

# L'aube Cosmique & L'époque de Réionisation

## *L'univers des premières structures*

Dominique Aubert

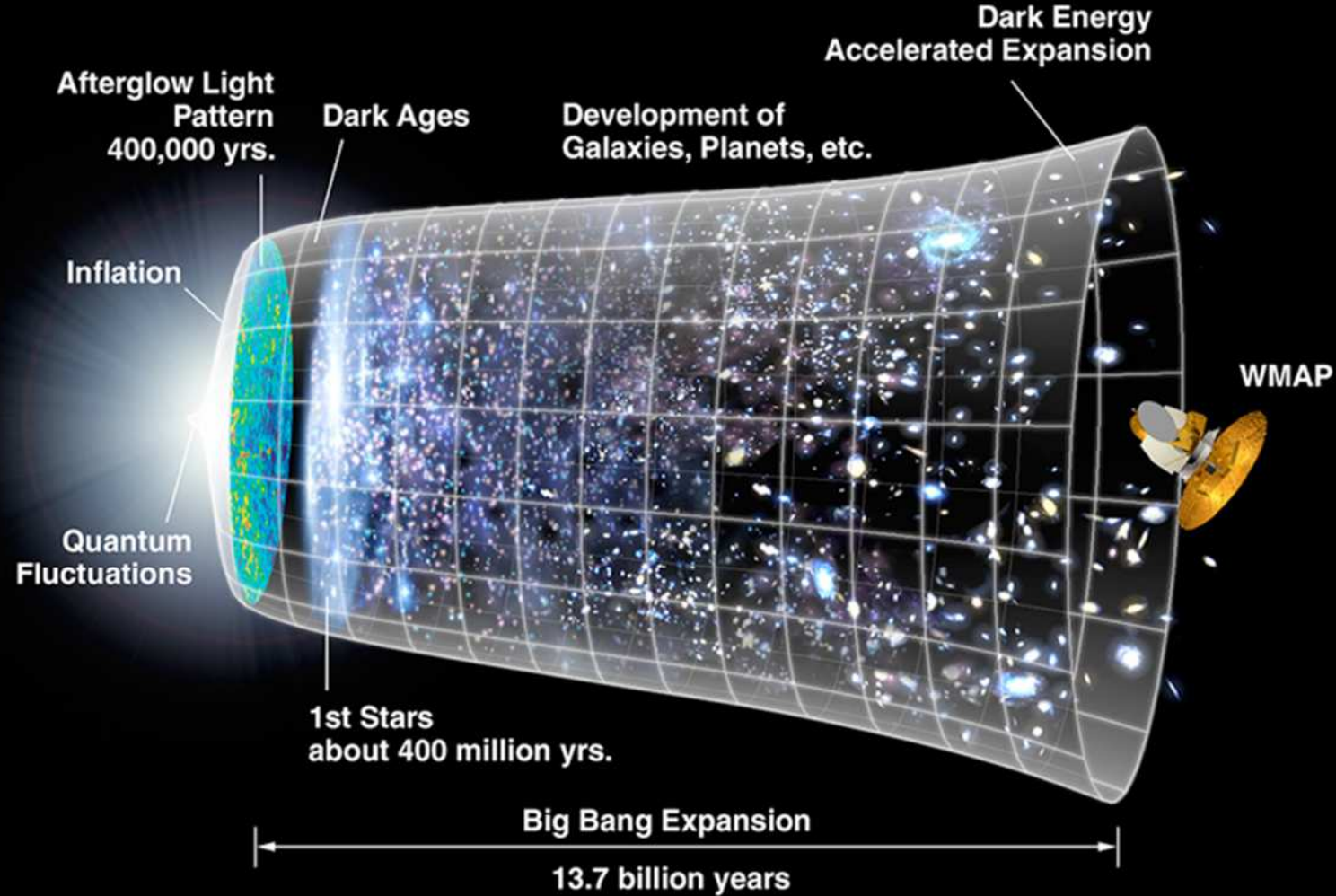


Observatoire

**astronomique**

de Strasbourg | ObAS





NASA/WMAP Science Team

Ce cours est dédié une époque dans l'histoire de l'Univers, plus qu'à des objets ou des processus.  
 L'époque où les **premières structures** se mettent en place, dans l'**Univers Jeune**  
 Cette époque recouvre la fin des **âges sombres**, l'**aube cosmique** et l'**époque de Réionisation**

# Plan

---

- Éléments de contexte : l'Univers des premières structures, **qu'est-ce que c'est ?**
- Acquérir de la connaissance sur l'Univers des premières structures : **observations & théorie/modélisation**
- **Quelques défis** posés par l'Univers des premières structures

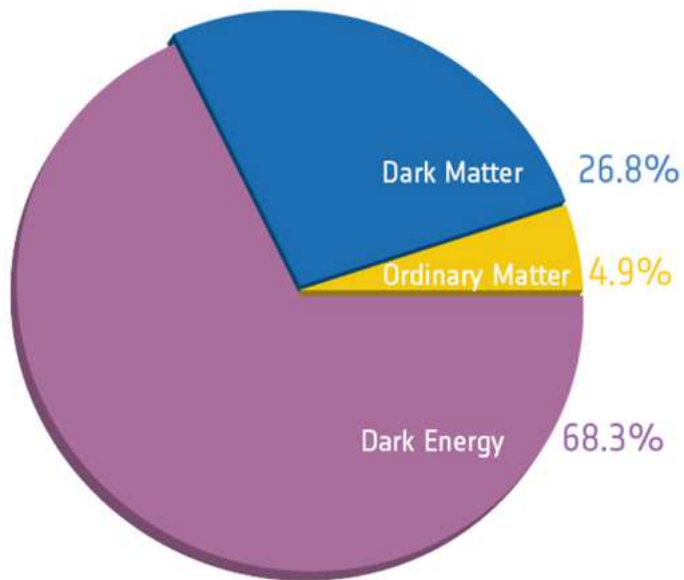
## Petite Biblio :

- Barkana & Loeb (2001) : *In the Beginning: The First Sources of Light and the Reionization of the Un*
- Loeb & Furlanetto (2013) : *The first Galaxies in the Universe*
- Acero+ (2018) : *French SKA White Book - The French Community towards the Square Kilometre Arr*
- Wise (2019) : *An introductory review of Cosmic Reionization*
- Dayal & Ferrara (2018) : *Early Galaxy formation and its large scale effects*

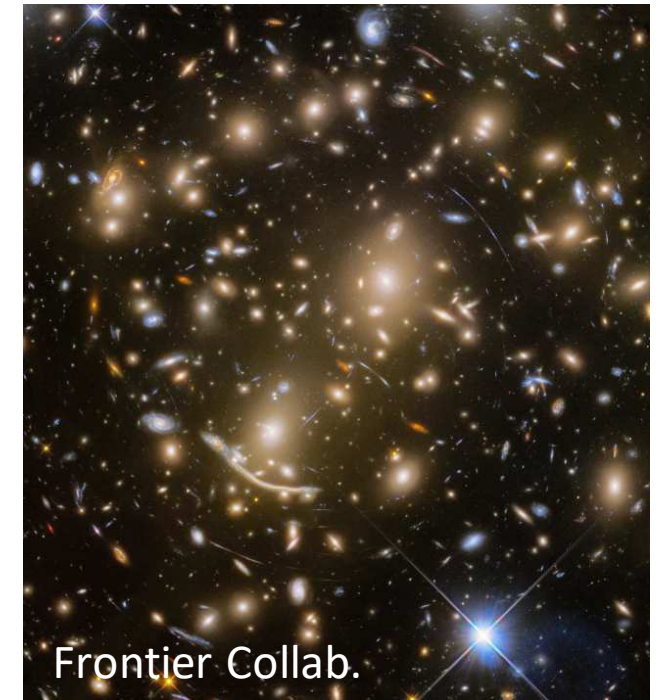
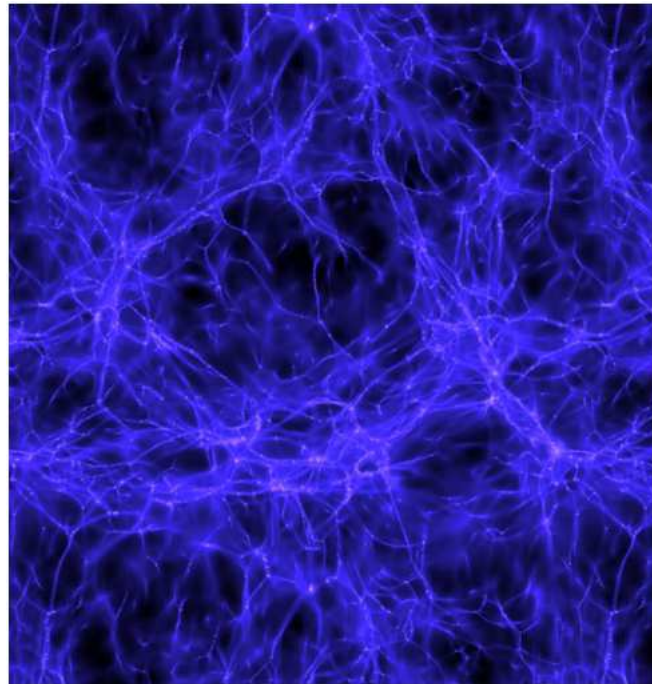
# Partie I : l'Univers Jeune des premières structures



# L'Univers Aujourd'hui (z=0)



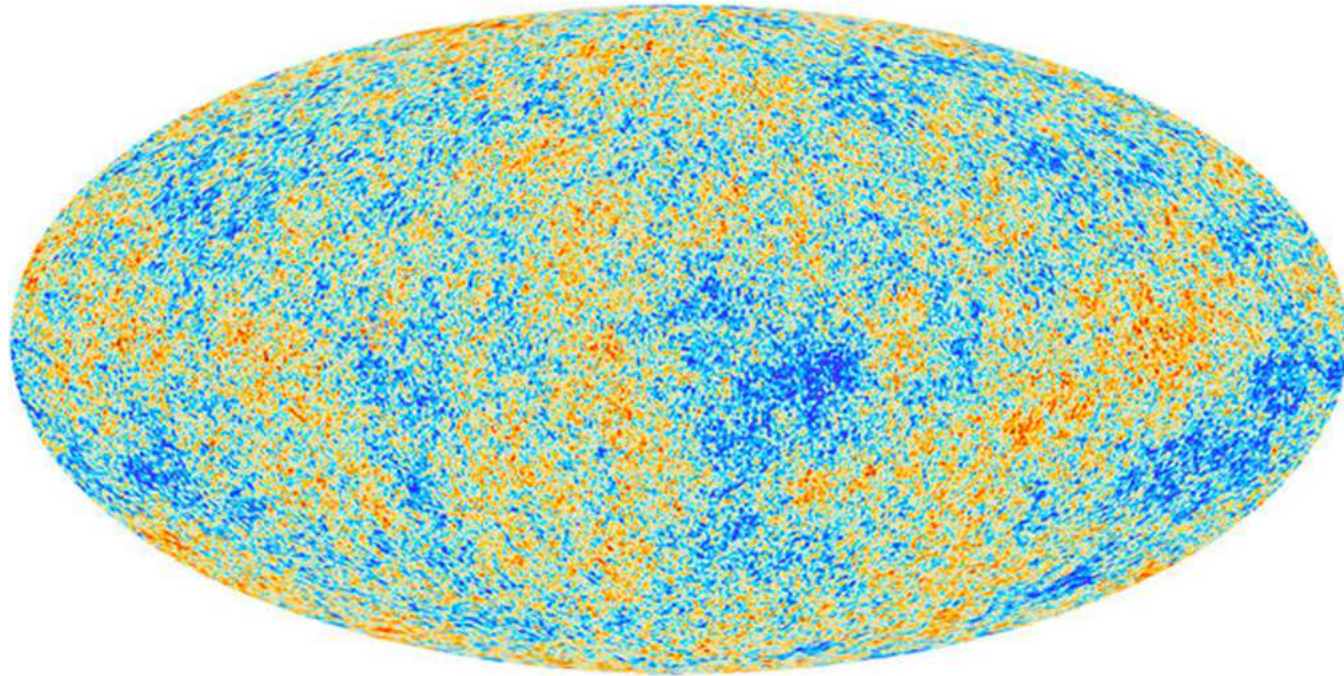
<http://sci.esa.int>



- Univers **ΛCDM**, avec un Big-Bang à  $\sim 13.8$  milliards d'années
- Les **baryons** sont sous-dominants,  $\sim 50\%$  dans le **milieu intergalactique (IGM)** diffus, le reste dans les **structures** types galaxies.
- Le milieu intergalactique est chaud ( $>10^4$  K -  $10^8$  K via chocs) et ionisé,  $<1$  atome /m<sup>3</sup>,
- Les galaxies sont des objets évolués, avec des populations stellaires multiples, métalliques, hébergent des AGNs, etc.
- **Fond Ultra-Violet d'origine astrophysique**, fondamental pour l'évolution des baryons

# L'Univers « Primordial » ( $z \sim 1000$ )

---



- Univers âgé de 380 000 ans, très homogène ( $\sim 10^{-5}$  de contraste) : les faibles fluctuations vont croître sous l'effet de l'instabilité gravitationnelle
- Emission du fond diffus cosmologique (CMB, cosmic microwave background) à  $z \sim 1000$
- Univers **Neutre** et **plutôt froid** ( $T \sim 3000$  K), qui va en se refroidissant

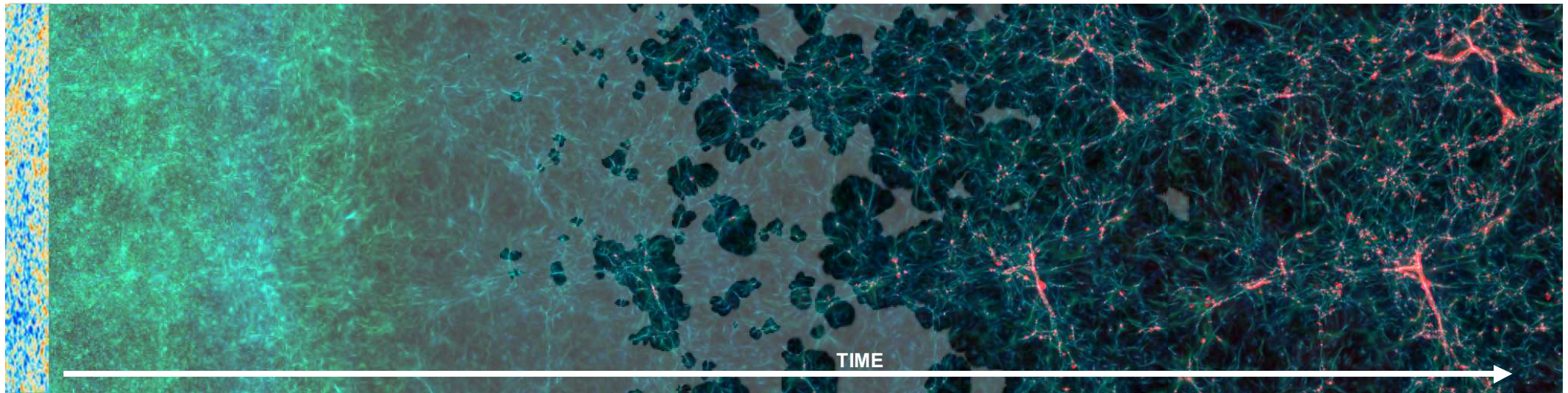
$$T_{\text{rad}} \sim (1 + z)^{-1} \quad T_{\text{b}} \sim (1 + z)^{-2}$$

- Pas de fond UV



# Cosmic Dawn & Reionization

Visu : N. Deparis



CMB  
 $z=1100$   
 $t \sim 380\,000$  yrs

Cosmic Dawn  
 $z \sim 30-15$   
 $t \sim 200$  Myrs

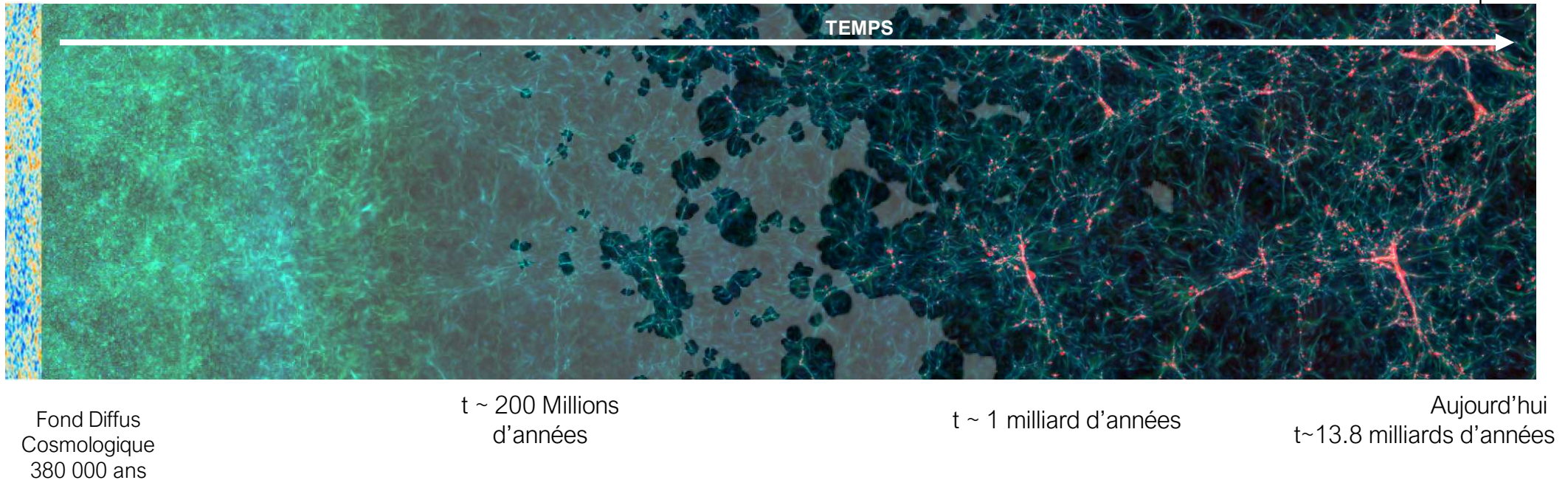
Reionization  
 $z \sim 15-5$   
 $t \sim 800$  Myrs

Today  
 $z=0$   
 $t \sim 13.8$  Gyrs

The Cosmic Dawn and the Reionization are driven by many aspects of the buildup of large scale structures and sources (including the very first stars and AGNs).

# Une transition dans l'Univers Jeune ( $60 > z > 6$ )

Visu : N. Deparis

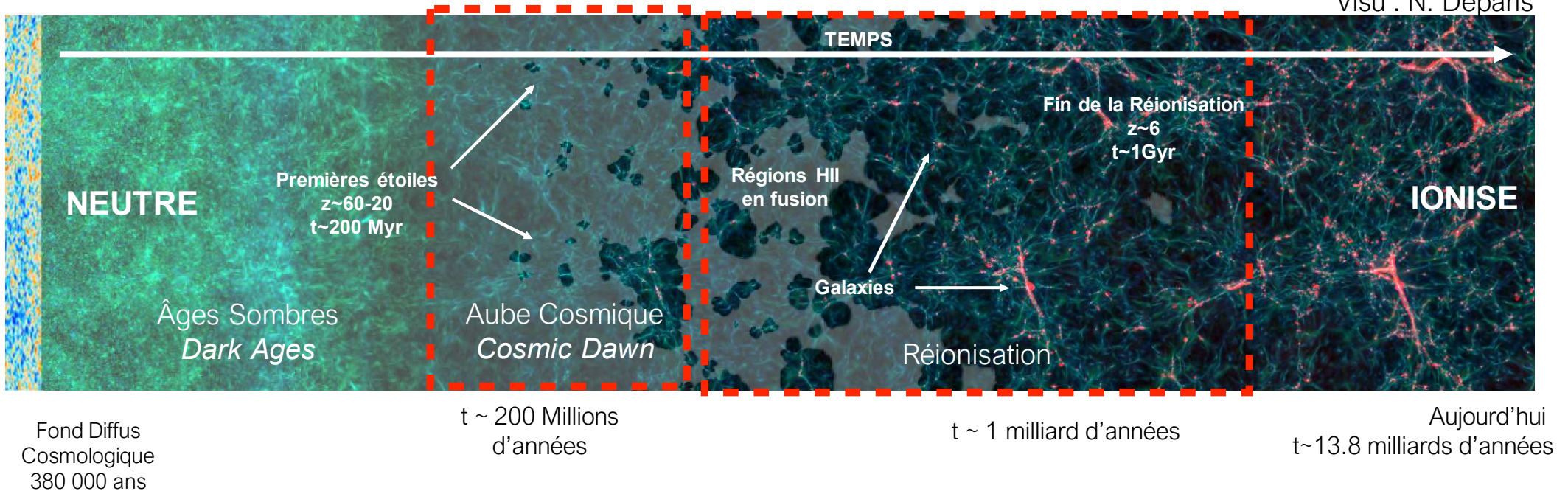


- L'**aube cosmique** et la **réionisation** sont régies par de nombreux aspects de la **mise en place** des grandes structures de l'Univers et des sources de lumières astrophysiques (dont les toutes **premières étoiles et noyaux actifs** de galaxies (AGNs))



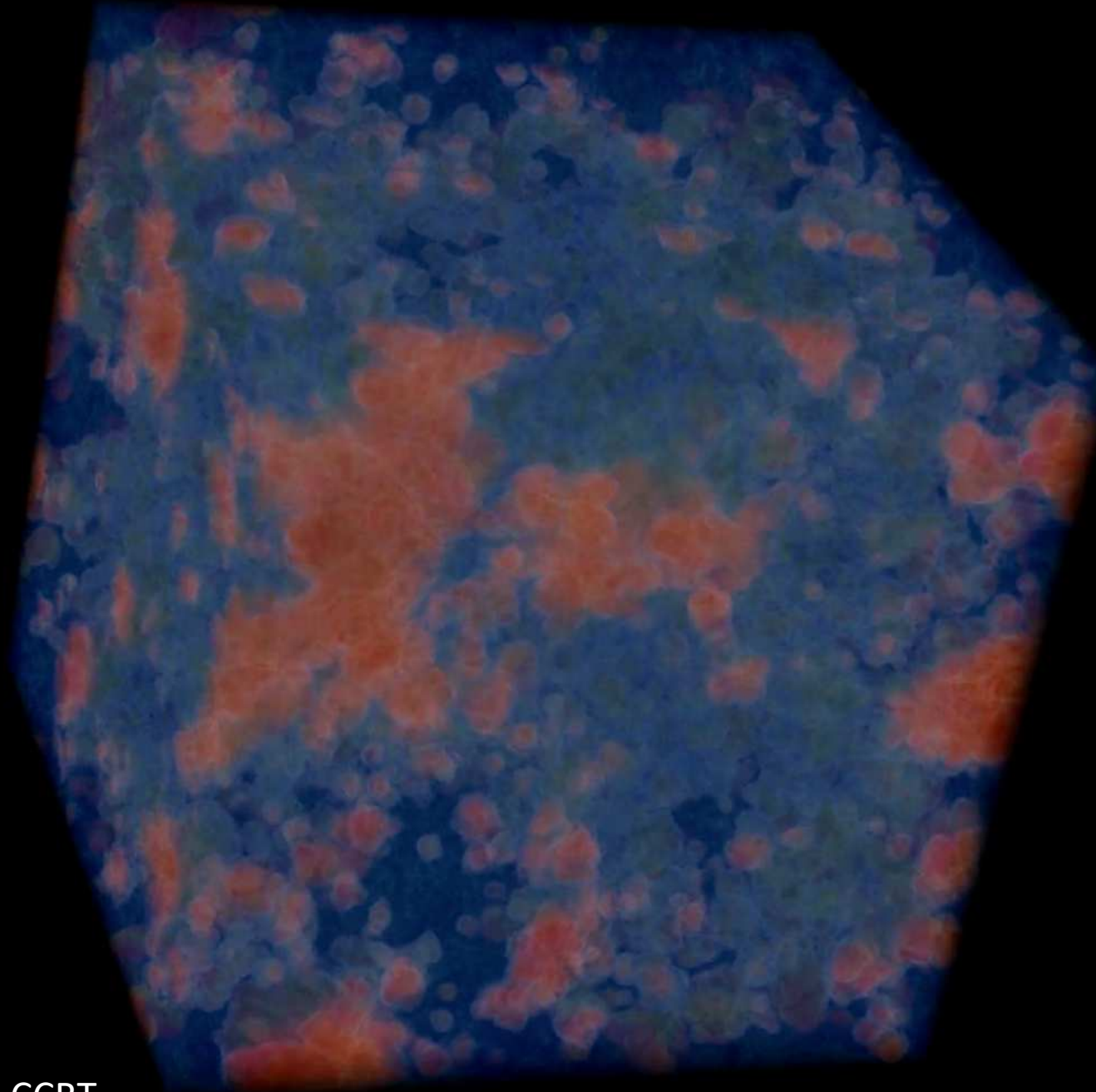
# Une transition dans l'Univers Jeune ( $60 > z > 6$ )

