
Intensity mapping

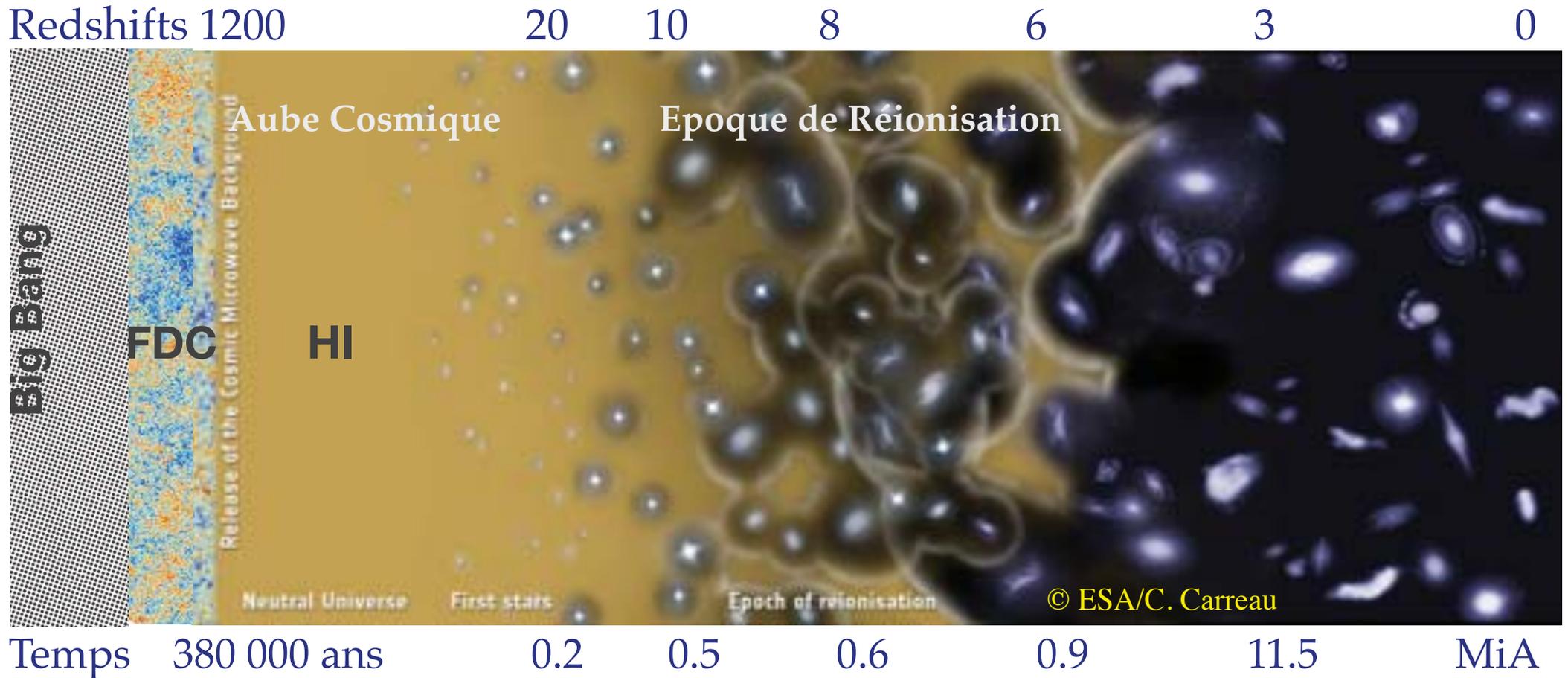
G. Lagache

Laboratoire d'Astrophysique
de Marseille

Collège de France

6 Janvier 2019

Fond diffus cosmologique, Aube cosmique et Epoque de réionisation



De la recombinaison à l'Univers local
... histoire de l'Univers (très brièvement)

Epoque de la réionisation: Quand?

Une percée majeure: Planck collaboration 2016, XLVI & XLVII, Planck collaboration, Planck 2018 results. VI (Cosmological parameters):

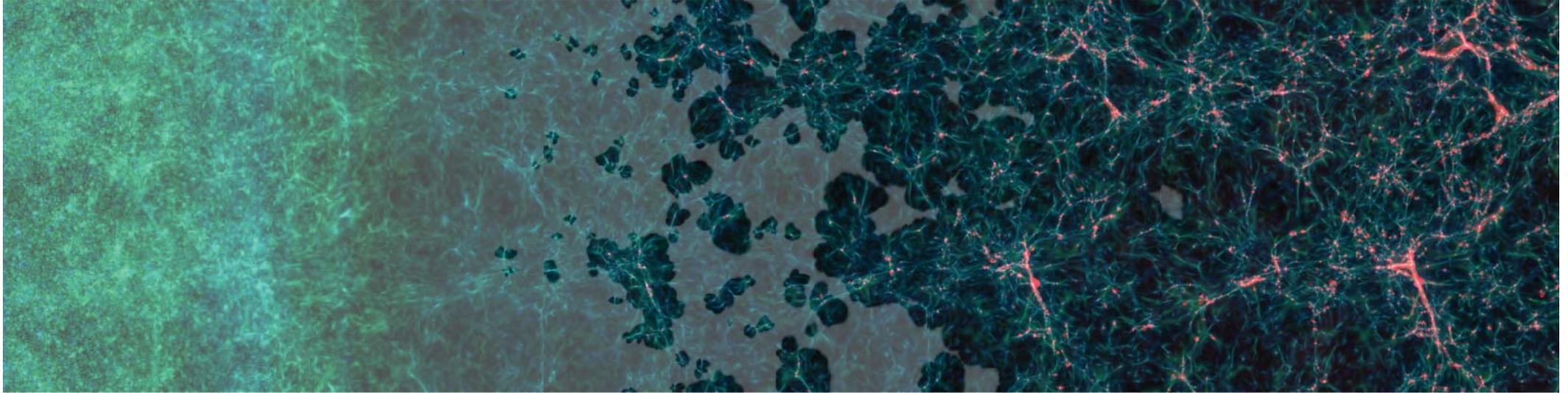
- ❖ Épaisseur optique par diffusion Thomson:

$$\tau(z) = \int_{t(z)}^{t_0} n_e \sigma_T c dt$$

- ❖ $\tau = 0.0544 \pm 0.0073$ (WMAP: 0.089 ± 0.014)
- ❖ Décalage vers le rouge moyen de la réionisation: $\langle z \rangle \sim 7,7$
- ❖ L'Univers est ionisé à moins de 10% à $z > 10$
- ❖ Effet Gunn-Peterson observé sur les lignes de visée des QSO à $z > \sim 6.2$ (absorption de la raie Ly- α par l'hydrogène neutre):
réionisation complète à $z=6$

=> Réionisation très rapide et à portée de mains!

Epoque de la réionisation: qui et comment ?



simulation EMMA, D. Aubert & N. Deparis

... Mais qui et comment?..... on ne sait pas vraiment!

Populations stellaires versus trous noirs, IMF dans les premières galaxies, rôle des supernovae et de la rétroaction radiative, efficacité de la formation d'étoile, structures de l'IGM, évolution de l'UVB, etc..

Des candidats "galaxie" ont été trouvés jusqu'à $z \sim 11$. Leurs populations stellaires sont-elles responsables de la réionisation?

Epoque de réionisation: les galaxies

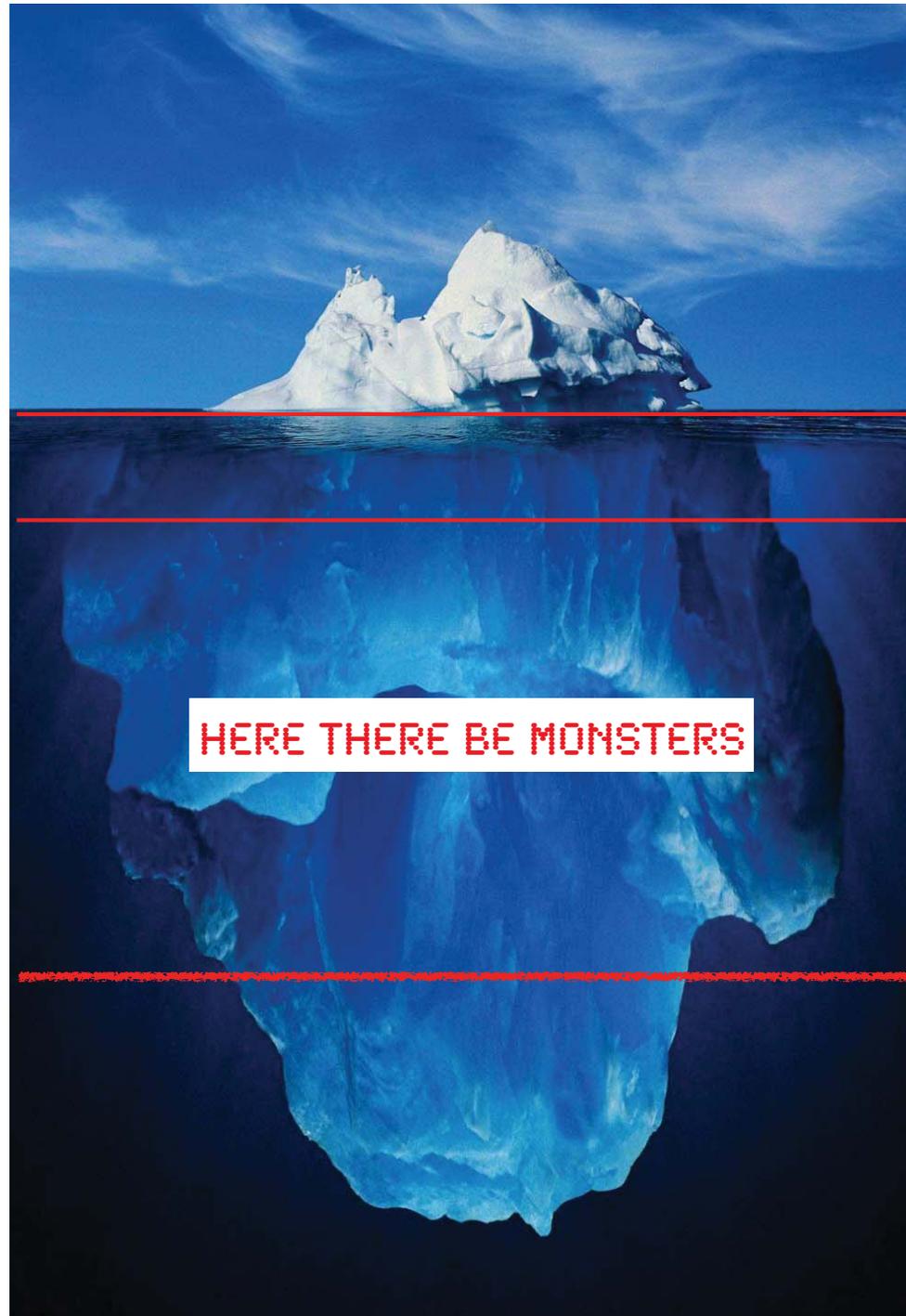
@ $z=8$

Hubble limit

JWST limit

Hidden population of faint and abundant galaxies?

Complete reionisation



$M_{AB}=-22$

$M_{AB}=-18$

-17.5

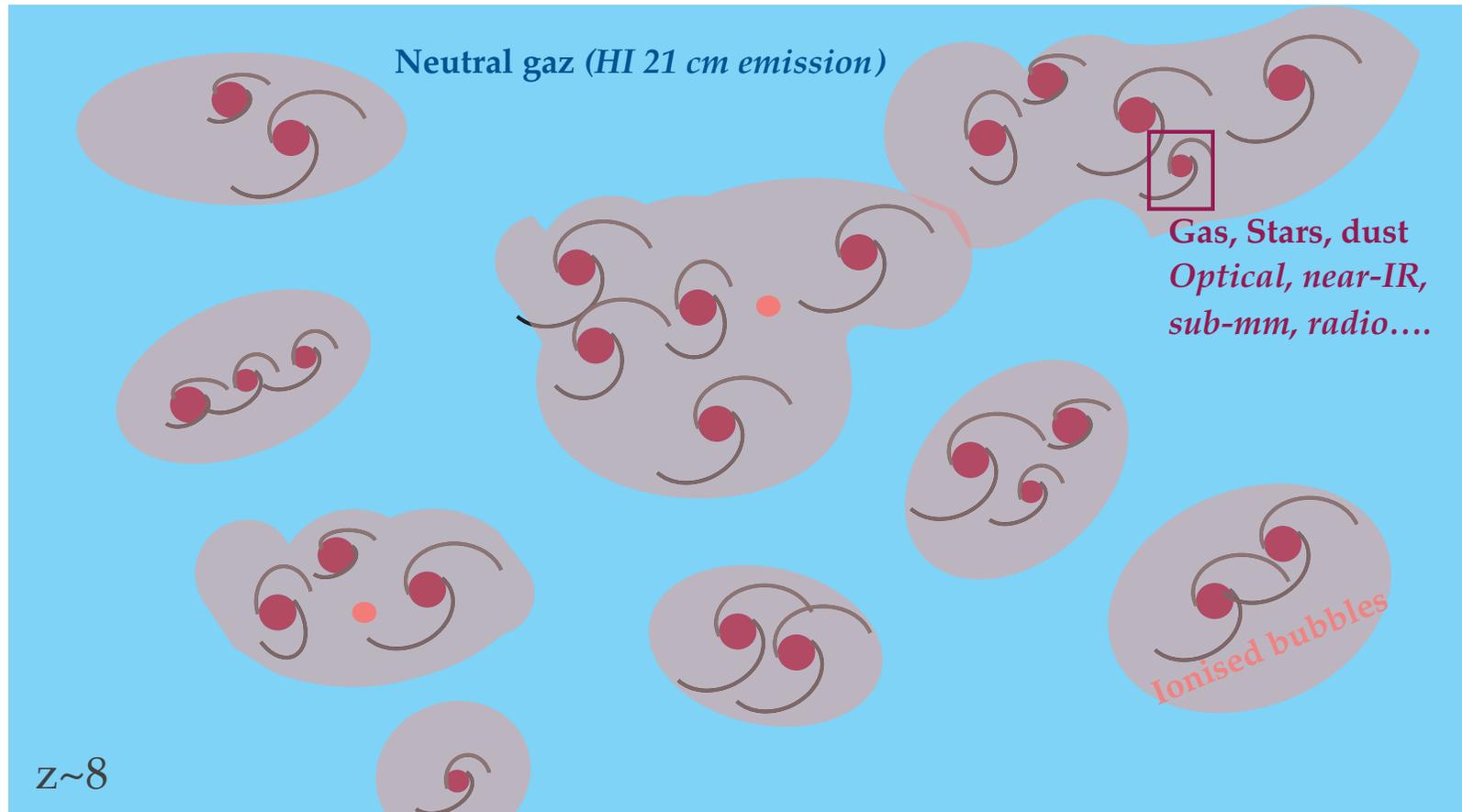
-16

$M_{AB}=-14$

-12

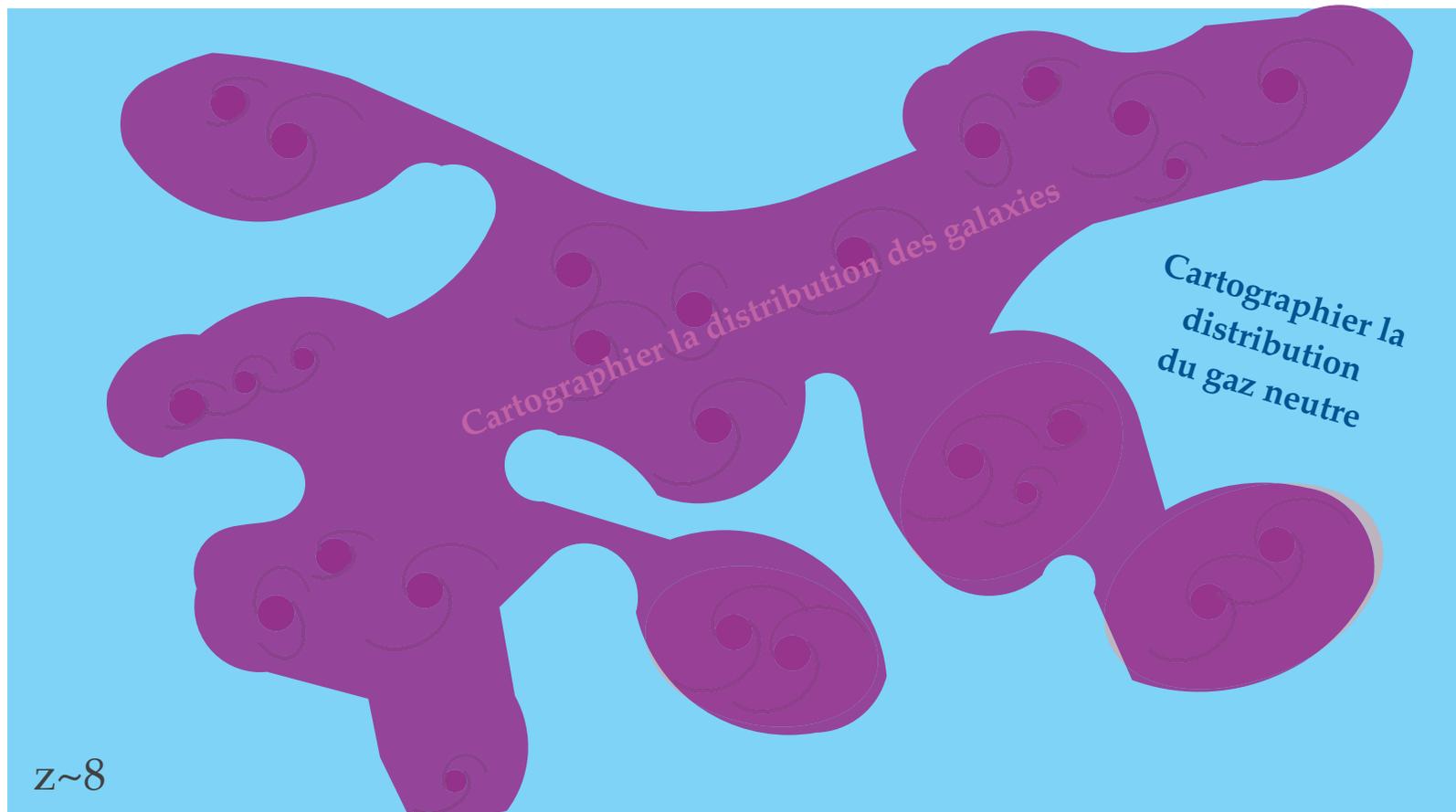
$M_{AB}=-10$

Epoque de réionisation: intensity mapping (idée de base)



Mesure des fluctuations à grande échelle de l'émission de la raie HI
(HI intensity mapping, e.g. LOFAR, SKA)

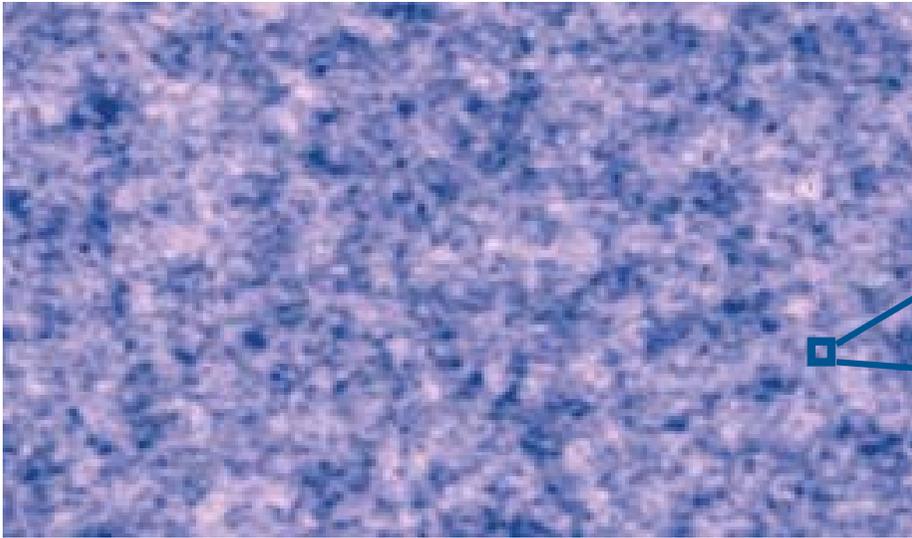
Epoque de réionisation: intensity mapping (idée de base)



