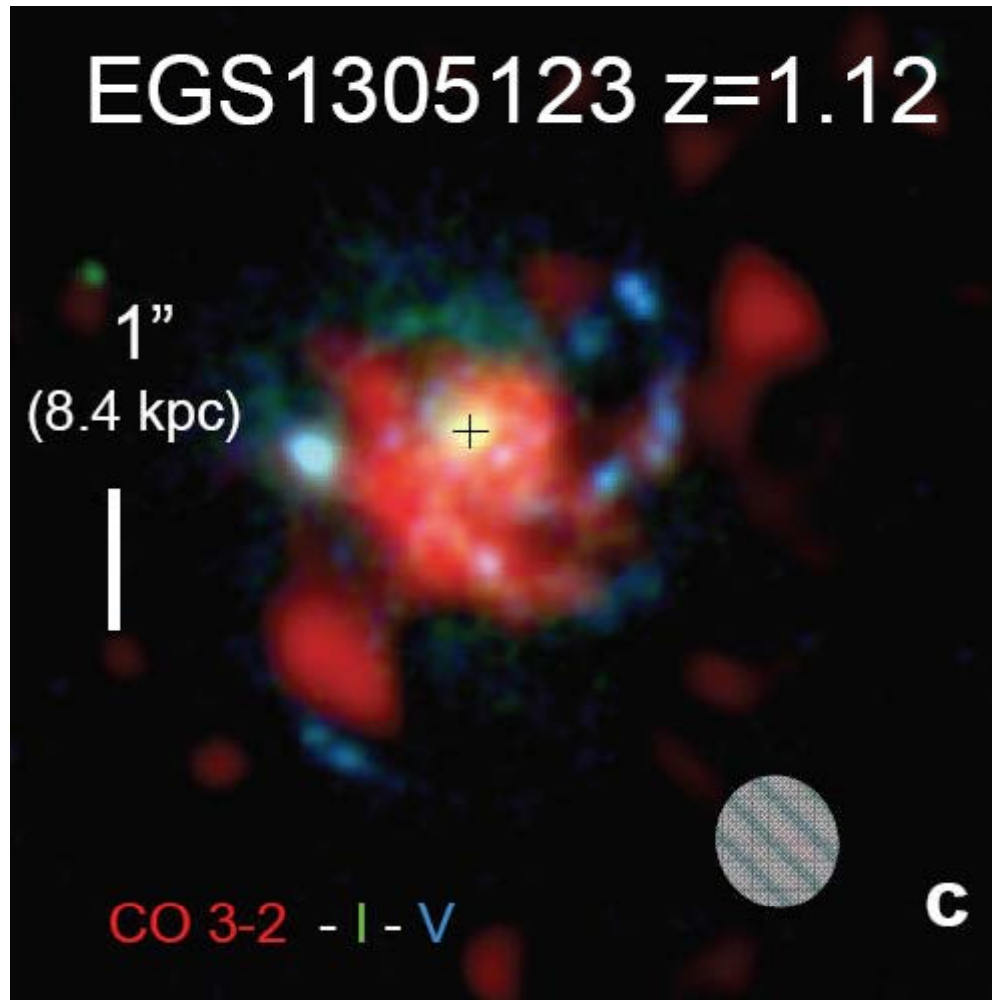
Faible excitation, comme la Voie Lactée

Niveaux de rotation de la molécule CO



Galaxies $z=1-2$

19 galaxies observées à IRAM,
10 à $z\sim 2.3$ et 9 à $z\sim 1.2$



Galaxies à formation d'étoiles « Normale »

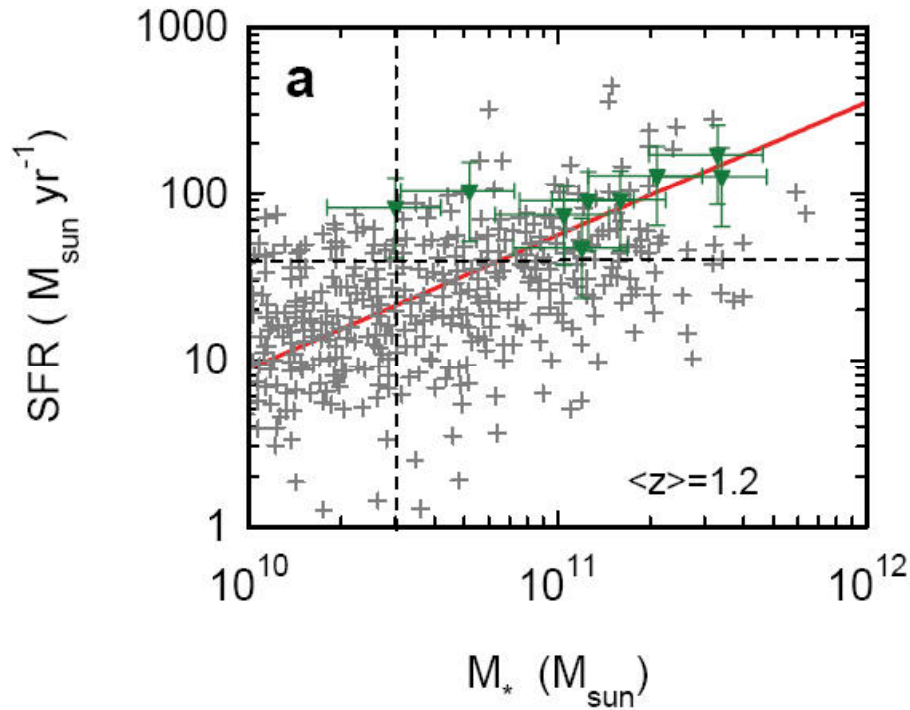
Contenu en gaz $\sim 34\%$ et 44% en moyenne à $z=1.2$ et 2.3 resp.