Visu : N. Deparis



- Réionisation terminée environ 1 Milliard d'années après le Big-Bang
- régie par la lumière ionisante des première étoiles, dans les premières galaxies
- laisse voir un réseau de régions ionisées, qui finissent par fusionner
- laisse place à un Univers ionisé (fraction d'hydrogène neutre résiduelle  $\sim 10^{-4}$ ) et chaud ( $\sim 10\,000$  K), baignant dans un fond UV d'origine astrophysique

Bleu= neutre et froid — Rouge = ionisé et chaud

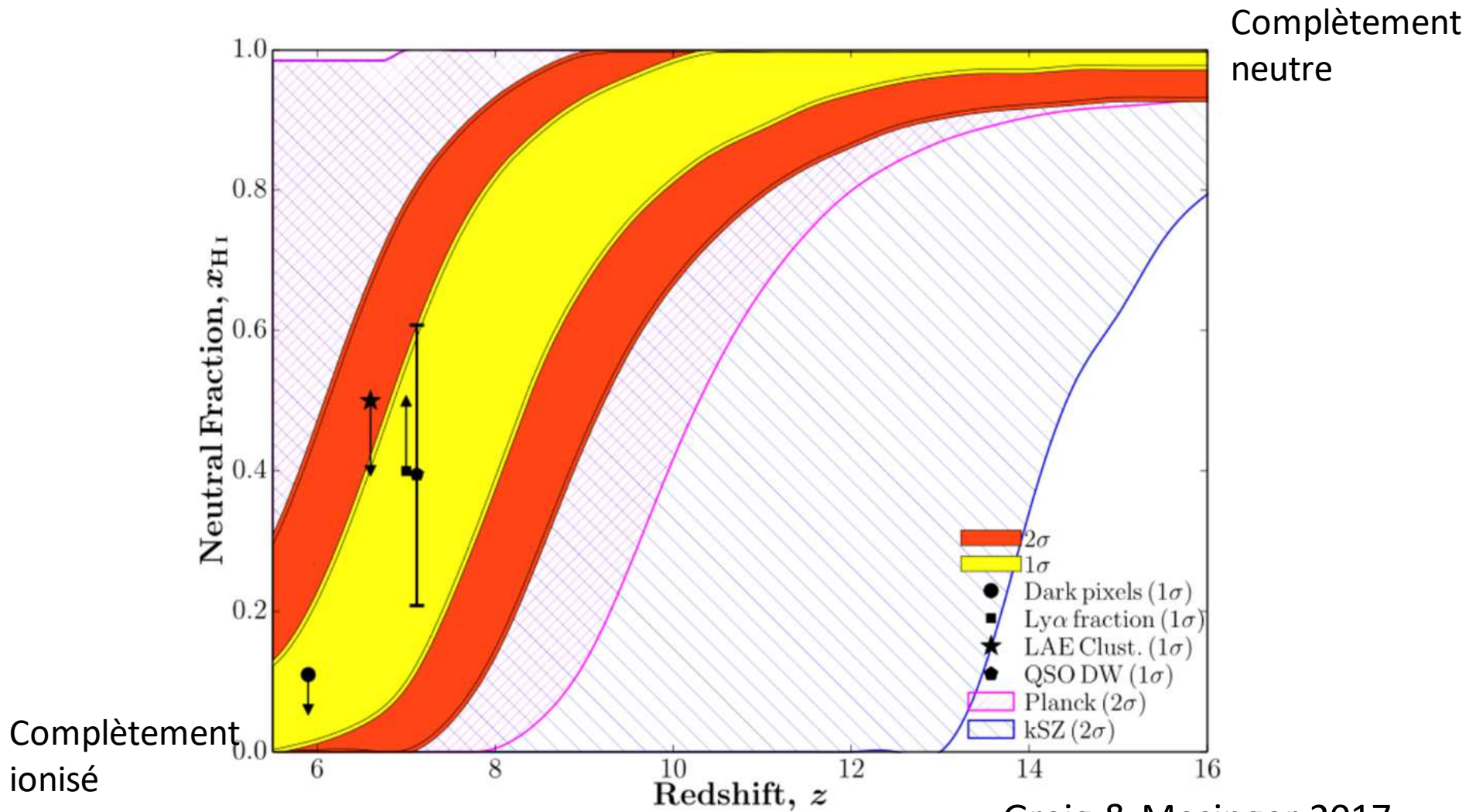


Titane -CCRT  
256 GPUs

Aubert & Teyssier 2010  
Visu : D. Pommarède



# La transition dans l'Univers Jeune ( $60 > z > 6$ )



Greig & Mesinger 2017

# Le mécanisme de base : région HII en expansion

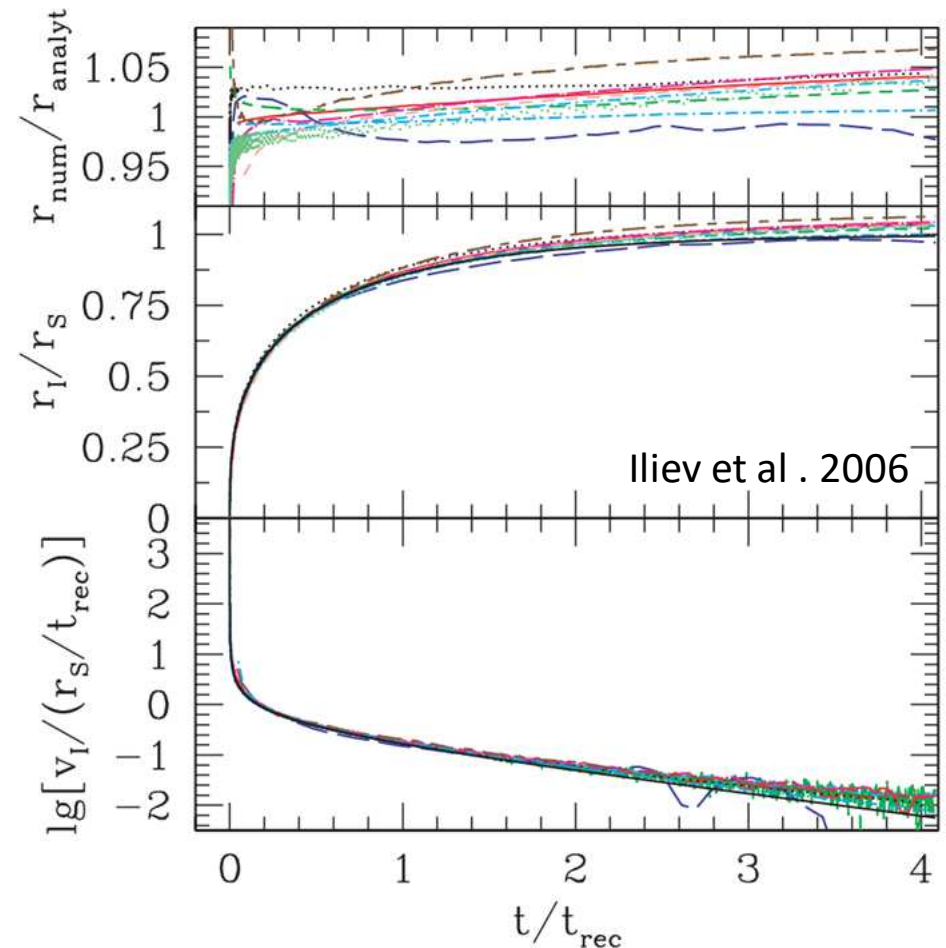
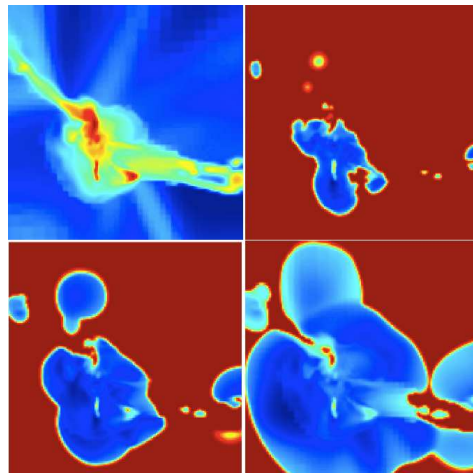
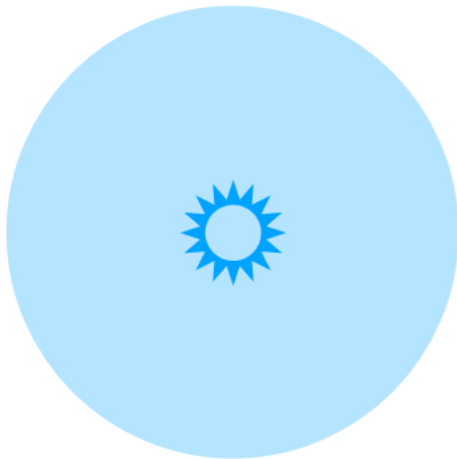
Cas homogène et Univers Statique

$$r_I = r_S [1 - \exp(-t/t_{\text{rec}})]^{1/3},$$
$$v_I = \frac{r_S}{3t_{\text{rec}}} \frac{\exp(-t/t_{\text{rec}})}{[1 - \exp(-t/t_{\text{rec}})]^{2/3}},$$

where

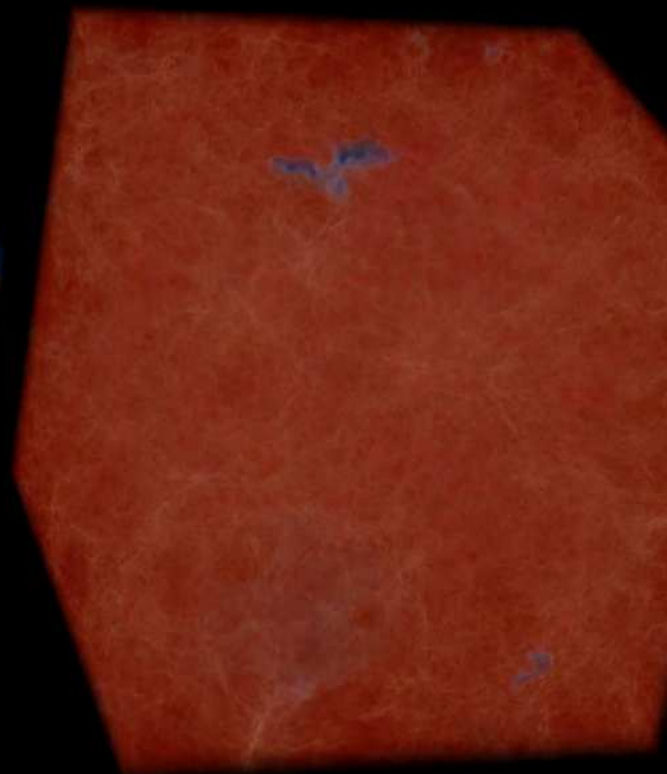
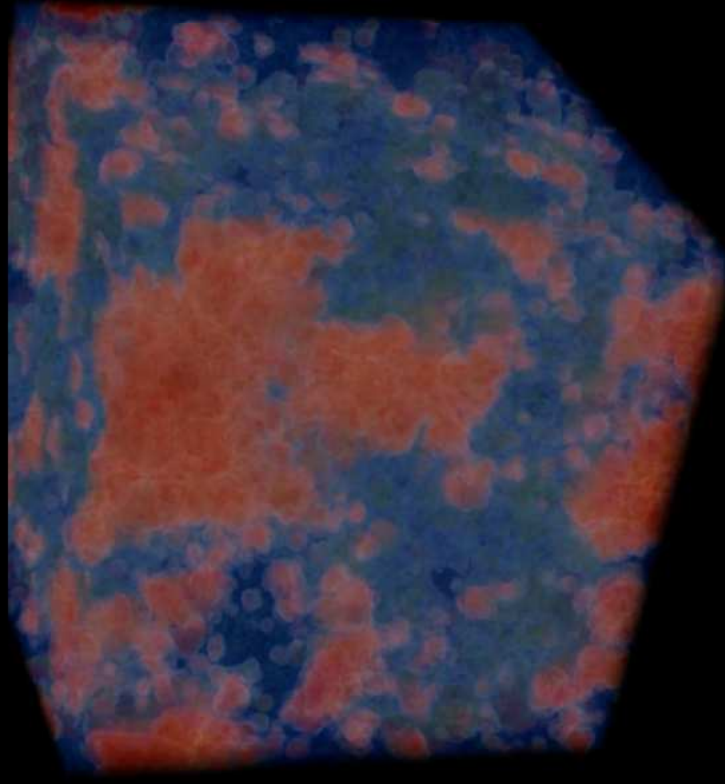
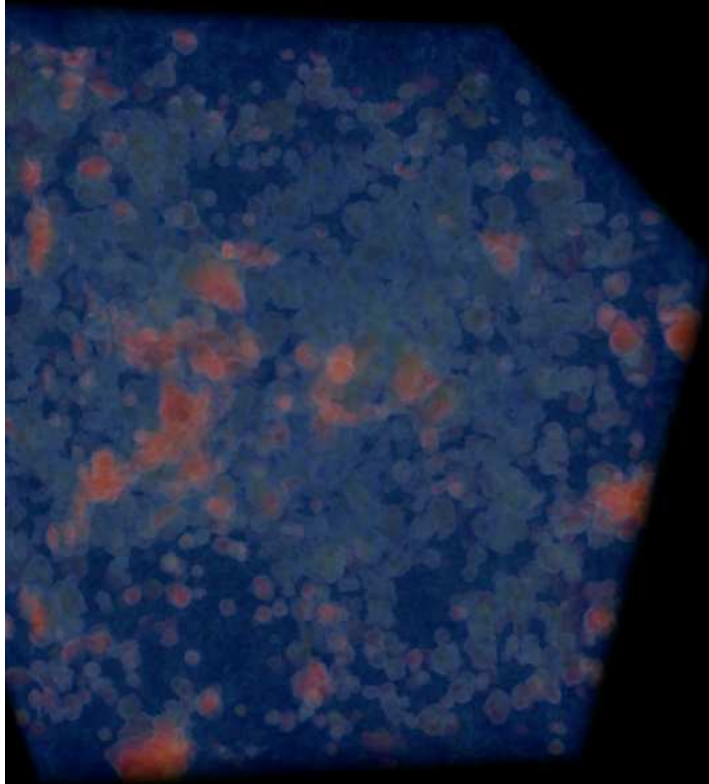
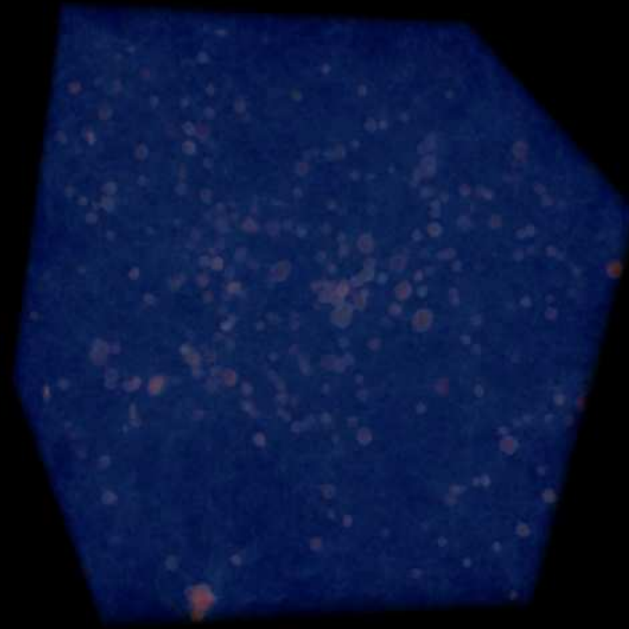
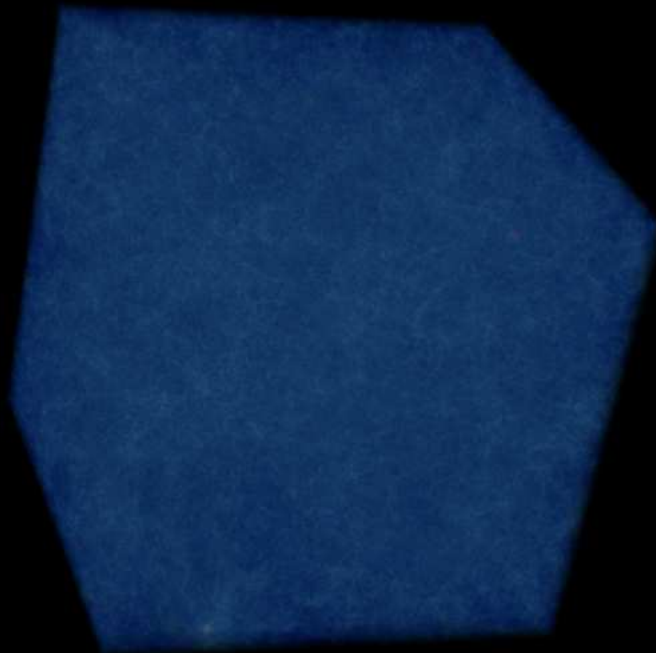
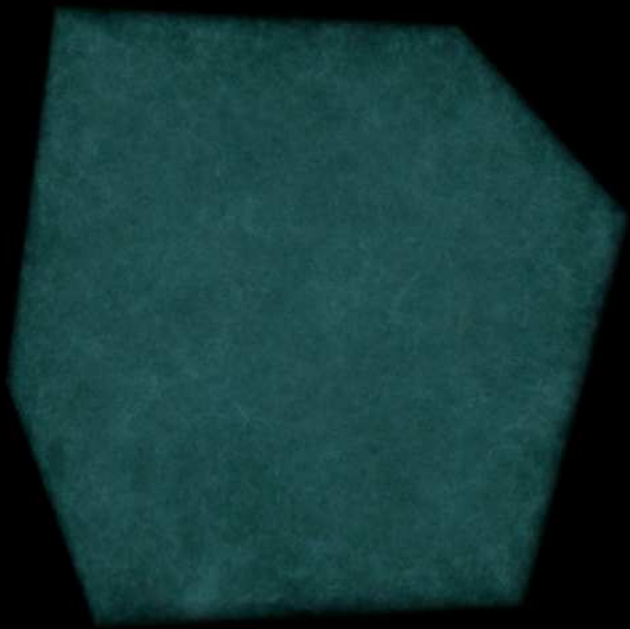
$$r_S = \left[ \frac{3\dot{N}_\gamma}{4\pi\alpha_B(T)n_H^2} \right]^{1/3}$$

Dans un Univers en expansion le régime stationnaire est atteint en coordonnées **comobiles**



See also: Mellema, Iliev, Shapiro, Alvarez, 2006 Shapiro & Giroux 1987

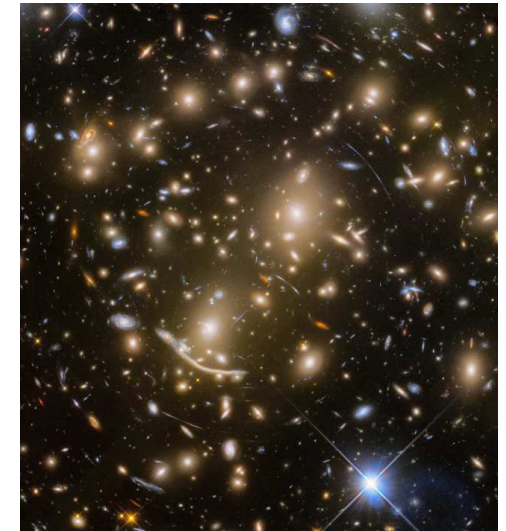
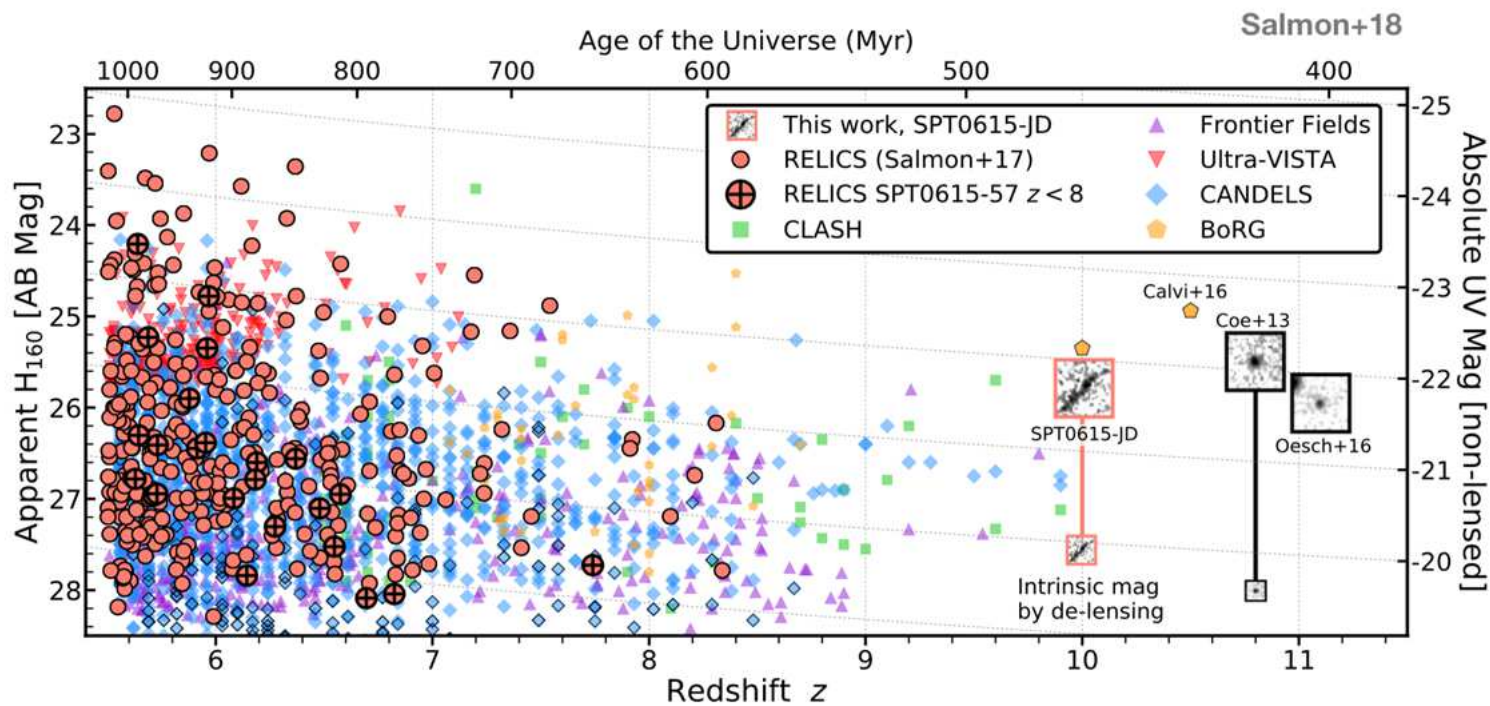




## Partie II : Observations et Théories de l'émergence des premières structures



# Les sources : Relevés profonds de galaxies

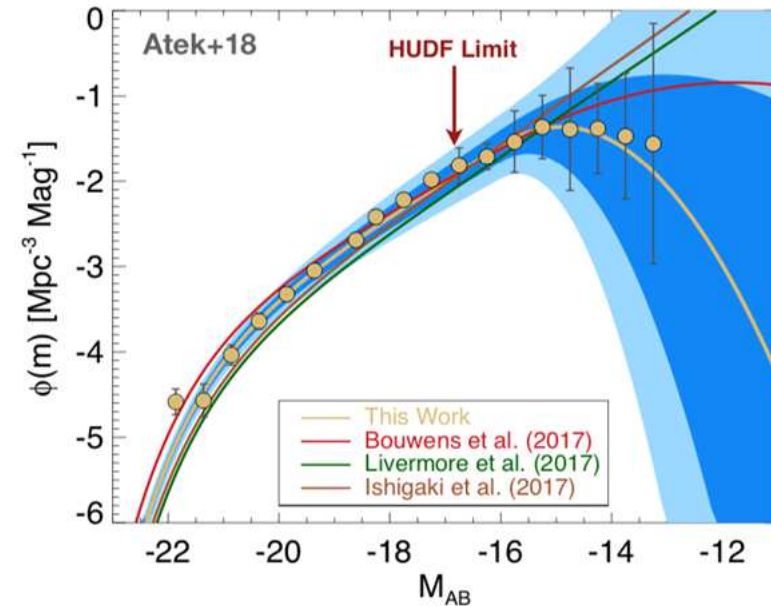
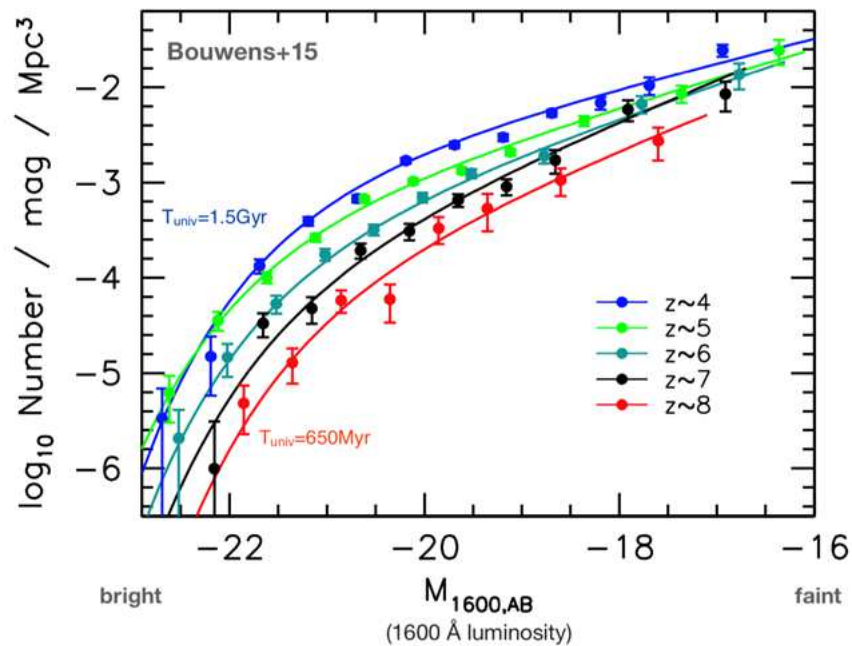


Relevés profonds avec HST permettent d'attraper des galaxies jusqu'à  $z \sim 8$ .