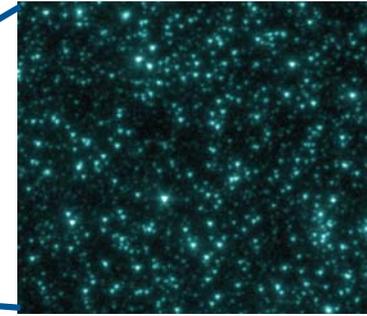
Mesure des fluctuations à grande échelle de l'émission provenant d'un grand nombre de galaxies non résolues

=> Fonds diffus infrarouges et X (mais pas accès au redshift), [CII] & CO

Intensity mapping: idée de base



Intensity mapping
(relevés de galaxies limités par la
confusion)



Relevés de galaxies
(HST, Spitzer,
JWST, ALMA)

Intensity mapping:

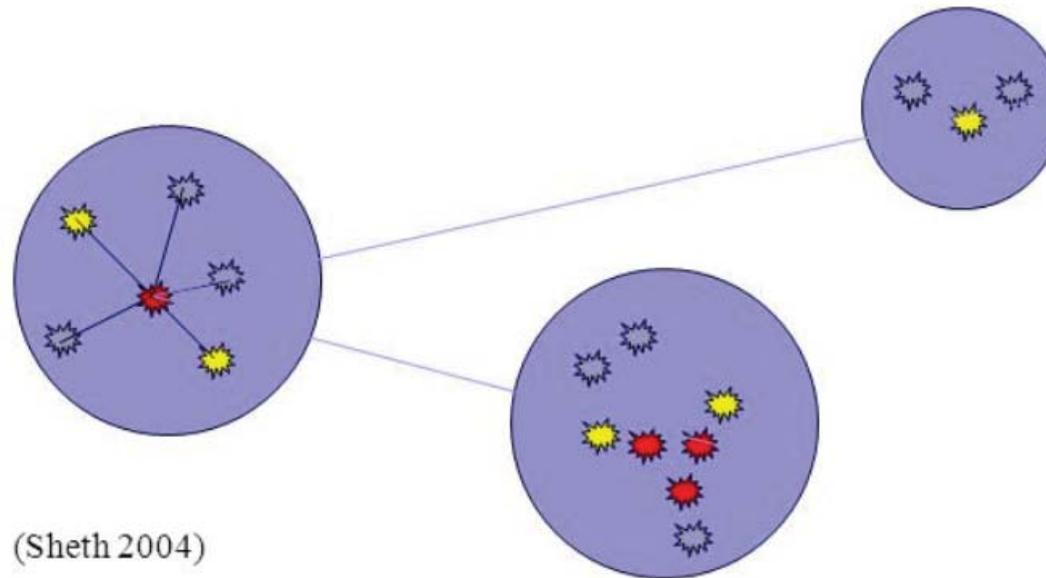
- mesure les fluctuations de brillance en fonction de l'échelle spatiale à une fréquence donnée,
- naturellement sensible à la radiation provenant des sources faibles et du milieu intergalactique diffus,
- outil de base : le spectre de puissance angulaire ; les fluctuations de brillance sont utilisées pour reconstruire le spectre de puissance des fluctuations de matière.

Qu'observe t'on dans le spectre de puissance?

Modèle de halo du regroupement des galaxies

Les galaxies résident dans des halos de matière noire.

A grande échelle, la relation entre la distribution spatiale des galaxies et le champ de densité de la matière noire est paramétrée par le biais b .



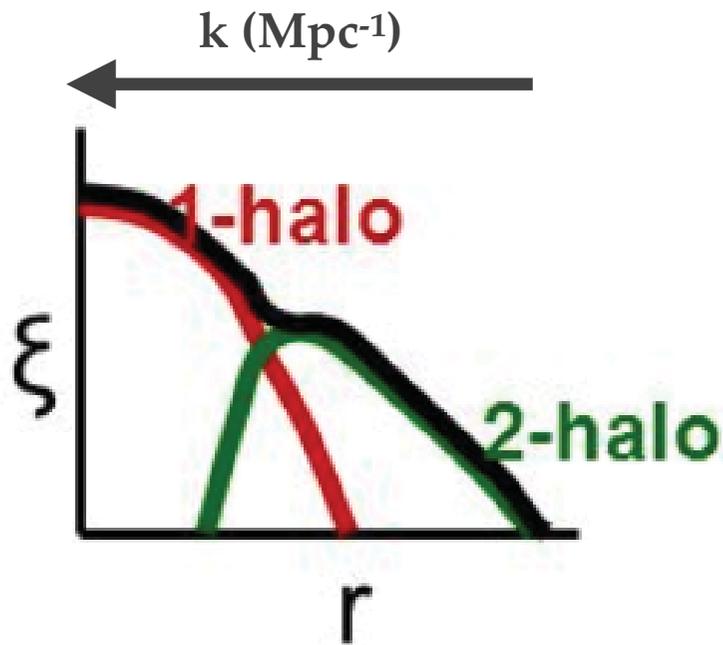
Composante 1-halo: petite échelle, regroupement à l'intérieur d'un halo de matière noire, physique de la formation des galaxies au sein des halos, non-linéaire.

Composante 2-halo: grande échelle, regroupement entre galaxies appartenant à différents halos, linéaire.

$$P(k)_{\text{total}} = b^2(k)P(k)_{\text{linear}} + P(k)_{\text{non-linear}}$$

Qu'observe t'on dans le spectre de puissance?

$$P(k) = P_{1h}(k) + P_{2h}(k) + P_{shot}$$



+

Bruit de Poisson

Bruit de grenaille (ou bruit de Poisson): les galaxies sont des objets discrets — bruit blanc

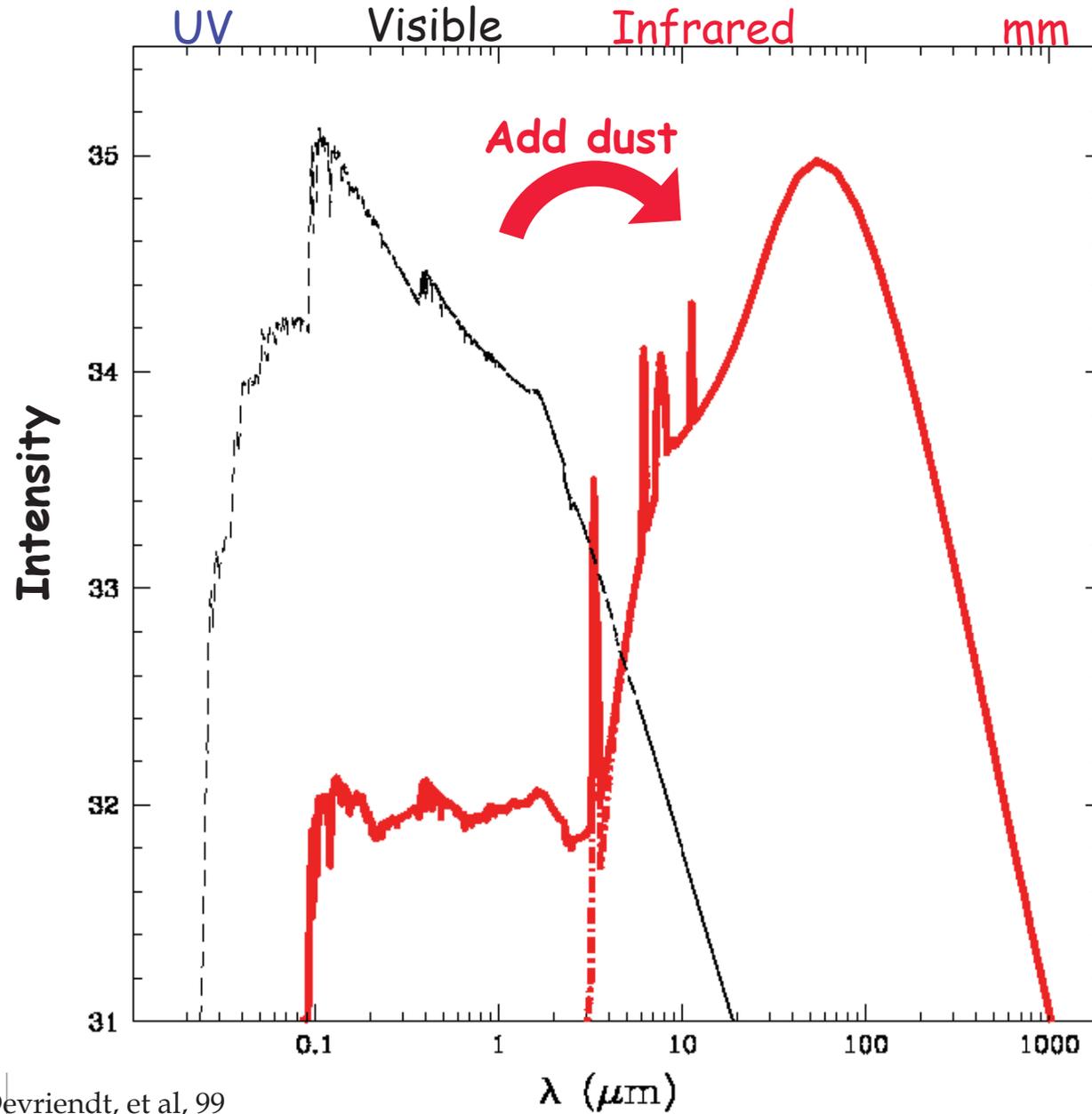
$$\sigma^2 = \int_0^{S_0} S^2 \frac{dN}{dS} dS \quad \text{Jy}^2/\text{sr}$$

Intensity mapping en 2D

Deux fonds diffus infrarouges

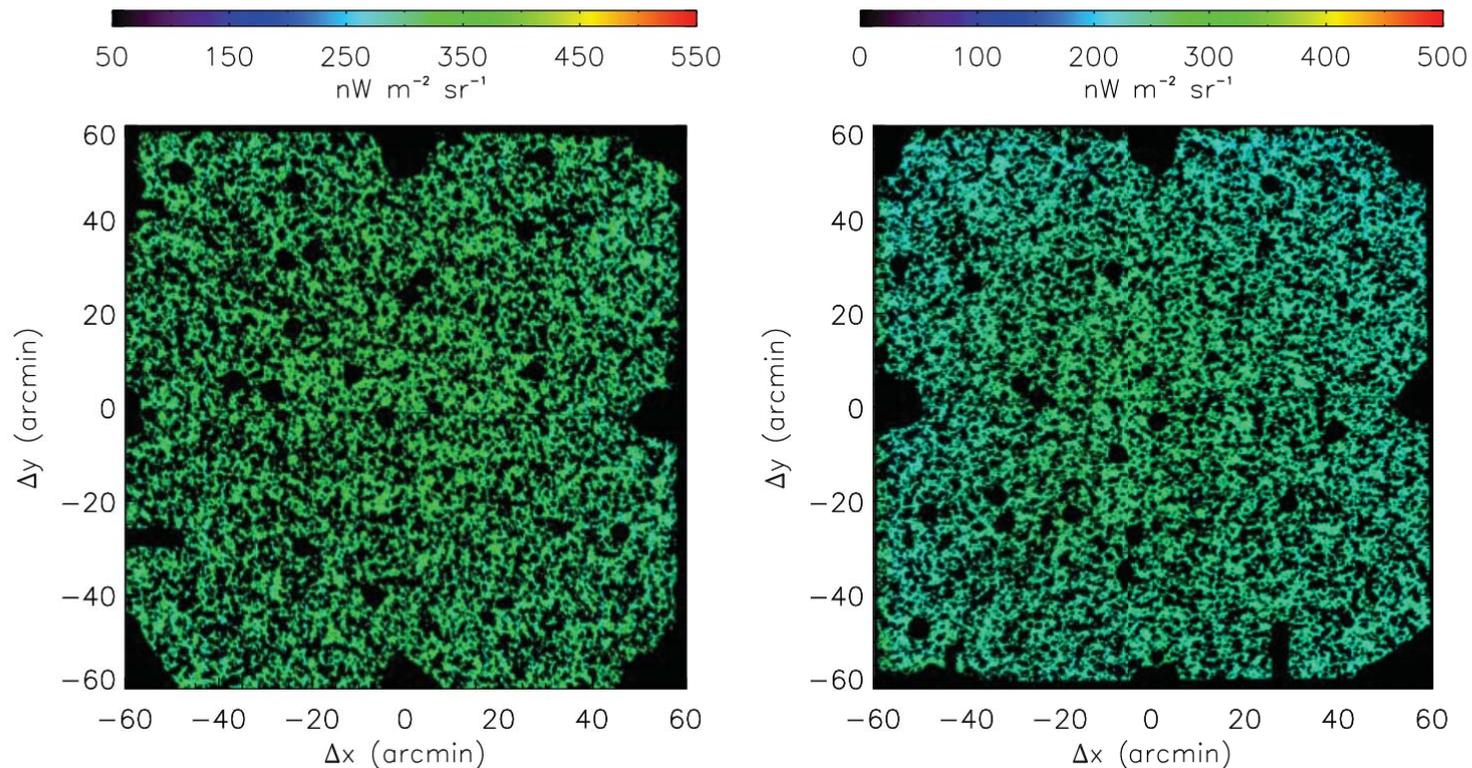
- ❖ Une seule origine :
 - ❖ Emission cumulée de toutes les galaxies sur l'histoire cosmique (tous les z)
- ❖ Deux processus d'émission :
 - ❖ Fond diffus IR proche, **NIRB** (~1-5 microns)
 - ❖ Emission directe des étoiles jeunes: émission dans l'UV (au repos) => IR proche à grand z (=> réionisation)
 - ❖ Emission due à l'accrétion sur les trous noirs ou due aux trous noirs primordiaux
 - ❖ Fond diffus IR lointain, **CIB** (~60 microns - 2 mm)
 - ❖ Emission des poussières: dans le lointain-IR -> mm
 - ❖ Galaxies poussiéreuses formant des étoiles

Effet de la poussière sur le spectre d'une galaxie



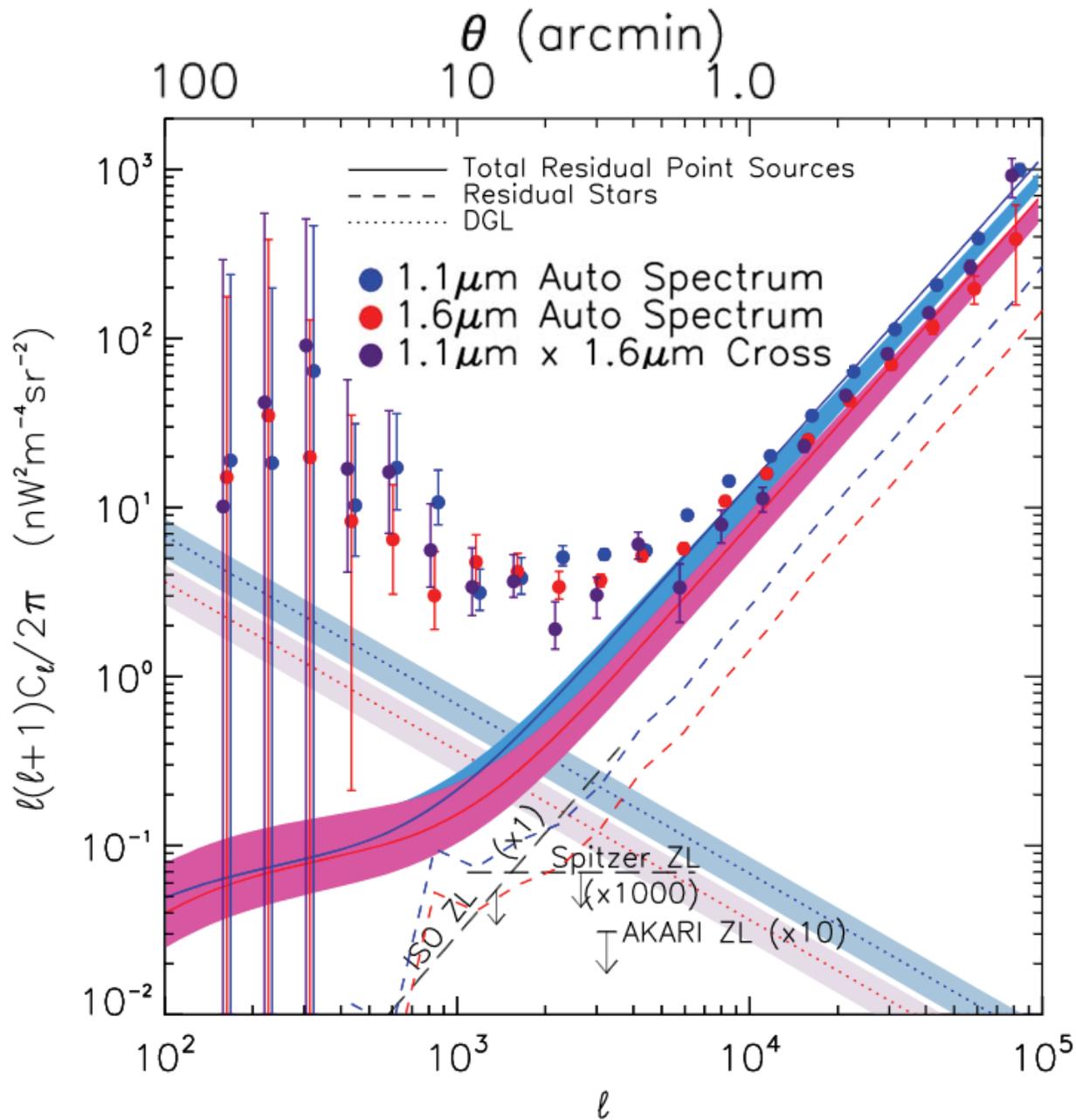
Les fluctuations du NIRB

- ❖ Challenges instrumentaux: obtenir des cartes d'émission diffuse: lumière diffusée, étalonnage des matrices de détecteurs.
- ❖ Intrus à bas z (galaxies mais aussi étoiles): catalogue extérieur et coupure en flux
- ❖ Avant-plans astrophysiques: Lumière zodiacale (variations temporelles), émission Galactiques diffuses (milieu interstellaire de la Voie Lactée), galaxies à bas z en dessous de la coupure en flux.