5% dans la Voie Lactée

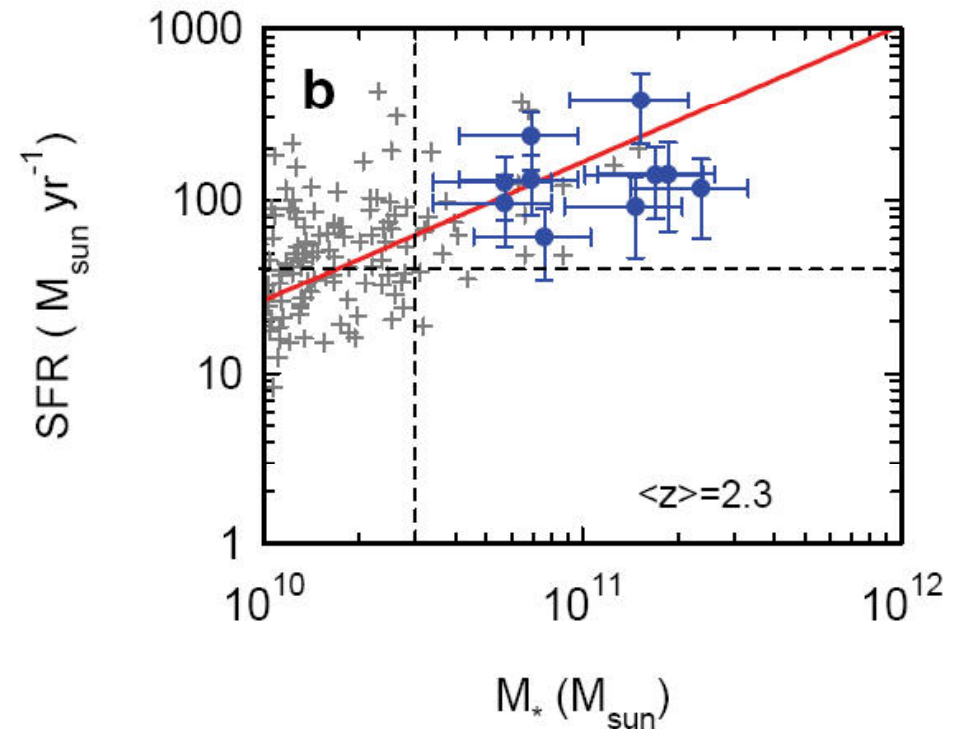
Tacconi et al 2010, Nature

Variations SF vs z

Si le taux SF est plus grand
→ Dû à une grande fraction de gaz



SFR proportionnel à $M_*^{0.8} (1+z)^{2.7}$

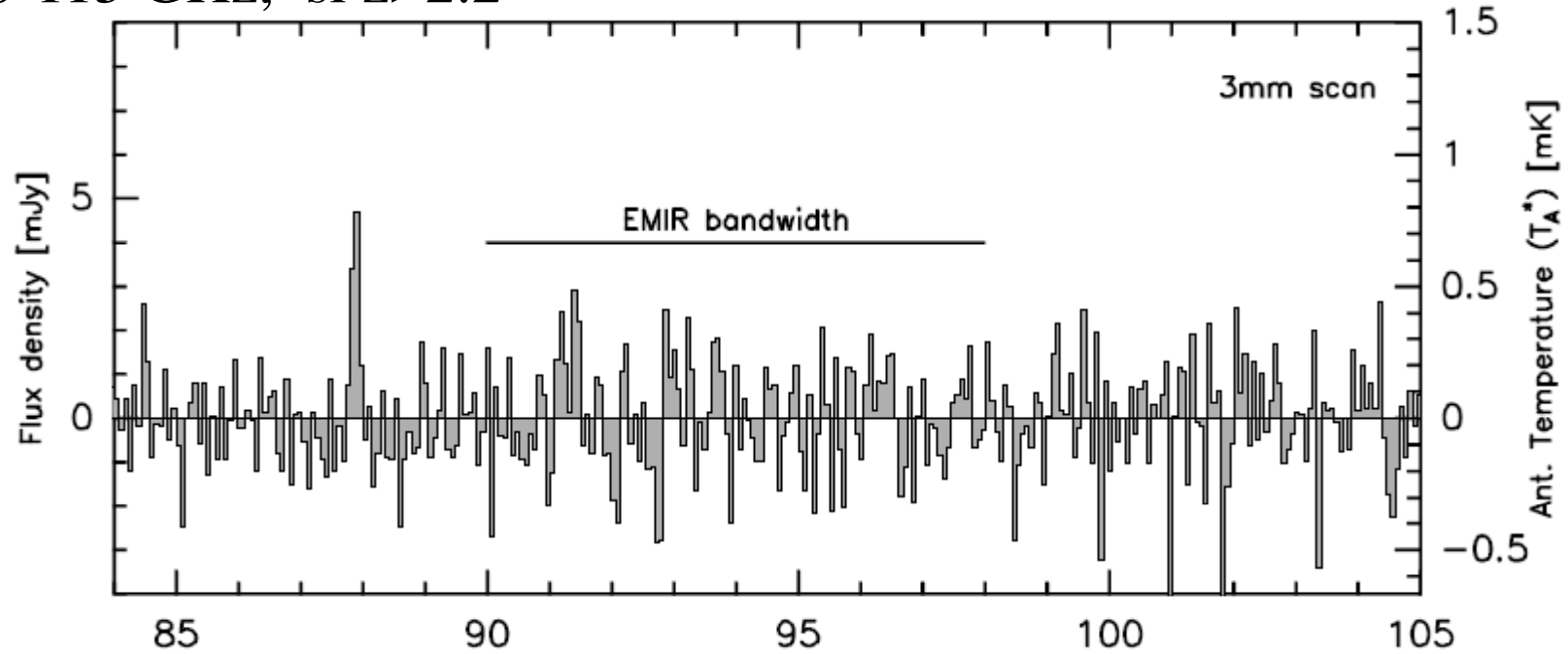


Avec aussi une plus grande efficacité de formation stellaire

→ Accrétion de gaz continue par les galaxies

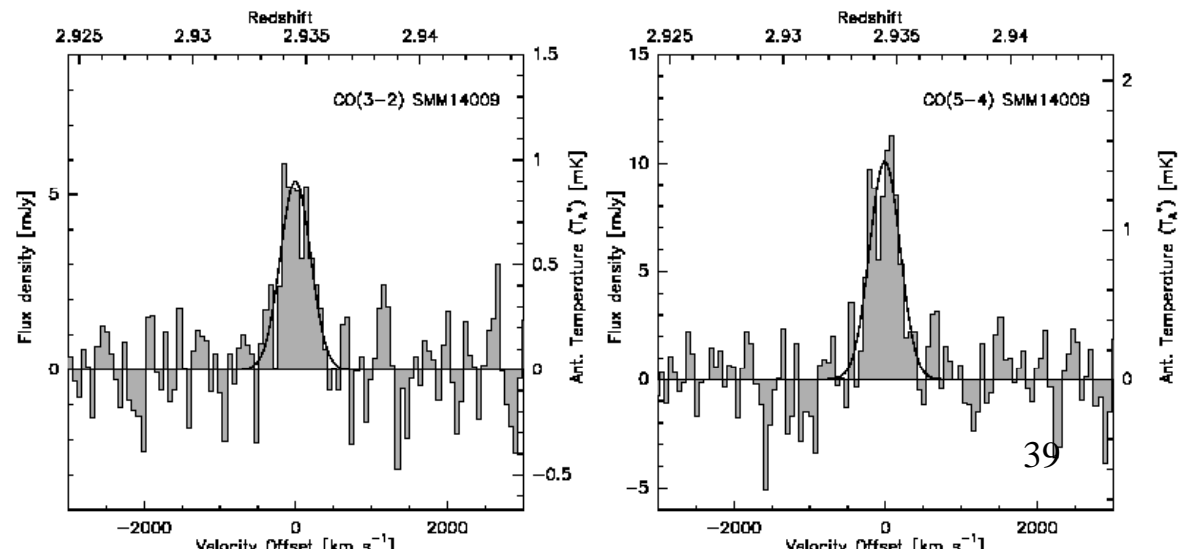
Machine à déterminer z

Toujours une raie de CO dans la bande
80-115 GHz, si $z > 2.2$



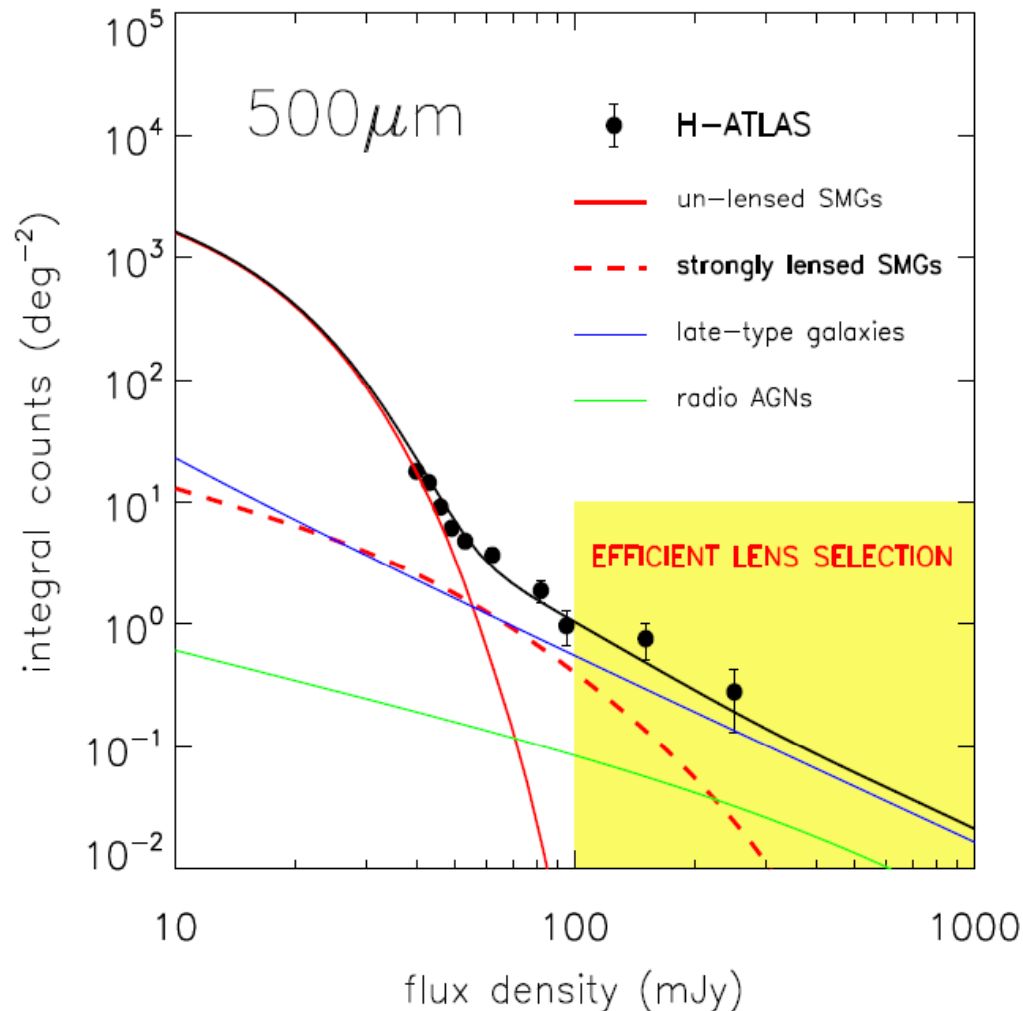
SMMJ14009+0252.

Weiss et al 2009





Galaxies de fond amplifiées détectées par Herschel



Au-dessus de 100 mJy, les sources
sont des galaxies + lentilles
6 sources détectées en 14 deg^2

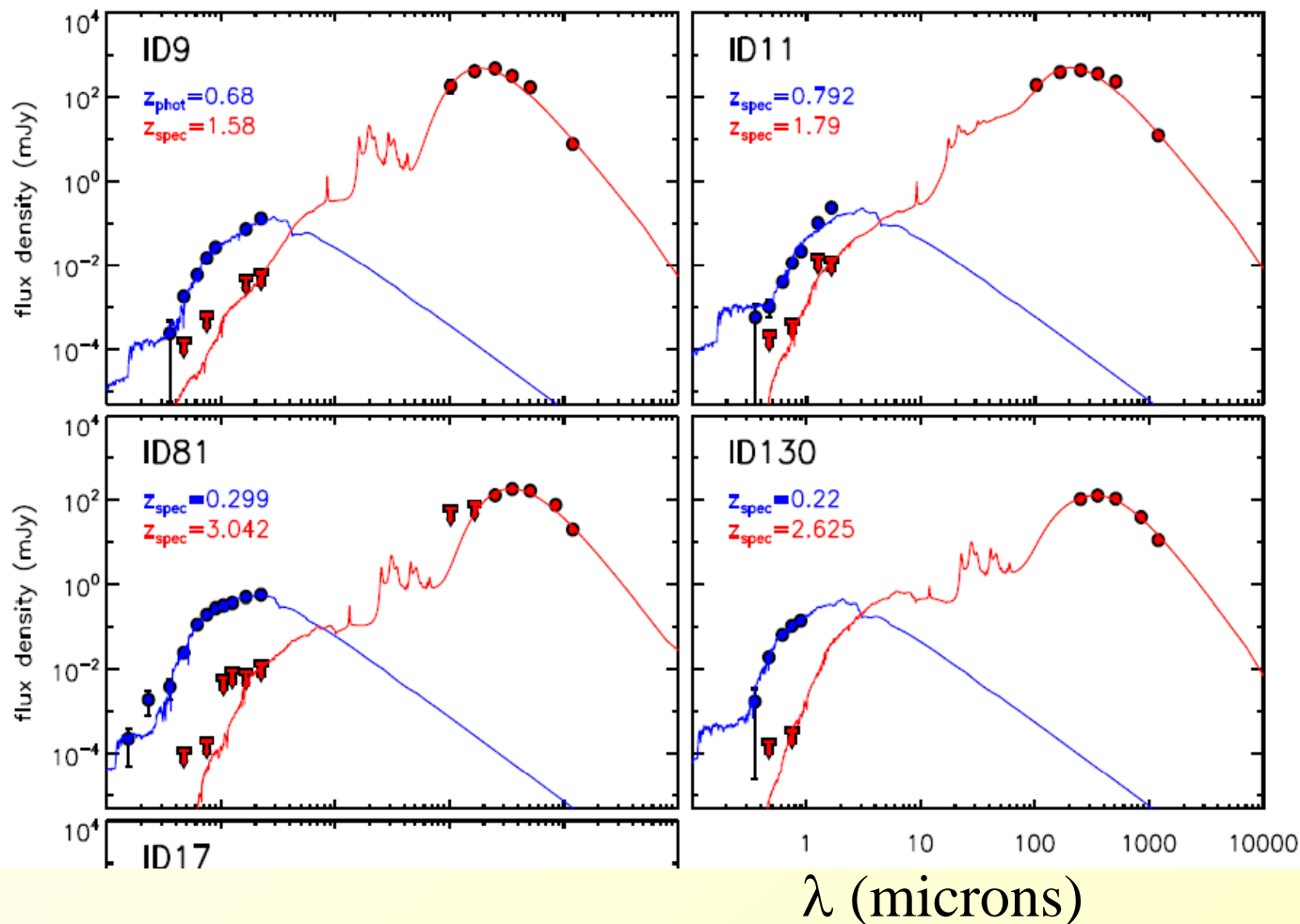
Extrapolation > 100 galaxies
en 550 deg^2