Par ailleurs, en ciblant des champs lentillés, on peut augmenter la taille des échantillons tout en attrapant des galaxies à  $z > 10$ .

**N'EST PLUS A JOUR !!**

# Les sources : Fonctions de Luminosité des Galaxies



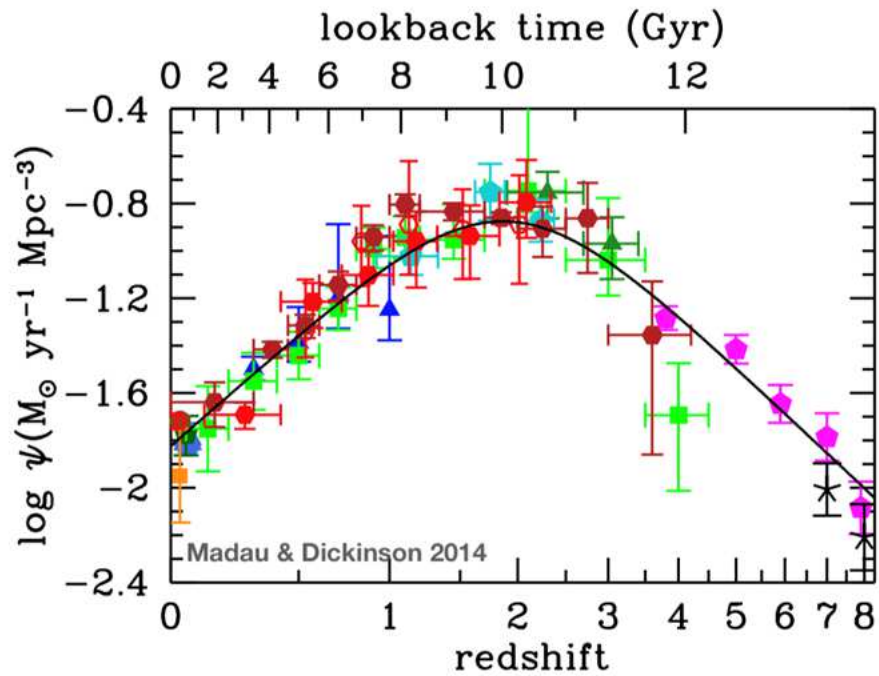
Les relevés permettent notamment la construction de fonctions de luminosité des galaxies.

Ces fonctions de luminosité permettent de remonter

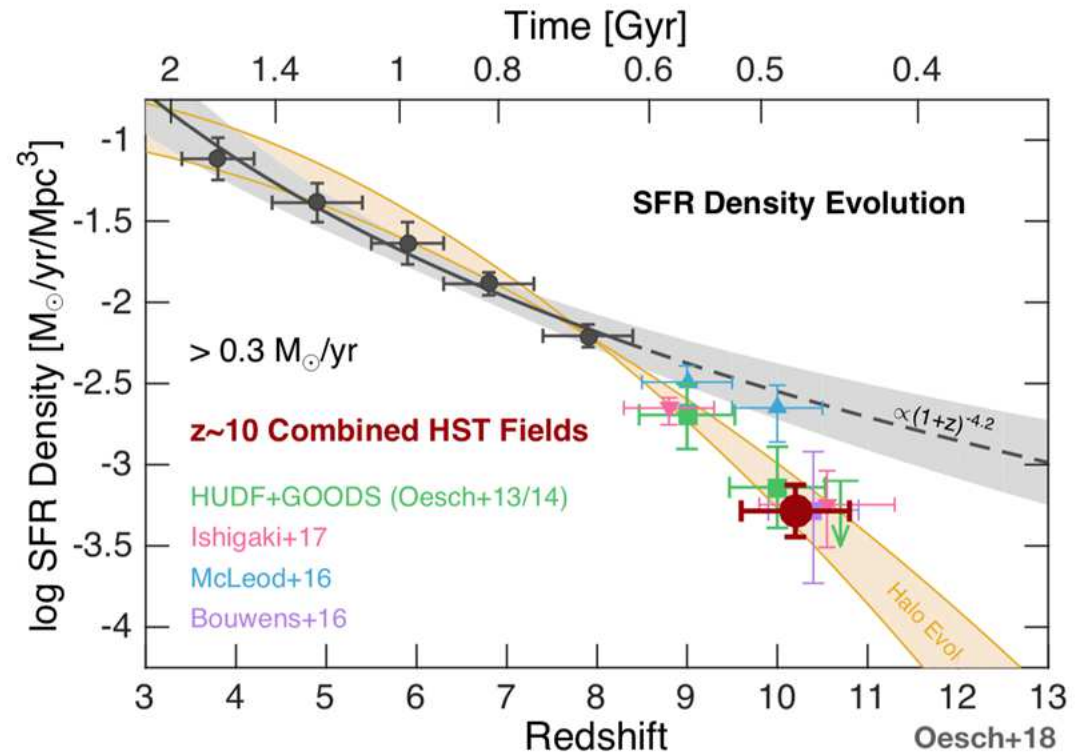
- au taux de formation d'étoiles cosmique (SFR, Star Formation Rate)
- au bilan et au budget de photons produits
- à la fonction de masse des halos de matière noire



# Les sources : Taux de formation d'étoile des galaxies

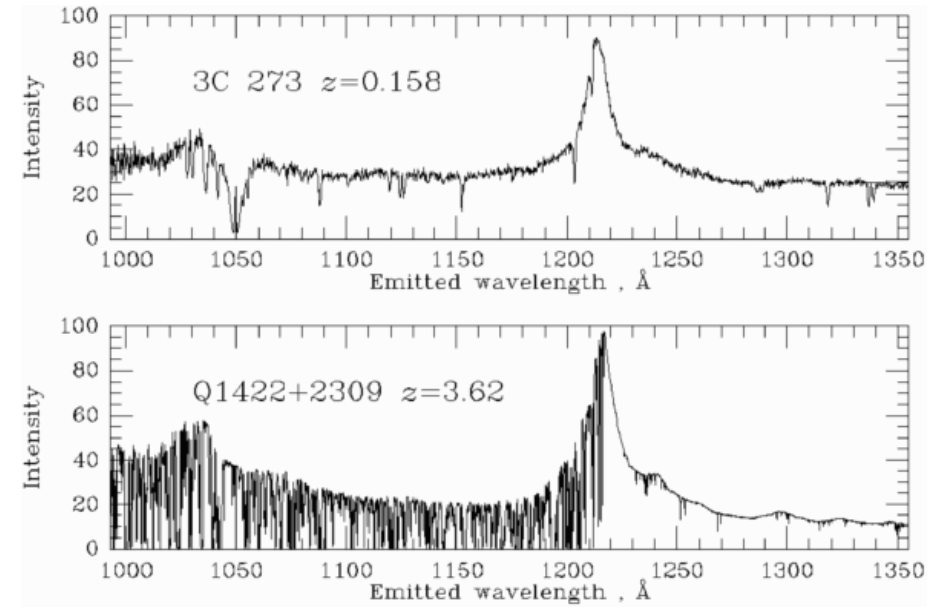
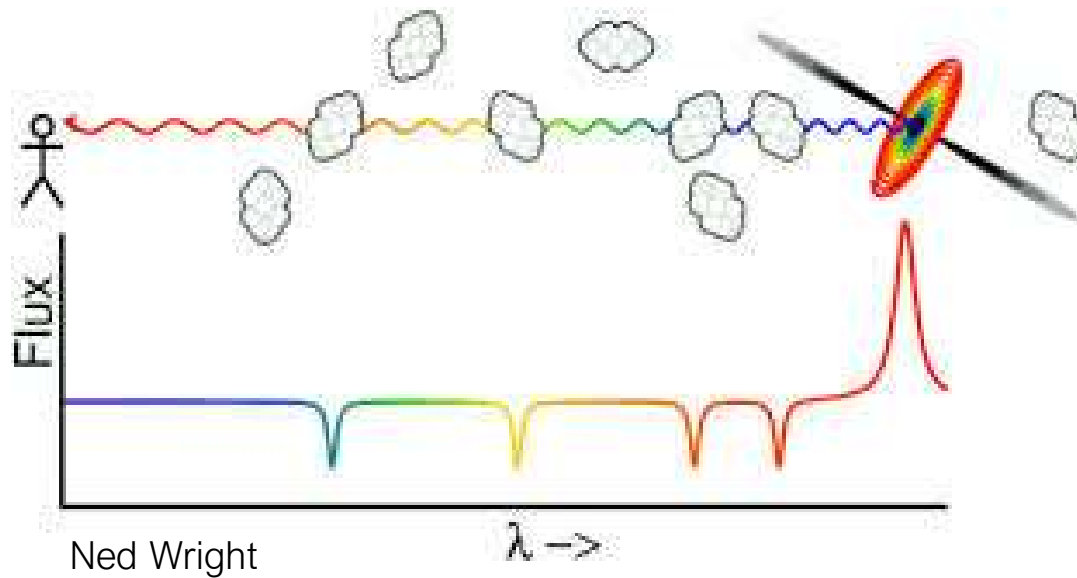


Taux de formation d'étoile cosmique



Taux de formation d'étoile cosmique durant les 2 premiers milliards d'années de l'Univers

# Le gaz diffus : Forêt Lyman-Alpha du milieu intergalactique

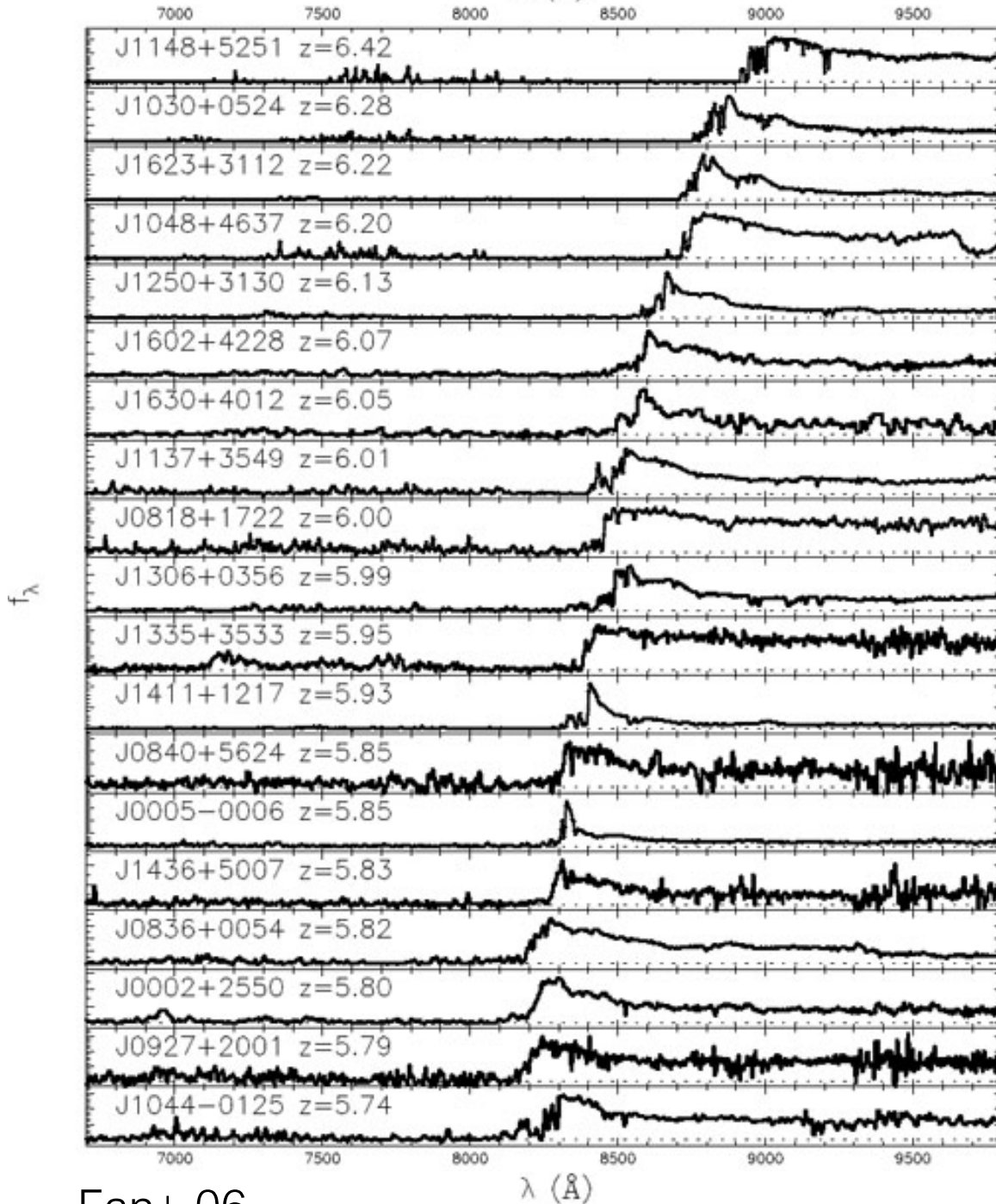


Bill Keel

Chaque absorbeur sur la ligne de visée , **qui possède encore de l'hydrogène neutre**, va laisser une raie d'absorption dans la partie bleue du spectre.

On peut par exemple reconstruire la distribution spatiale du gaz le long de la ligne de visée vers un phare distant (un quasar)



$\lambda$  (Å)

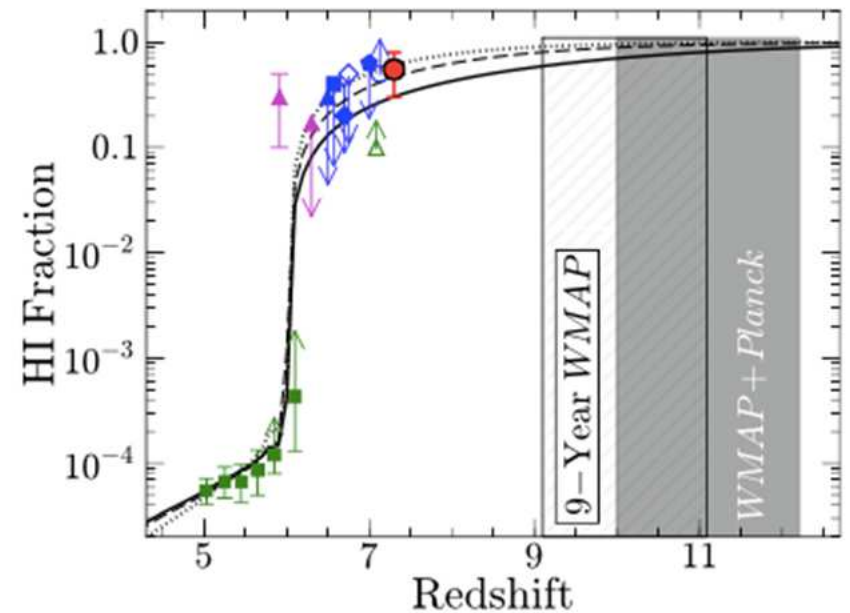
Age de l'Univers

Plus les quasars sont distants plus l'absorption est saturée

Les quasars les plus distants sont entourés d'un continuum de gaz absorbant, avant la réionisation. Il n'y a plus de forêts mais de véritables **tunnels d'absorption**.

On retrouve de la transmission à partir de 1 milliard d'années après le Big-Bang, vers  $z \sim 6$ .

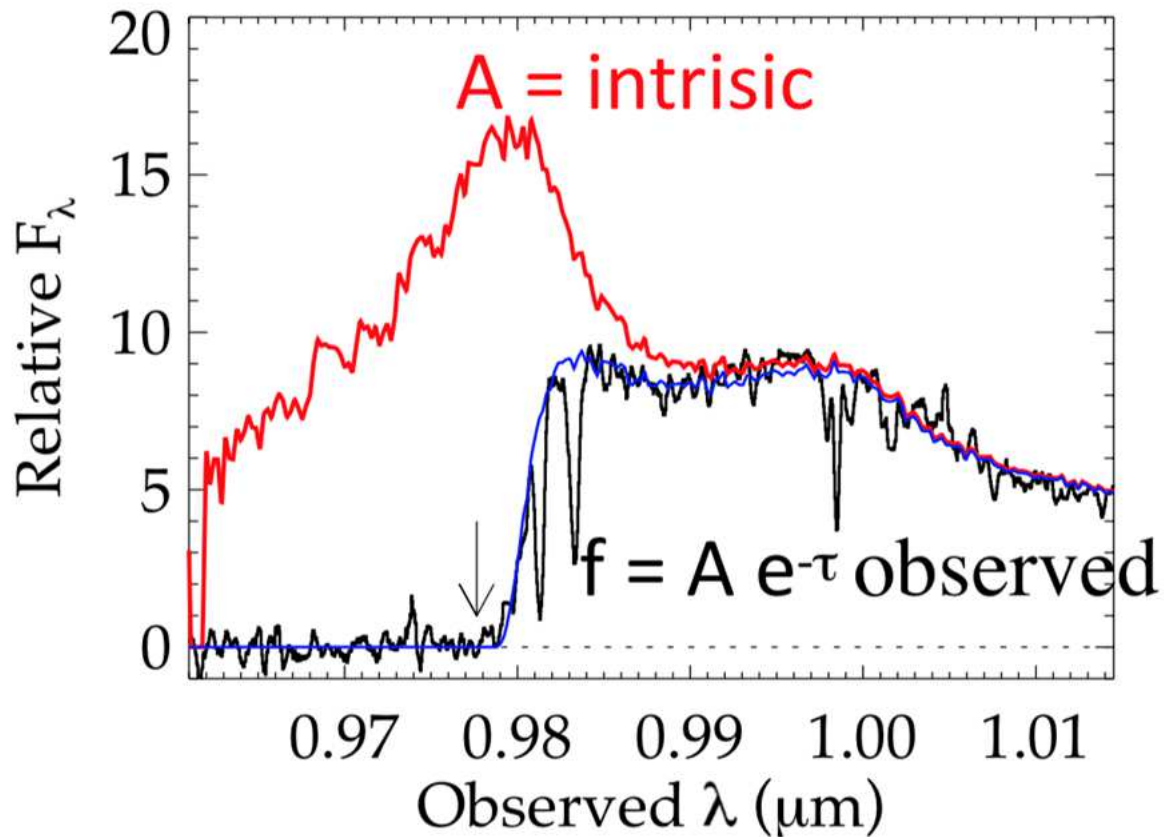
La réionisation a eu lieu à ce moment là.



Fan+ 06

Fan et al. 2006, Konno et al. 2014

# Le milieu intergalactique : effet de proximité



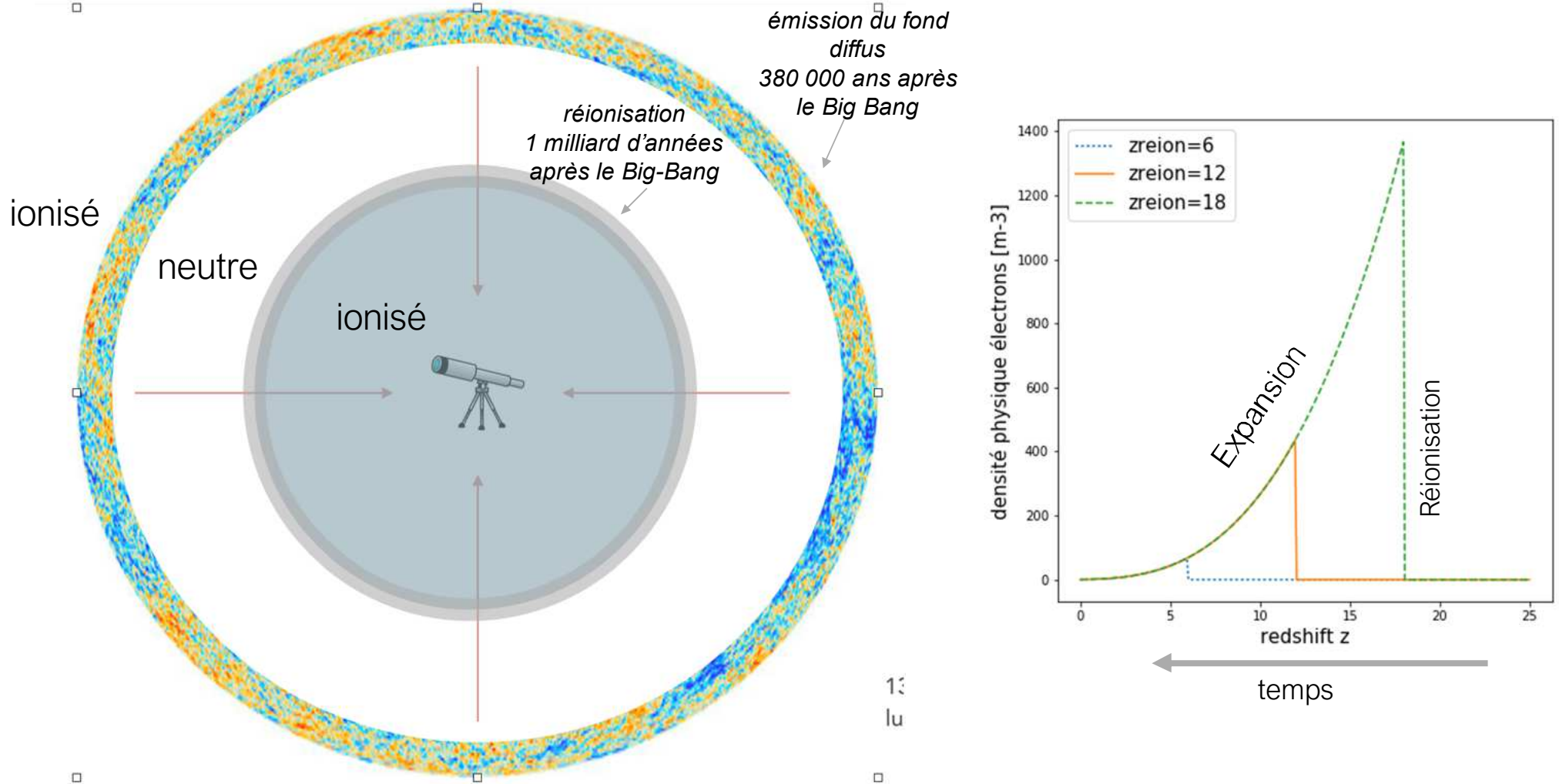
Simcoe 2012 (adapted from Mesinger 2019)

La forme de la raie d'émission indique comment les photons LyA diffusés ont été absorbés à proximité du Quasar.