CIBER 1.1 and 1.6 μm (Zemcov+2014)

Les fluctuations du NIRB



Fluctuations du signal
astrophysique à 1.1 et 1.6 μm
(Zemcov+2014)

.... 60% des pixels sont
masqués

Les fluctuations du NIRB: un débat sur leur origine

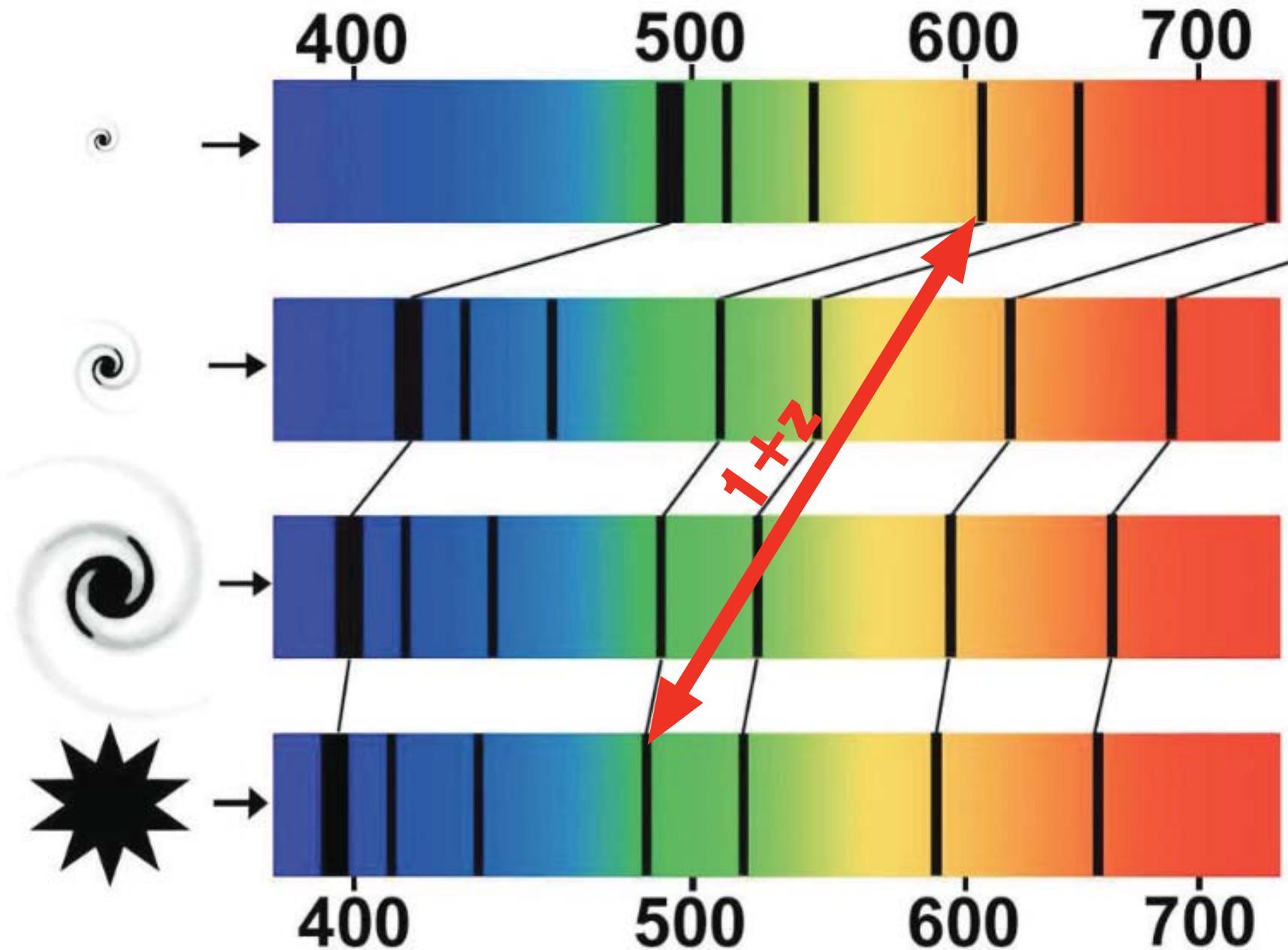
- ❖ Premières étoiles et galaxies primordiales (Fernandez+10, Kashlinsky+12)
 - ❖ Signal trop faible? (Helgason+16)
- ❖ Lumière intra-halo, provenant d'étoiles éjectées de leurs galaxies parentes lors d'interactions de marée (Cooray+12)
 - ❖ Cappelluti+17 (Spitzer - X): seulement si une fraction substantielle des étoiles orphelines (plus grande que celle observée dans les galaxies) sont des binaires X ou des pulsars.
- ❖ Accrétion sur les trous noirs, ou trous noirs primordiaux
 - ❖ Trous noirs primordiaux à $z > 12$ invoqués pour expliquer la corrélation croisée entre les fluctuations à 3.6 microns et le fond diffus X (Yue+13) - Mais le modèle produit une densité de masse accrétée sur les trous noirs supérieure à la valeur observée localement (Helgazon+16).
- ❖ Voir Kashlinsky+18 (arXiv:1802.07774) pour une revue récente

Démêler les contributions relatives des sources à bas et grand z est loin d'être trivial

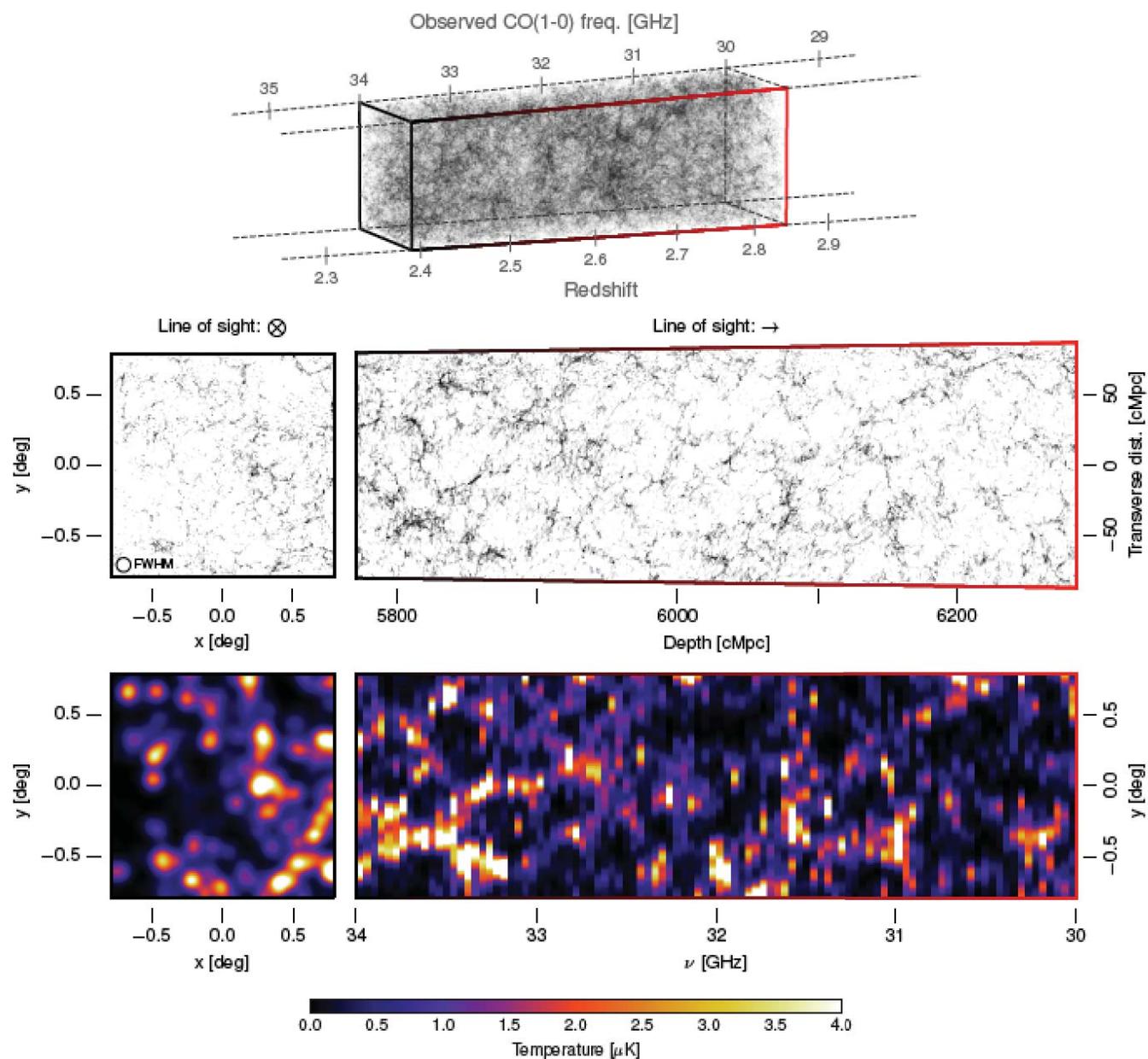
=> besoin du redshift!

Intensity mapping en 3D

Utiliser une raie d'émission (d'absorption) pour avoir le redshift



Intensity mapping en 3D



Intensity mapping en 3D

- ❖ Fluctuations de brillance, comme les fonds diffus IR et X (et le fond diffus cosmologique) mais en 3D.
- ❖ Bonne résolution spectrale, et donc information en redshift.
- ❖ Grandes régions du ciel (plusieurs degrés carrés) dans une grande bande de fréquence (et donc de redshift, $\Delta z \sim 4$).
- ❖ Relevés limités par la confusion:
 - ❖ Faible résolution angulaire: science des LSS, économique.
 - ❖ Similaires en principe aux relevés spectroscopiques des galaxies, mais plus rapides et non biaisés.

Quelles raies?

- ❖ Critères:
 - ❖ Raie forte (le signal d'IM est faible)
 - ❖ Observation: sol versus spatial ; antenne unique versus interférométrie
 - ❖ Potentiel scientifique identifié

- ❖ Raies UV/Optique/proche-IR:
 - ❖ **Ly α** , H α 6563, H β 4861, OIII 5007 Angström

- ❖ Raies IR lointain/mm/radio
 - ❖ **HI 21cm, CO, [CII]**, [NII] 122 and 205 μ m, [CI], [OIII] 88 μ m

- ❖ Raies IR moyen
 - ❖ Hydrogène moléculaire

La raie HI à 21 cm

- ❖ Transition atomique entre les deux sous-niveaux de la structure hyperfine du niveau fondamental de l'atome d'hydrogène
- ❖ Milieu neutre et nuages de gaz denses:
 - ❖ Emission: milieu neutre dans les galaxies à $z < 0.2$ (SKA1: $z < 1.7$)
 - ❖ Absorption: le long de la ligne de visée des quasars à grand z : unique pour tracer le gaz neutre froid ($T < 300\text{K}$) dans les galaxies — jusqu'à $z \sim 3.5$

Sonde la plus directe de l'époque de réionisation

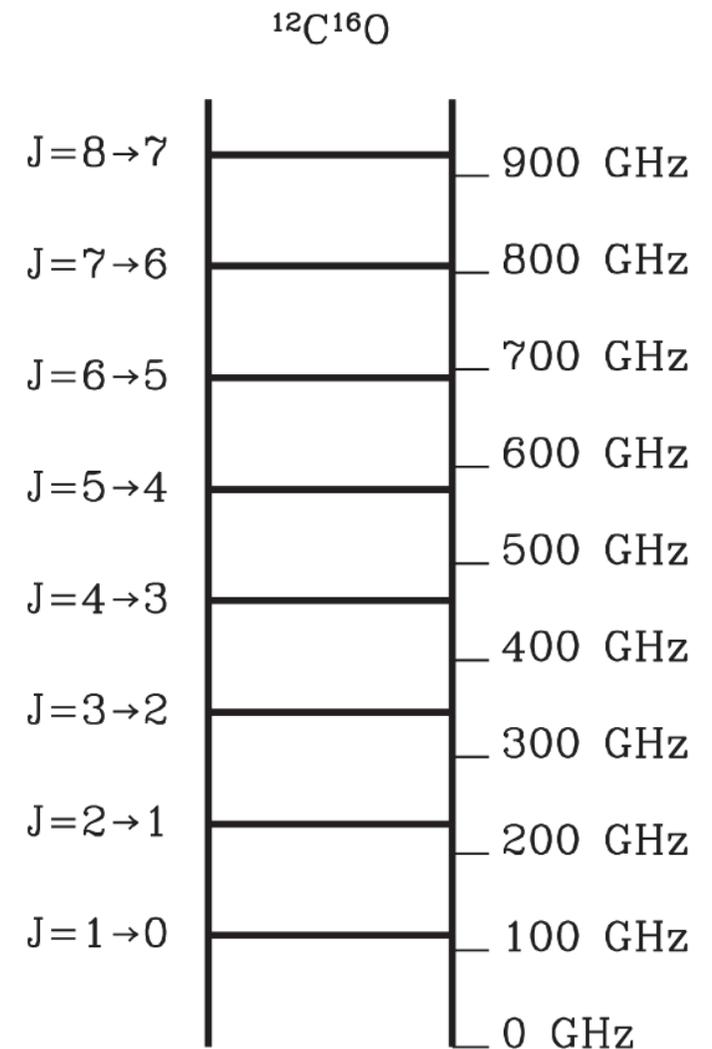
Les raies de CO

- ❖ Le monoxyde de carbone CO est une molécule diatomique polaire.
- ❖ Moment dipolaire électrique permanent tourne à une vitesse angulaire constante, de sorte que la molécule rayonne en fonction de sa fréquence de rotation.
- ❖ Energie cinétique de rotation:

$$E_{\text{rot}} = \frac{J(J+1)\hbar^2}{2I}, \quad J = 0, 1, 2, \dots$$

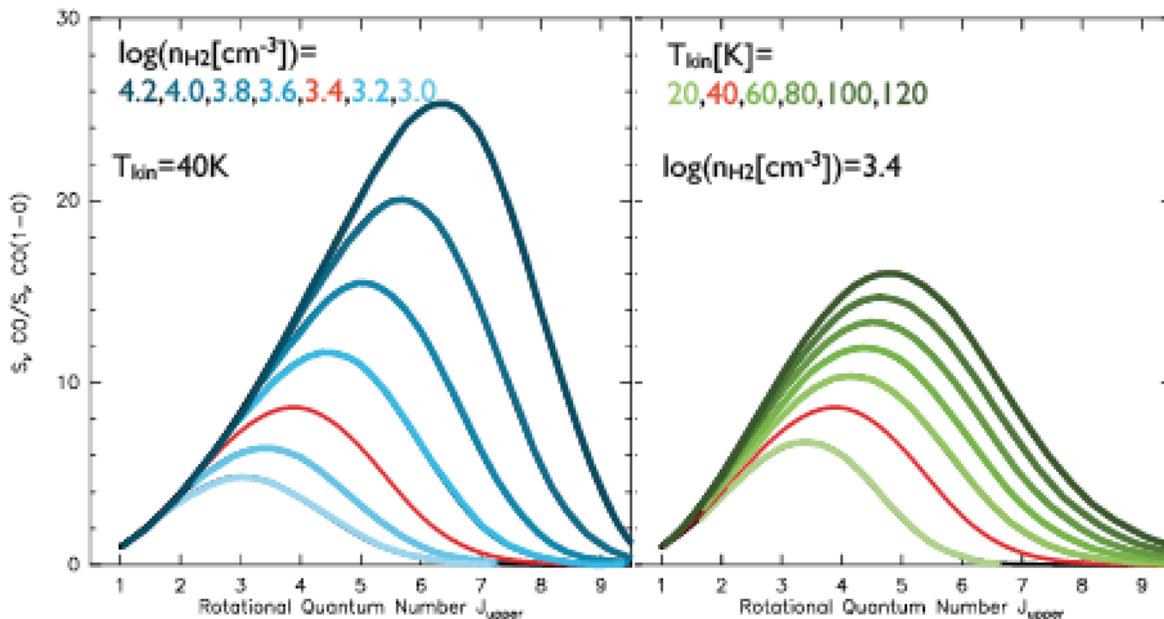
(I = moment d'inertie)

- ❖ CO(1-0) = 115.271208 GHz (~2.6 mm)

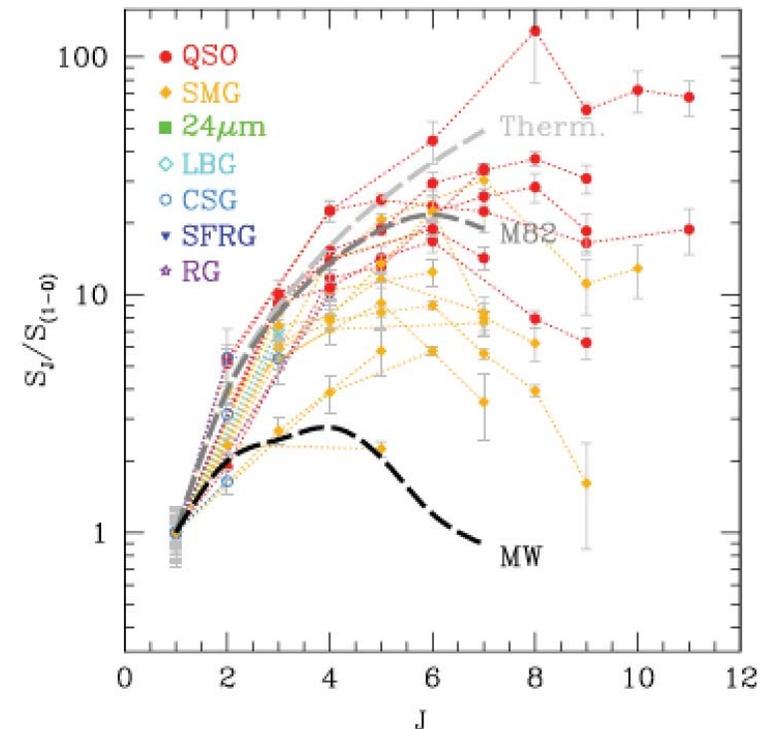


Les raies de CO

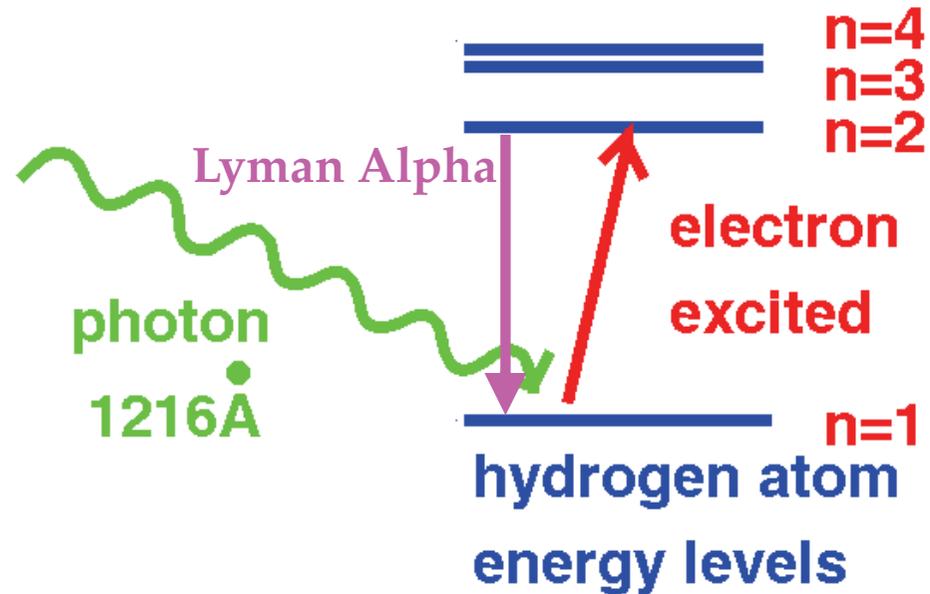
- ❖ Les intensités relatives des différentes raies de rotation dépendent de la température et densité du nuage.
- ❖ La densité critique de la raie J=1-0 est seulement de $\sim 700 \text{ cm}^{-3}$
 - ❖ Beaucoup de nuages moléculaires Galactiques ont des densités supérieures => Emission CO J=1-0 Galactique forte et répandue.
 - ❖ n_{cr} est ~ 50 fois plus grand pour J=3-2



Carilli & Walter 2013



La raie Lyman Alpha



Changement du niveau d'énergie de l'électron: $n=2 \rightarrow n=1$

Cas d'intérêt pour la cosmologie : l'absorption.

Les absorptions et émissions arrivent fréquemment.

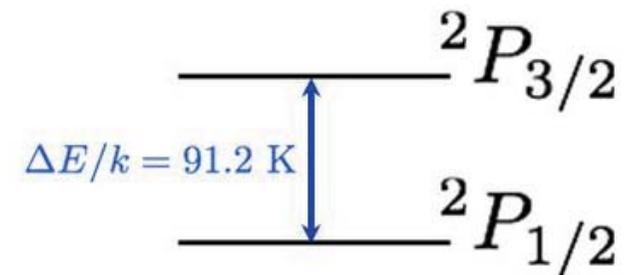
Nous renseigne sur la présence d'Hydrogène et d'électrons libres dans l'Univers.

La raie Lyman Alpha

- ❖ Provient principalement du voisinage des étoiles massives et jeunes et en association avec l'accrétion de grande quantité de matière: idéal pour détecter les galaxies jeunes.
- ❖ Beaucoup de processus différents structurent le spectre et la distribution spatiales des photons Ly α => une multitude de propriétés physiques des galaxies peut être étudiée.
- ❖ Mais: interprétation des observations Ly α difficile.
 - ❖ Ly α est une raie de résonance, elle diffuse sur les atomes d'Hydrogène => Provient de régions éloignées de la source d'émission (avec des conditions physiques inconnues).
- ❖ Parmi les inconnues: Fraction d'échappement des photons Ly α ? Effet de la poussière? Impact du transfert au travers de l'IGM?