Observations en NIR
→ Révèle la lentille

Sources détectées en CO

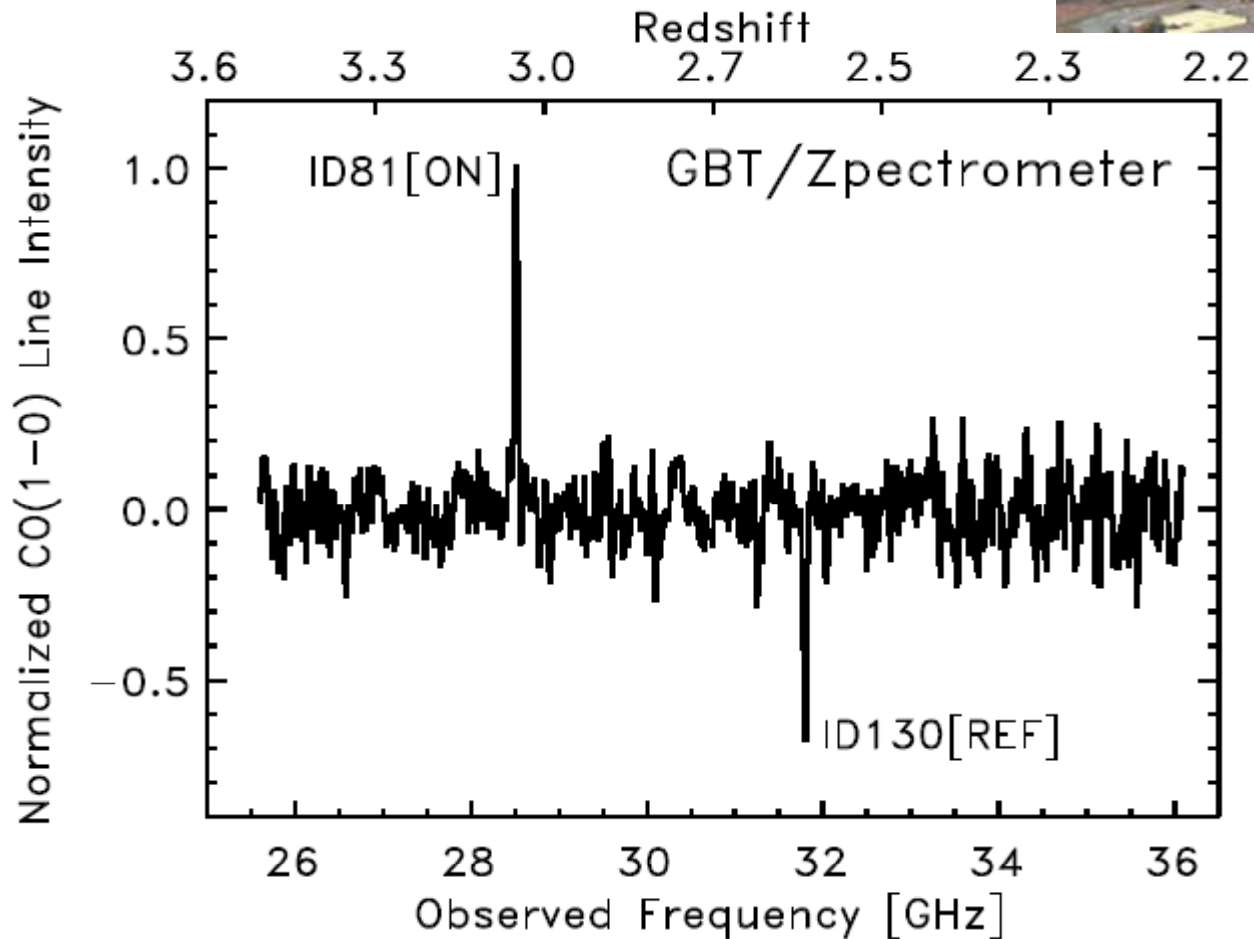
Redshifts découverts avec les raies de CO
Entre $z=1.5$ et $z=3$

Negrello et al 2010



Recherche du redshift avec les raies de CO

Recherche avec le GBT Z-spec
CO(1-0) line



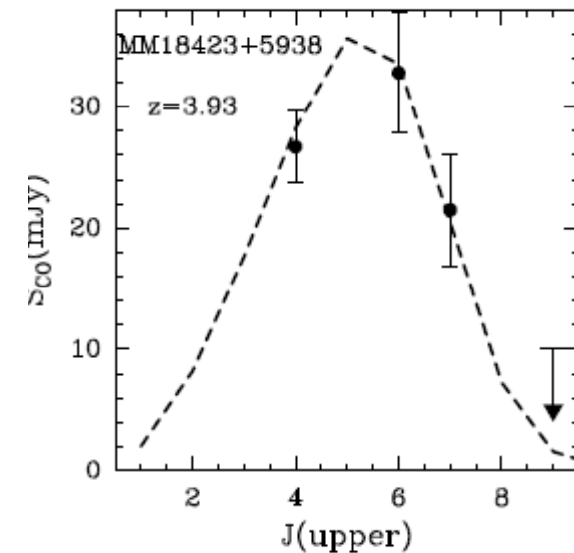
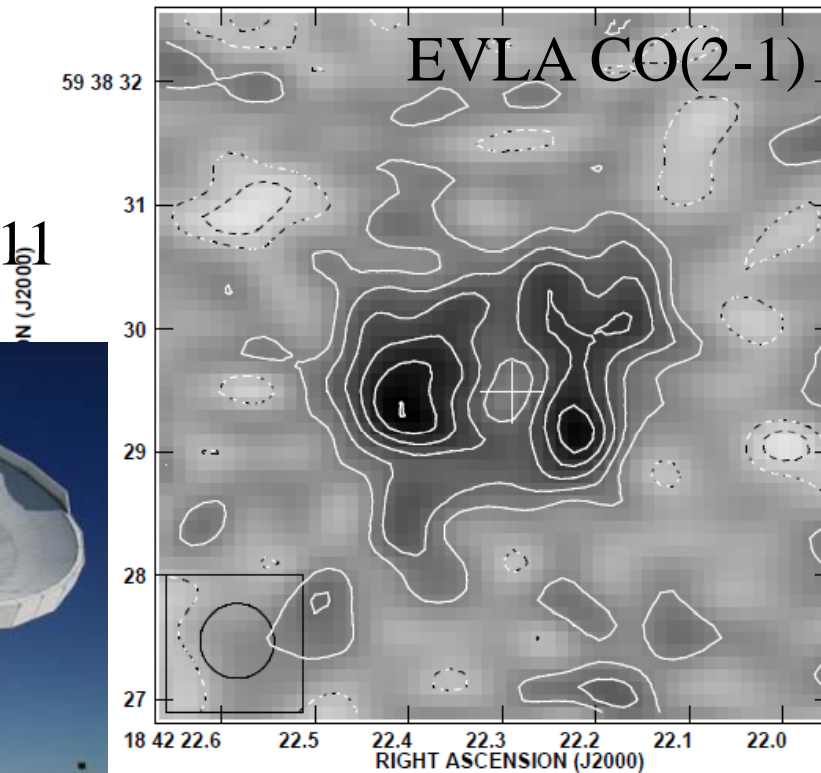
Une galaxie ultra-lumineuse

Recherche de redshift avec IRAM-30m CO(6-5) et (4-3)

amplification

$m=12$

Lestrade et al 11



$S=30\text{mJy}$ à 1.2mm avec MAMBO. Recherche près d'un disque de débris
→ Découverte par hasard!

Lestrade, Combes, Salome et al 2010

MM18423+5938 2 raie Cl, CO(7-6)

$z=3.93$

$L= 4.8 \cdot 10^{14}/m \text{ Lo}$

$M_{\text{dust}}= 6 \cdot 10^9/m \text{ Mo}$

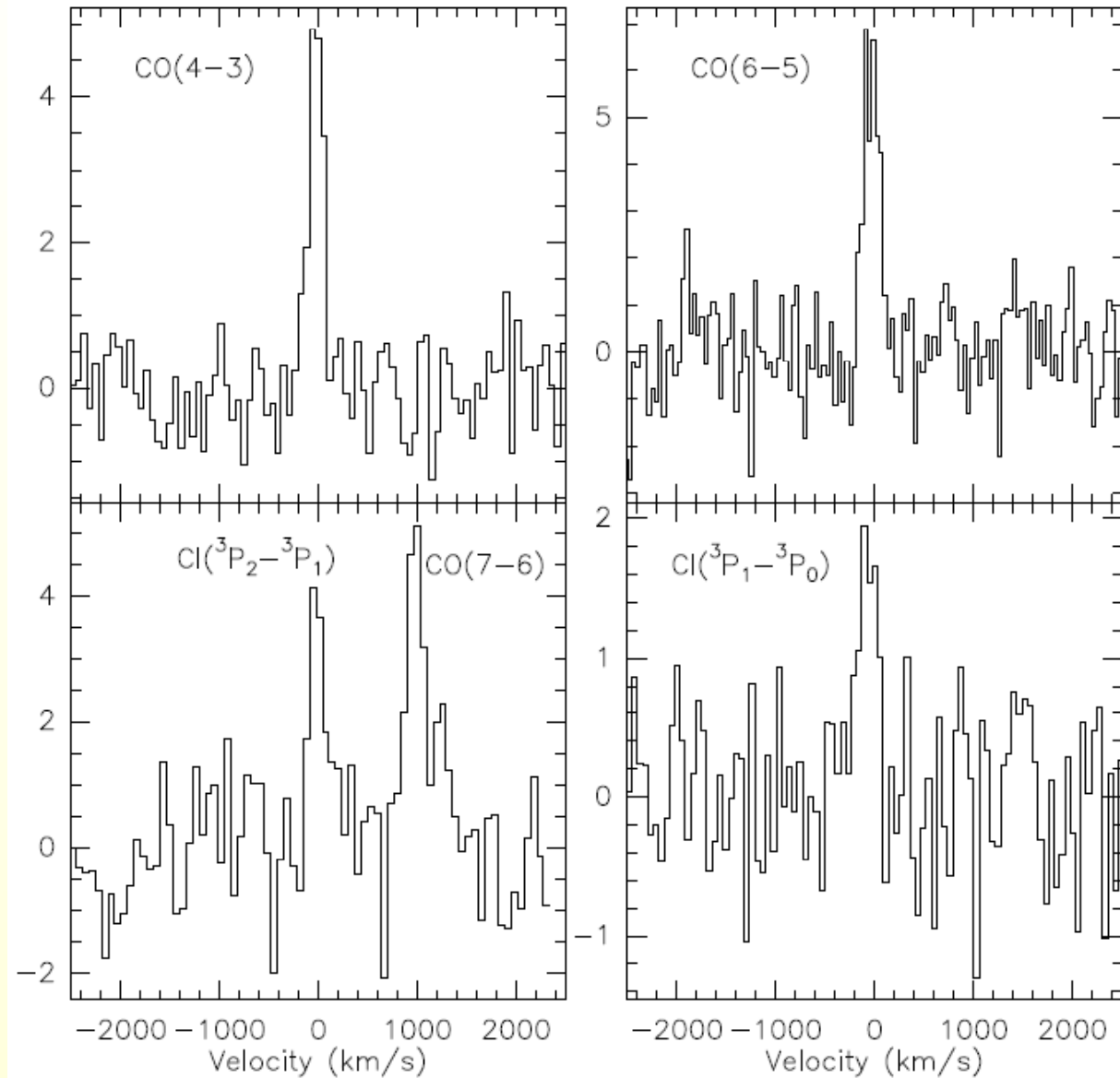
$\text{SFR}= 8.3 \cdot 10^4/m \text{ Mo/yr}$