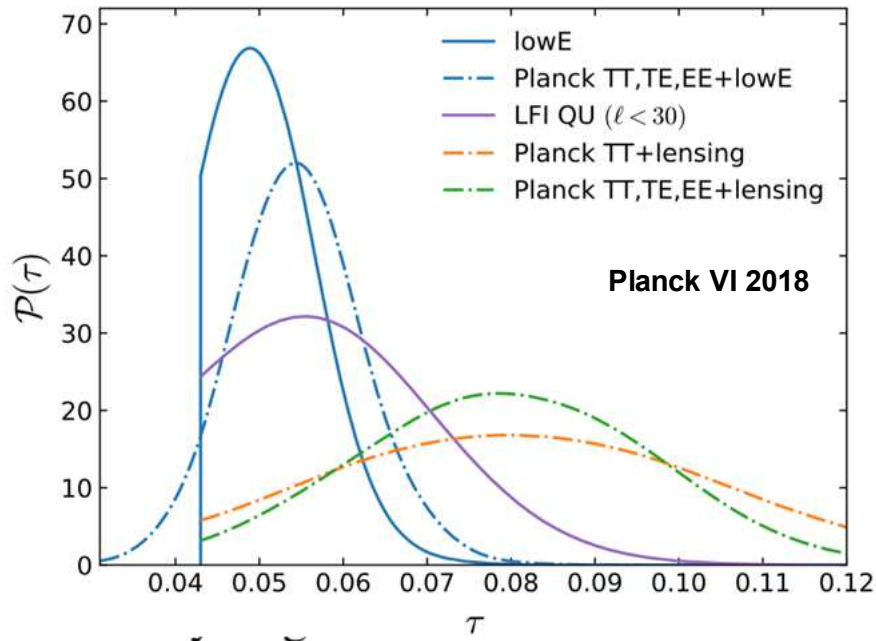
On parle de Quasar 'near-zone'



# Le gaz diffus : Le fond diffus cosmologique et la réionisation

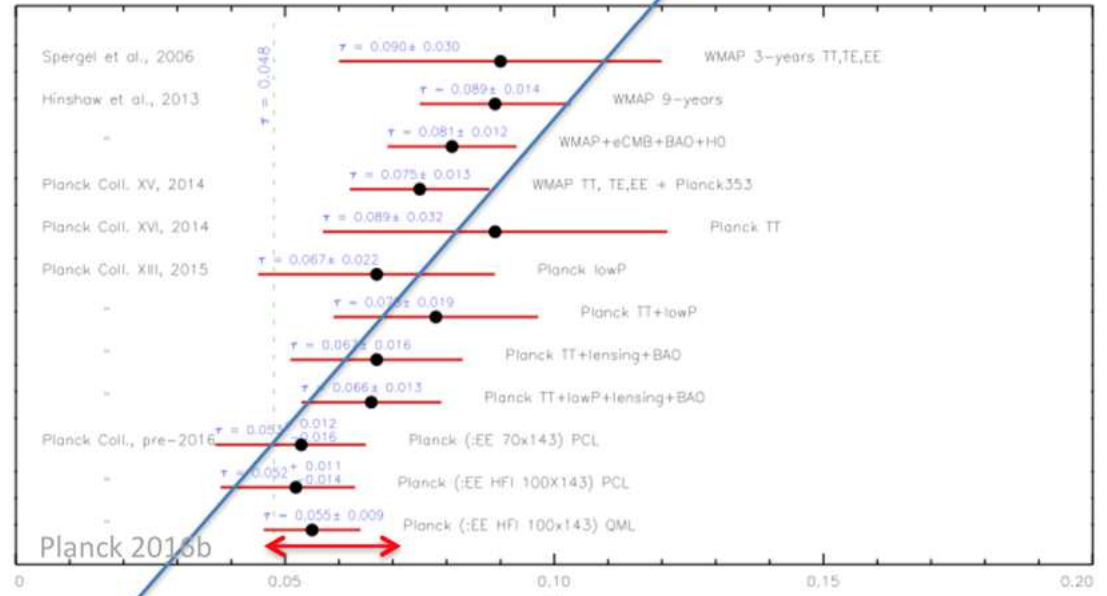


Aujourd'hui, les mesures du satellite Planck suggèrent une mi-réionisation à  $z \sim 7.7$ , compatible avec les mesures de la forêt Lyman-Alpha



optical depth  $\tau = 0.054 \pm 0.007$

WMAP1 2003



$$\tau = c\sigma_T \int_{z=0}^{z_{\text{rec}}} n_e(t) dt$$

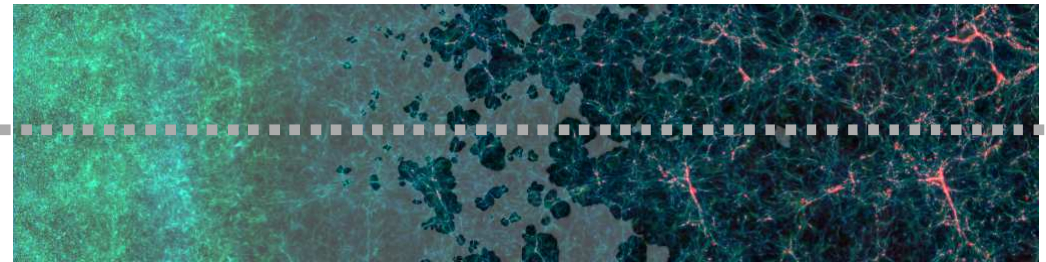
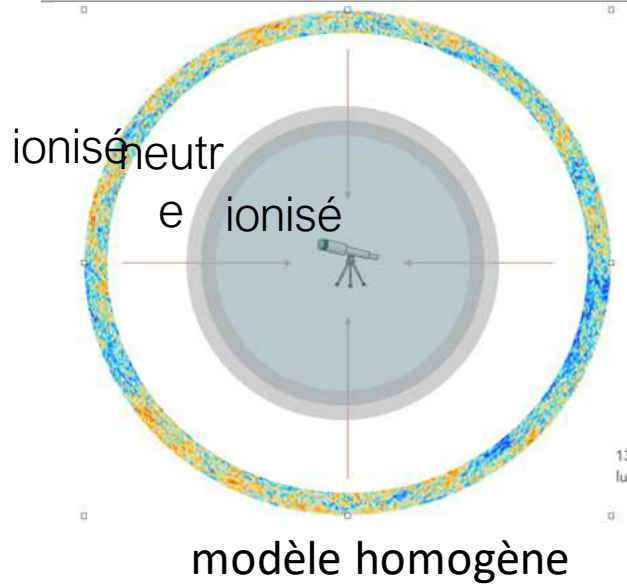
Planck prédit une mi-réionisation vers  $z=7.7$

On note une tendance à la baisse de l'opacité avec le temps des observations

Le CMB apparaît comme une sonde moins sensible que prévue à la Réionisation

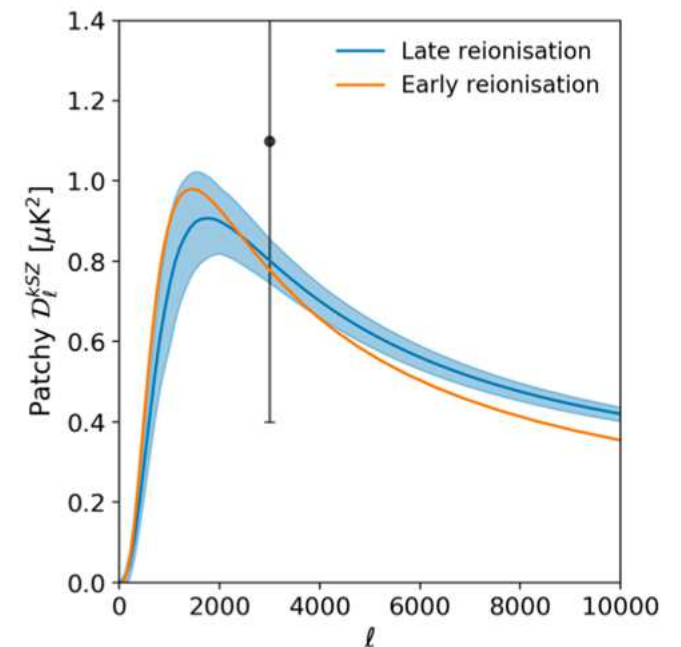
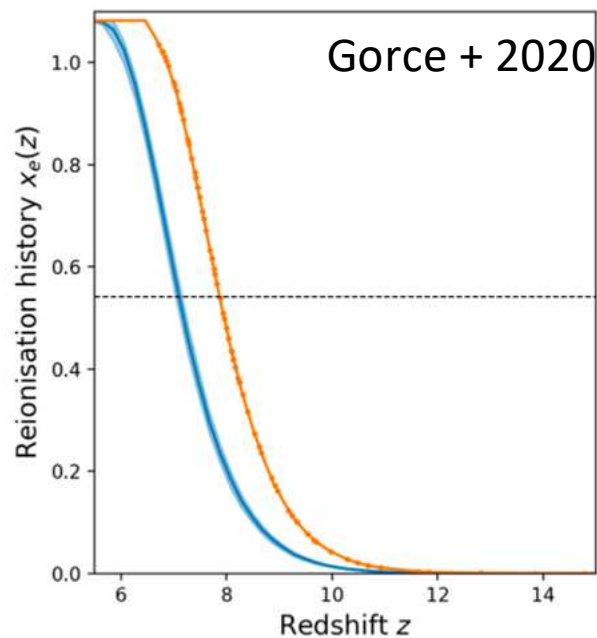


# kSZ : effets de la réionisation 'patchy' à petite échelle

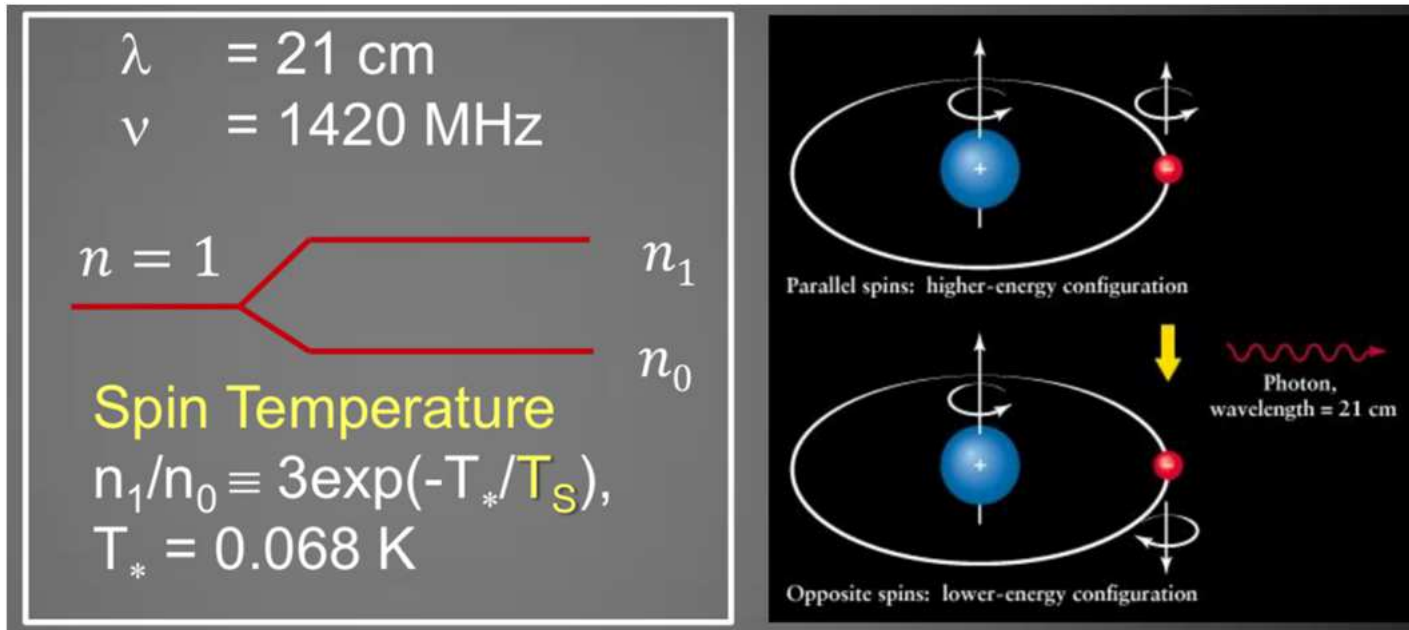


effet hétérogène = effet 'kinetic Sunyaev-Zeldovich'

- Nécessite l'accès aux hautes  
résolution angulaires  
+ Signal faible  
+ Modèles fiables



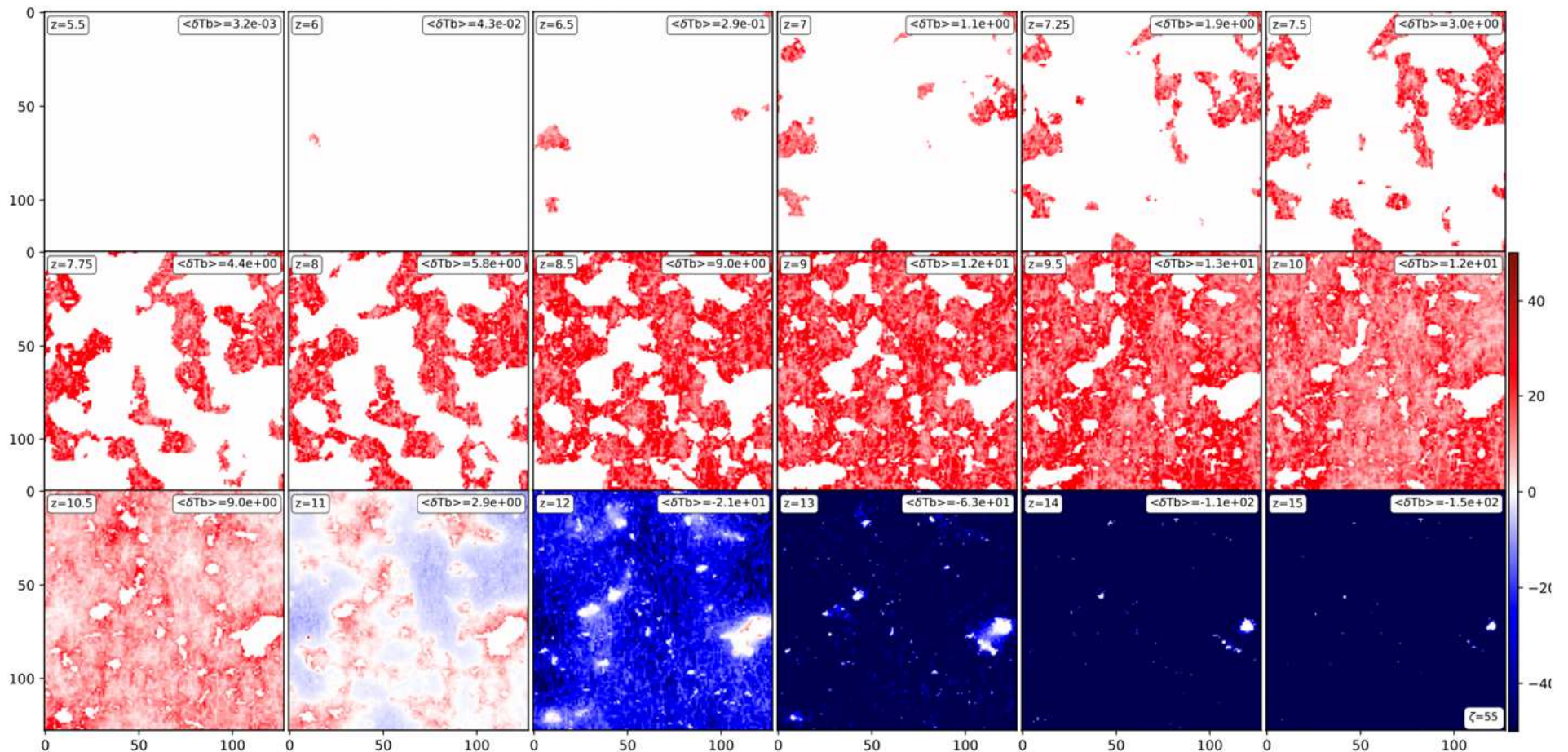
# Observations du futur : l'émission radio de l'IGM



$$\delta T_b(\nu) \approx 27 \chi_{\text{HI}} (1 + \delta_{\text{nl}}) \left( \frac{H}{dv_r/dr + H} \right) \left( 1 - \frac{T_\gamma}{T_S} \right) \left( \frac{1+z}{10} \frac{0.15}{\Omega_M h^2} \right)^{1/2} \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.023} \right) \text{ mK}$$

Avant la fin de la réionisation, l'Univers est rempli d'hydrogène neutre : on doit pouvoir capter son émission à 21 cm (décalée vers le rouge)

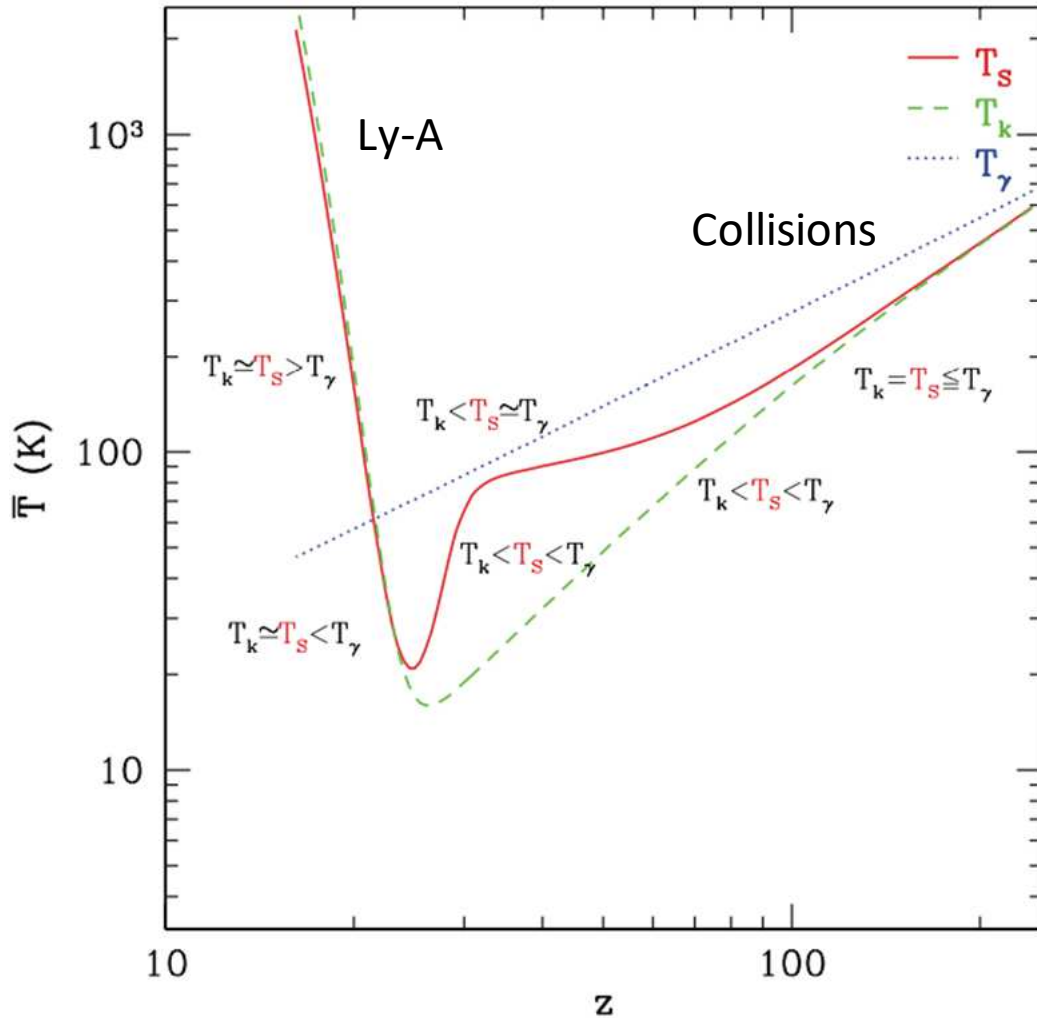
# Histoire du signal à 21cm 'anisotrope'



Gillet + 2021, Hiegal+ (in prep.) (Rq : avant-plans  $\sim 1000 \times$  signal)



# Observations du futur : l'émission radio de l'IGM

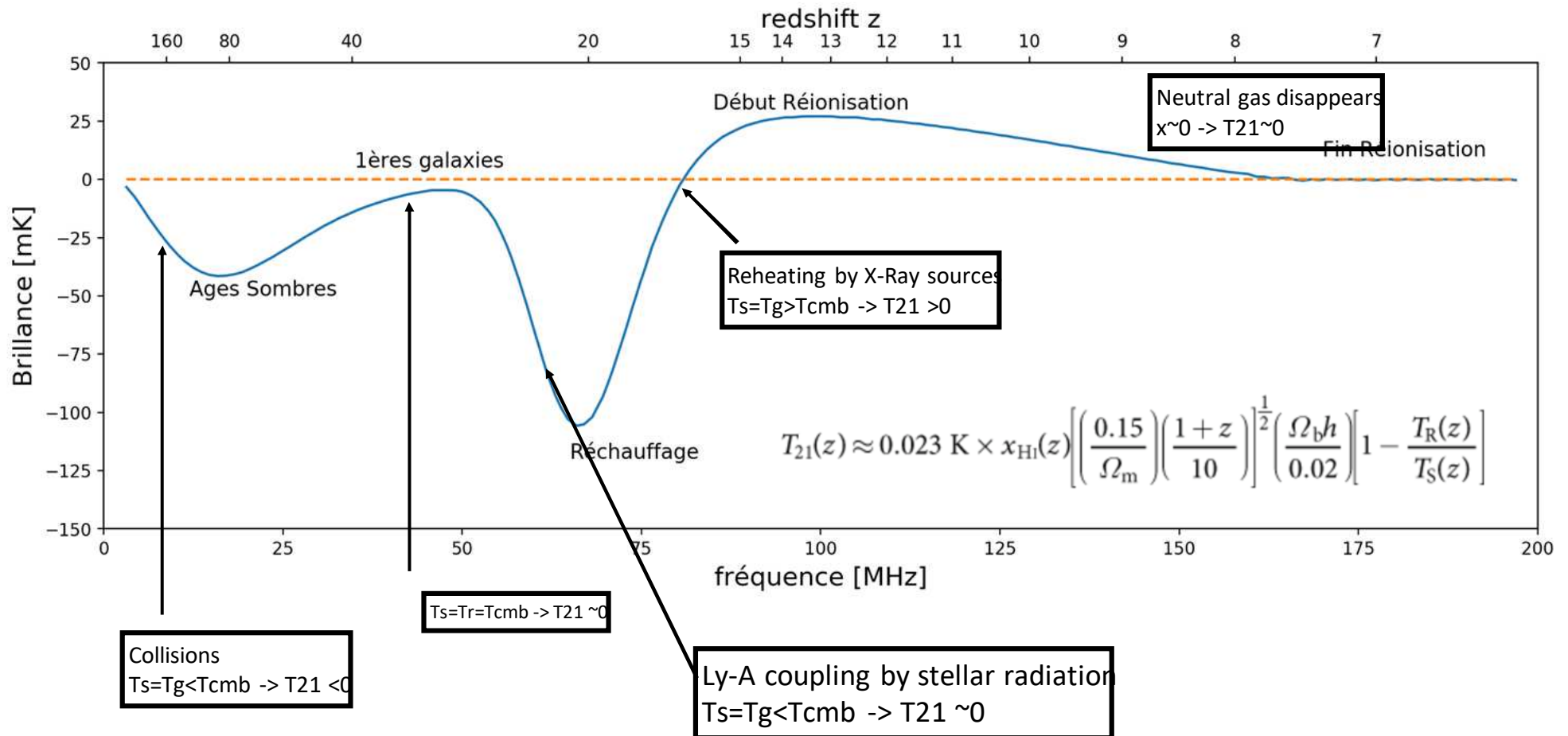


Si les niveaux hyperfins sont thermalisés avec le CMB, le signal 21cm est invisible

Si les niveaux hyperfins sont thermalisés avec le gaz (plus chaud ou plus froid que le CMB), le signal est visible en émission ou en absorption

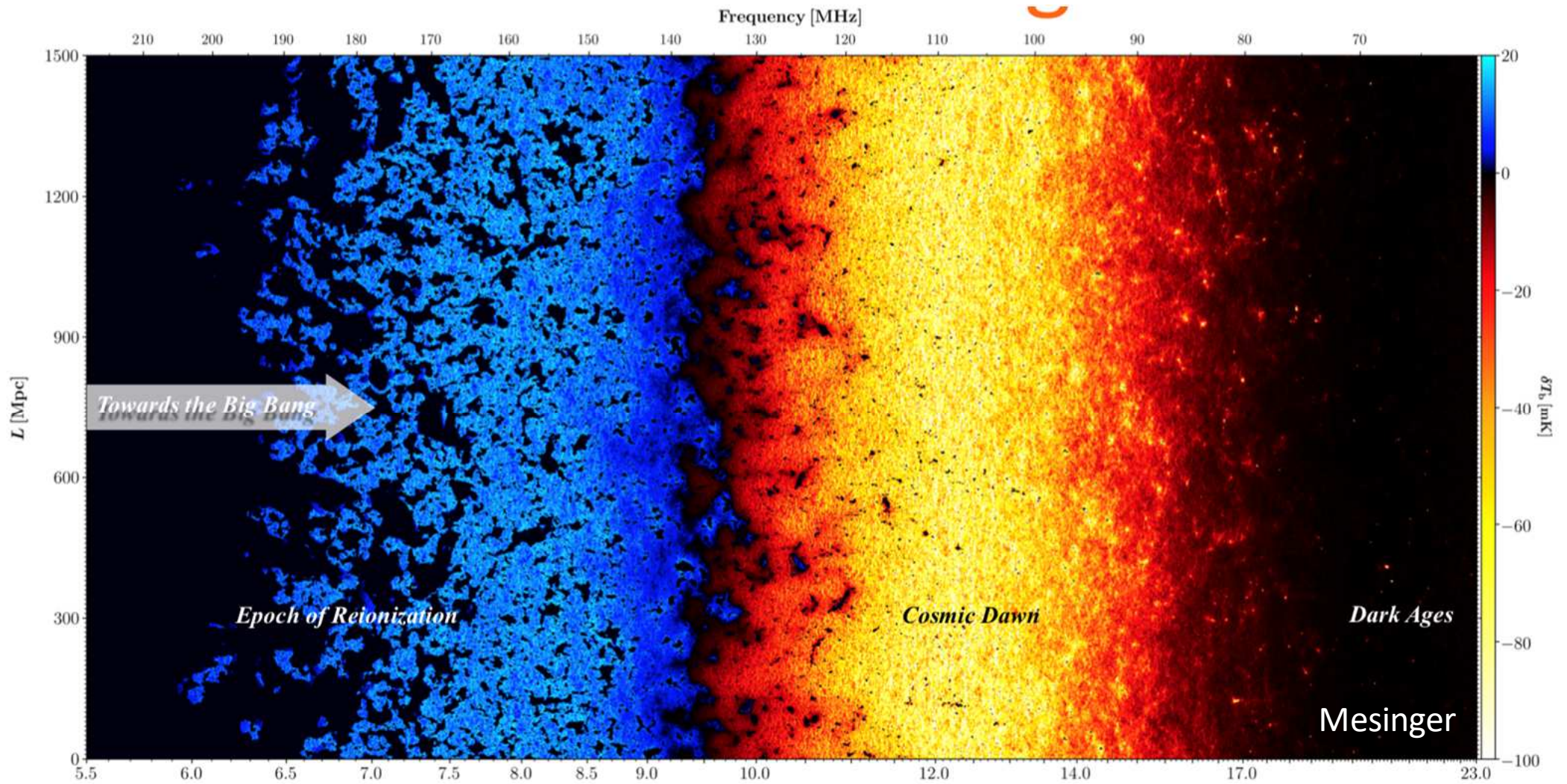
$$\delta T_b(\nu) \approx 27 x_{\text{HI}} (1 + \delta_{\text{nl}}) \left( \frac{H}{dv_r/dr + H} \right) \left( 1 - \frac{T_\gamma}{T_s} \right) \left( \frac{1+z}{10} \frac{0.15}{\Omega_M h^2} \right)^{1/2} \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.023} \right) \text{mK}$$

# Histoire du signal à 21cm moyen



L'intensité du signal radio de la réionisation se mesure en contraste par rapport au CMB.