La raie de [CII]

- ❖ Potentiel d'ionisation du Carbone faible (11.3 eV) => [CII] est la forme dominante (pour une grande variété de conditions)
- ❖ Raie de structure fine à 157.74 μm

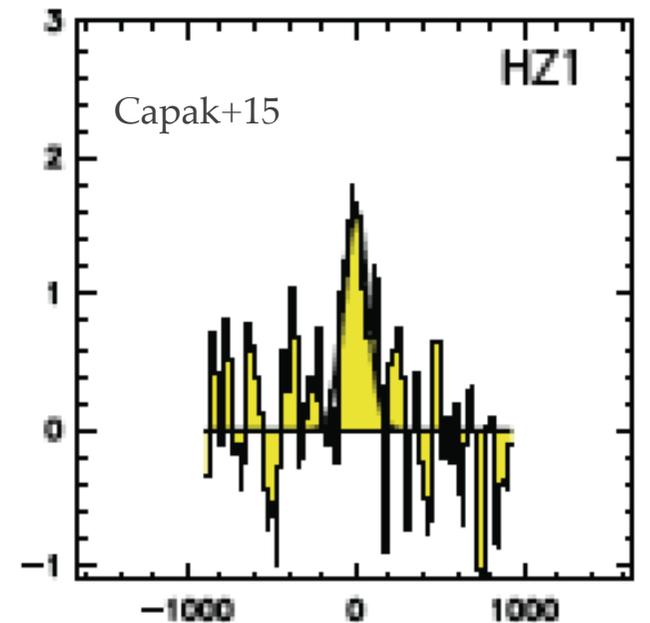
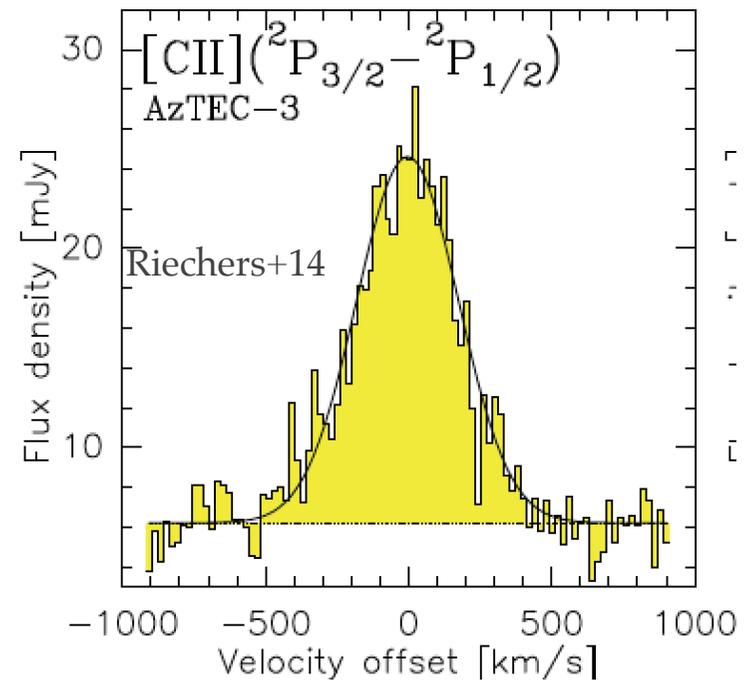


Fine structure of the ground state of C+

- ❖ Excitation de la transition de structure fine peut se faire via les collisions avec les molécules et atomes d'Hydrogène, et les électrons.
- ❖ e.g., pour les conditions du WNM et WIM, la densité critique d'excitation de [CII] par les atomes d'H est de 1300 cm^{-3} , et par les électrons de 45 cm^{-3}

La raie de [CII]

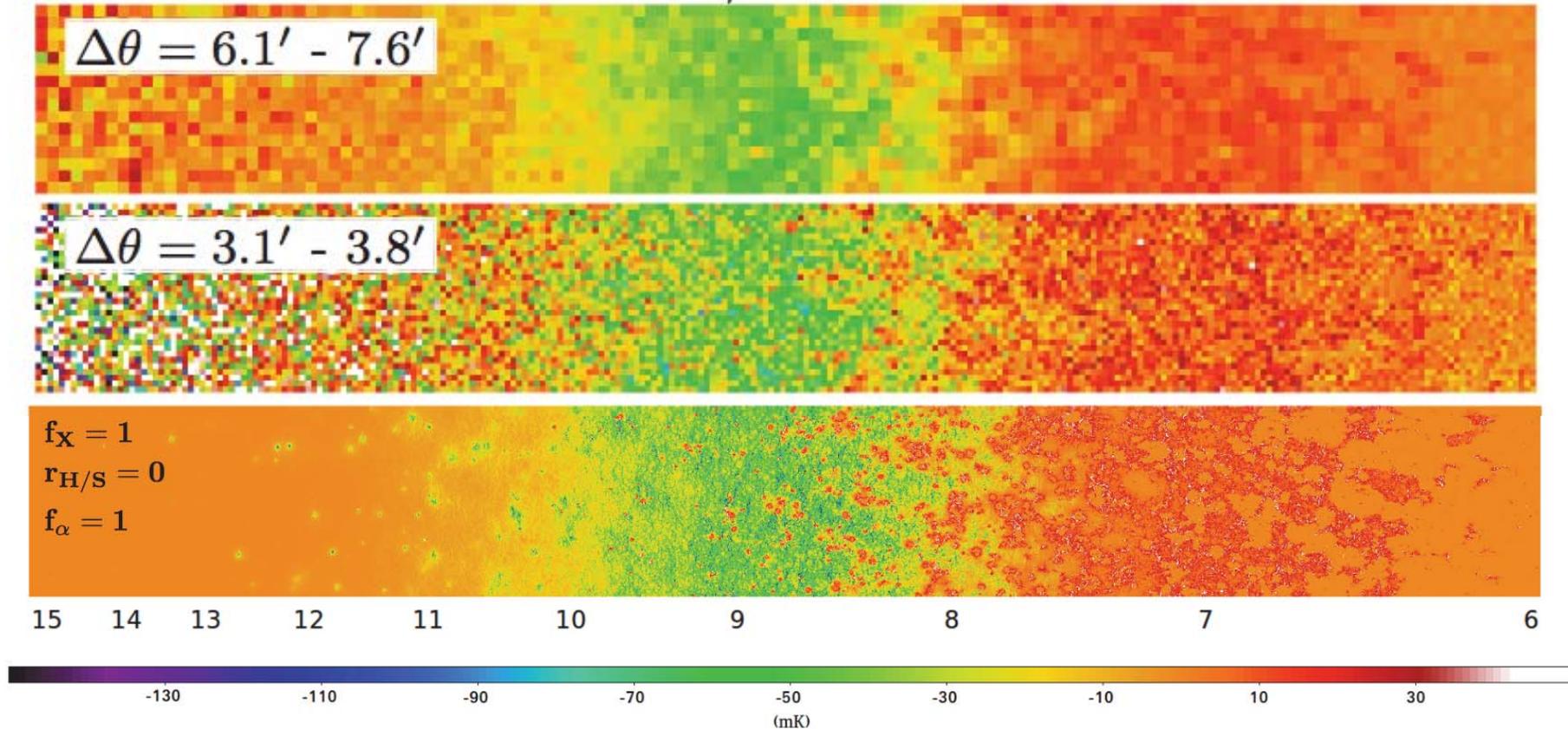
- ❖ Une des raies les plus brillantes dans le spectre des galaxies
- ❖ Un des meilleurs traceurs de la formation d'étoile à très grand z
 - ❖ [CII] à grand z vient principalement des PDR (& CNM)
- ❖ Traceur non biaisé par la présence de poussière
- ❖ [CII] est "redshifté" dans les bandes atmosphériques sub-mm et mm sol pour $z > 4.5$



Intensity mapping: quelle science?

Epoque de réionisation

$$f_X = 1, r_{H/S} = 0, f_\alpha = 1$$



Température de brillance de la raie à 21 cm
Tomographie difficile à $z > 10$

Assemblage des galaxies, formation des étoiles, IGM

- ❖ Caractéristiques physiques moyennes du milieu interstellaire des galaxies distantes
- ❖ Contenu en gaz, masse HI
- ❖ Densité du taux de formation d'étoile:
 - ❖ Dans l'Univers distant: densité du taux de formation d'étoile de populations de galaxies à grand z de tailles relativement réduites (assez brillantes pour être détectées individuellement).
 - ❖ CO et [CII]: proxy pour tracer la formation des étoiles
- ❖ Phases diffuses et faiblement lumineuses du milieu intergalactique; difficile à détecter et caractériser
 - ❖ Densité, évolution, et structuration de l'IGM
- ❖ Relation avec la masse des halos de matière noire
- ❖ Corrélations croisées: LIR/LCO/LCII, quand l'Univers produit de la poussière?, ...

Science clef pour chaque raie

- ❖ **HI:**

- ❖ Réionisation + aube cosmique [+ BAOs]

- ❖ **CO:**

- ❖ Evolution des galaxies ($z \sim 2-3$)

- ❖ **Lyman alpha:**

- ❖ Réionisation + IGM + formation et évolution des galaxies

- ❖ **CII**

- ❖ Réionisation + formation et évolution des galaxies

Modèles et interprétations

Deux approches

❖ Phénoménologiques:

- ❖ Assez simples: construits sur des relations empiriques (e.g. intensité de la raie versus SFR, SFR versus masse des halos).
- ❖ MAIS: les relations d'échelle, basées sur des recettes variées, donnent des amplitudes très différentes sur le spectre de puissance + évolution en redshift de ces relations est souvent mal connue + la puissance de l'IM est de sonder les objets trop faibles pour être détectés individuellement et qui sont donc en dehors des relations d'échelle mesurées.

❖ Simulations numériques et modèles semi-analytiques:

- ❖ Détails sur les processus gouvernant la physique du MIS, capables de prédire simultanément l'émission de plusieurs raies à grand z .
- ❖ MAIS: Nombreuses hypothèses, exigeants en terme de calcul, non flexibles.

❖

Modèles et interprétations

Exemple: Prédiction du spectre de puissance de la raie de [CII] à $z > 4.5$ avec l'approche empirique

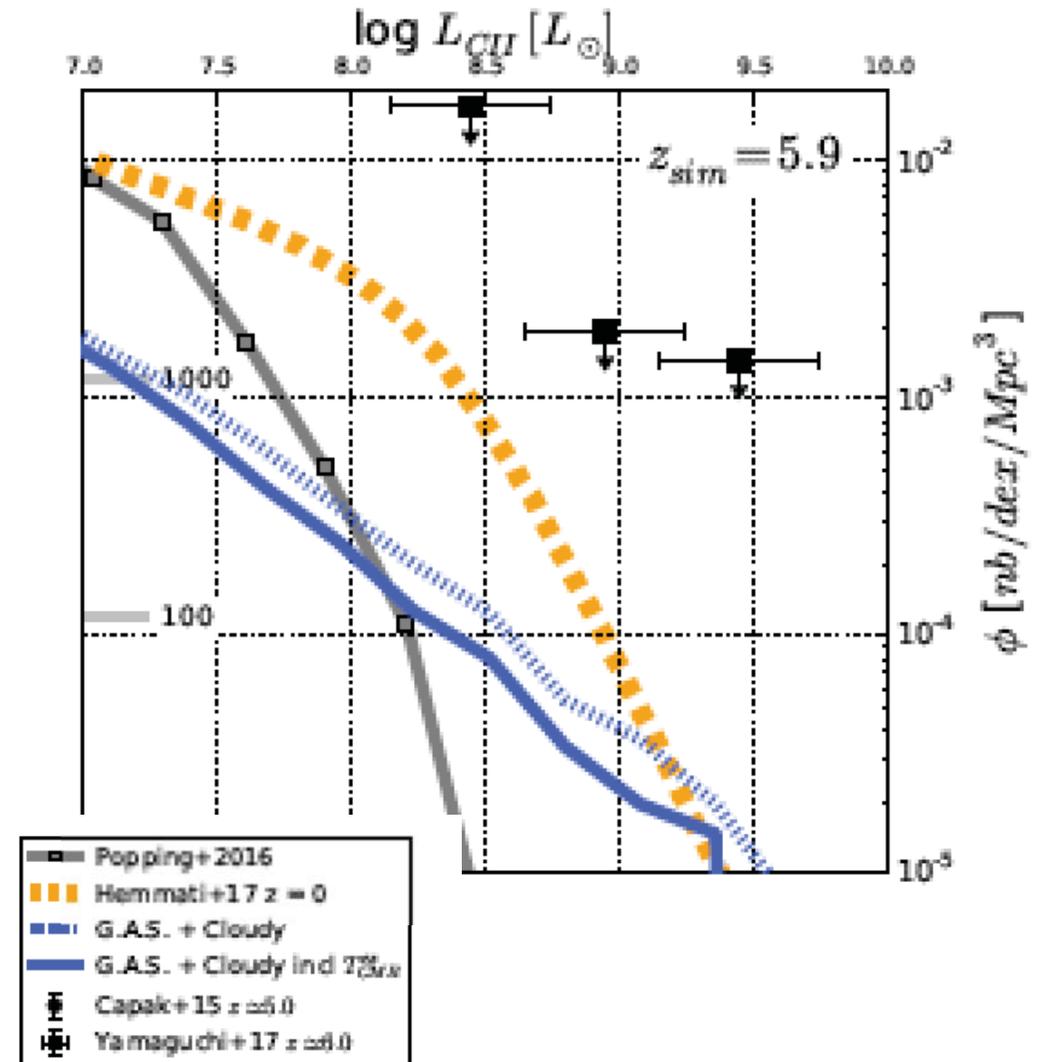
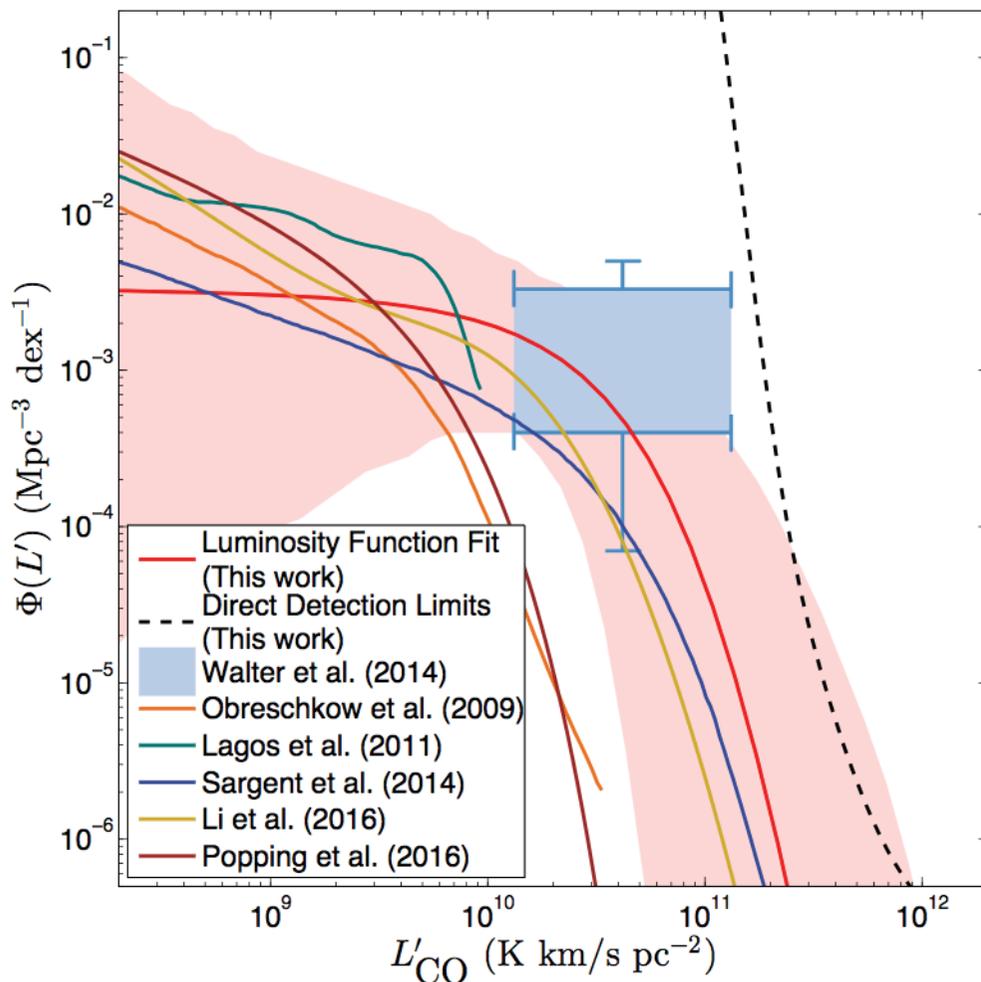
- ❖ Simulation de matière noire (Bolshoi) + relations d'échelle (incluant ou pas les correspondances d'abondances)
 - ❖ $M_{\text{Halo}} / M_{\text{star}} / \text{SFR} / \text{LCII}$
 - ❖ Yue+15, Silva+15, Béthermin+17
- ❖ Prescription du regroupement (biais linéaire) + relations d'échelle
 - ❖ Gong+12, Silva+15
- ❖ A partir du CIB:
 - ❖ Modèle de halo (contraintes du CIB) + SFRD + relation $L_{\text{FIR}}/\text{LCII}$
 - ❖ Serra+16
 - ❖ **Différence d'un facteur 10 !!**

Modèles et interprétations

Fonctions de luminosité CO et CII:

Apport précieux pour les modèles de formation des galaxies

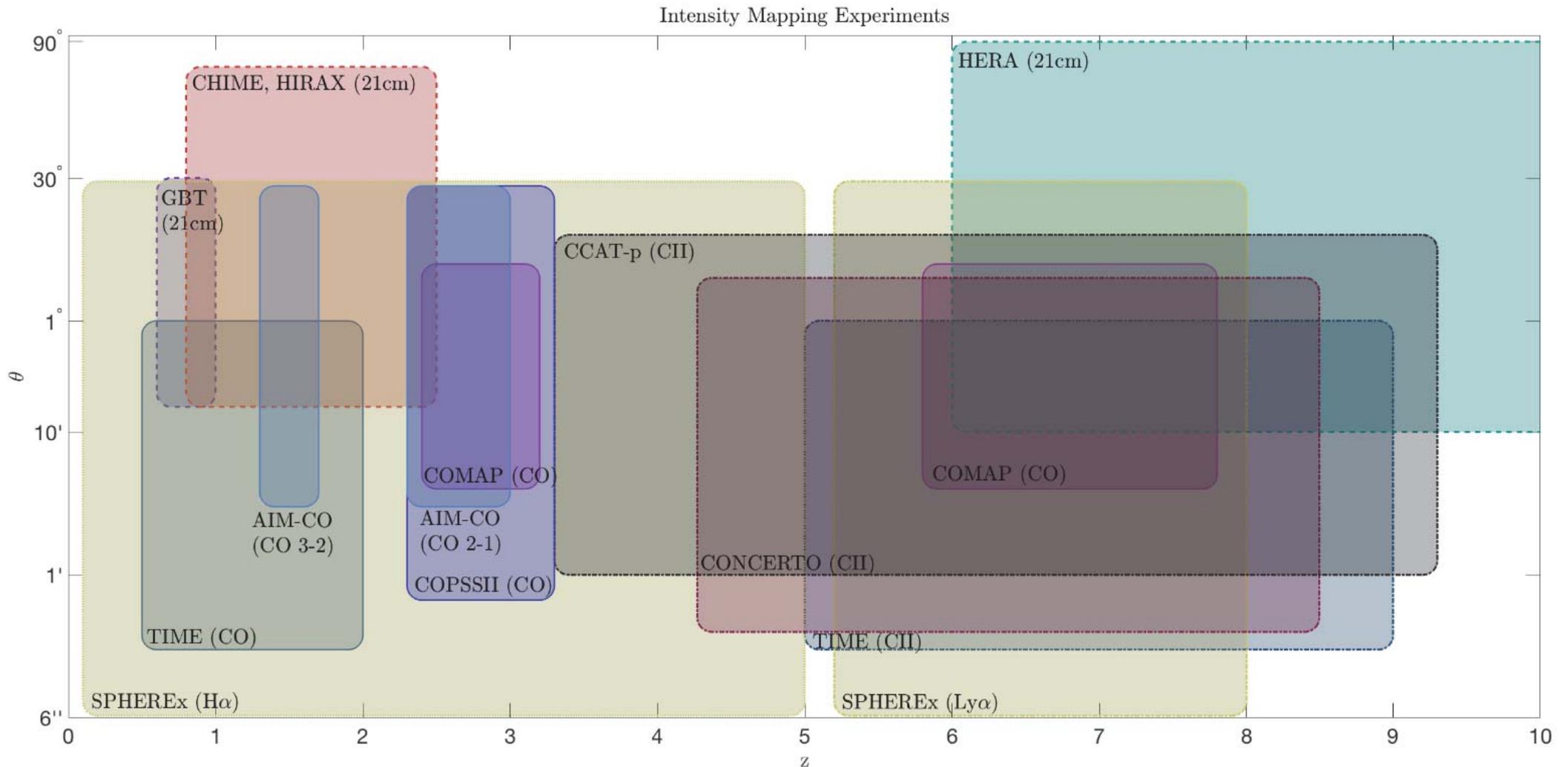
Autant de prédictions différentes que de modèles!!