$M_{\text{H}_2}= 2 \cdot 10^{11}-10^{12} \text{ Mo}$

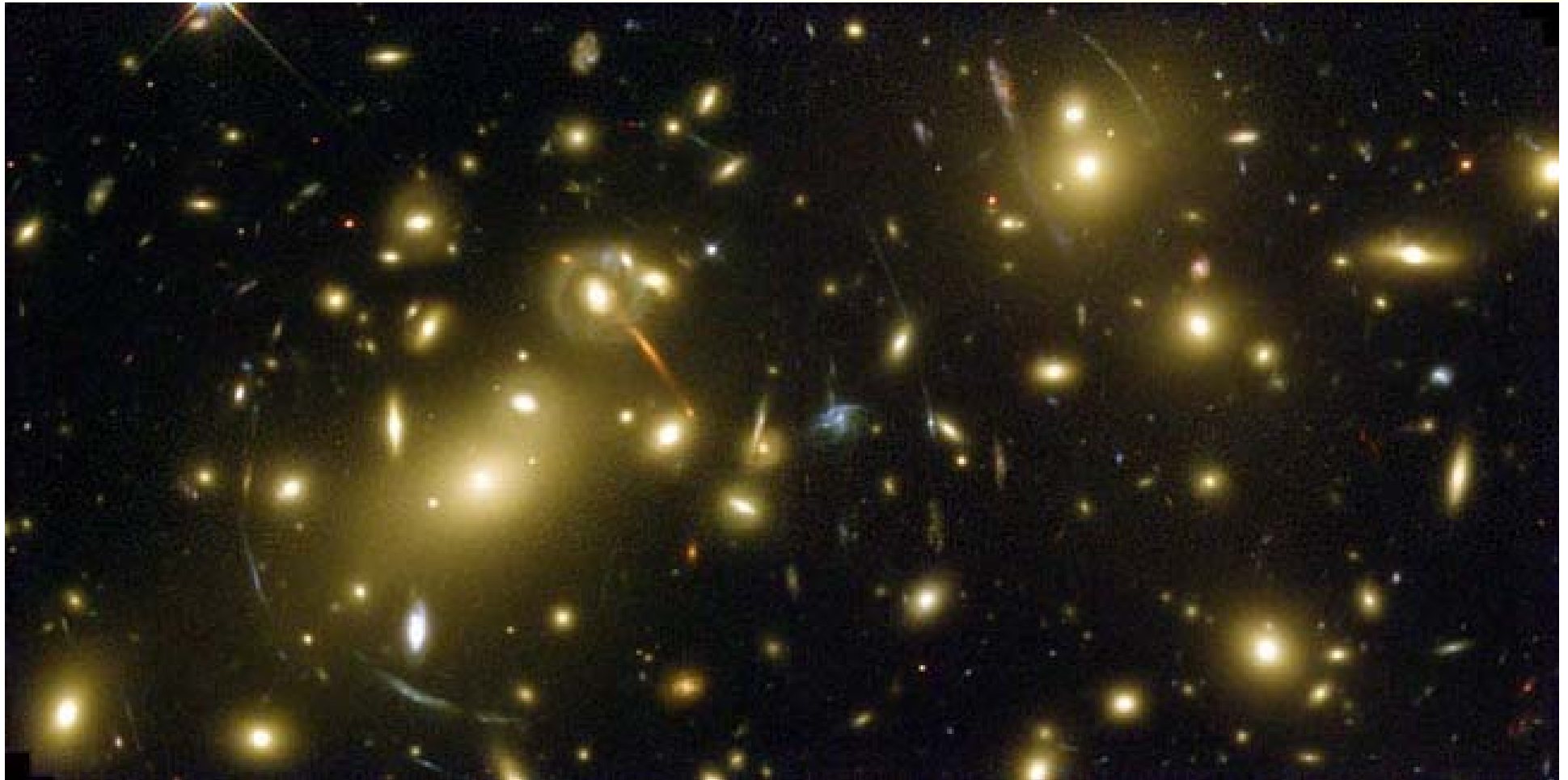
$\text{Cl}/\text{H}_2 = 1.4-8 \cdot 10^{-5}$

Faible excitation CO

Pas de quasar?

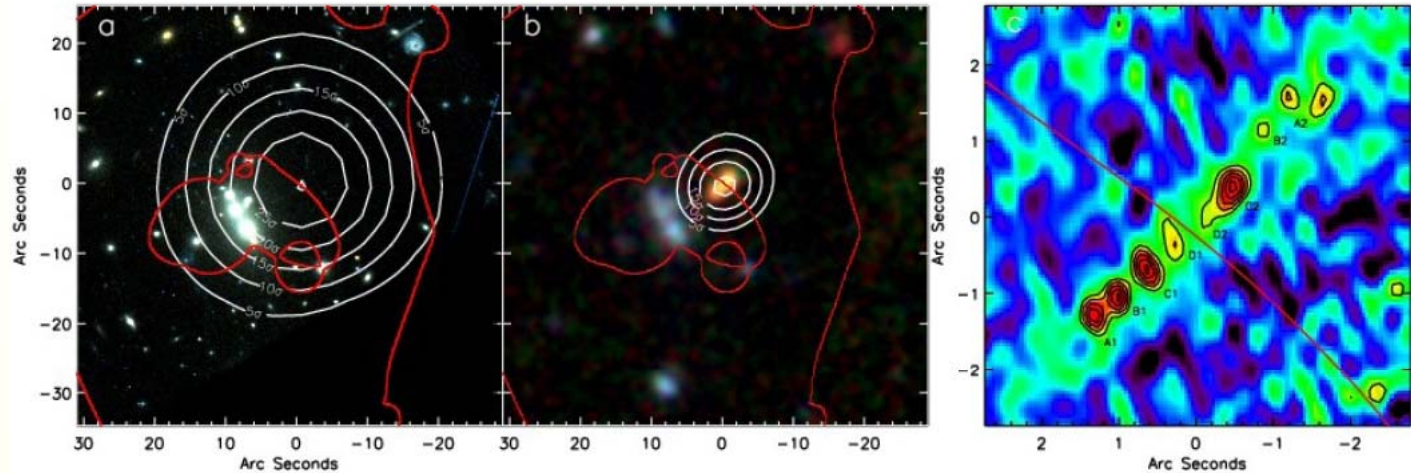


Amas de galaxies comme télescope gravitationnel



Formation d'étoiles: galaxie à $z=2.33$

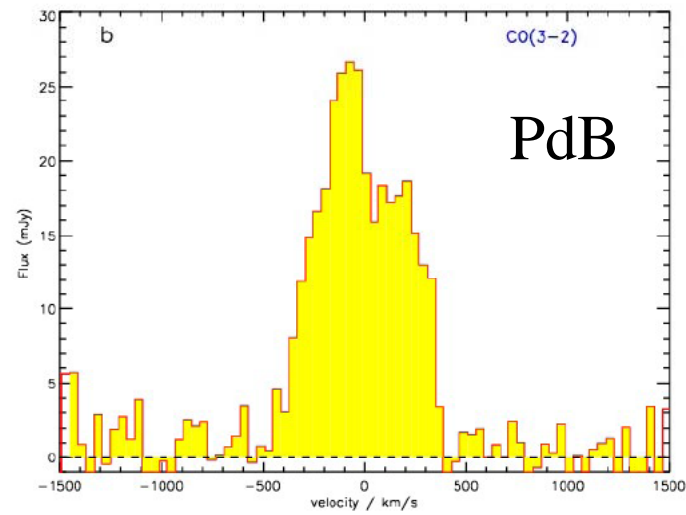
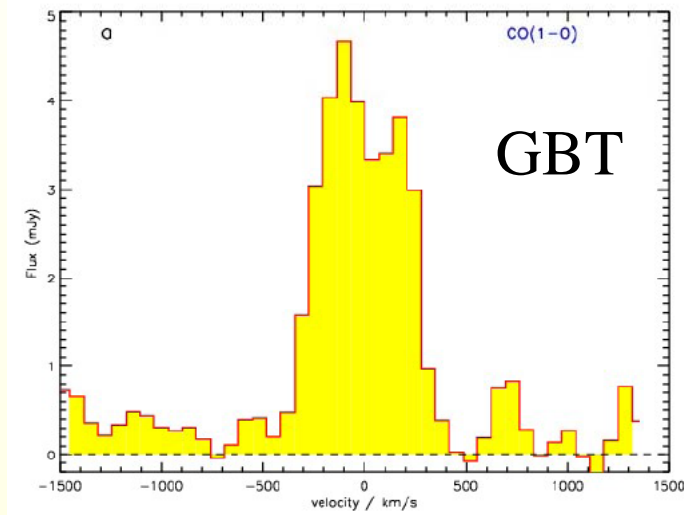
$z=2.326$
Critical curves



APEX 850 μ m on HST,

350 μ m on IRAC

SMA



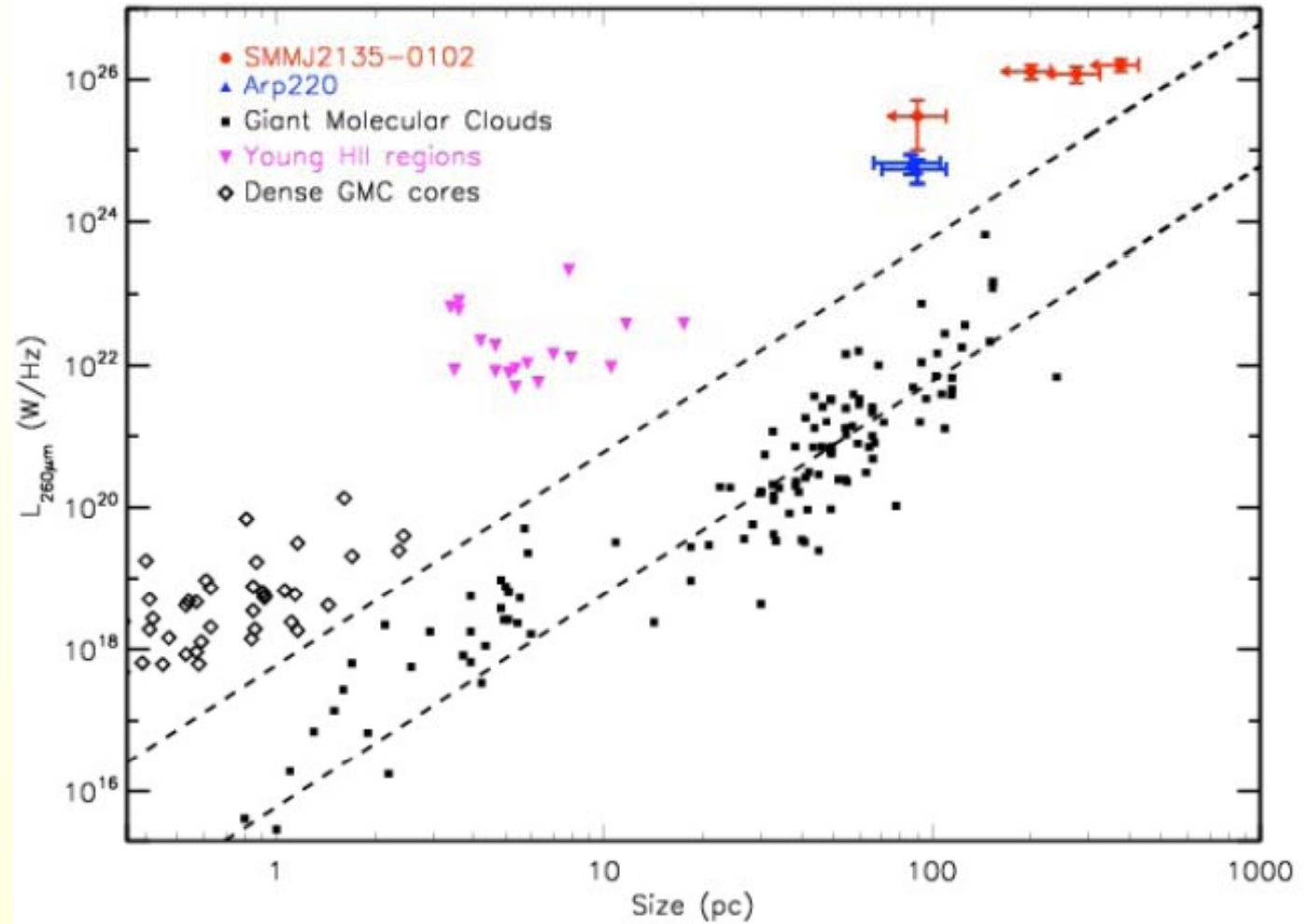
Swinbank et al 2010

Résoudre les nuages à $z=2.33$?