**En très gros**, si le CMB est le moteur du pompage de la raie 21cm, le signal est invisible. Si c'est le gaz, le signal est visible, en absorption ou emission selon la température relative du gaz par rapport au CMB.



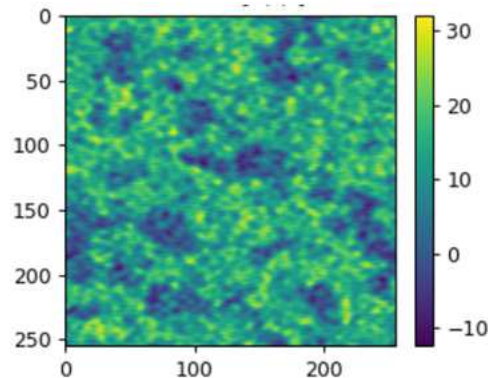
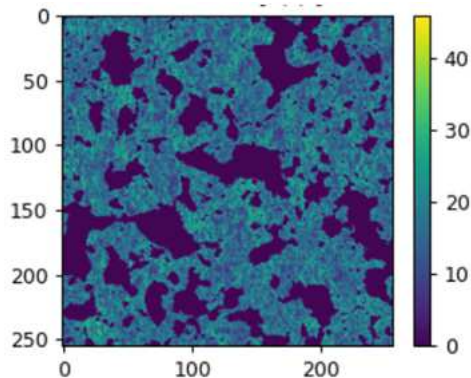
Le « Graal » : cartographie 3D à 21cm : sur le ciel + le temps (simplement en changeant de fréquence)

Réseau radio via instruments tels que HERA (US), SKA (Af.Sud/Australie)  
 Précurseurs : MWA, Paper, **LOFAR**, **NenuFAR**

Remarque : avant de faire de la tomographie, tentative de mesure du **spectre de puissance** des fluctuations du signal radio. Actuellement, limite supérieure seulement.



# SKA-Low (et précurseurs HERA, MWA, NenuFAR, etc.)



Location: Australia

Frequency range:  
**50 MHz to 350 MHz**

**~130,000** antennas spread between **500 stations**

Total collecting area:  
**0.4km<sup>2</sup>**

Maximum distance between stations:  
**>65km**

Total raw data output:  
**157 terabytes** per second  
**4.9 zettabytes** per year

SKA1 LOW

Enough to fill up  
**35,000 DVDs** every second

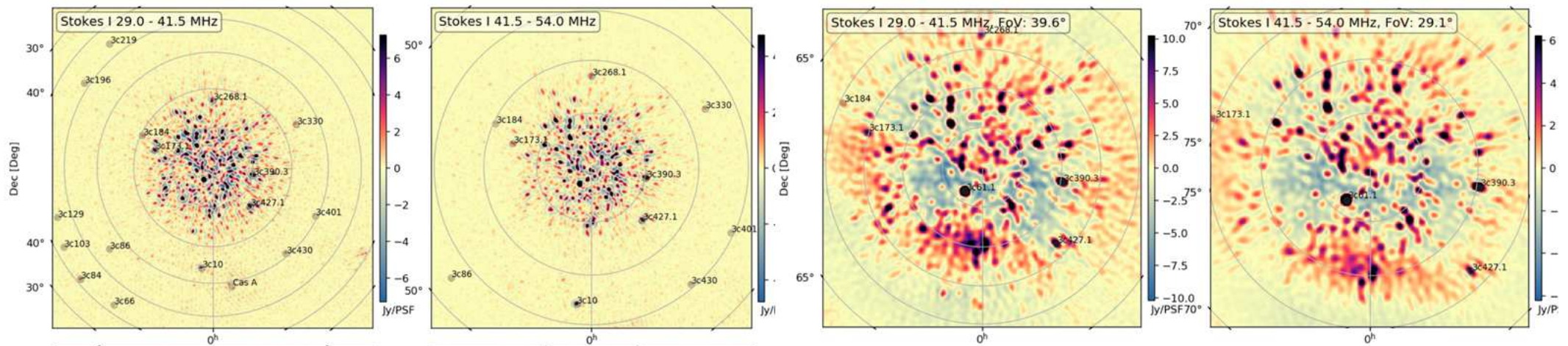
the estimated global internet traffic in 2015  
(source: Cisco)

Compared to LOFAR Netherlands, the current best similar instrument in the world

**25%** better resolution  
**8x** more sensitive  
**135x** the survey speed



# Le 21cm de l'Univers Jeune : un défi pour l'observationnel/traitement du signal



Mertens 2020



- Calibration/Effets instrumentaux
- Gros volumes de données
- Avant plans (~1000 x le signal)

<https://nenufar.obs-nancay.fr>

# Observations du futur : les sources

---



JWST



ATHENA

JWST permettra d'analyser en détail les galaxies à grand  $z$  : redshifts spectroscopiques, contenu stel

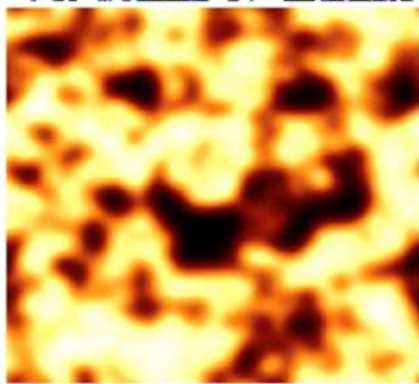
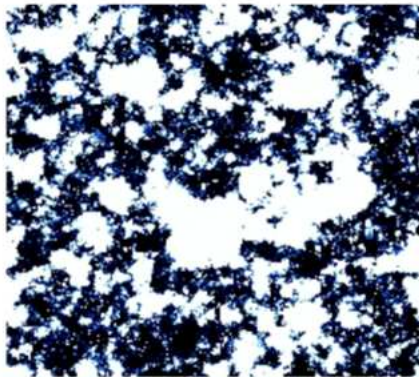
ATHENA permettra d'analyser les AGNs à grand  $z$  ( $z \sim 8$ ) :  
détermination robuste des fonction de luminosité des AGNs



# Observations du futur : Intensity mapping

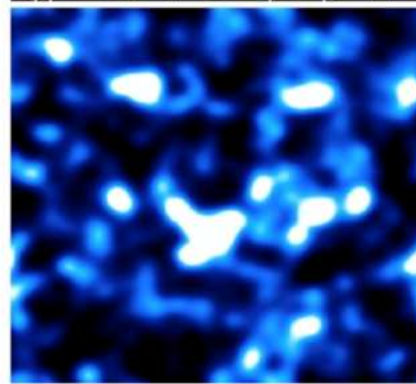
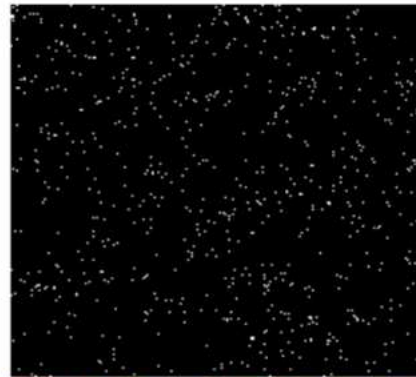
Intensity mapping = emission non résolue des sources, dans une raie donnée (Ly $\alpha$ , CO, CII, OIII, etc.)

Ionization



21 cm

Galaxies



CO(2-1)

200 Mpc

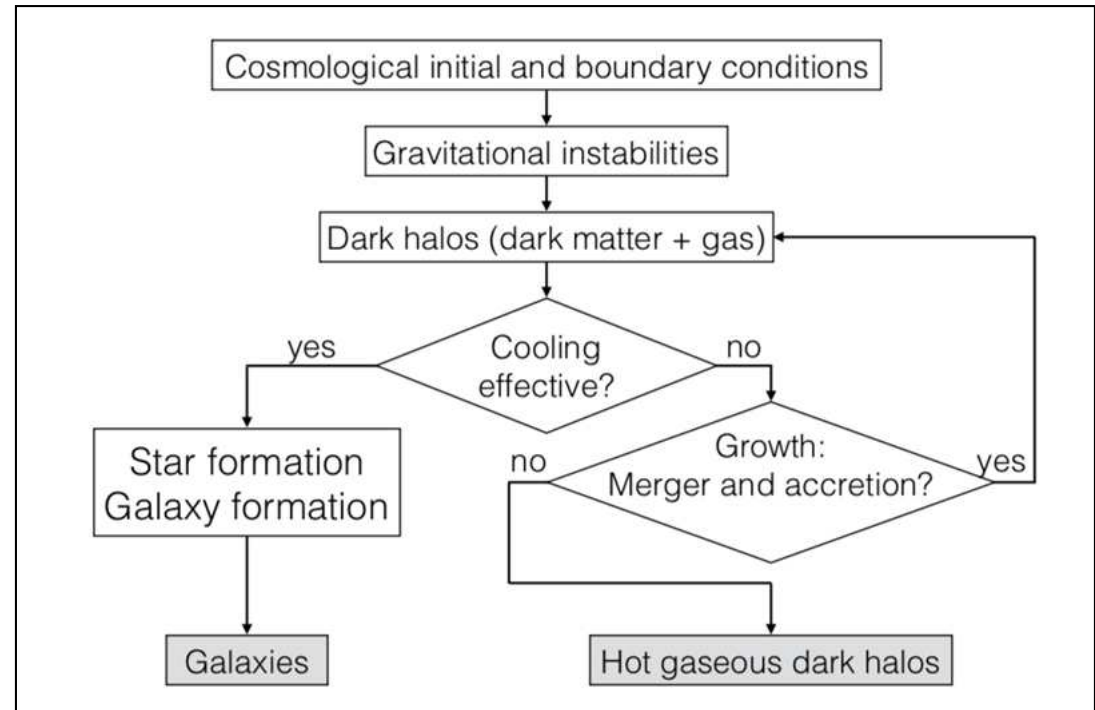
Perte de résolution au profit de l'efficacité :

- Mesure toute l'émission
- Permet de sonder facilement les grandes échelles
- Cross-corrélation permet de réduire l'impact des avants plans
- Permet de sonder la dimension temporelle
- exemple : CONCERTO (CII), SphereX

## Partie III : Quelques défis posés par les premières structures dans l'Univers Jeune

# Théorie & Modélisation de la formation des galaxies

La formation des premières structures  
=  
la formation des structures



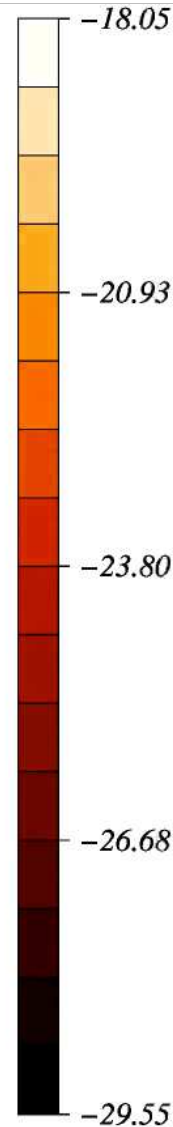
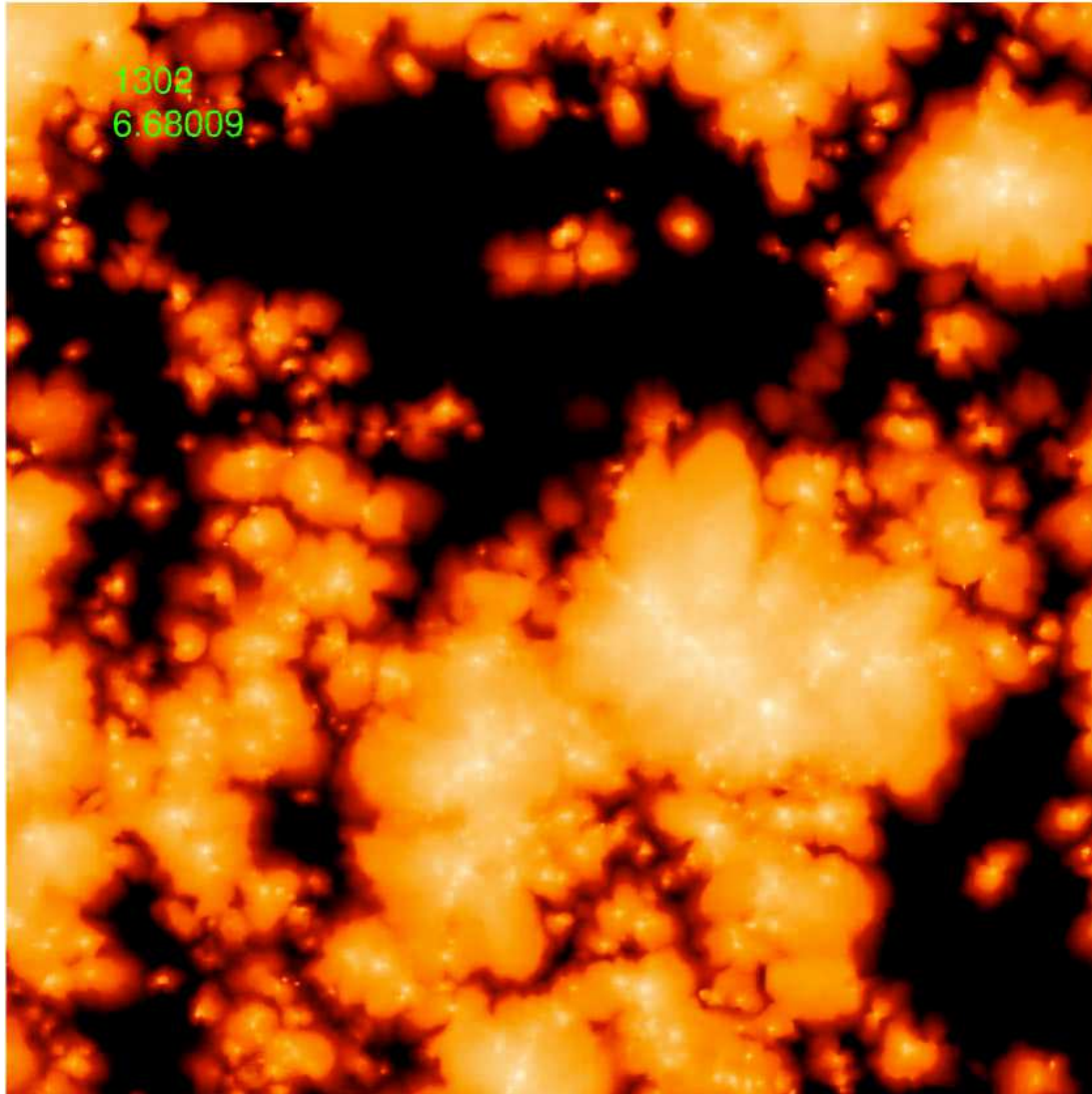
Les méthodes permettant de comprendre comment les premières structures se forment sont similaires à celles utilisées à plus bas  $z$ .

Il faut un modèle de formation des grandes structures régi par la matière noire, et un modèle d'évolution des baryons dans le contexte créé par ces structures de matière noire.

Il faut ajouter un modèle de **transfert radiatif**, i.e. physique de l'interaction matière-rayonnement



# Simulation numérique

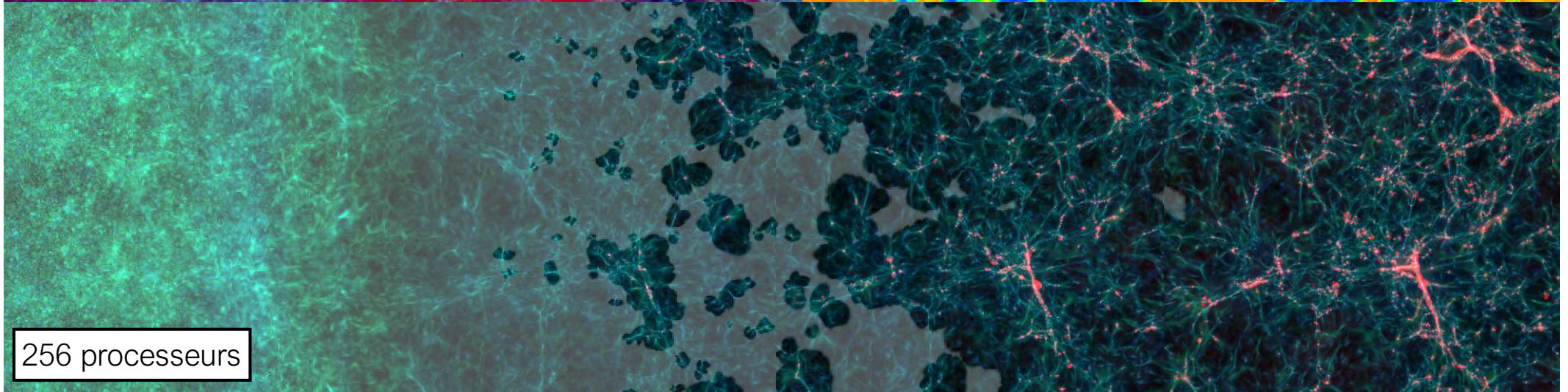
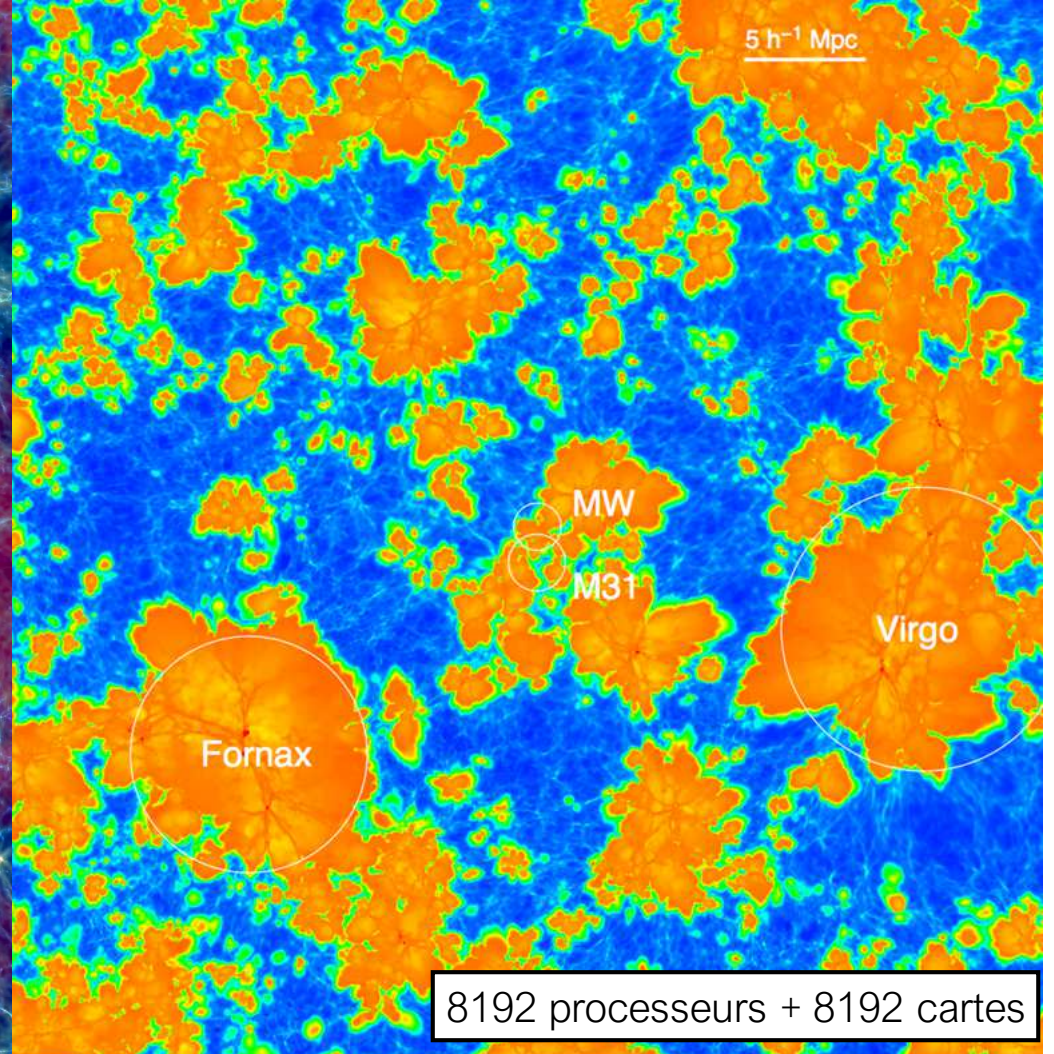
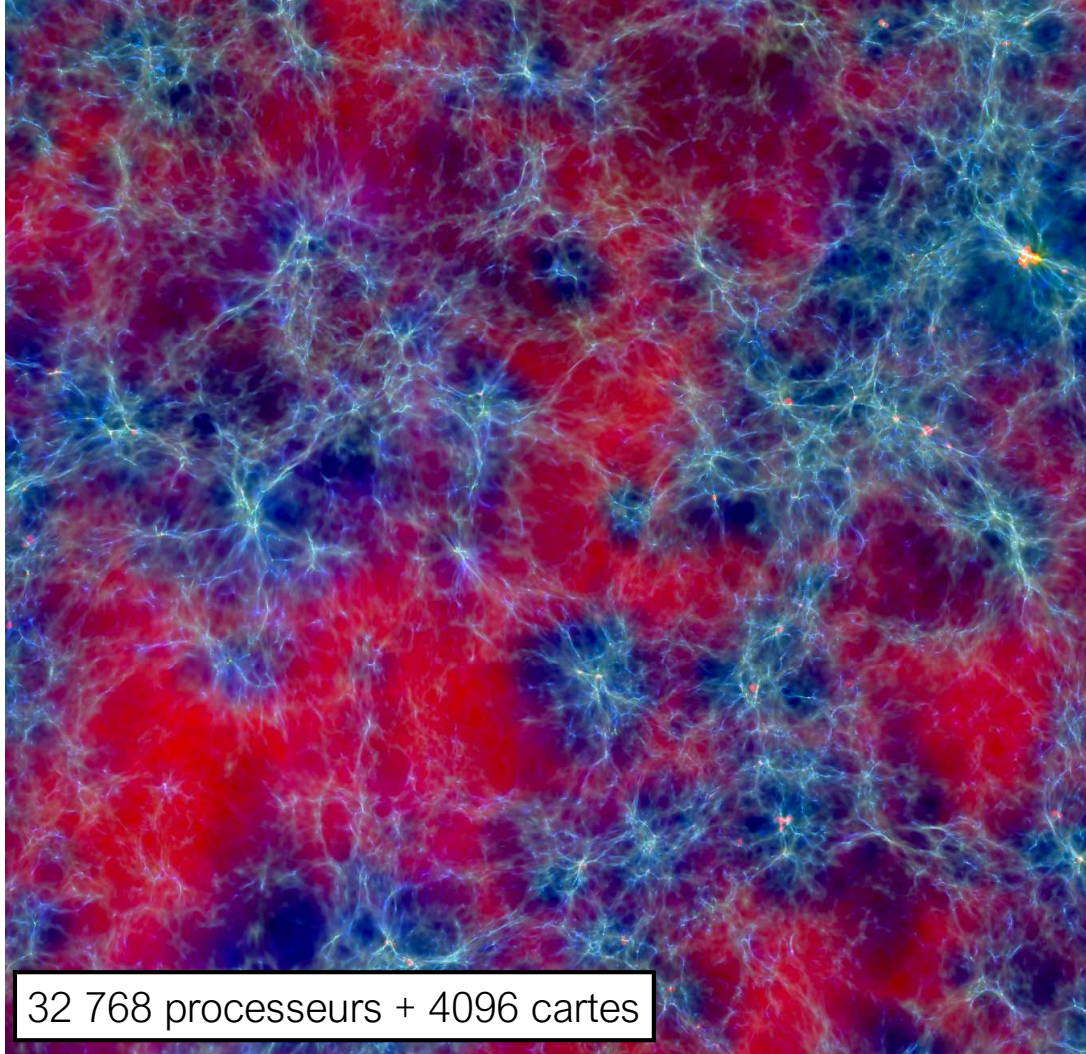