Paysage expérimental

Paysage expérimental

Expériences IM en cours ou prévues à court terme
(21cm, CO, [CII], H α , Ly α)



Paysage expérimental

Experiment	Line	Frequency	Redshift range	Location
HERA	HI	50 – 250 MHz	5 – 27	South Africa
SKA-LOW	HI	50 – 350 MHz	3 – 7	Australia
CCAT-prime	[CII]	185 – 440 GHz	3.3 – 9.3	Chile
TIME	[CII]	200 – 300 GHz	5.3 – 8.5	North America
CONCERTO	[CII]	200 – 360 GHz	4.3 – 8.5	Chile
COPSS	CO	27 – 35 GHz	2.3 – 3.3	North America
mmIME	CO, [CII]	300, 100, 30 GHz	1 – 5	various
AIM-CO	CO	86 – 102 GHz	1.2 – 1.7, 2.4 – 3.0	China
COMAP	CO	26 – 34 GHz	2.4 – 3.4, 5.8 – 7.8	North America
STARFIRE	[CII], NII	714 – 1250 GHz	0.5 – 1.5	Sub-orbit (balloon)
SPHEREx	H α (H β , [OII], [OIII]), Ly α	60 – 400 THz	0.1 – 5, 5.2 – 8	Space
CHIME	HI	400 – 800 MHz	0.8 – 2.5	North America
HIRAX	HI	400 – 800 MHz	0.8 – 2.5	South Africa
SKA-MID	HI	350 MHz – 14 GHz	0 – 3	South Africa
BINGO	HI	939 – 1238 MHz	0.13 – 0.48	South America

- ❖ Première étape:
 - ❖ Démontrer la faisabilité et le potentiel scientifique des grands relevés IM
 - ❖ Fournir un banc d'essai pour les technologies et élaborer les stratégies observationnelles

Premiers résultats

Premiers résultats (corrélation croisée)

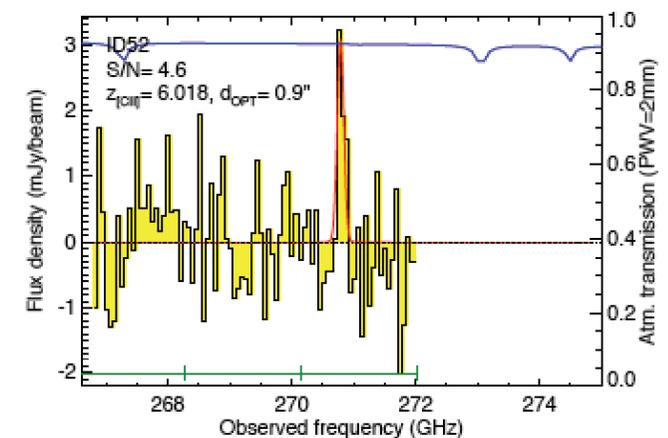
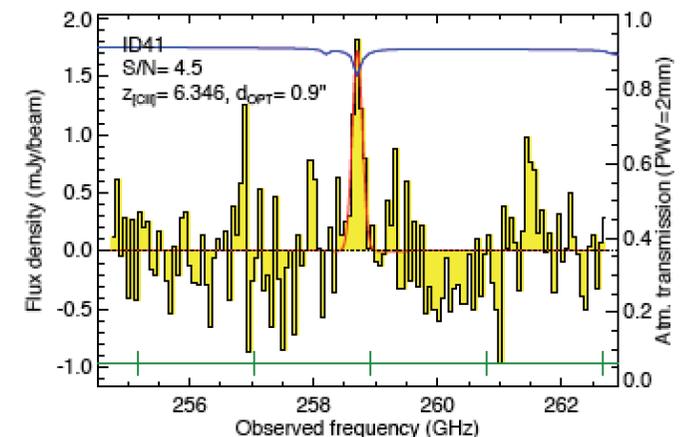
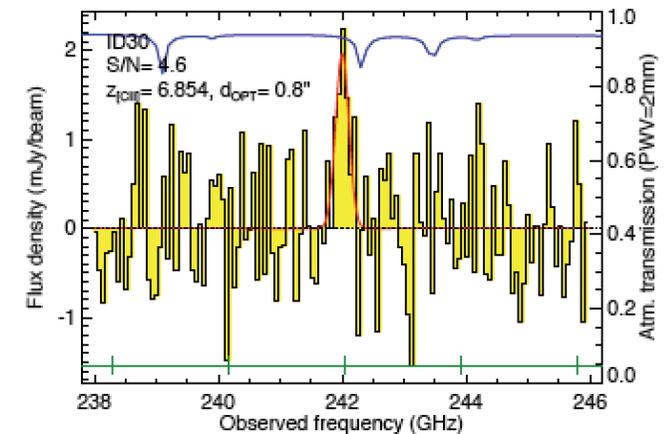
- ❖ Détection (4σ) HI en corrélation croisée (avec un relevé de galaxies) à $z \sim 0.8$: Chang+2010 et Masui+13
- ❖ Détection à confirmer de [CII] à $2 < z < 3.2$: corrélation croisée Planck 545 GHz et quasars: Pullen+2017 (CIB&CII et CIB seulement: même probabilité!)
- ❖ Corrélation croisée entre Ly α et quasars à $2 < z < 3.5$: Croft+2016
 - ❖ Détection à 8σ pour 1 and $15 h^{-1}$ Mpc mais avec une amplitude extrêmement élevée (\Rightarrow 97% de l'émission Ly α dans l'Univers à ces z n'est pas détectée dans les relevés des émetteurs Ly α !).
 - ❖ Pas de signal pour $r > 15 h^{-1}$ Mpc
 - ❖ Signal local aux quasars?

Premiers résultats (champ profond)

Aravena+16

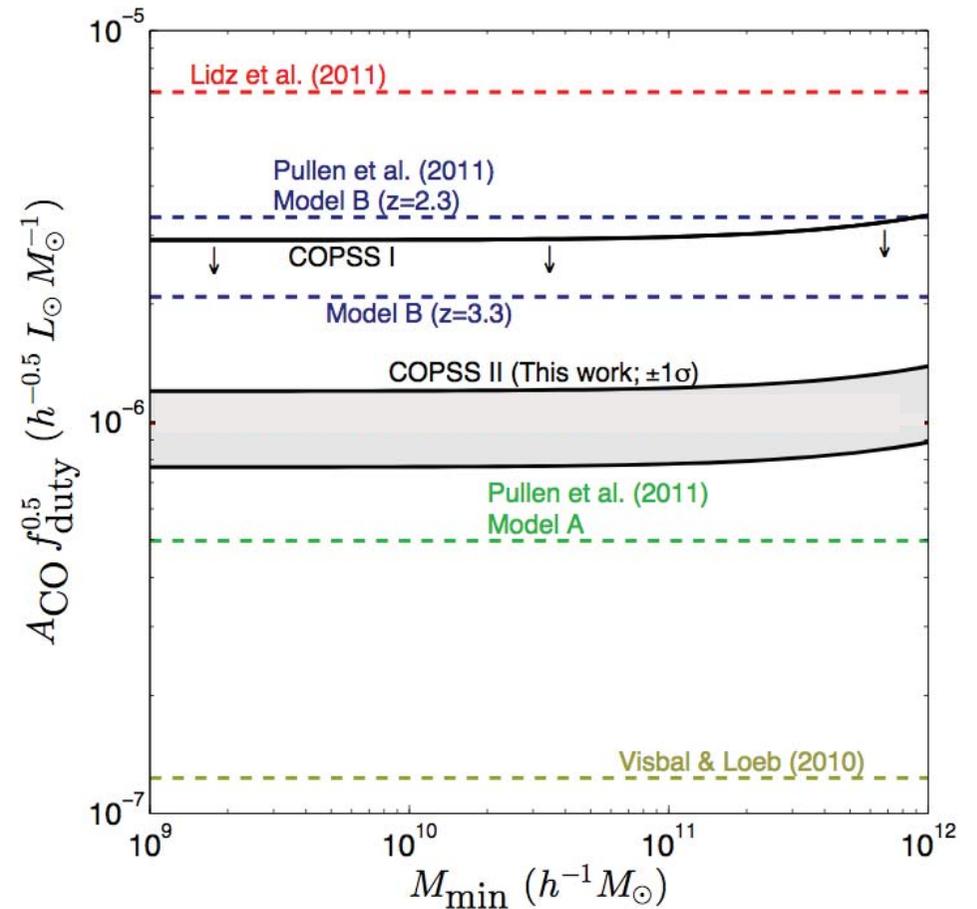
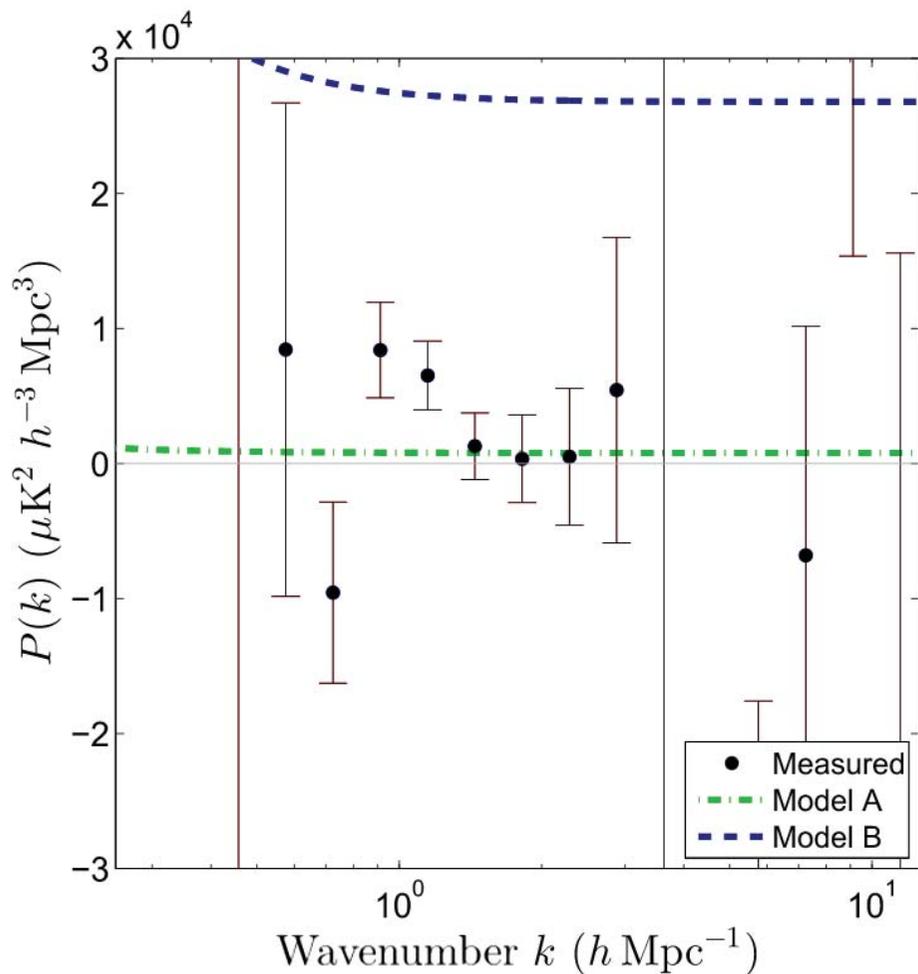
Relevé ALMA ASPEC
(Walter+2016) dans le champ UDF:

- ❖ 1 arcmin², 40h de temps ALMA
- ❖ Scans en bande 3 (84-115 GHz) et 6 (212-272 GHz)
- ❖ [CII] à $6 < z < 8$
- ❖ 14 candidats émetteurs [CII], 60% de faux candidats
- ❖ LP en cours sur 4 Sq. arcmin



Premiers résultats (spectre de puissance)

- ❖ Une détection à $\sim 3\sigma$ des fluctuations de CO (Keating+2016)
 - ❖ Transition CO(1–0) à $z=2.3-3.3$

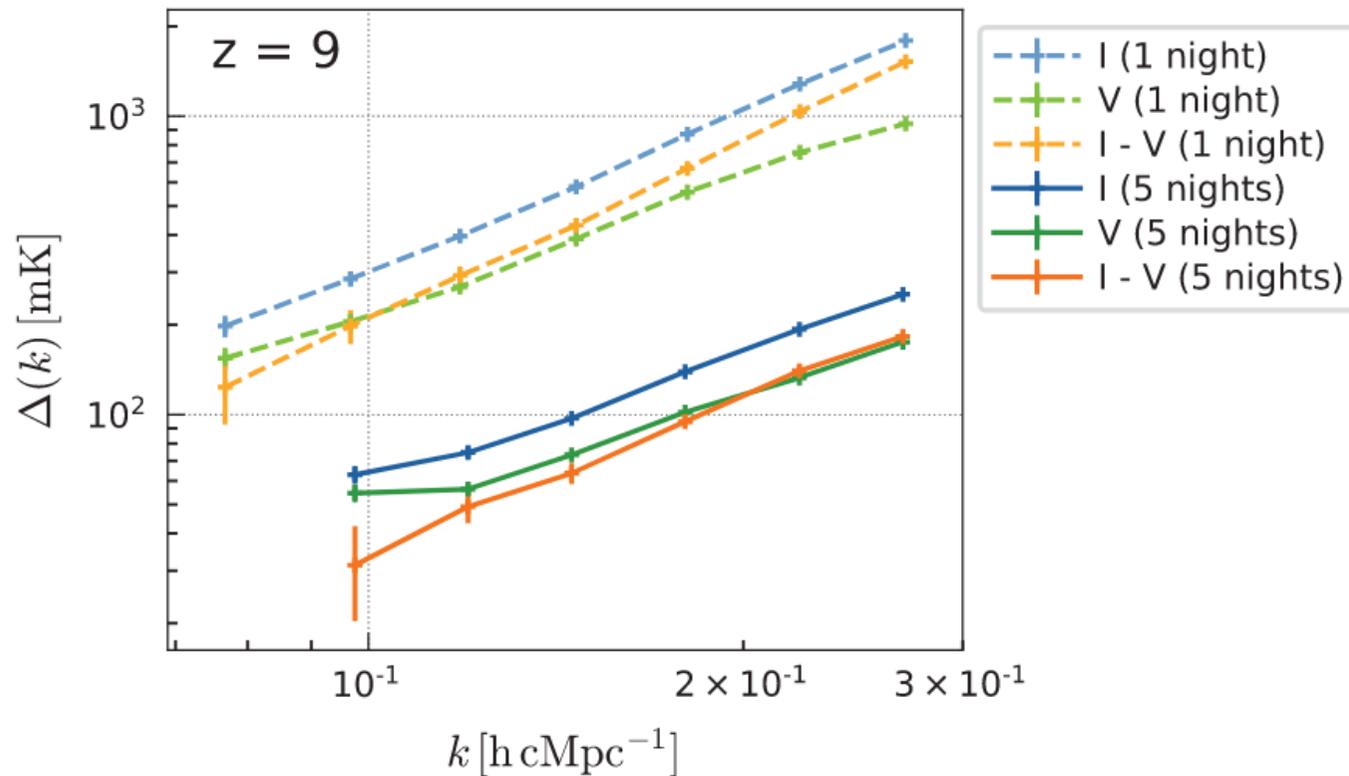


f_{duty} : duty cycle of CO emitters
 A_{CO} : ratio of L_{CO} to halo mass for CO-luminous halos

Premiers résultats (spectre de puissance)

LOFAR (limites sup)

Patil+17, Koopmans+18 (IAU 333)



Commence à pouvoir tester l'espace des modèles EoR et Aube Cosmique (=> limite inférieure sur le chauffage du milieu intergalactique pendant l'aube cosmique).

Seulement 3.5% des données acquises dans NCP depuis 2012 (extrapolation à 1700h => signal de l'EoR devrait être détecté).

+ Gehlot+19 (pour une limite supérieure à $z \sim 20$) + Li, Pober+19 (MWA, $z \sim 7$)

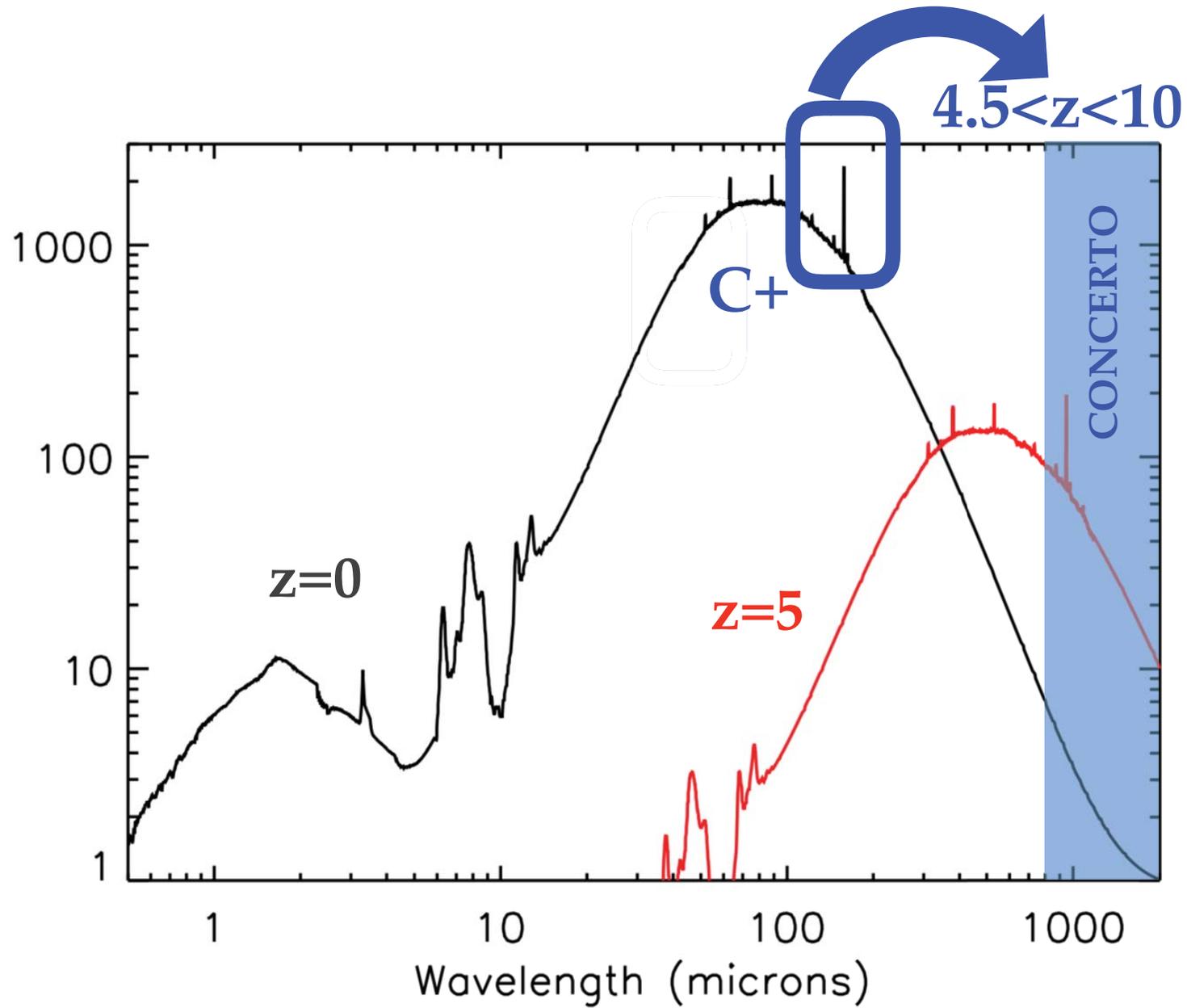


CONCERTO

**Spectromètre (sub-)mm pour l'observation de
la raie de [CII] à $z > 4.5$**

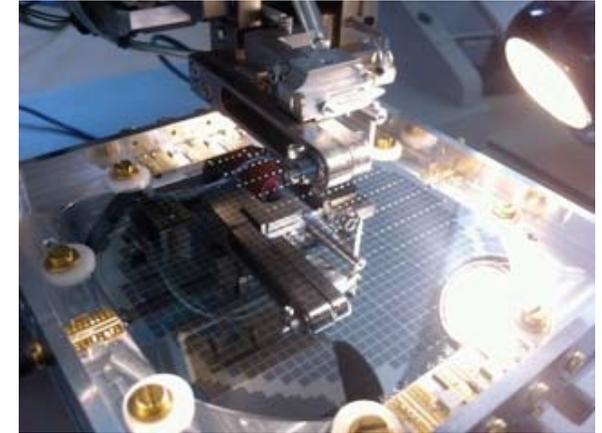
LAM, Institut Néel, LPSC, IPAG
Et partenaires européens (science)