Size of SF regions

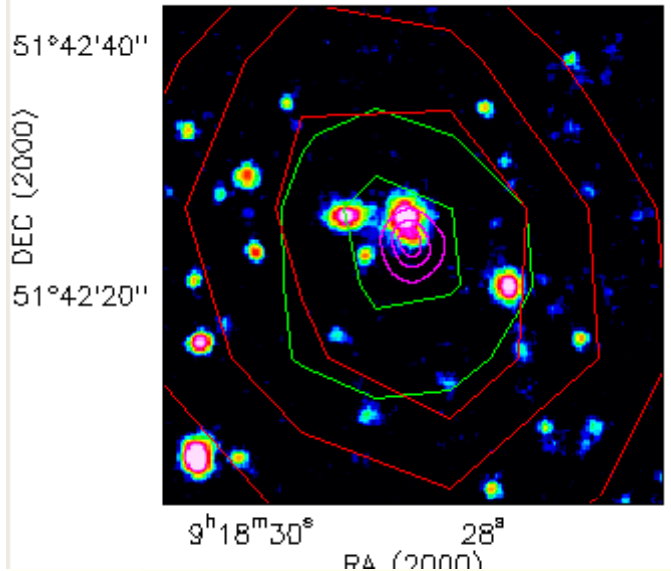
100 times more
luminous at a
given size than
MW GMC

Magn=32



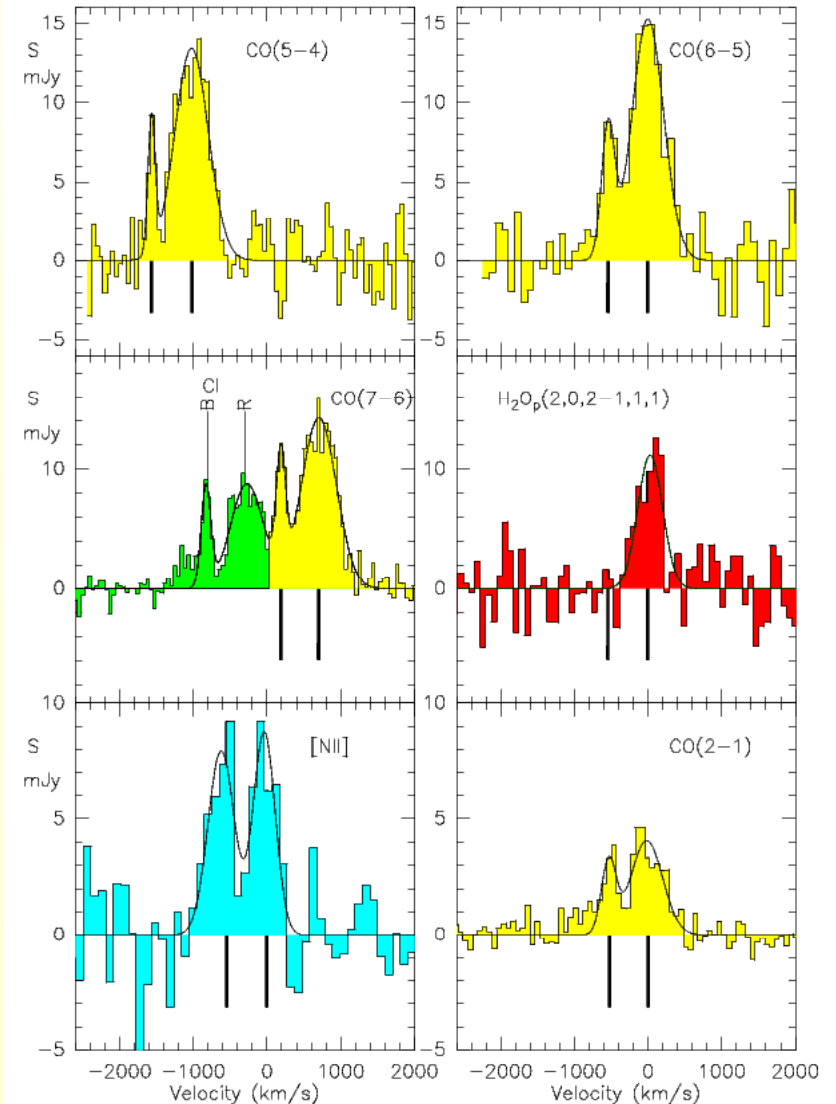
Une galaxie hyper-lumineuse, 1 Ga après le Big-Bang

Image Subaru, spectre lentille Keck



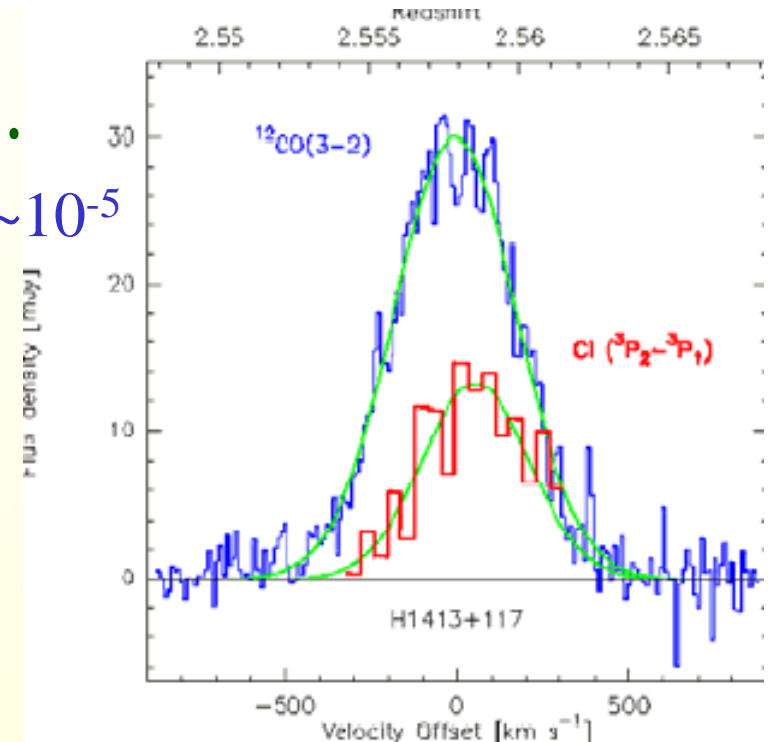
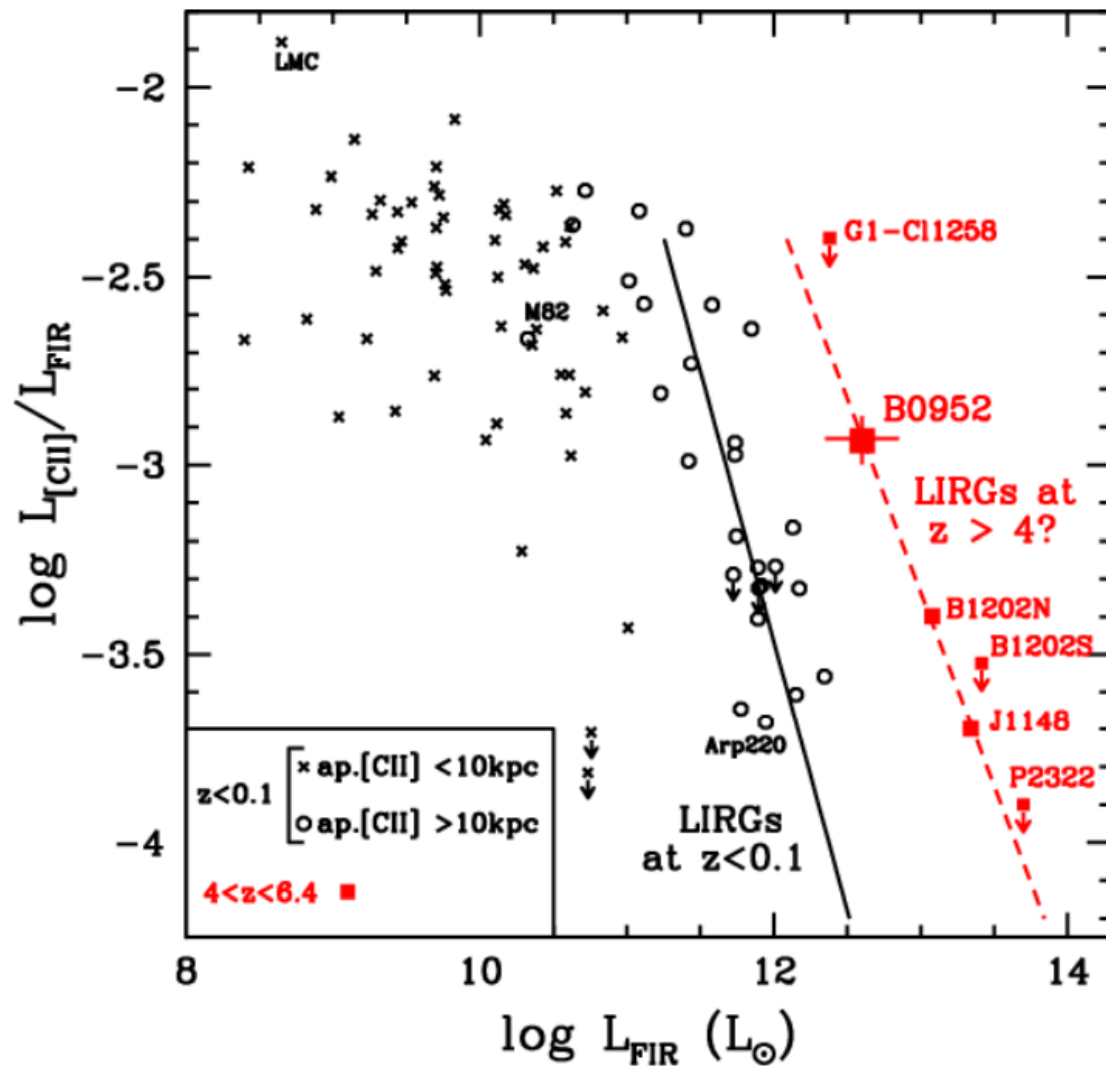
$Z=5.24$

Source détectée par Herschel en infrarouge, puis le redshift déterminé avec un scan de l'IRAM 30m
Combes et al 2012



Autres raies CII 158 μ , CI, NII...

$$\text{CI}/\text{H}_2 \sim 10^{-5}$$



Cloverleaf

$$L(\text{CI})/L_{\text{FIR}} \sim 7 \cdot 10^{-6}$$

$T(\text{CI}) = 29\text{K}$, as in MW

Walter et al 2011

$\text{CII}/L_{\text{FIR}} < \sim 0.06\%$,
Enhanced at high z ?