Simulation numérique,  
couplage de physiques  
modélisées  
à partir de principe premiers  
(dans la mesure du possible)

suit la matière noire, le gaz,  
les étoiles et **le rayonnement**  
de façon couplée

moins d'hypothèses adhoc,  
régime non-linéaire,  
**mais très couteux, en**  
**particulier le transfert**  
**radiatif**







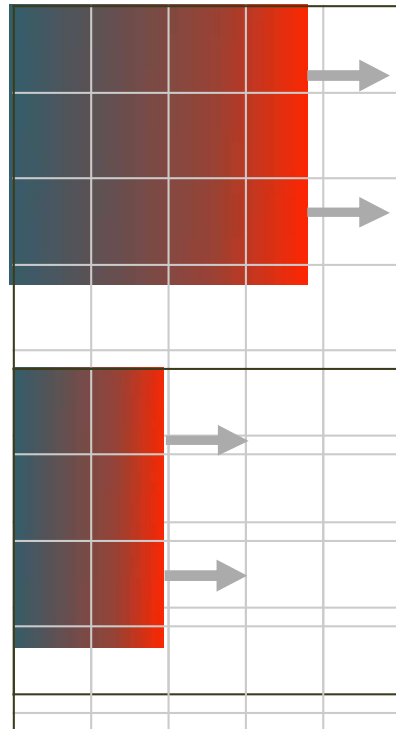
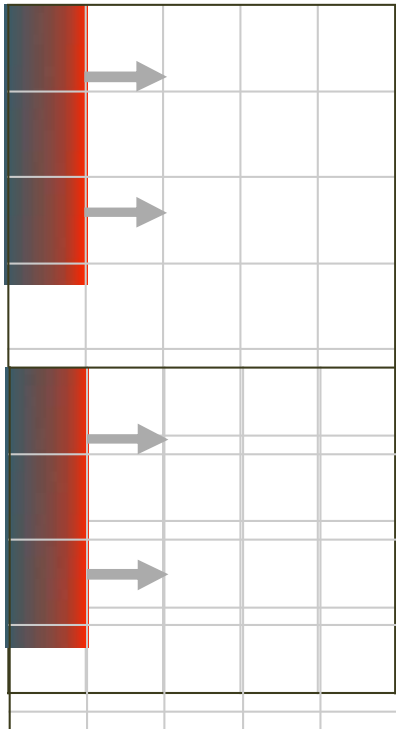
# Un énorme défi numérique aussi pour les simulations

Il faut être capable de suivre la propagation d'un front lumineux qui peut se déplacer à la vitesse de la lumière

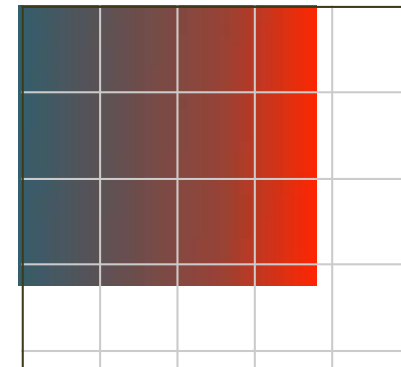
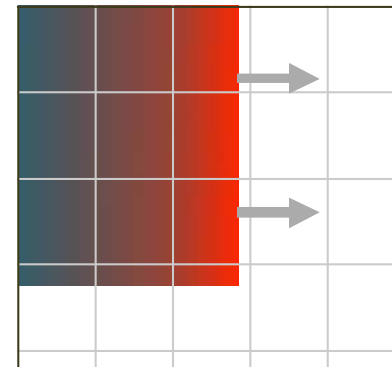
Un front radiatif peut se déplacer jusqu'à plusieurs centaines de fois plus rapidement qu'un choc gazeux  
-> une simulation avec physique du rayonnement peut coûter jusqu'à 100 x plus cher en temps de calcul

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{v}$$

Condition de Courant

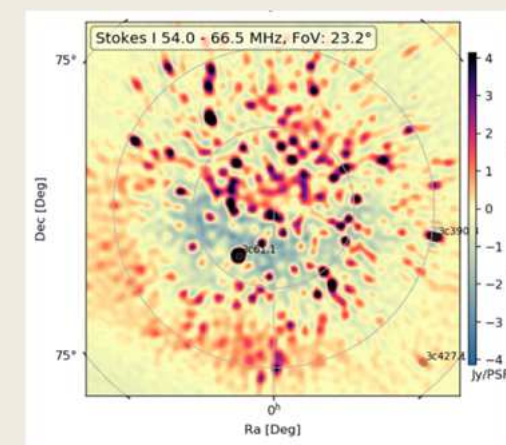
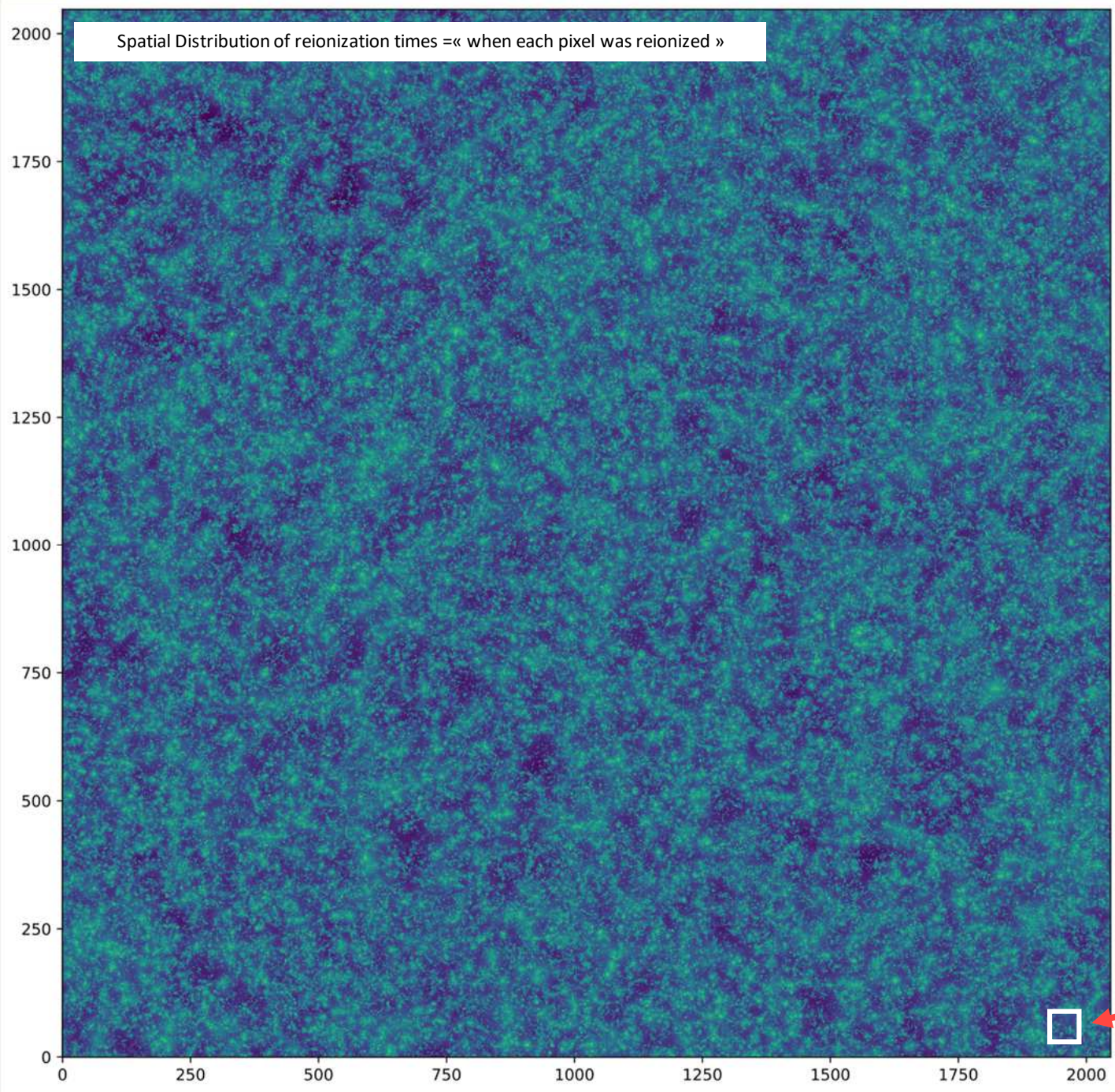


Instable



Stable





NenuFAR Field of view at  $z=20$   
 $\sim 2$  cGpc  
 (courtesy : F. Mertens & NenuFAR CD KSP)

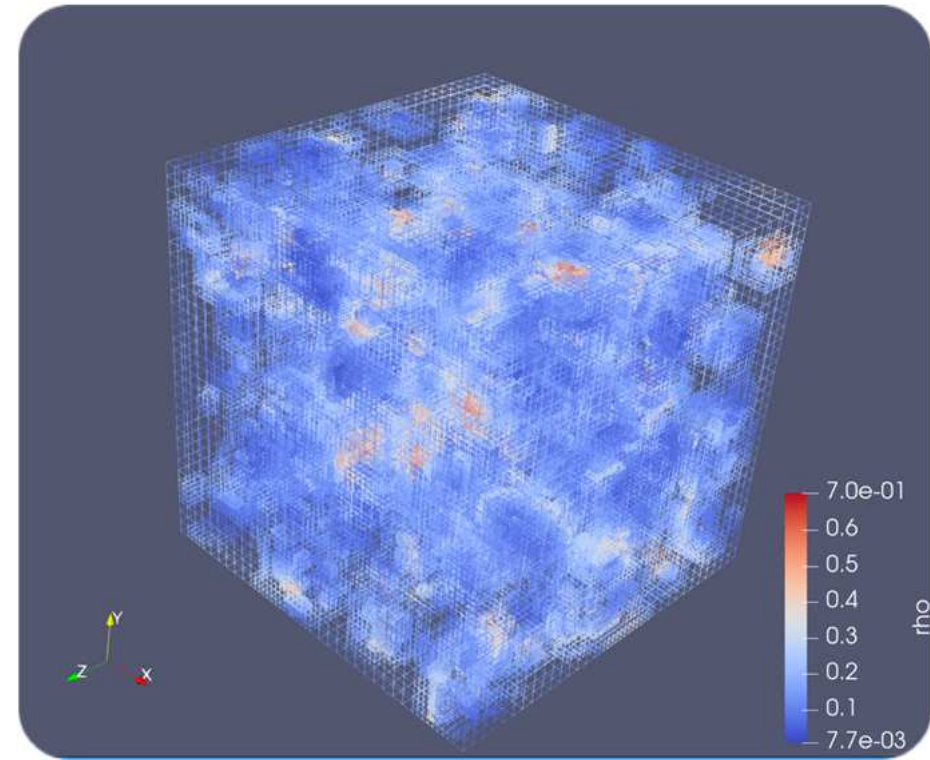
CoDa sims are here...  
 we need exascale  
 supercomputers

# Ginea/Dyablo

**D. Aubert (pour Ginea, Obs. Strasbourg)**

**A. Durocher (CEA)**

A.Durocher (CEA), B.Commercon (CRAL), B. Thooris(CEA), C. Cadiou (UCL), D. Chapon (CEA), Y. Dubois (IAP), D. Aubert (Obs. Strasbourg), F. Bournaud (CEA), J. Blaizot (CRAL), J. Fensch (CRAL), J. Rosdahl (CRAL), L. Michel-Dansac (CRAL), L. Strafella (CEA), M. Trebitsch (Groningen), M. Gonzalez (CEA), M. Delorme (CEA), O. Abramkina (IDRIS), P. Tremblin (CEA), P. Kestener (CEA), P. Ocvirk (Obs. Strasbourg), V. Reverdy (ENS), Y. Rasera (Obs. Paris)



**kokkos/kokkos**

Kokkos C++ Performance Portability Programming  
EcoSystem: The Programming Model - Parallel  
Execution and Memory Abstraction

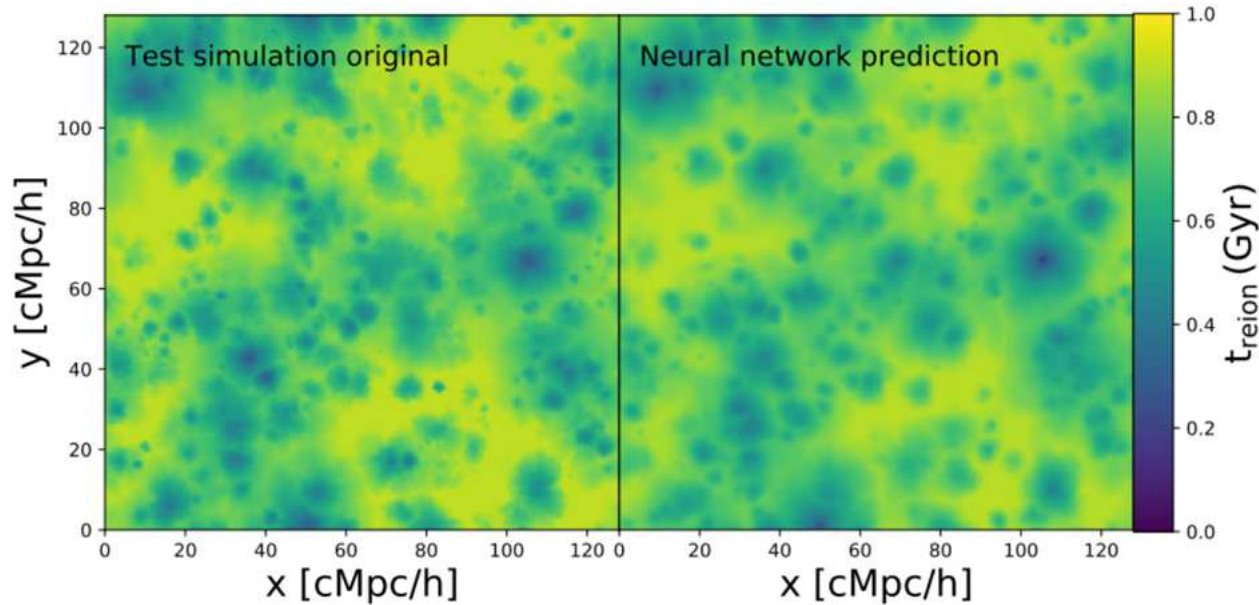


SF2A 2021

Nouveaux codes de simulations pour des supercalculateurs de nouvelle génération Exascale. Hybrides, massivement parallèles et évolutifs.

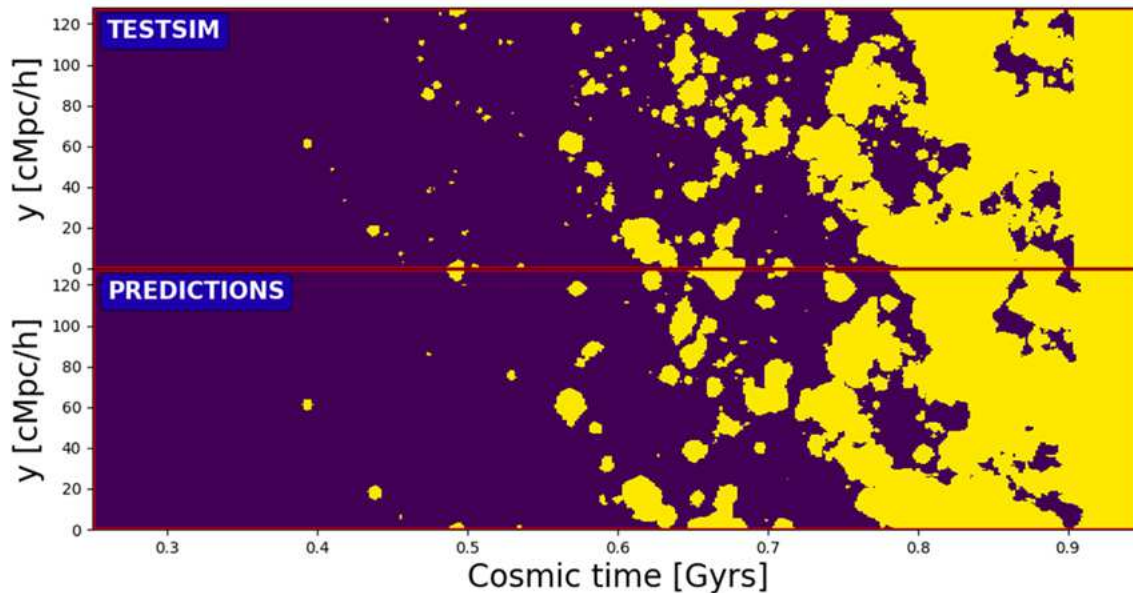


# Emulation de simulations par réseaux de neurones



Nous sommes capables aujourd'hui de faire imiter à des réseaux de neurones la résolution d'équations différentielles.

Convergence simulation/intelligence artificielle, notamment au sein du supercalculateur Jean-Zay.





# Modèles semi-analytiques

## Modèles semi-analytiques

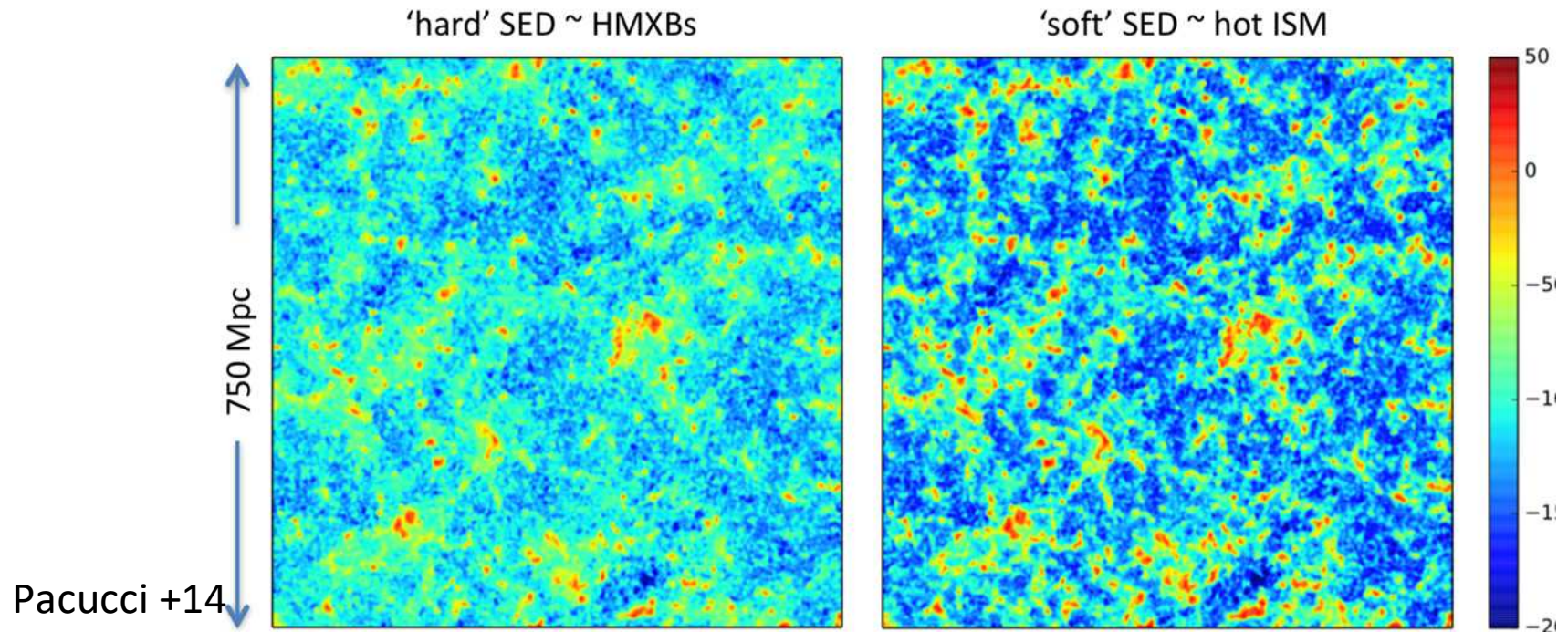
Basé sur des modèles ad hoc (mais physiquement motivés)

Par exemple, croissance de régions HII autour de pics de densités.