<https://mission.lam.fr/concerto/>



❖ Plan focal:

- ❖ Détecteurs à inductance cinétique (KIDs)
- ❖ Succès de la caméra NIKA2 installée sur le 30m/IRAM
- ❖ 2x2160 pixels — Champ de vue: $D > 15'$
- ❖ Refroidi à 150mK
- ❖ Deux bandes de fréquences: 125-300 GHz et 200-360 GHz



❖ Spectres:

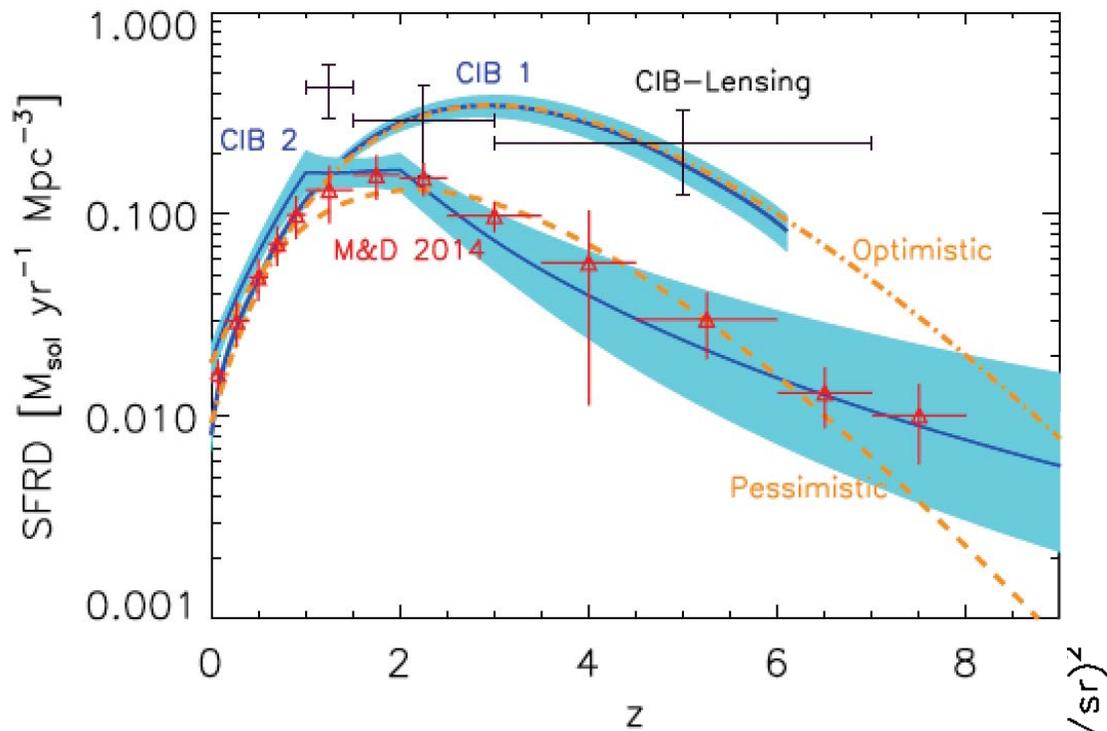
- ❖ Interféromètre de Martin-Puplet
- ❖ Résolution spectrale ($\nu/\delta\nu$): $R=100$ à 300
- ❖ Enregistrement continu des interferogrammes à une fréquence de quelques Hz (2-5Hz)
 - ❖ Plus rapide que le bruit du ciel - Possible seulement avec les KIDS
- ❖ Au moins un spectre pour tous les pixels des deux matrices chaque seconde

Très très sec, à une altitude de 5100 m

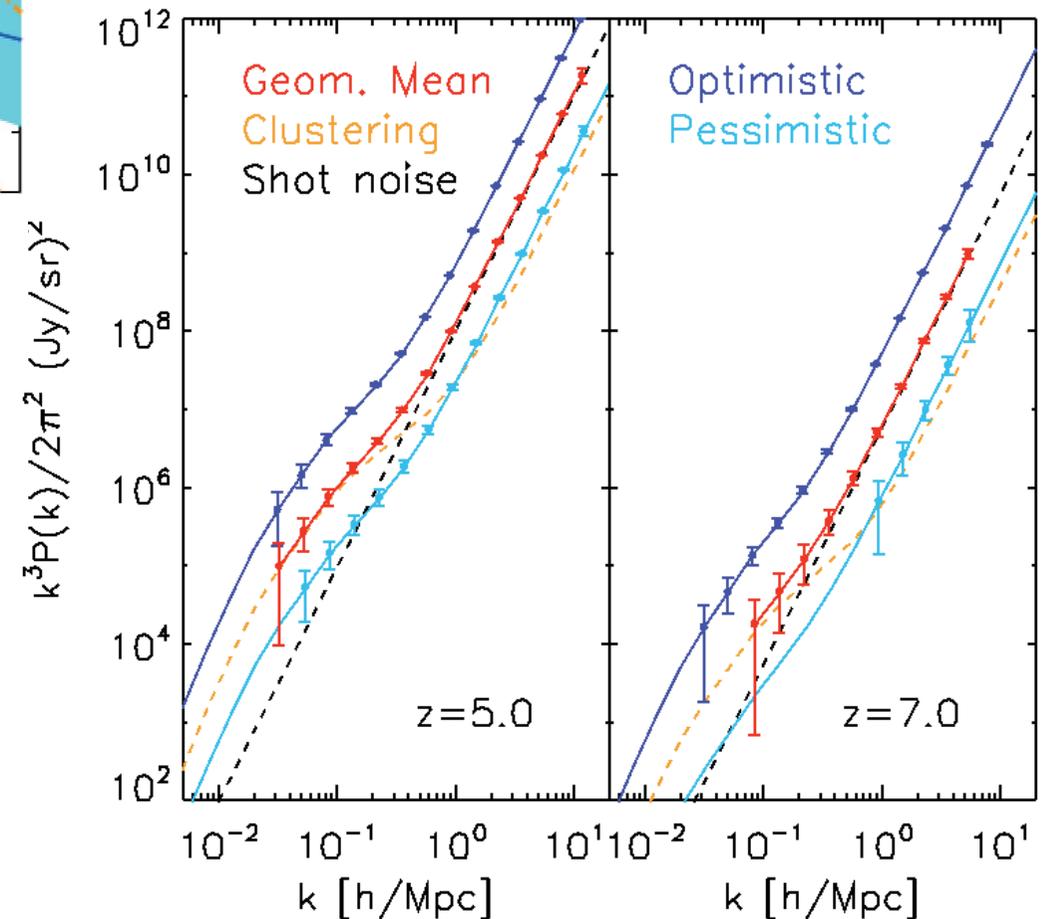


CONCERTO sera installé ici en janvier 2021

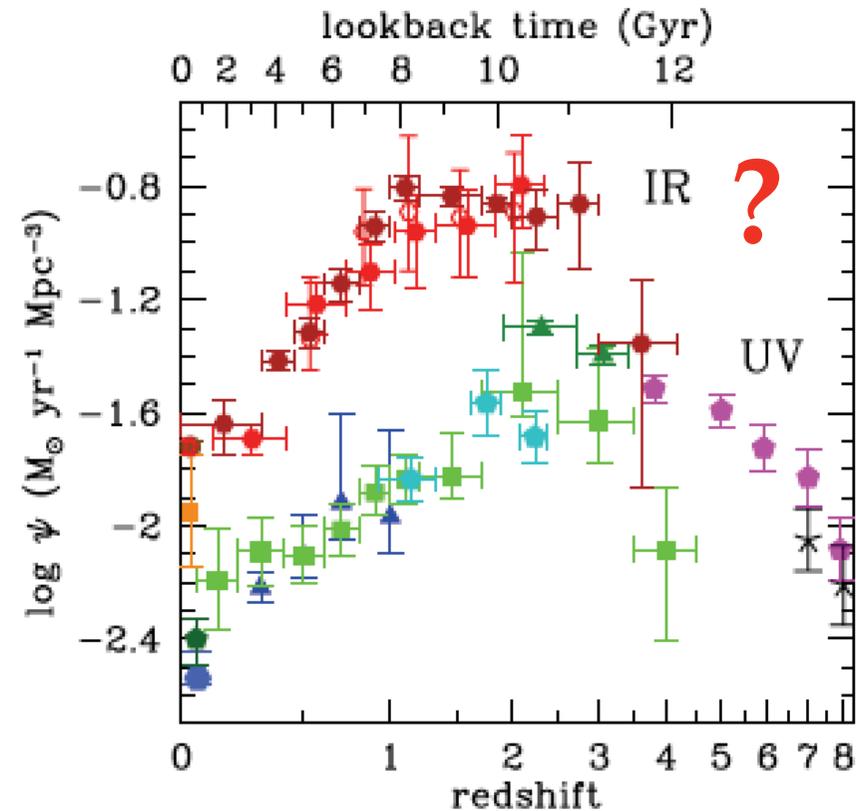




Relevé de 1.4 degrés carrés
1200 heures d'observations



- ❖ Densité du taux de formation des étoiles à $z > 4.5$

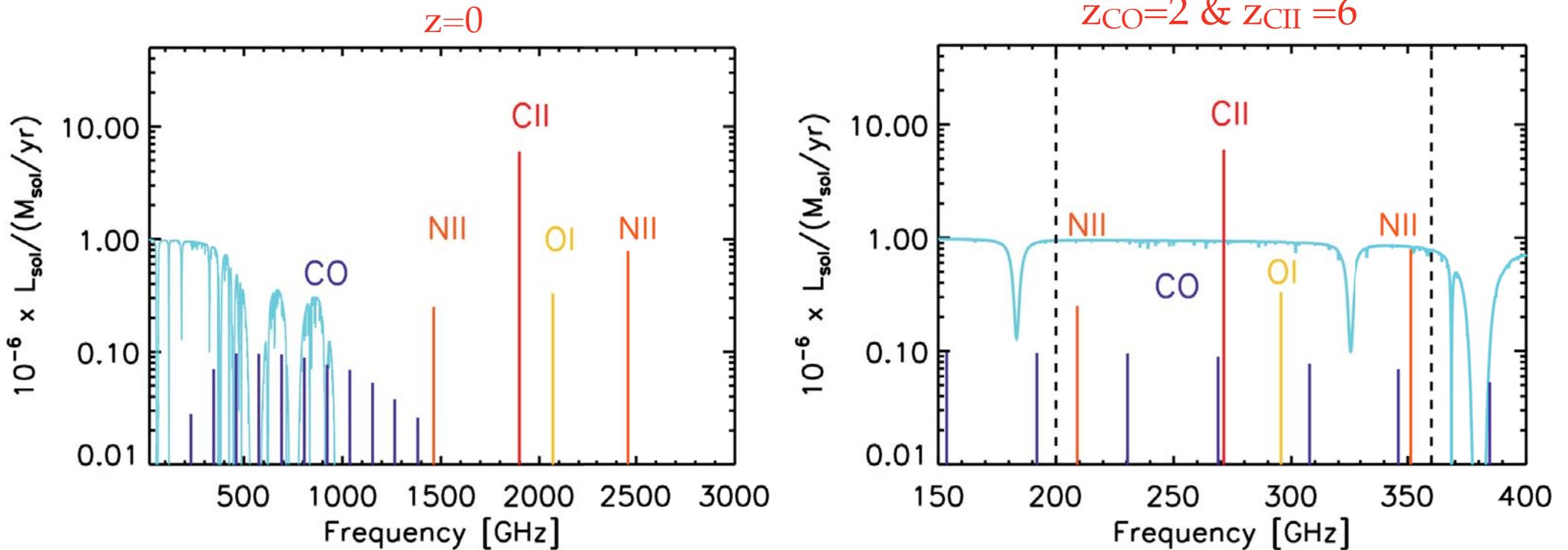


- ❖ Relation luminosité [CII] - Mh
- ❖ Masse typique des halos de matière noire des galaxies à grand z
- ❖ Nombre d'émetteurs [CII] en fonction de redshift
- ❖ Fonctions de luminosité

Contribution de ces galaxies à la réionisation

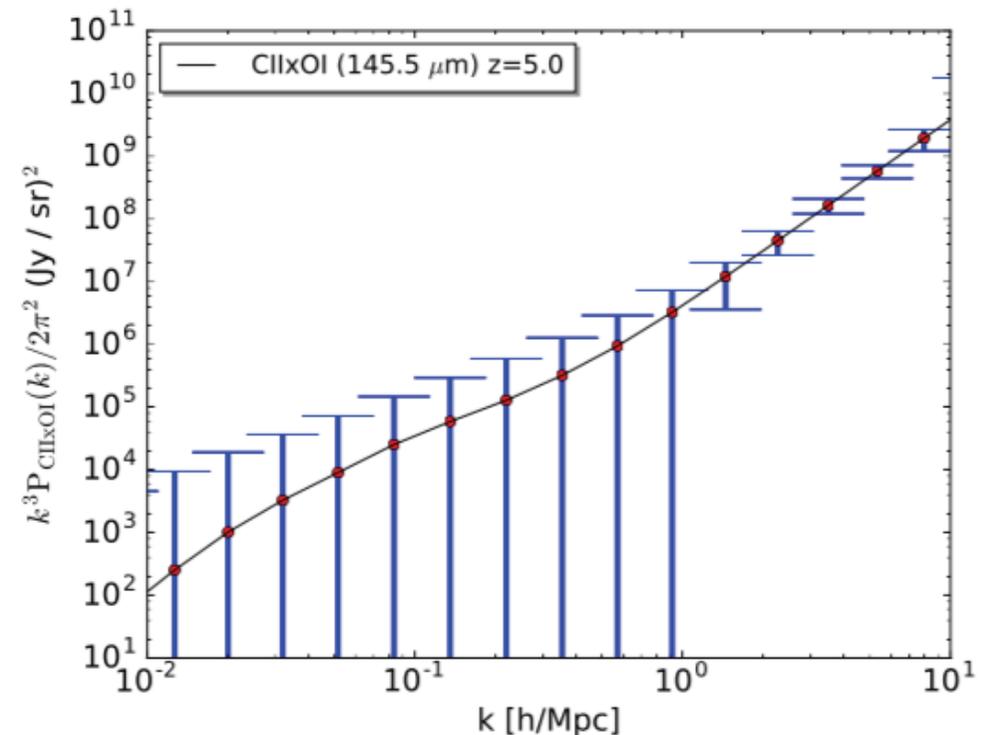
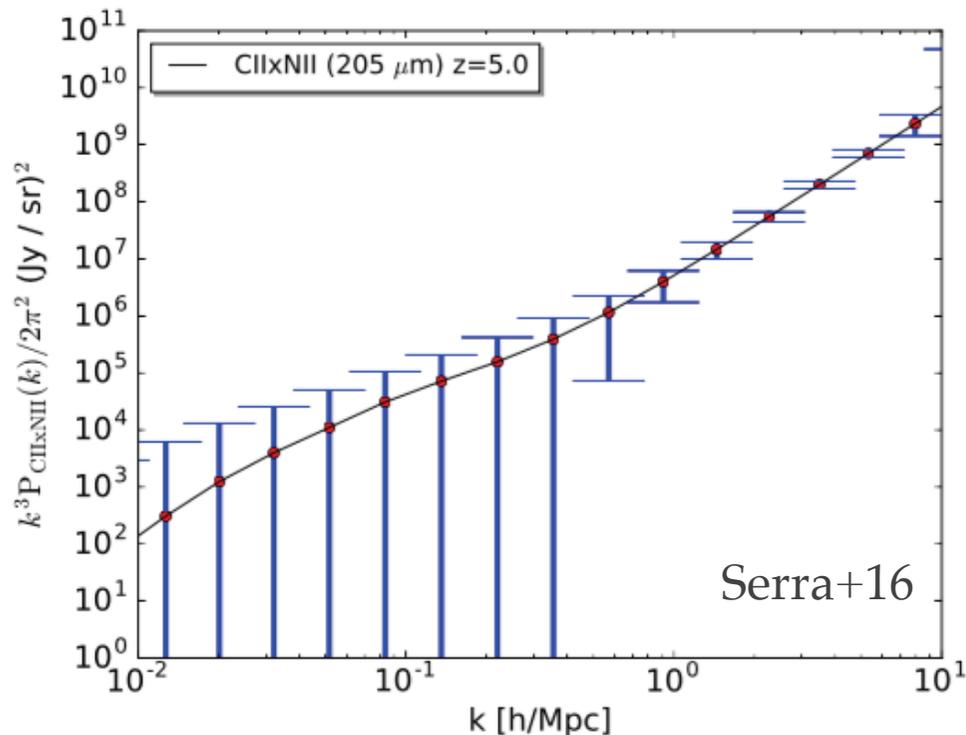
Structuration de la matière baryonique pendant l'EoR

- ❖ Emission CO à $z < 1.9$ (pour les niveaux rotationnels jusqu'à $J=5$):



- ❖ Correlation croisée avec les galaxies: contenu en gaz des galaxies (jusqu'à $z \sim 2$)
- ❖ Spectre de puissance croisé des raies de CO aux mêmes z :
 - ❖ Une mesure du regroupement 3D des galaxies non détectées individuellement

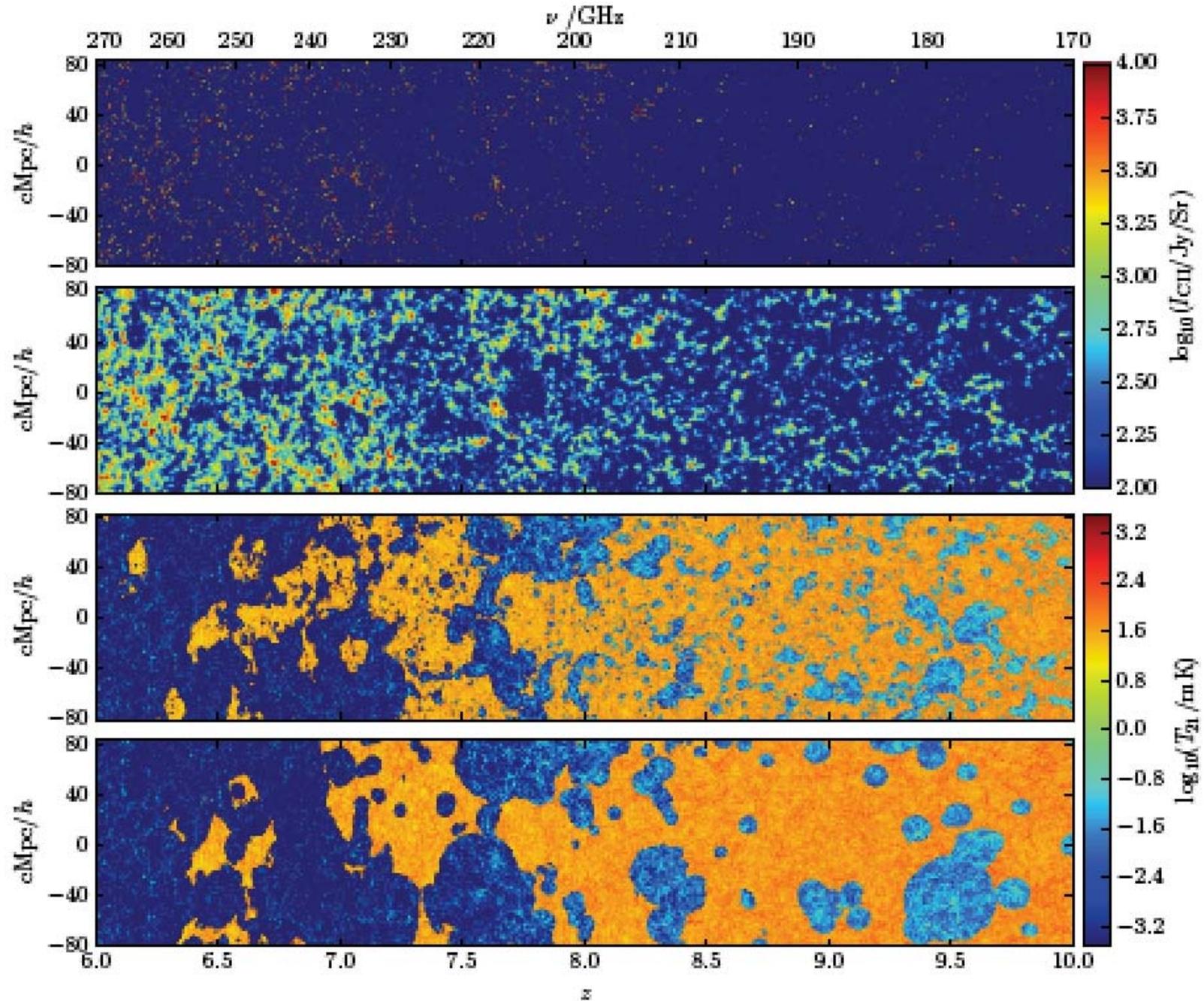
- ❖ **Corrélations croisées dans CONCERTO:**
 - ❖ Raies de [CII], [OI] (145 μm), et [NII] (122 μm and 205 μm).
 - ❖ Densité d'électrons du milieu ionisé.
 - ❖ Quantité de [CII] provenant du milieu ionisé.
 - ❖ Champ de radiation et densité moyenne des PDRs.