Maiolino et al 2009 ⁴⁹

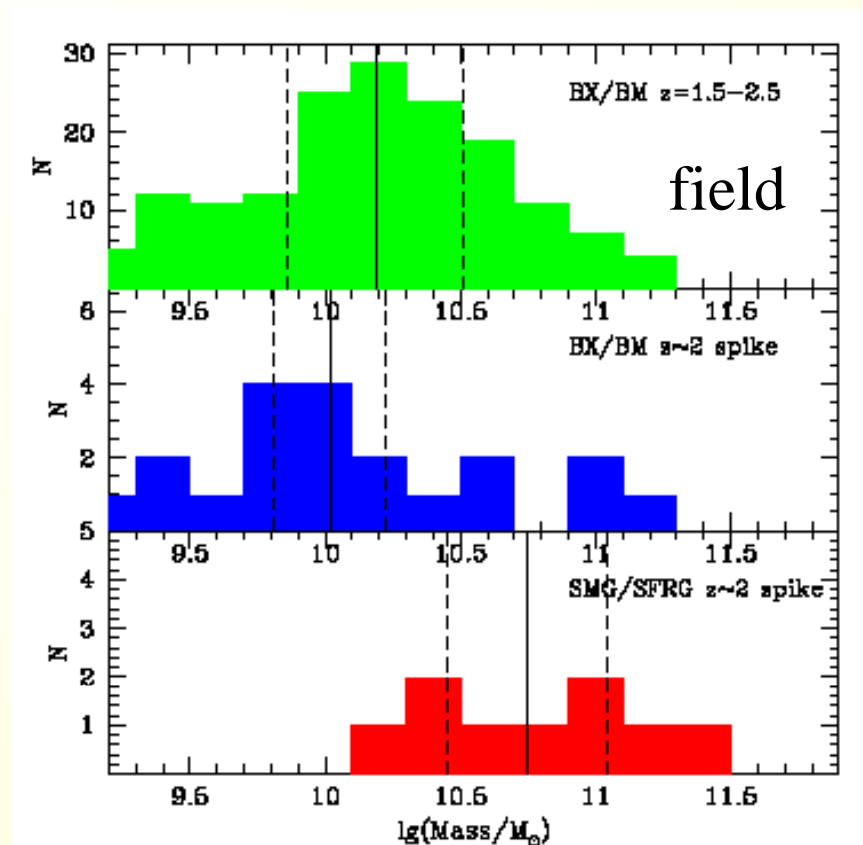
Est-ce que les SMG tracent les halos massifs?

Dans les champs profonds, amas de SMG à $z=1.99$

La plus forte association de SMG (*Chapman et al 2009*)

Surdensité de 10. Mais seulement 2 en galaxies UV

→ Seulement faible surdensité, avec forts starbursts

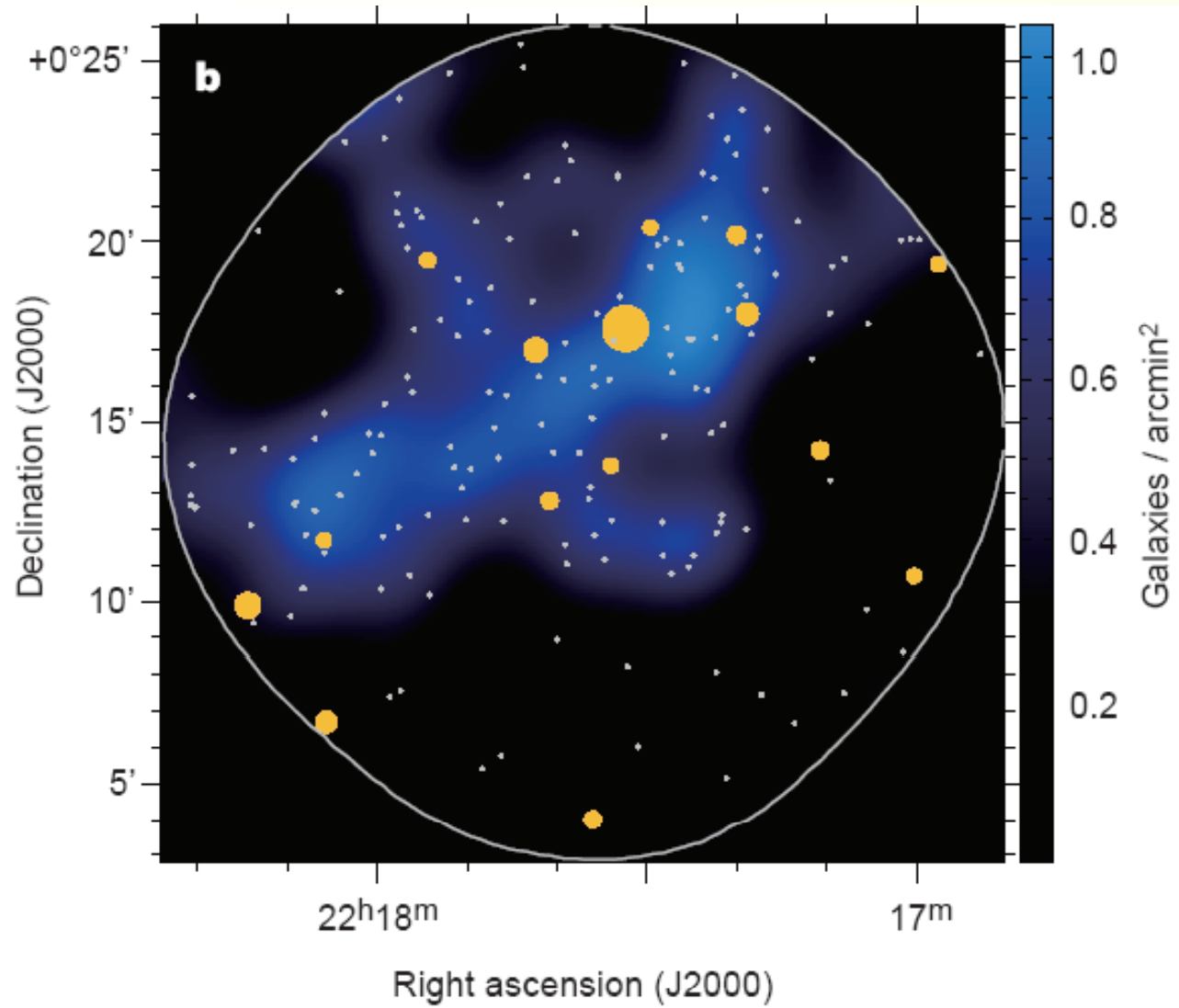


Périodes de fusions actives
dans des structures de masse
modeste

→ Biais de fusion

Herschel et ALMA vont
Cartographier divers
environnements

SMG dans les filaments d'objets Lyman- α



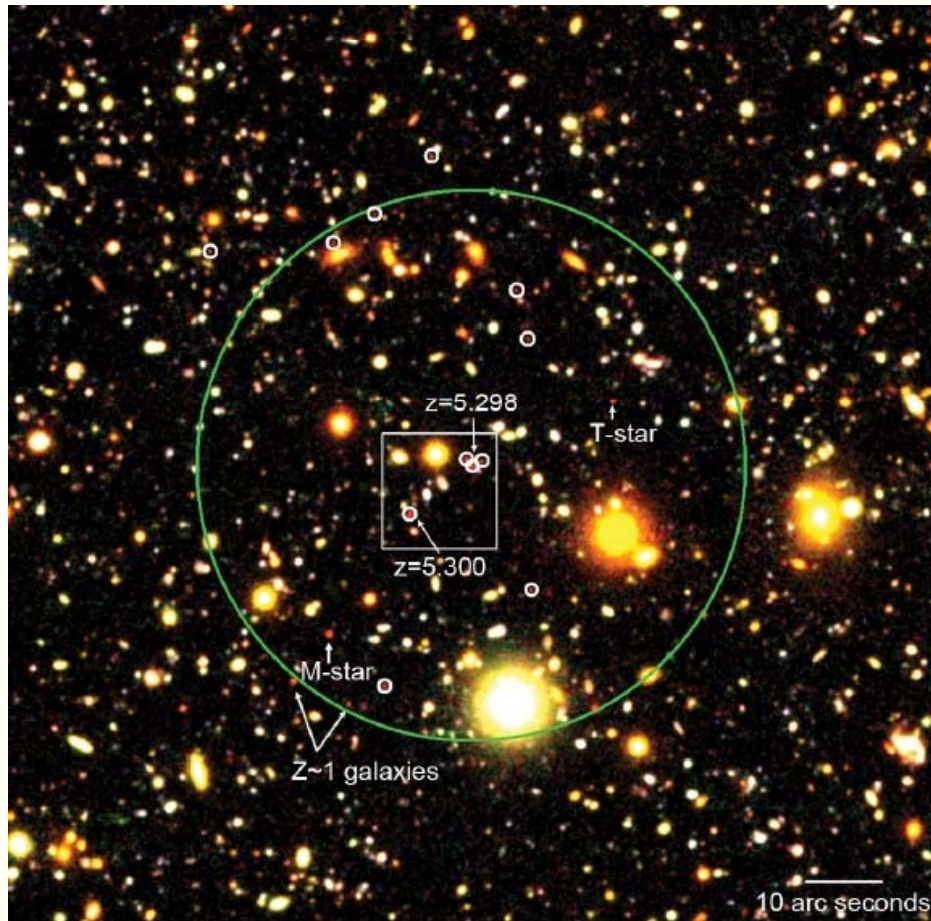
SSA22
Protocluster region
 $z=3.1$

Filament colour
from LAE

SMG 1,1mm from
AzTEC on ASTE

$S > 2.7$ mJy
Size \propto flux

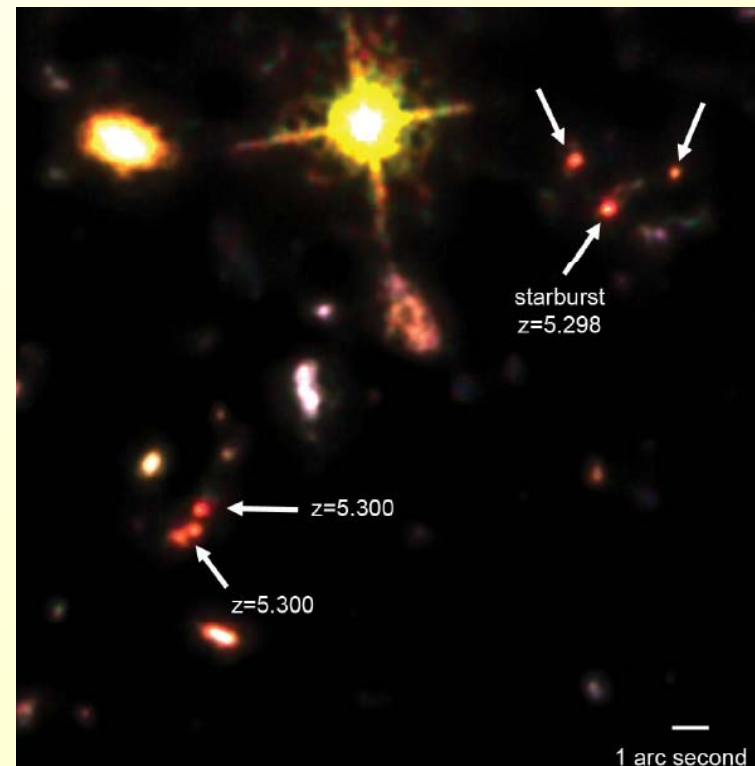
Un proto-amas massif à $z=5.3$



- Protocluster region
- 13 Mpc
- Includes QSO
- SMG COSMOS
- Aztec-3
- Total $> 4 \cdot 10^{11} \text{ Mo}$