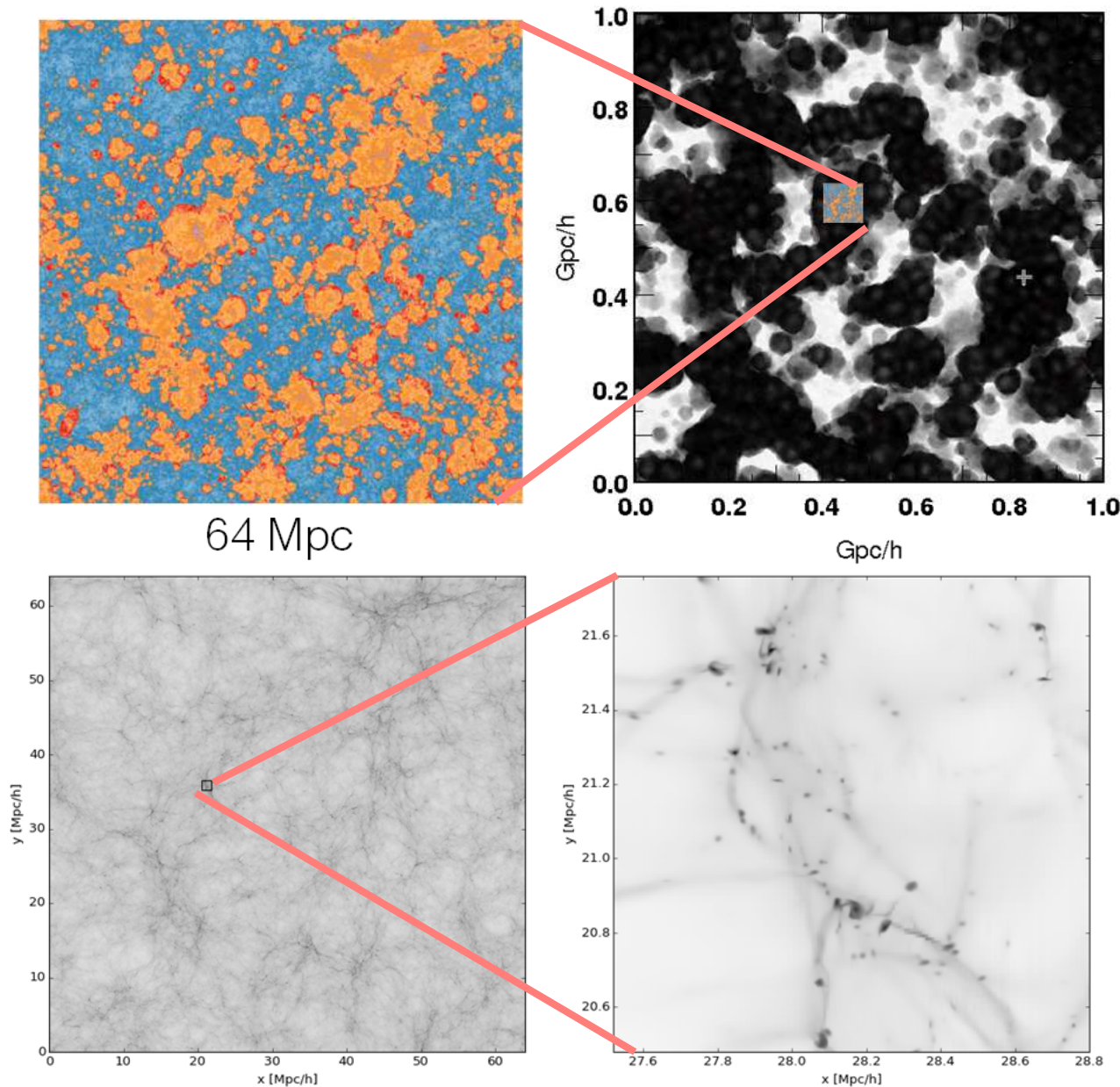
Ne repose pas sur des principes premiers, minimisent ou ignore certains couplages ou rétroaction, souvent limité au régime linéaire ou faiblement non linéaires

Bien pour le grandes échelles, souvent extrêmement efficaces, utilisés pour l'inversion d'observables par exemple

Exemple : 21cmfast (Mesinger+), Fialkov, Lidz, etc.



# Couplage d'Échelles cosmiques et sub-galactiques



Les régions HII peuvent s'étendre sur des dizaines, voire centaines de Mpc.

Les sources sont créées au sein des premières structures  $\ll 1$  kpc

Couplage inédit entre très grandes et très petites échelles



CURIE - 90 000 coeurs + 300 GPUs



TITAN - 300 000 coeurs + 16 000 GPUs



MARE NOSTRUM 45 000 coeurs

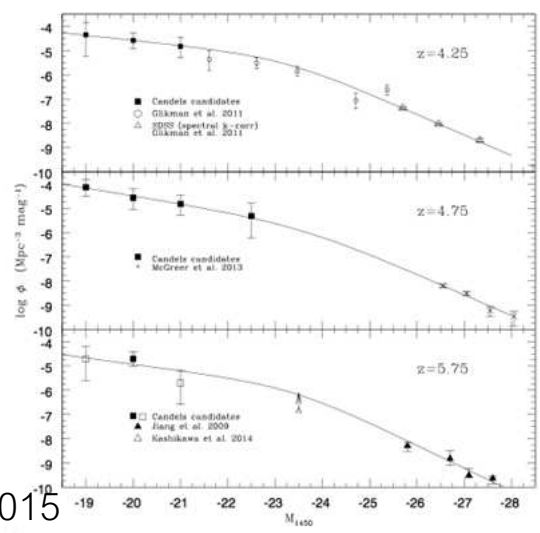
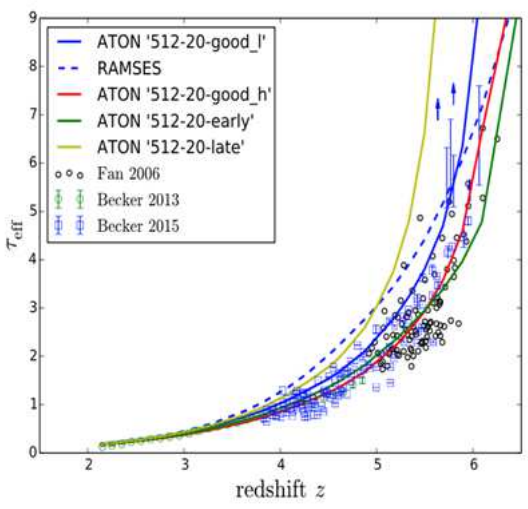
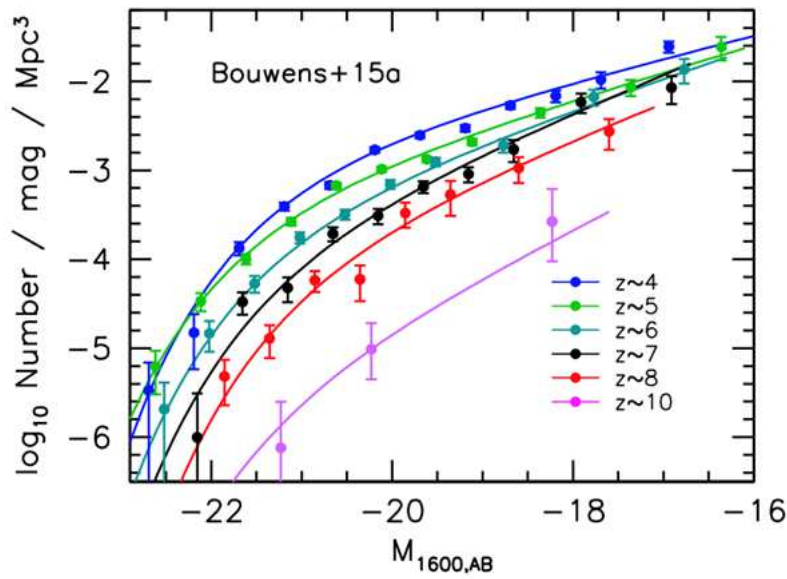
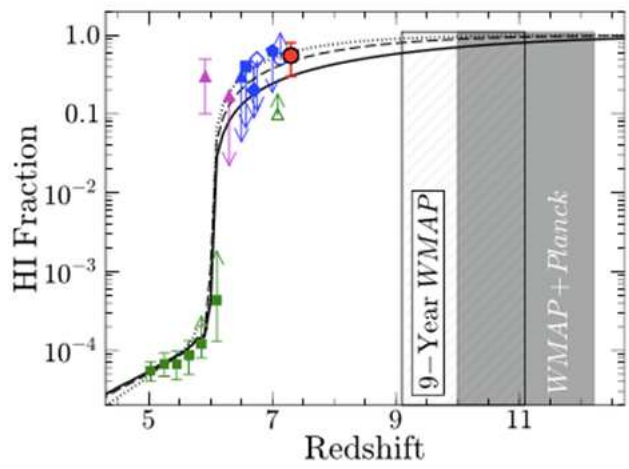


OCCIGEN 85 000 coeurs





# L'Univers Jeune : une opportunité pour comprendre la formation des structures



- Objets multiples : galaxies, AGNs, IGM
- Contraintes spatio-temporelle
- Epoques initiales : objets peu évolués, courtes durées, dégénérescence plus faible
- Observations multiples

IGM Becker et al. 2015

AGNs LFs Giallongo et al. 2015

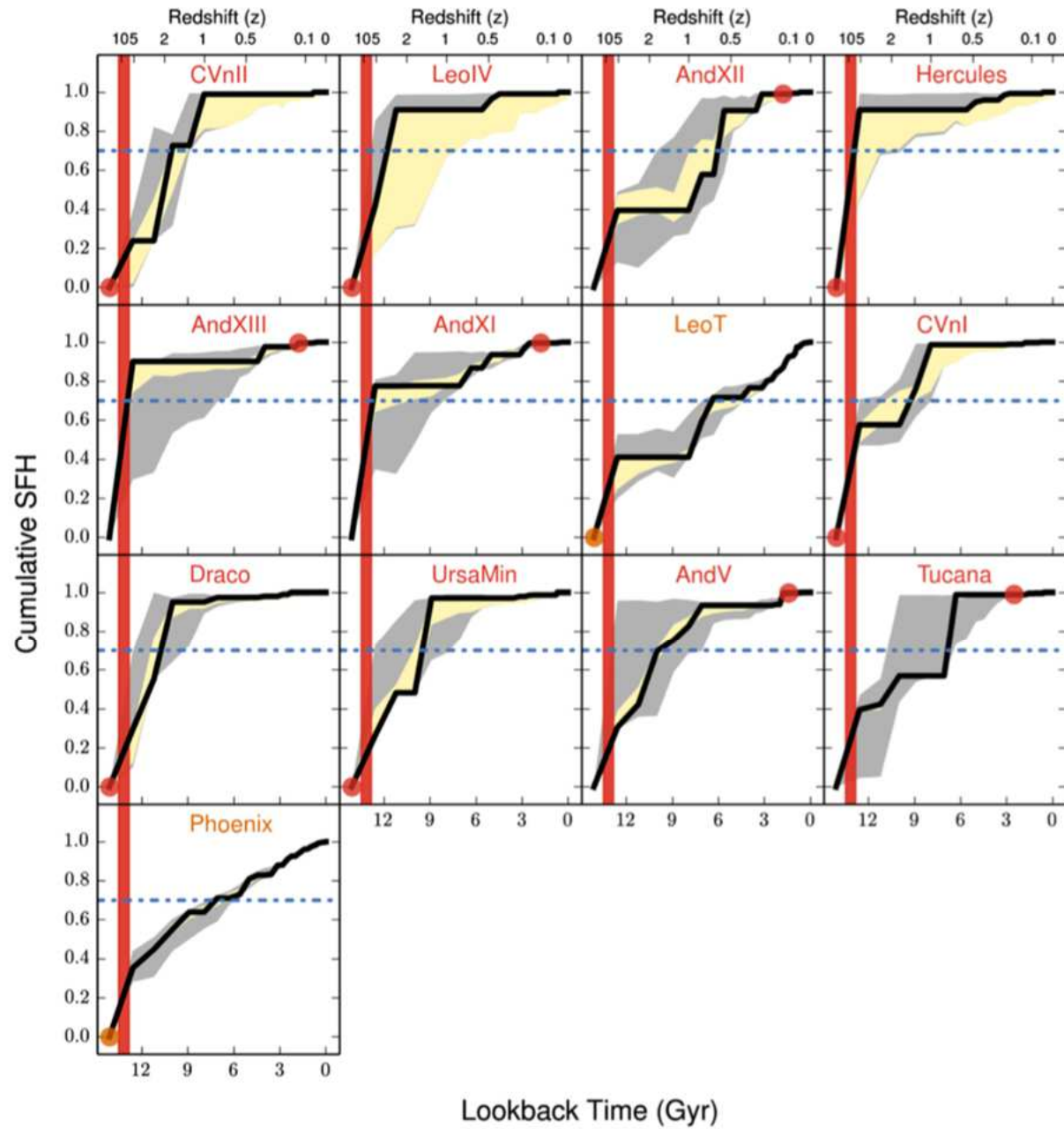
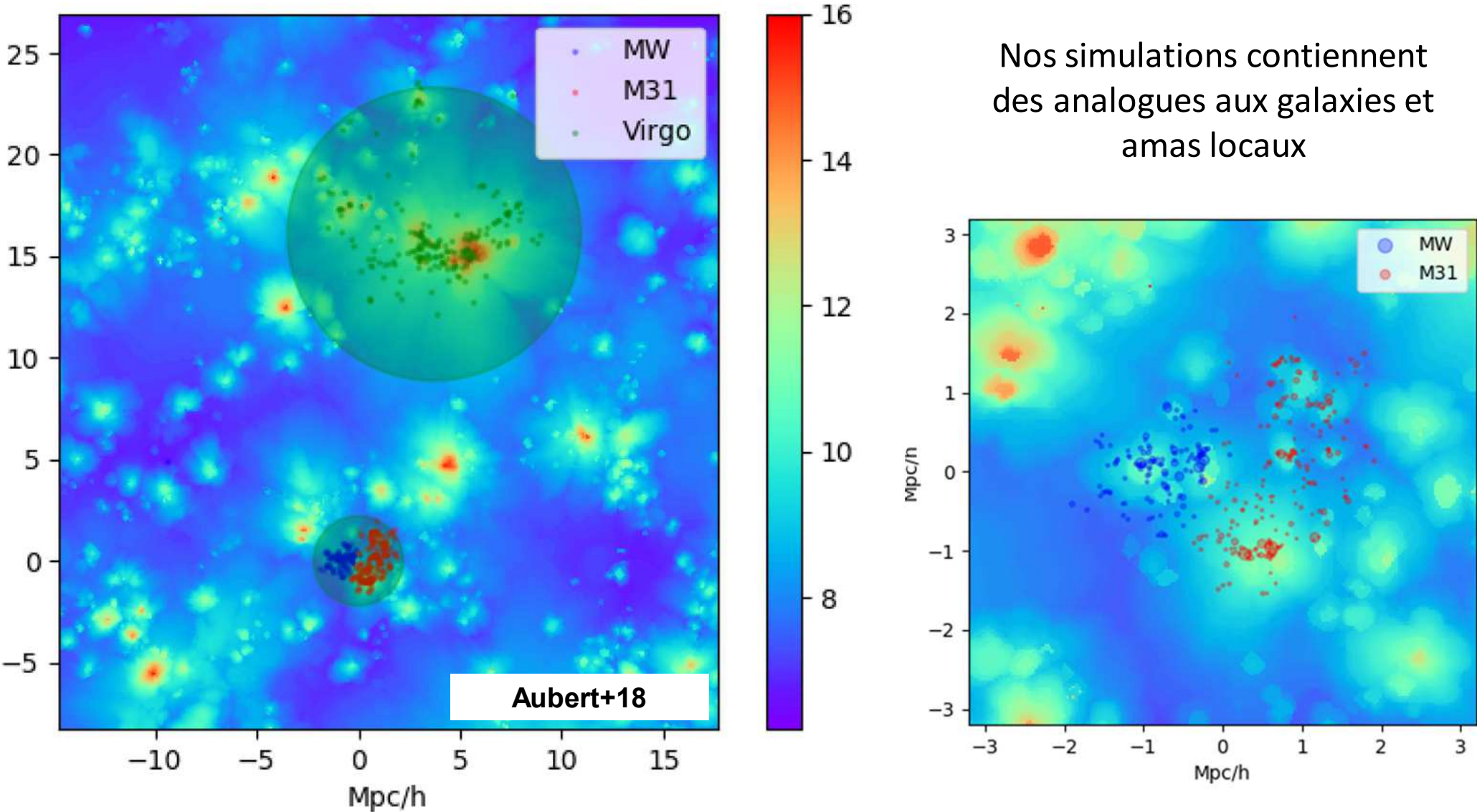


FIGURE 1.19 – SFH cumulées et normalisées de 13 galaxies naines "fossiles" du Groupe Local. Les zones grises et jaunes présentent les incertitudes aléatoires et totales (aléatoire et systématique). La bande rouge indique la Réionisation et le trait bleu horizontal marque les 70 % de SFH. Cette figure est extraite de [Weisz et al. \(2014\)](#).

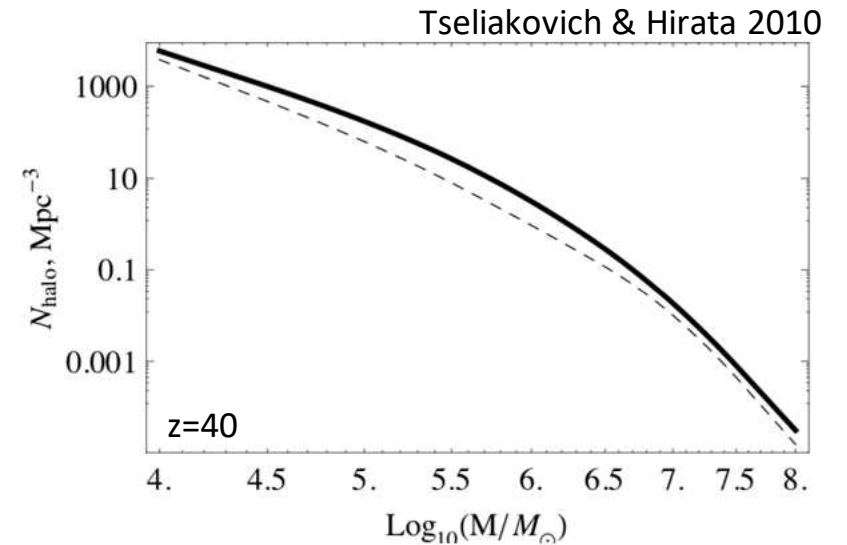
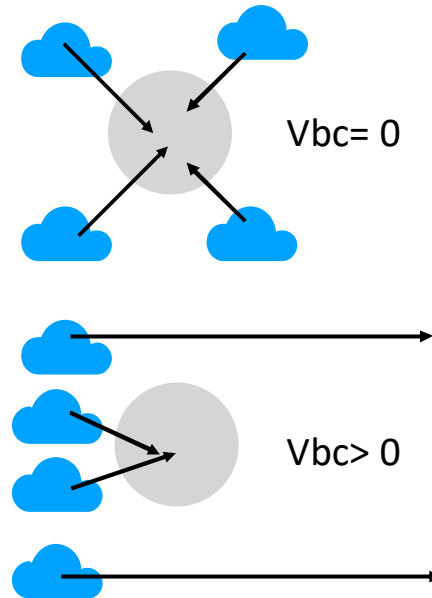
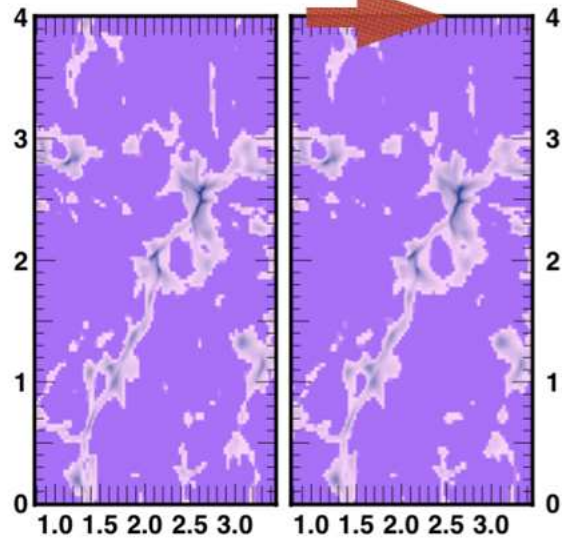
# Les instants de réionisation de la Voie Lactée et la Galaxie D'Andromède





# Suppression « fondamentale » des petites structures ?

$v_b = 30 * (z/1000) \text{ km/s}$   $z=10.4$

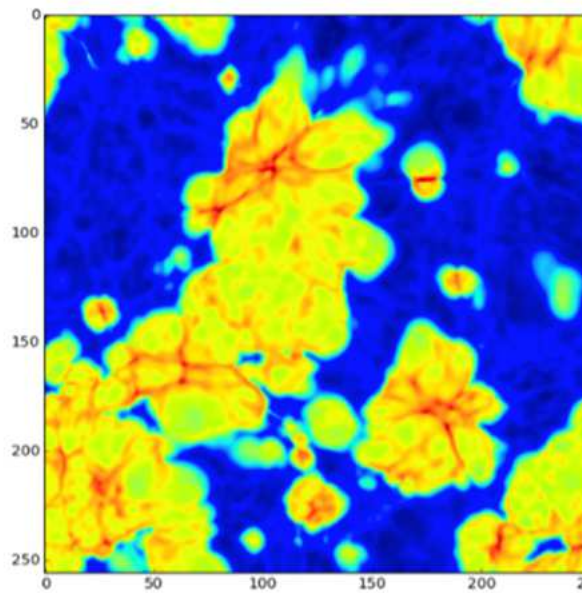


Vitesse Baryons différente de DM à la recombinaison

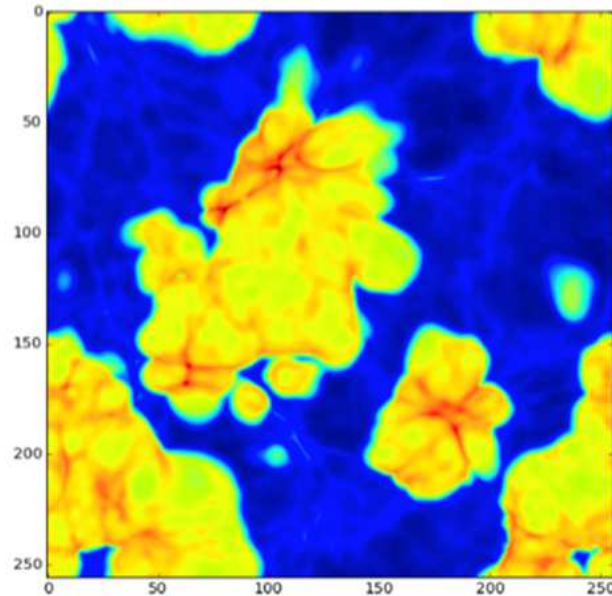
$\Delta V \sim \text{qq km/s}$  à  $z=100$  cohérent sur qqes Mpc.

Impact sur la formation des premières sources ?

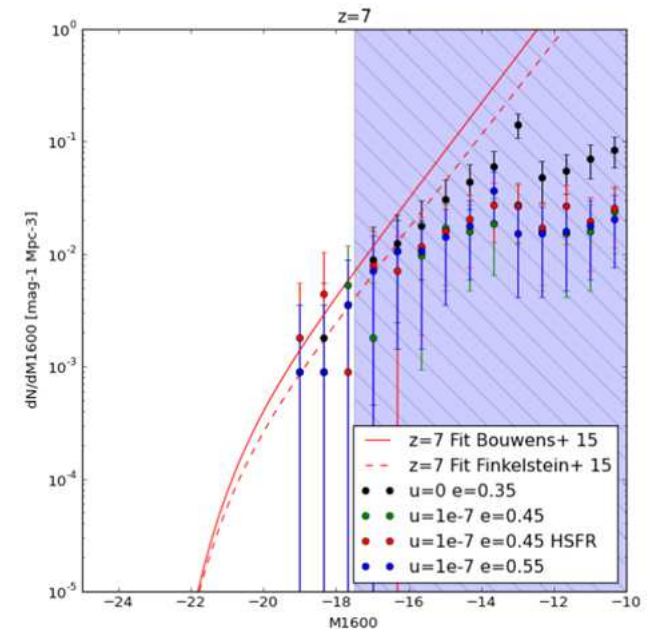
# Suppression « fondamentale » des petites structures ?



standard DM

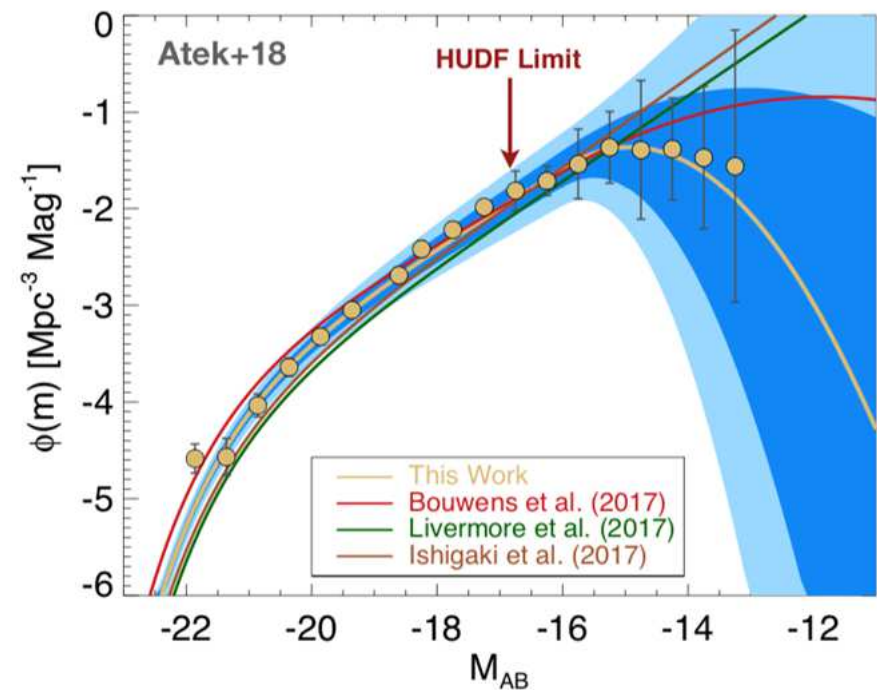
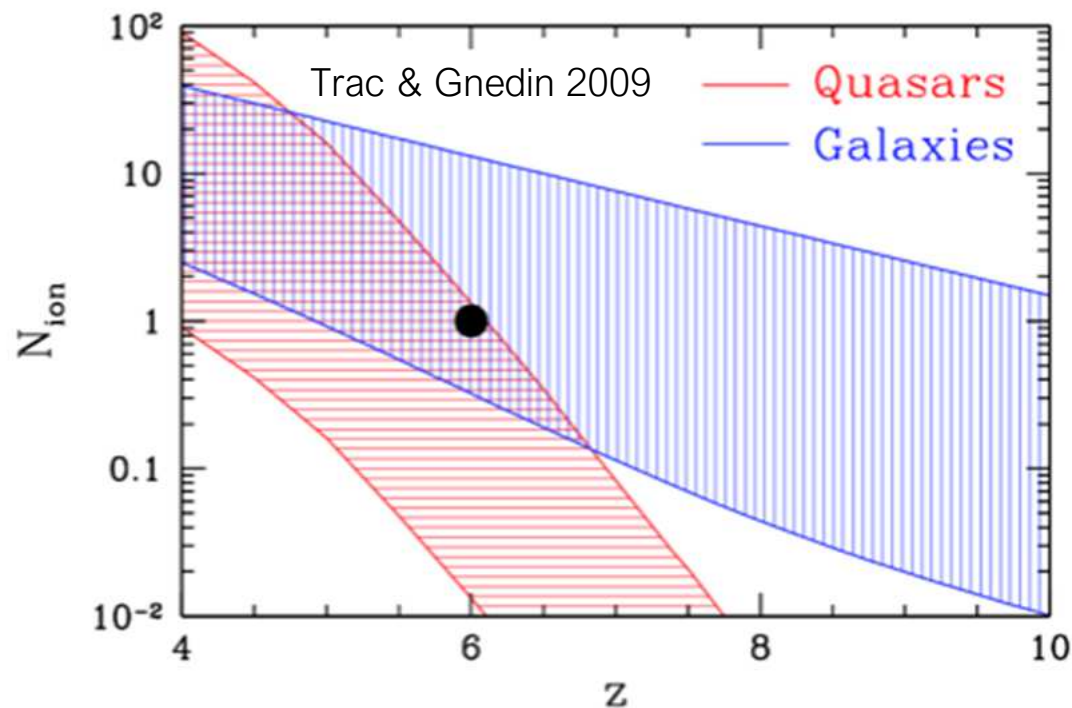


interacting DM



Toute modification de la fonction de transfert aux petites échelles va se manifester sur les petites galaxies et potentiellement sur les fonctions de luminosité ou même histoire/topologie de réionisation

# Les premières structures peuvent-elle réioniser l'Univers ?



La capacité des premières galaxies à réioniser l'Univers n'est pas établie.