- ❖ Corrélations croisées avec des jeux de données extérieurs:
 - ❖ Avec les galaxies distantes:
 - ❖ Une autre estimation du taux de formation des étoiles dans les galaxies à $z \sim 4-8$.
 - ❖ Enrichissement en poussière de l'Univers.
 - ❖ Avec le HI:
 - ❖ Les fluctuations HI et [CII] proviennent de régions différentes et mutuellement exclusives, ce qui entraîne une forte anti-corrélation à grande échelle.
 - ❖ HI x [CII] contraint la physique pendant l'EoR, e.g. les tailles des bulles de gaz ionisé et la fraction moyenne d'ionisation.

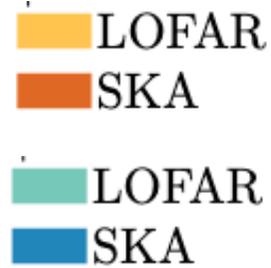
CONCERTO: Corrélation croisée avec les fluctuations du HI

Dimitru+2018

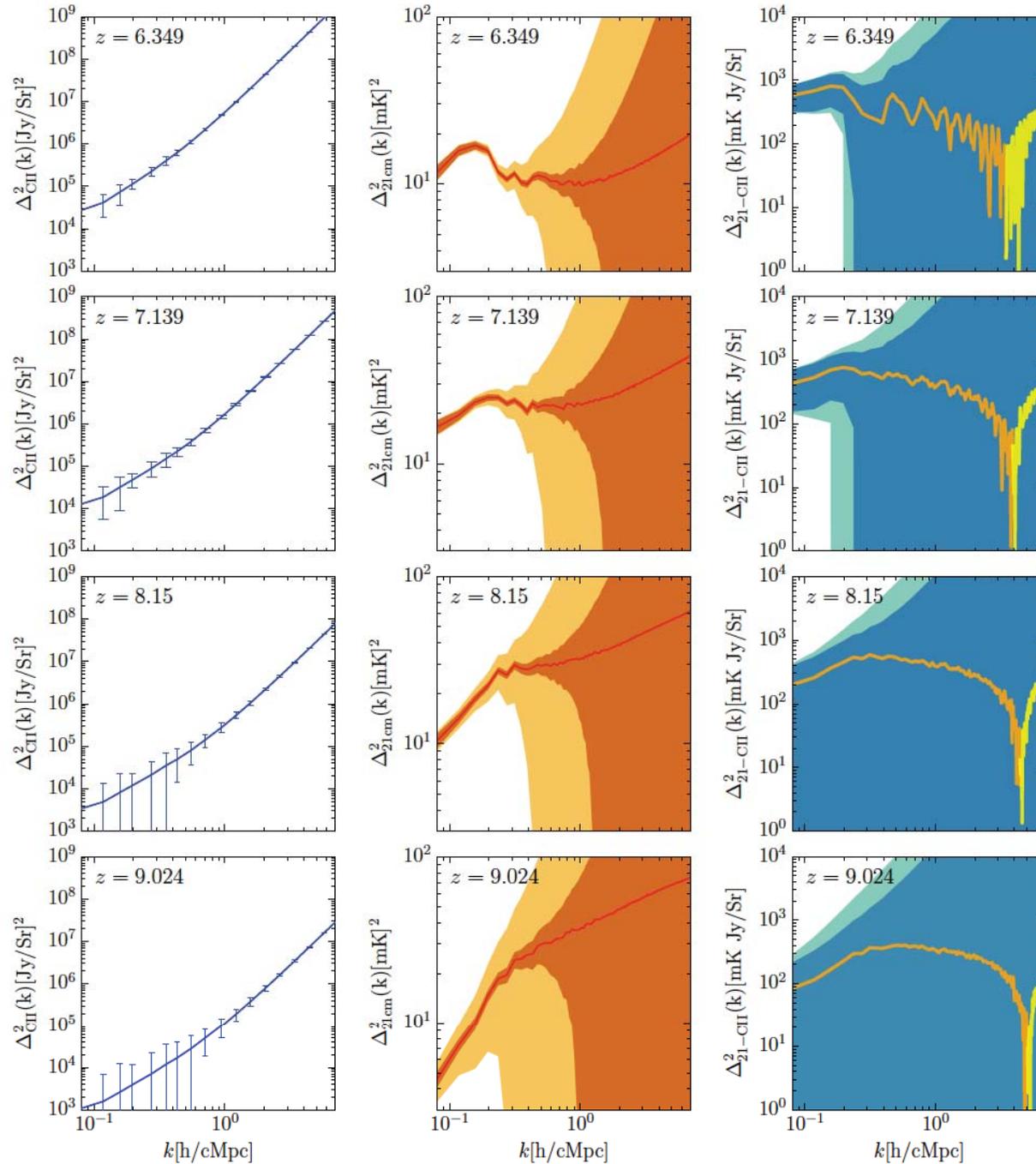


CONCERTO: Corrélation croisée avec les fluctuations du HI

Dimitru+2018



Réionisation
par les
galaxies



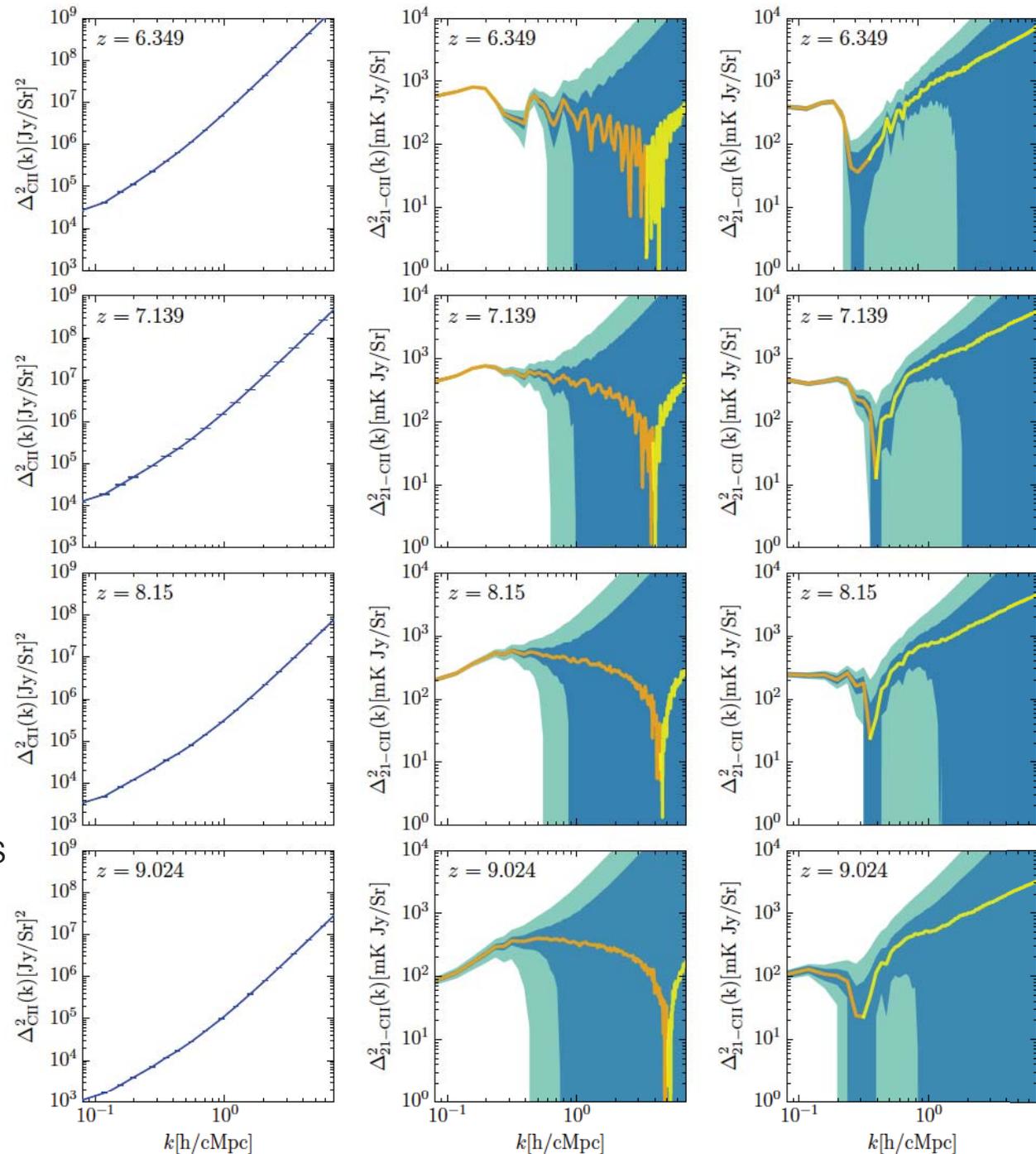
[CII] 2ème génération: Corrélation croisée avec les fluctuations du HI

Dimitru+2018

Réionisation par les “galaxies” (milieu) et les “quasars” (droite)

- Distribution en masse des halos participant à la réionisation

- Nombre de photons ionisant produit par les halos



Intensity mapping

- ❖ Nouvelles perspectives sur l'évolution de l'Univers à bas z , et sur l'époque de la réionisation et l'aube cosmique.
- ❖ Aujourd'hui: domaine émergent, peu de mesures.
- ❖ Devrait changer radicalement avant la fin de la décennie:
 - ❖ nombreuses expériences en cours ou prévues,
 - ❖ efforts considérables consacrés à la conception des observations, au développement de méthodes pour analyser les données et à l'étude des implications pour l'astrophysique et la cosmologie.

=> Communauté mondiale croissante de scientifiques impliqués dans les différents aspects de l'IM.
- ❖ De très nombreux challenges: volumes des données (e.g. LOFAR EoR: données brutes ~ 50 TB/nuit), traitement des données, nuisances (e.g. RFI), séparation de composantes, modélisation et interprétation.

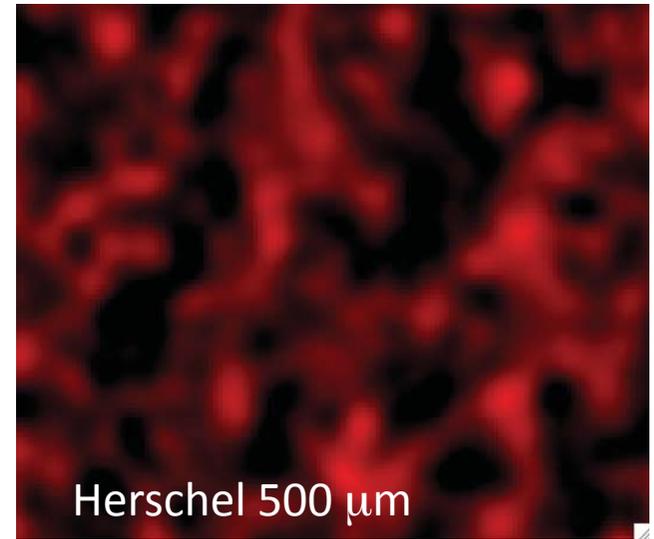
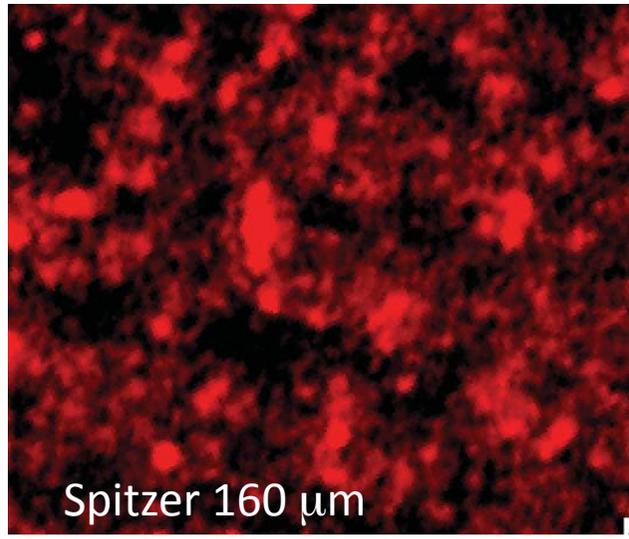
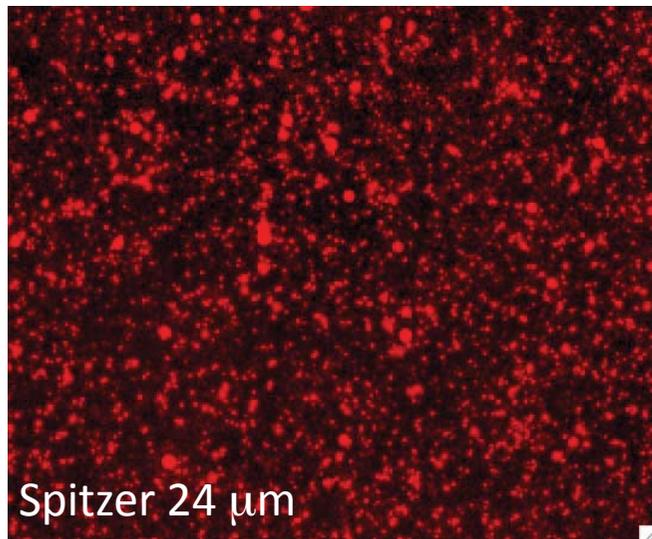
Restez à l'écoute !

La confusion

Galaxies faibles et nombreuses comparé à la résolution angulaire des instruments

=> les observations sont limitées par la **confusion**.

=> Fluctuations de la brillance.



Galaxies individuelles

~6% du fond résolu en galaxies
=> Intensity Mapping

Spitzer @ 24 microns:	6"
SPIRE/Herschel @ 500 microns:	35"
HST visible:	0.1"

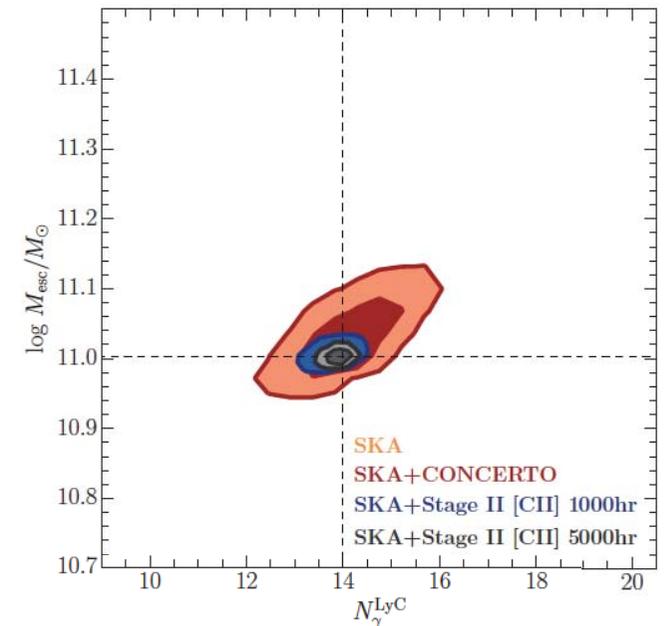
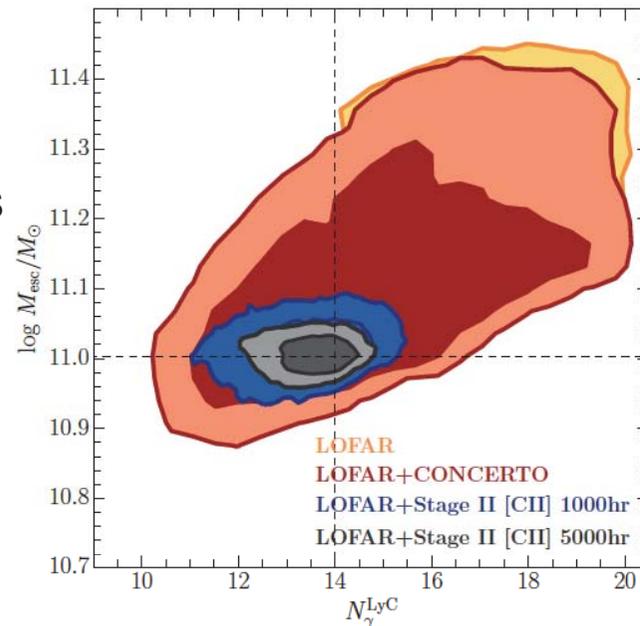
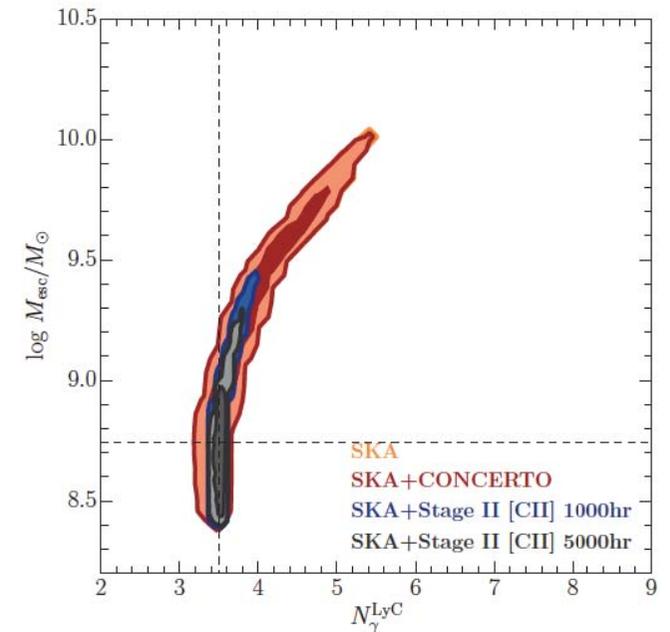
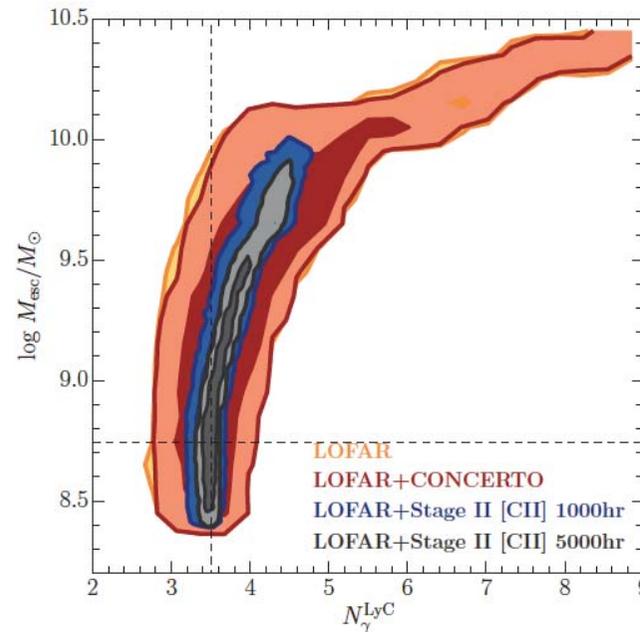
Cross-correlation with HI

Dimitru+2018

Inspections de deux paramètres:

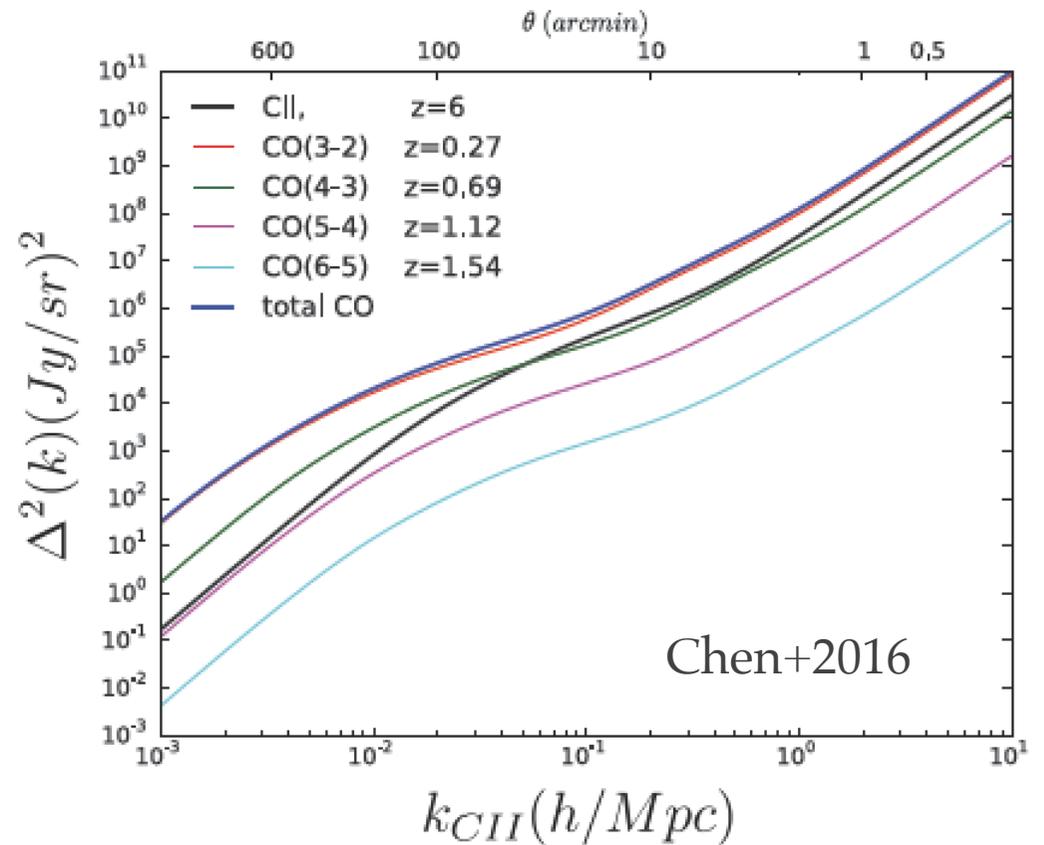
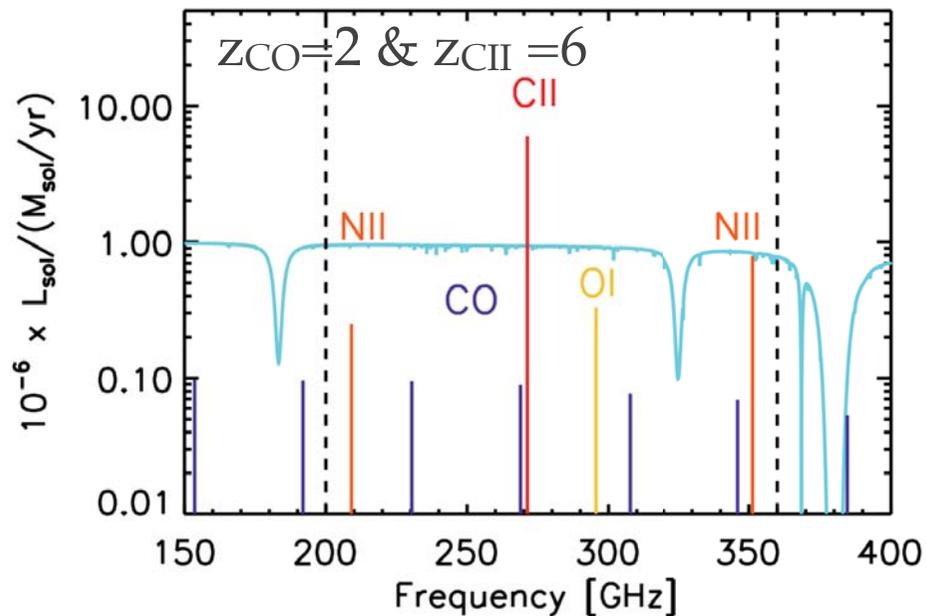
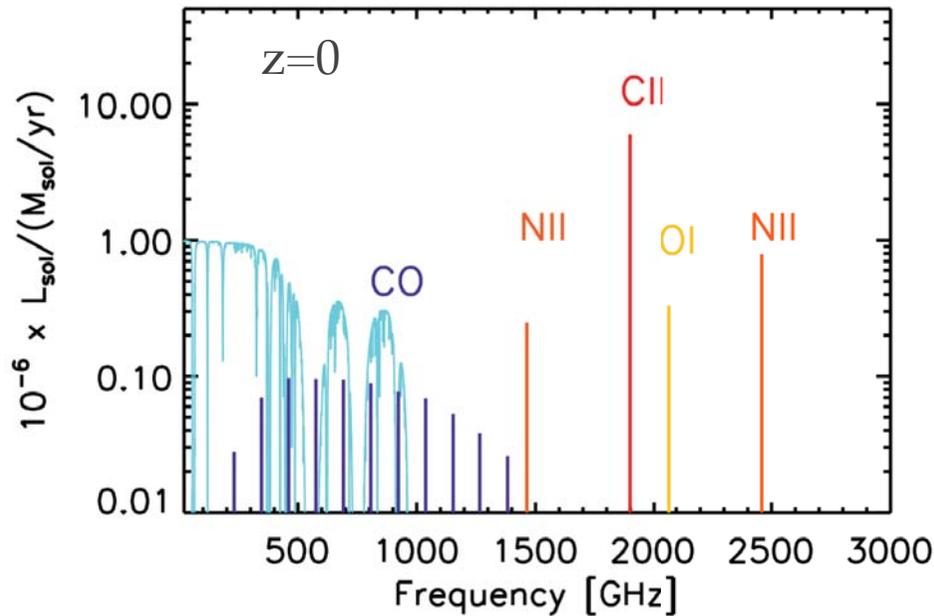
- Tous les halos dans la simulation produisent de l'émission CII mais seuls les halos de masse $M > M_{\text{esc}}$ participent à la réionisation du milieu intergalactique.

- N_{LyC} : fixe le nombre de photons ionisant produit par un halo.



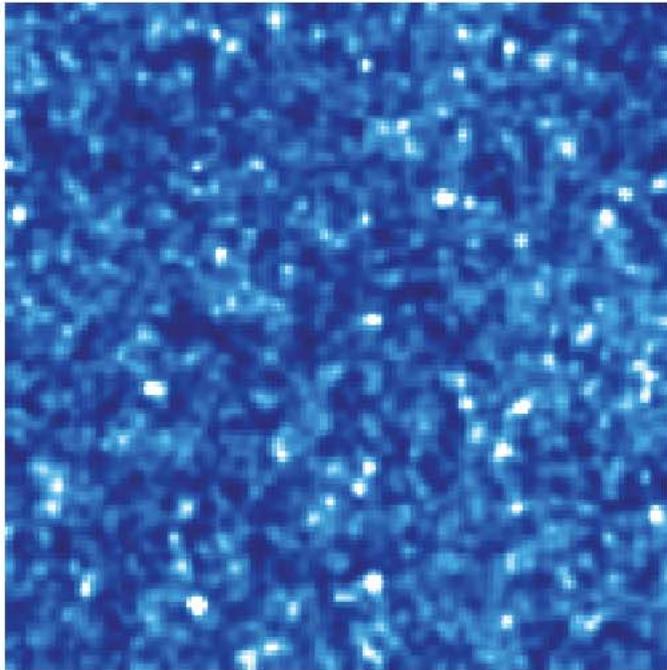
Component separation: CII and CO

- ❖ CO emission at $z < 1.9$ (for the rotational levels up to $J=5$): A foreground for CII

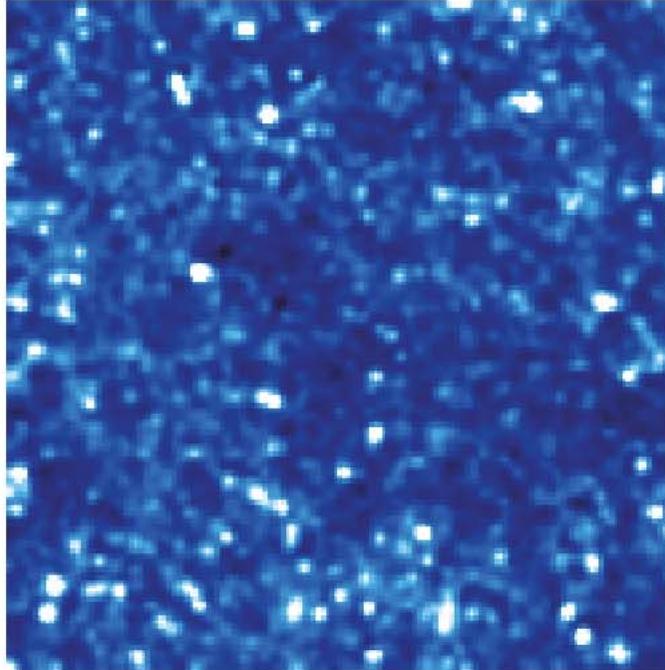


Component separation: CII and CO

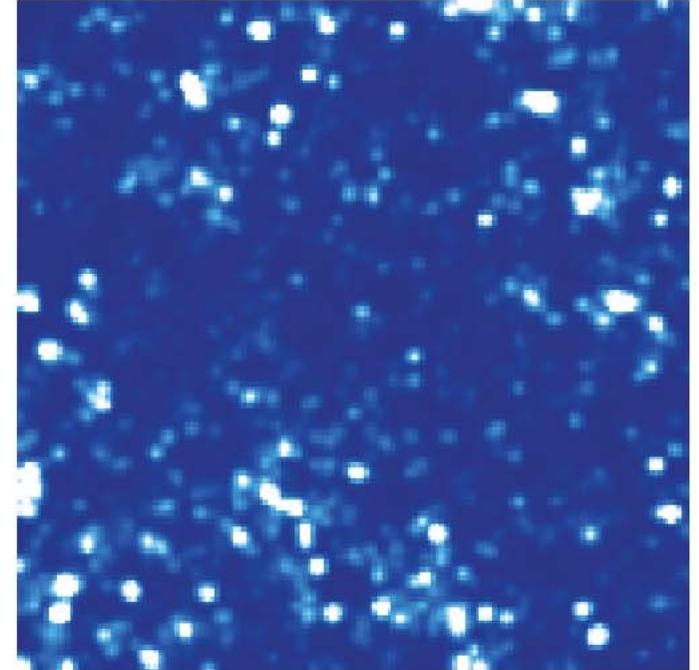
1.4x1.4 degrees simulated sky maps at $z=5.5\pm 0.1$



Total



CO + [CII]



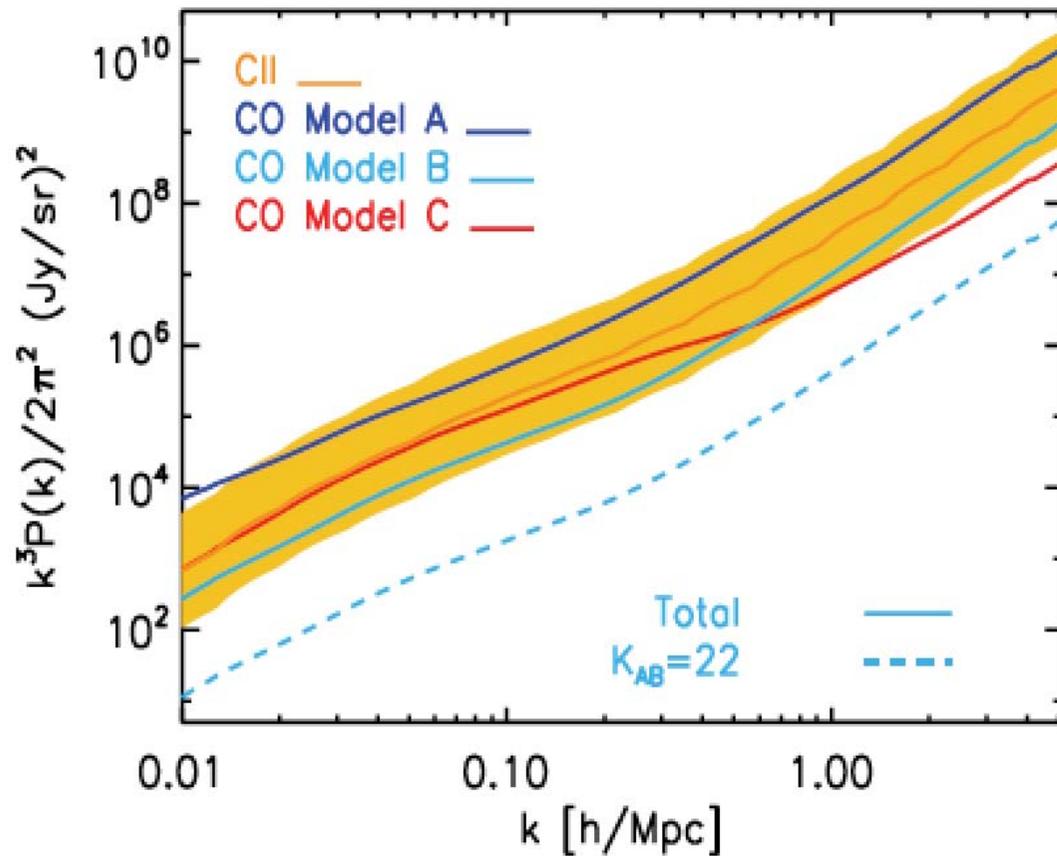
[CII]

The standard deviation of the [CII] map is 30 times lower than that of the total signal map

Based on Béthermin+17 (but see also Yue et al. 2015)

Component separation: CII and CO

- ❖ Masking the brightest (CO) galaxies (Silva+2015, Yue+2015 Breysse+2015)
- ❖ Recover the [CII] power spectrum up to $z=6$



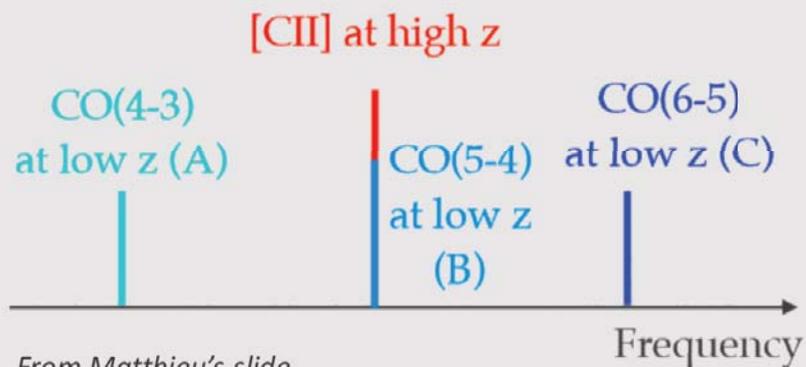
Power spectra of [CII] at $z=6$ (orange area) and CO interlopers at lower redshift. CO models A and B are from Silva+2015, model C from Cheng+2016.

Reduced CO contamination (in the case of model B, dashed curve) obtained by masking near-IR sources with magnitude below $K_{AB}=22$.

Separating [CII] from CO: cross-correlations

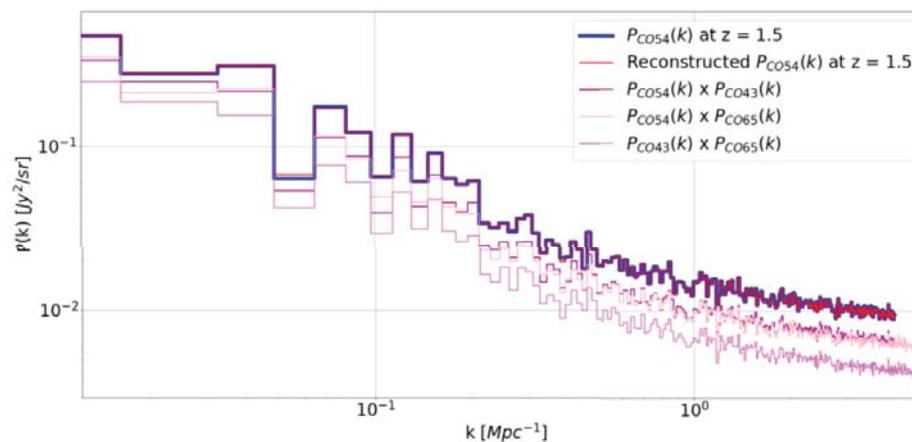
- If CO, a lower J and a higher J lines in other channels
- $P(k)$ can be reconstructed using cross-power-spectra between these channels

$$P_B(k) = P_{AB}(k) P_{BC}(k) / P_{AC}(k)$$



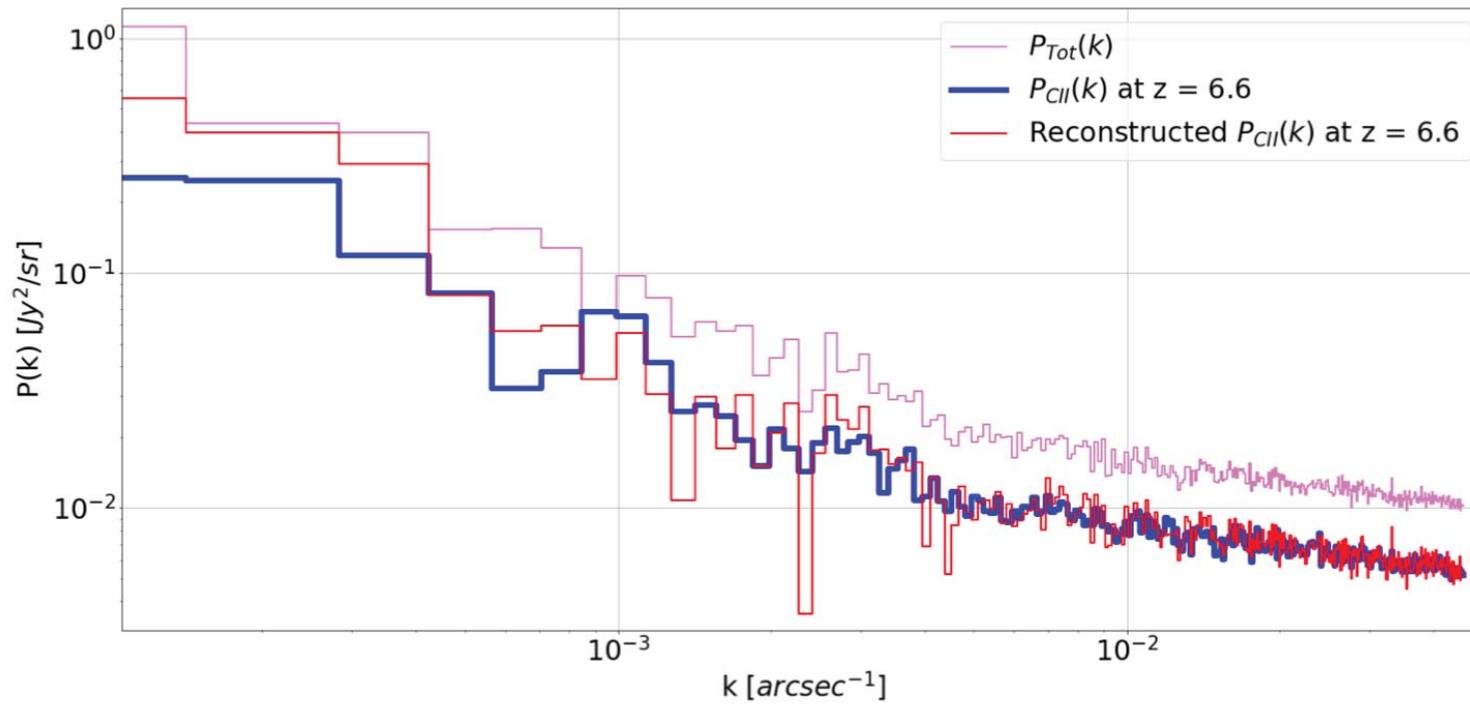
From Matthieu's slide

Reconstruction of CO(5-4) using only crosscorrelation measurement



230 GHz

Separating [CII] from CO: cross-correlations



250 GHz
 $z=6.6$