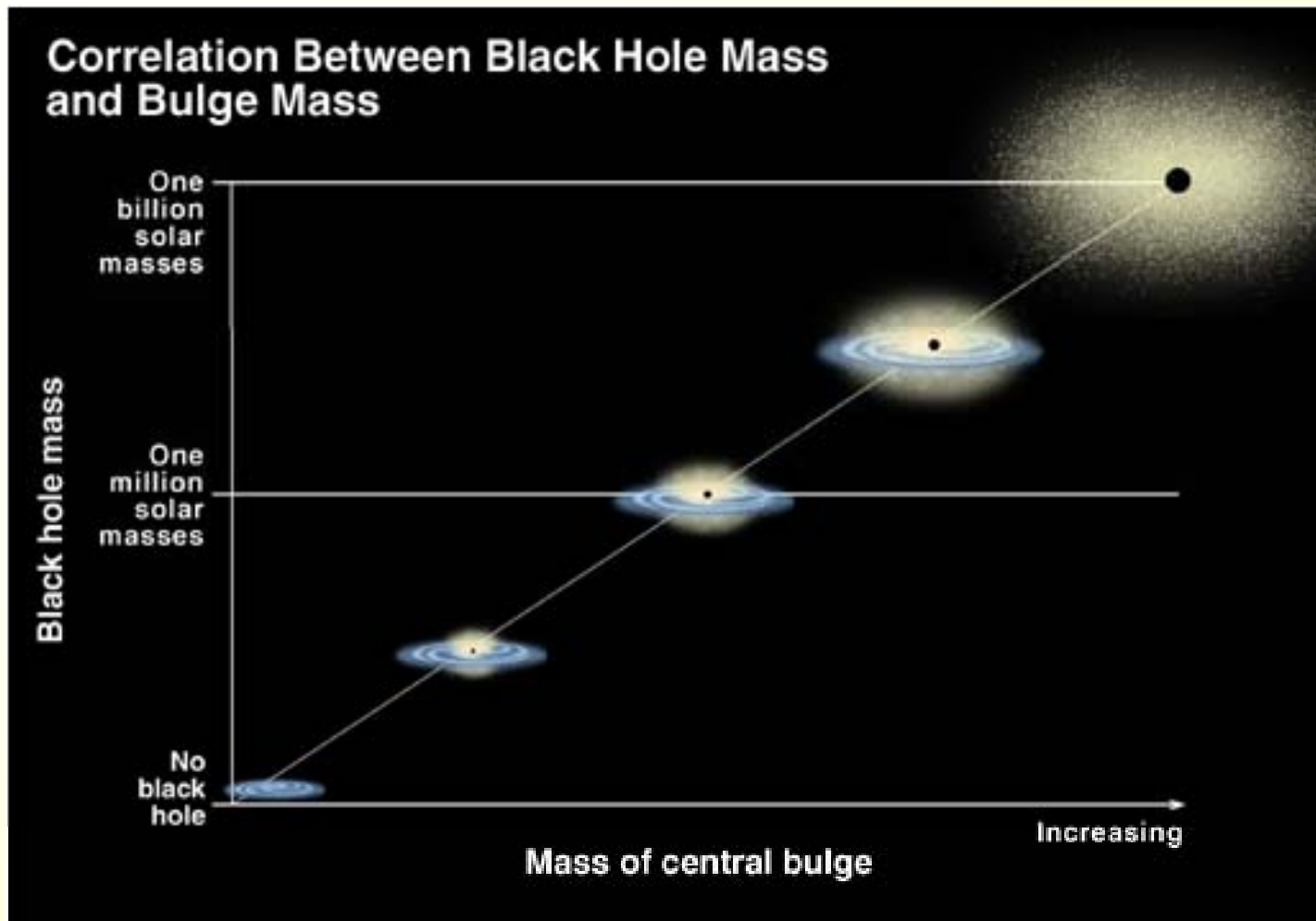
COSMOS-Aztec3 $M_{H2} = 5 \cdot 10^{10} \text{ Mo}$
70% gas, cD? Capak et al 2011

Carilli et al 2011: GN20 $z=4.05$

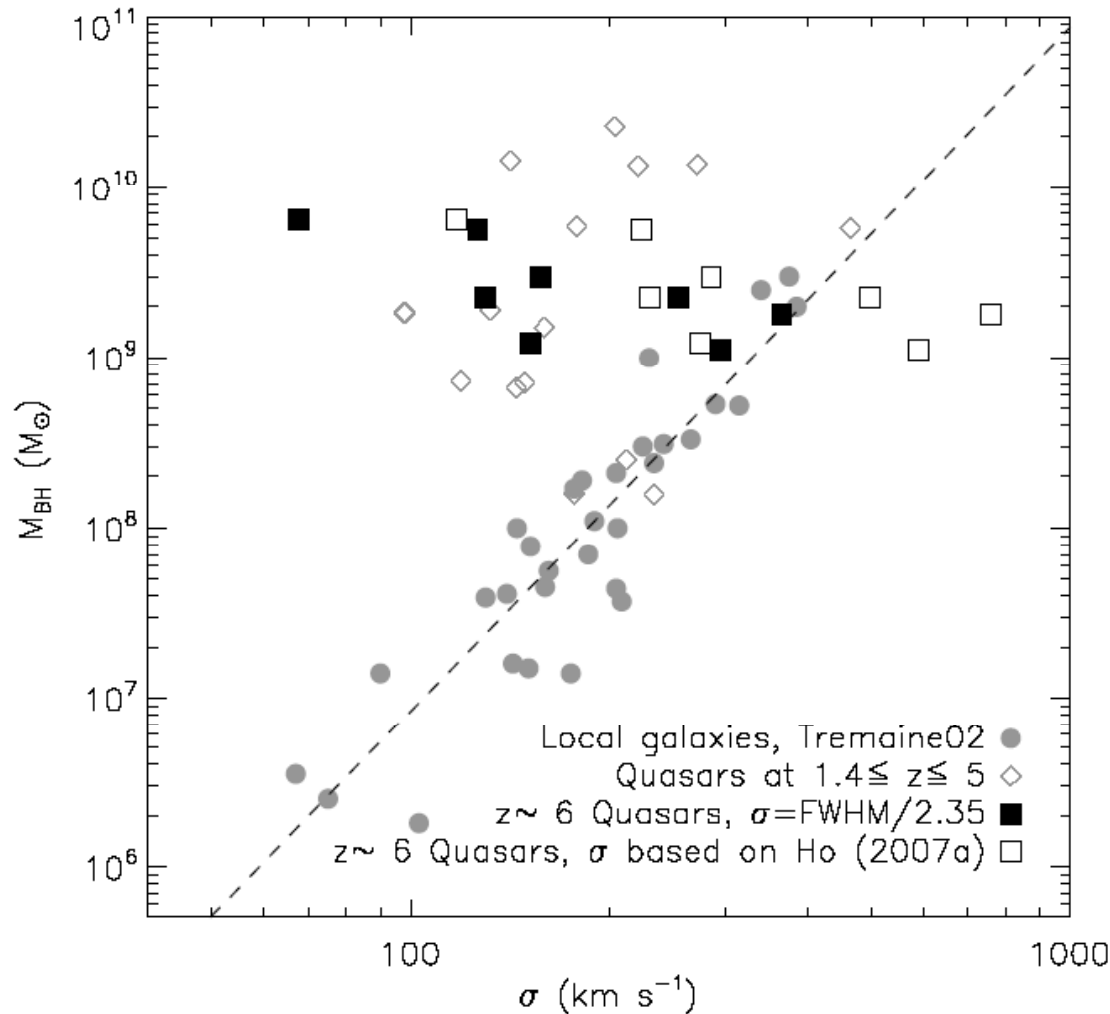


Co-habitation trou noir - Galaxie

Qu'en est-il au début de l'Univers?



MBH – Masse bulbe (ou σ)



QSO à $z=6$

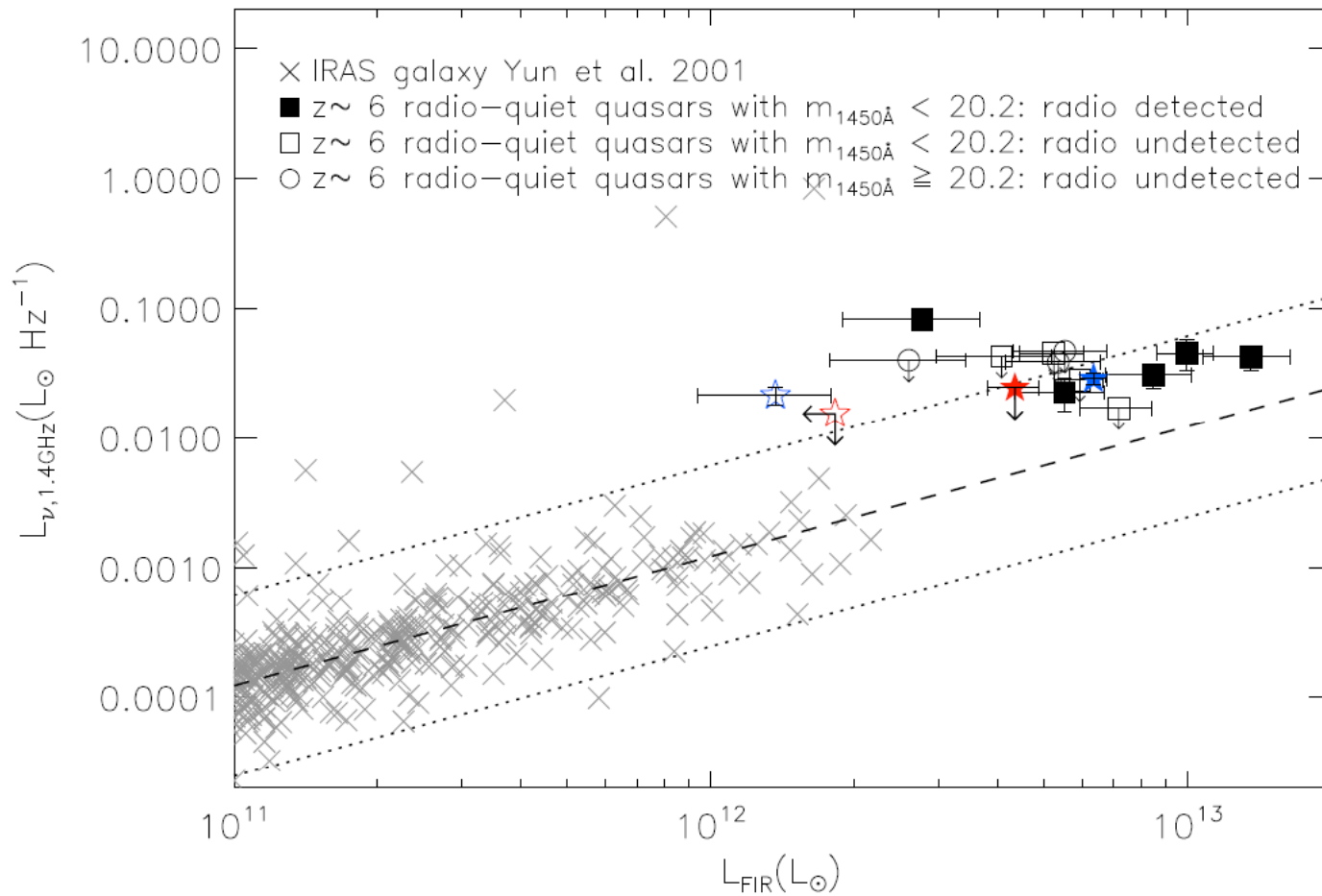
→ La masse des trous noirs est plus grande que prévue

Mais:
Inclinaison incertaine

biais ?

→ ALMA pourra donner la morphologie, et les inclinaisons

Quasars faibles à $z=6$



Filled *

**Blue: optically
bright QSO**

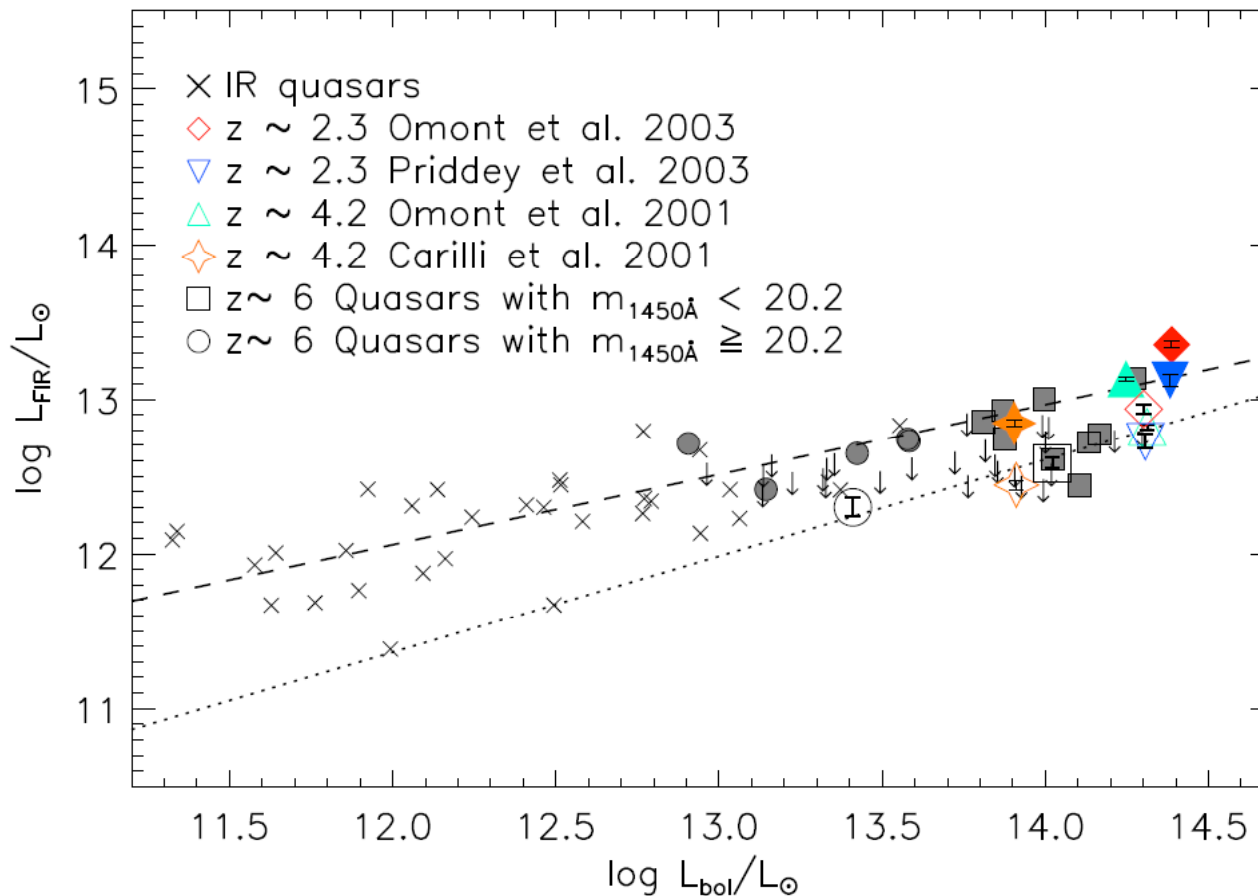
**Red: optically faint
QSO**

MAMBO detected

Empty *

Upper limits

Luminosité tous quasars



Dash ---

LFIR $\sim L_{\text{bol}}^{0.45}$

Submm

detected

z=2-6

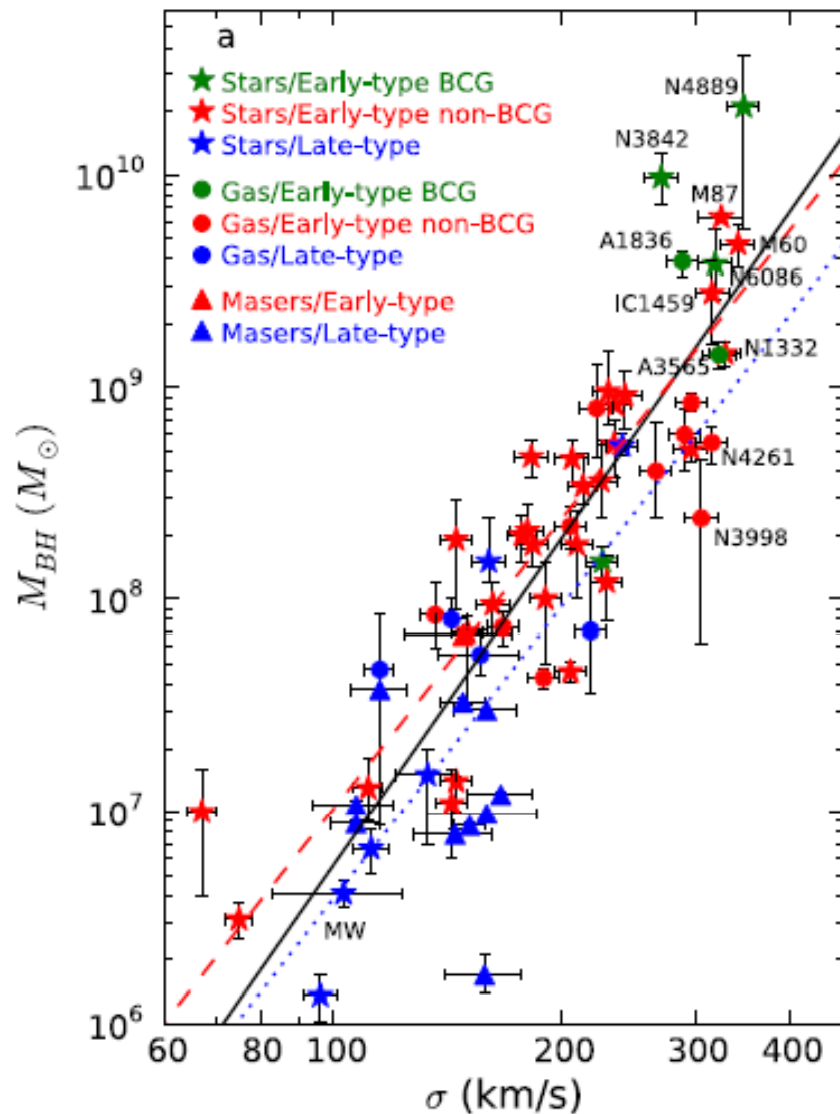
Dots

LFIR $\sim L_{\text{bol}}^{0.62}$

All high-z QSO

Quasars sont aussi
des starbursts avec
qq 100 Mo/yr

Masse du trou noir et masse du bulbe



Les deux masses sont proportionnelles $\sim 1/700$

Parfois, on arrive un peu au-dessus, dans les amas de galaxies

Galaxies cannibales au centre

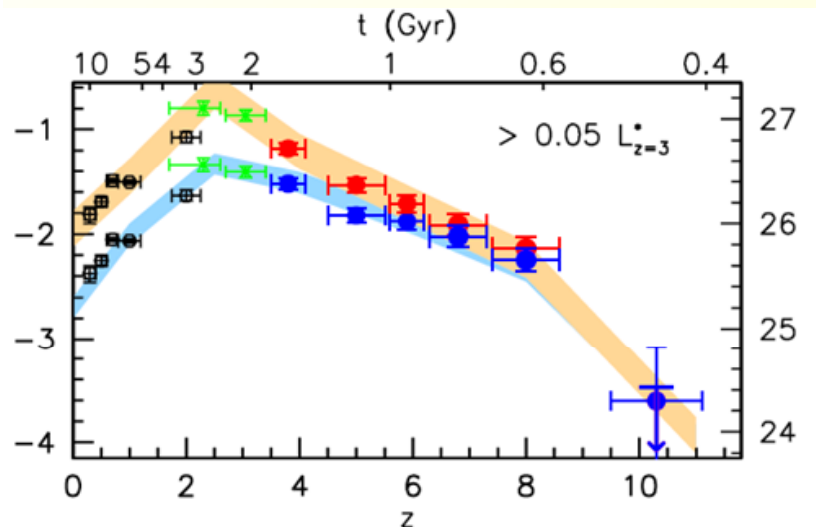
Avalent le gaz chaud avant la formation d'étoiles?

Perspectives avec ALMA, JWST, hypertélescopes..

- Morphologie détaillée, IR, optique dans le réf au repos
Composant stellaire, cinématique
- Le gaz moléculaire sera déterminé à grand z avec ALMA
→ efficacité de formation stellaire (z), cinématique, M_{dyn} , MBH

→ Détermination de la formation des premières étoiles

Histoire de la formation stellaire



→ SFH + MH2 → SFE