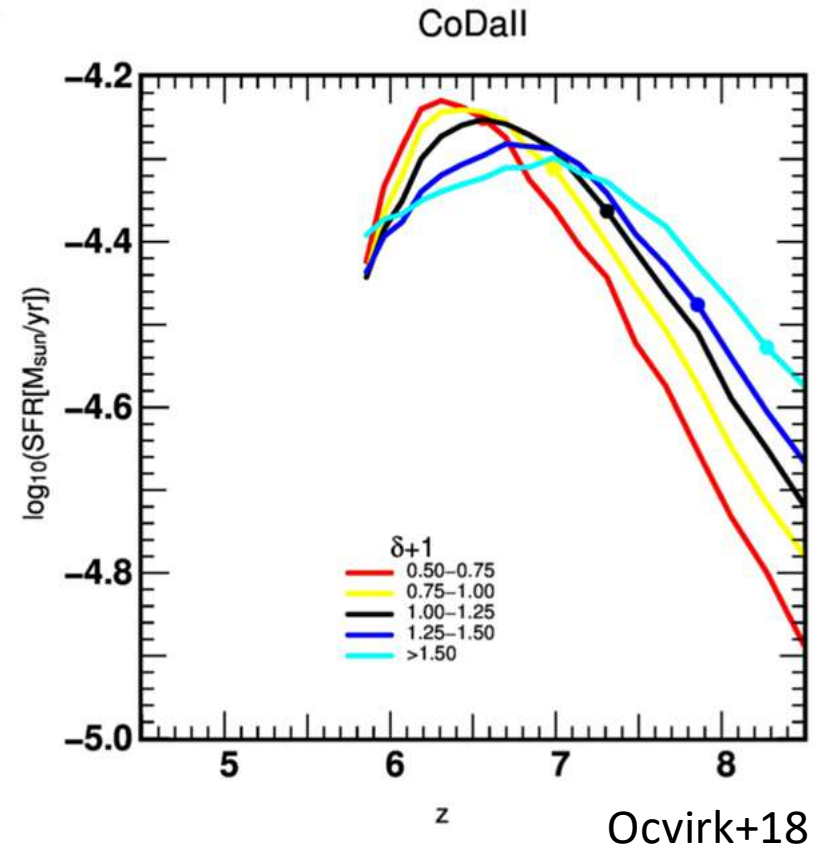
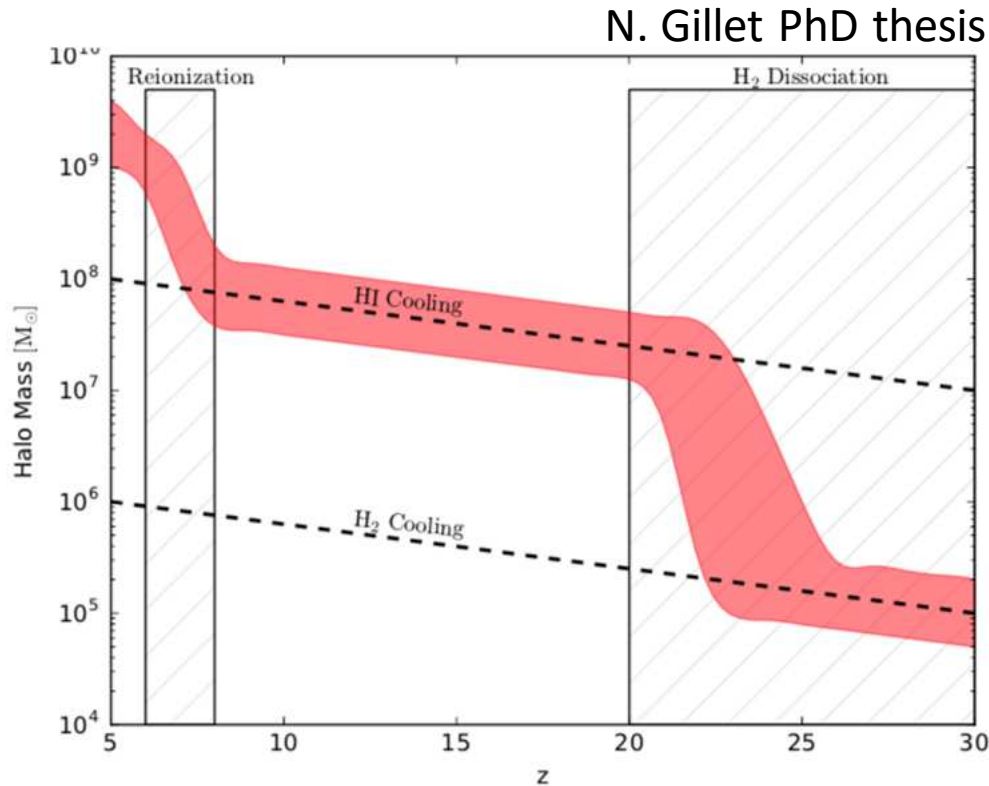
Quel rôle joué par les petites galaxies ( $<10^{9-8} M_{\text{sol}}$ ) ?

Quelle type de population stellaire ont-elle, Population III sous-métalliques ?

Quelle fraction du rayonnement produit dans les premières structures s'échappe effectivement vers le cosmos ?



# Les premières structures peuvent-elle former des étoiles ?



En théorie les petites galaxies ne devraient pas former beaucoup d'étoiles à cause de l'émergence du fc

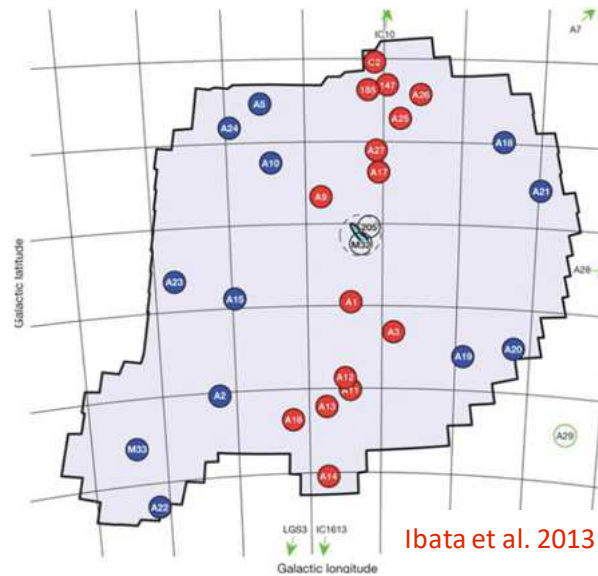
- photo-évaporation du gas dans potentiel trop faible
- refroidissement contrarié
- changement dans l'accrétion

Mais c'est un problème compliqué, qui dépend par exemple du lieu et de l'époque

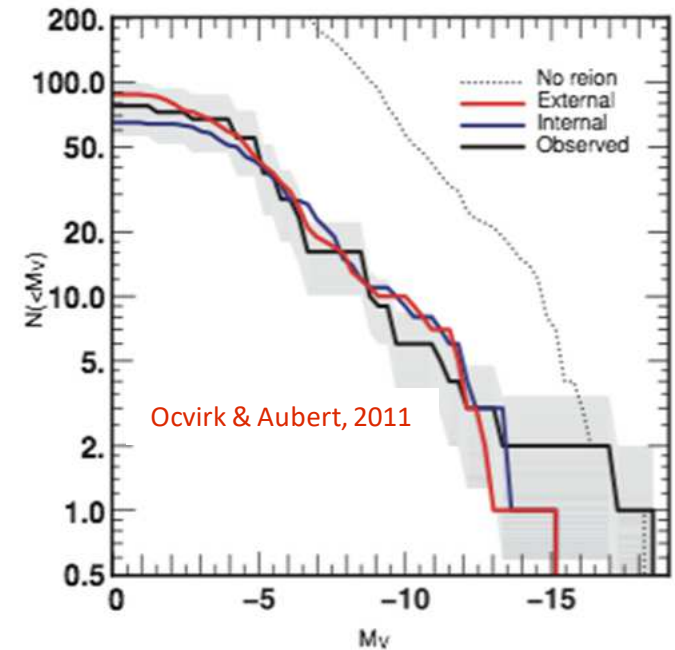
# Impact sur les galaxies satellites du groupe Local



Modèles prédisent des centaines de satellites de DM



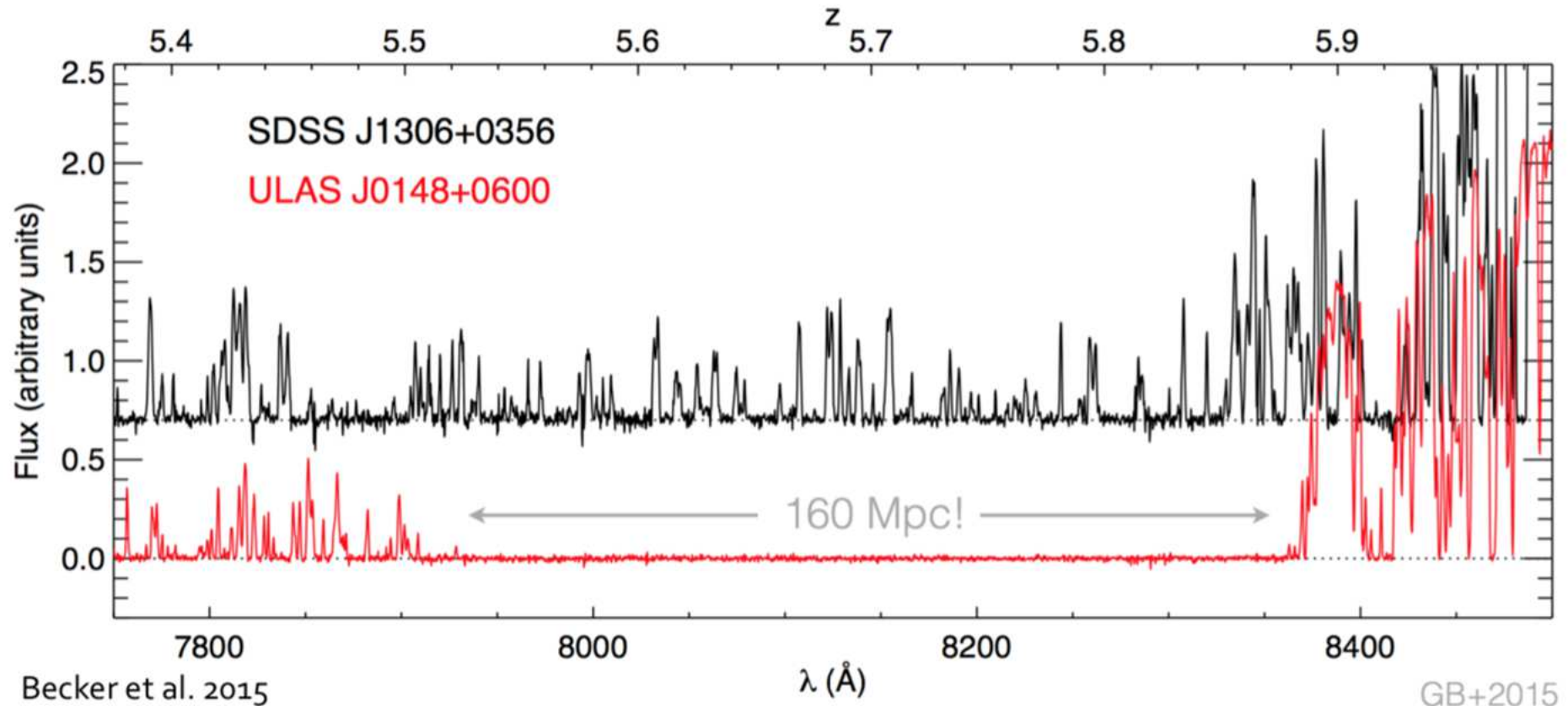
Les Observations montrent 10 fois moins d'objets



Les galaxies satellites sont des reliques de cet Univers jeune et font partie des « premières structures »

Le fond UV local couperait la formation d'étoiles et offre une voie de résolution au problème des sous-structures.

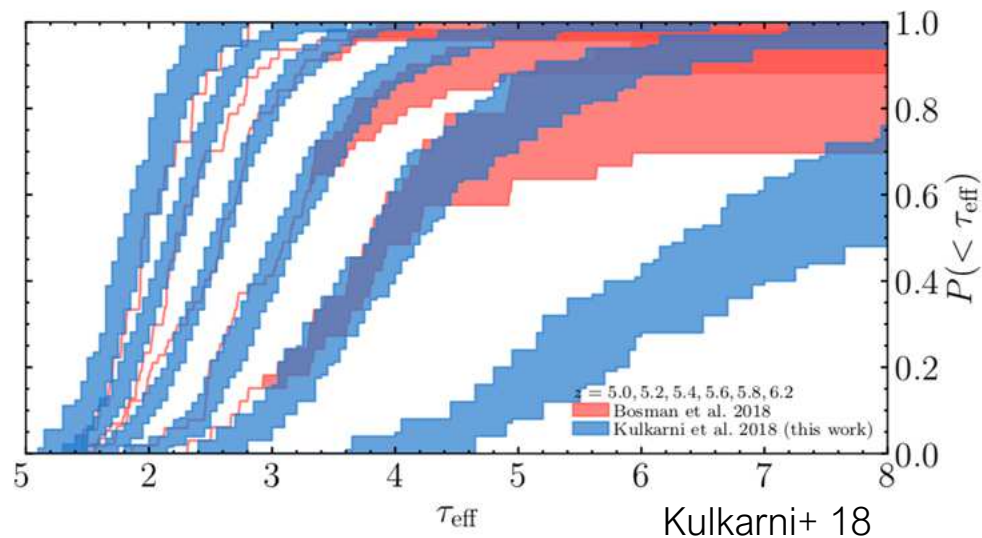
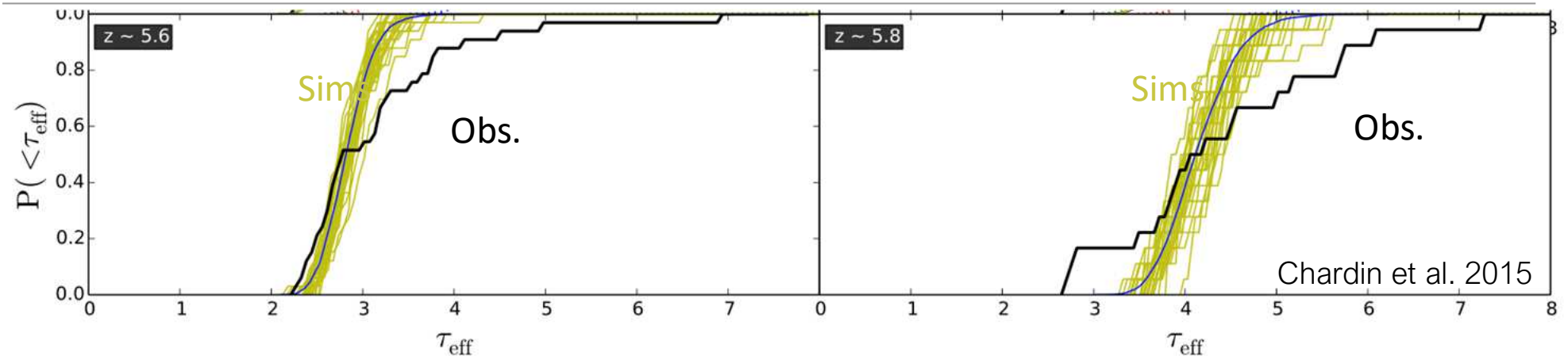
# Un milieu intergalactique pas si réionisé que ça....



Post réionisation (ici  $z \sim 5.5$ ) on a encore de vastes régions qui possèdent de l'hydrogène neutre. Dans les modèles/simulations cela pourrait s'expliquer par une réionisation plus longue que les mod



# Un milieu intergalactique pas si réionisé que ça....

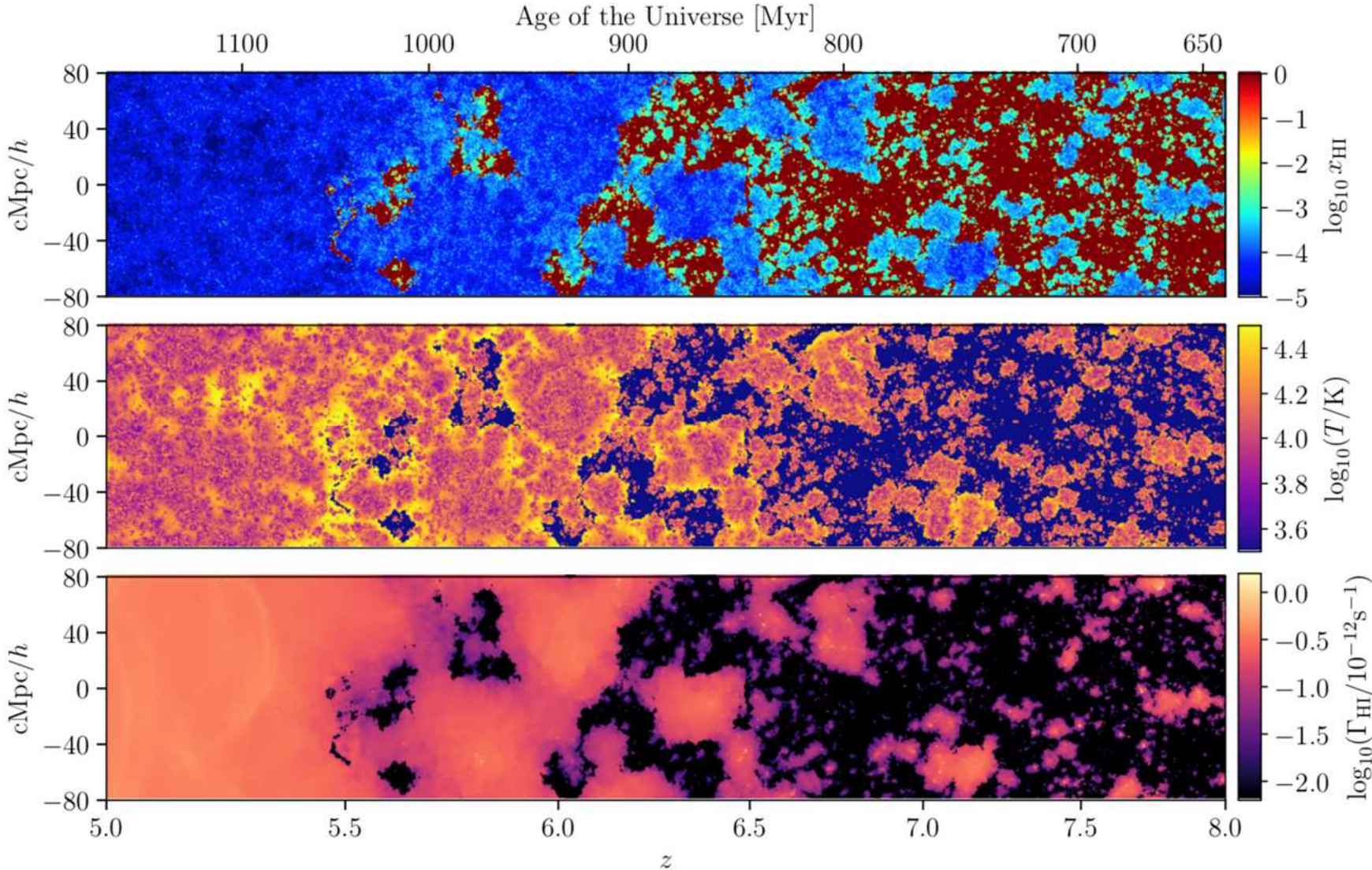


Nos modèles d'émission par les premières structures font une réionisation trop homogène.

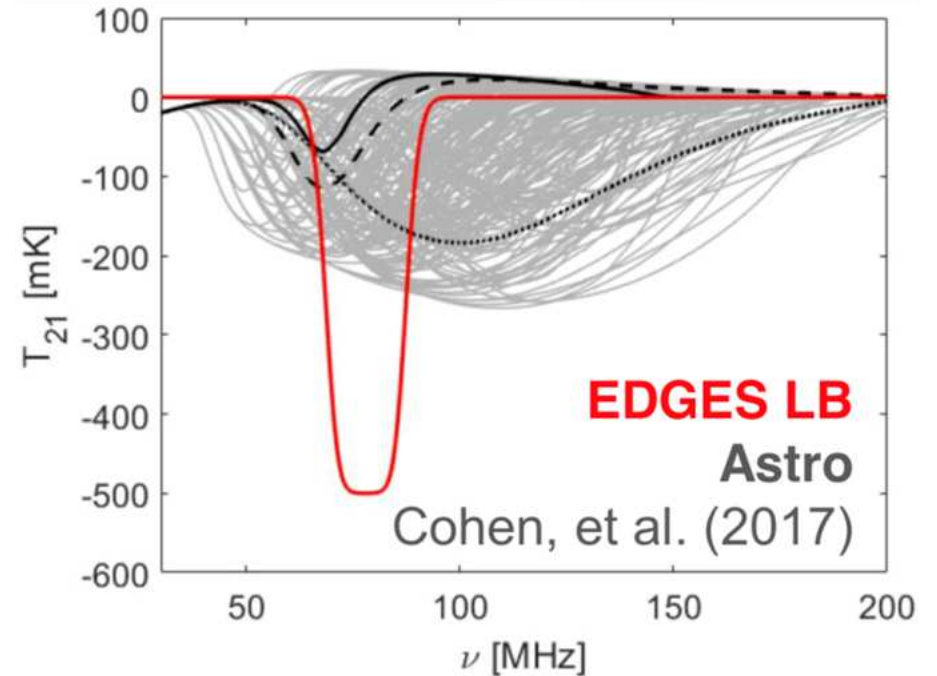
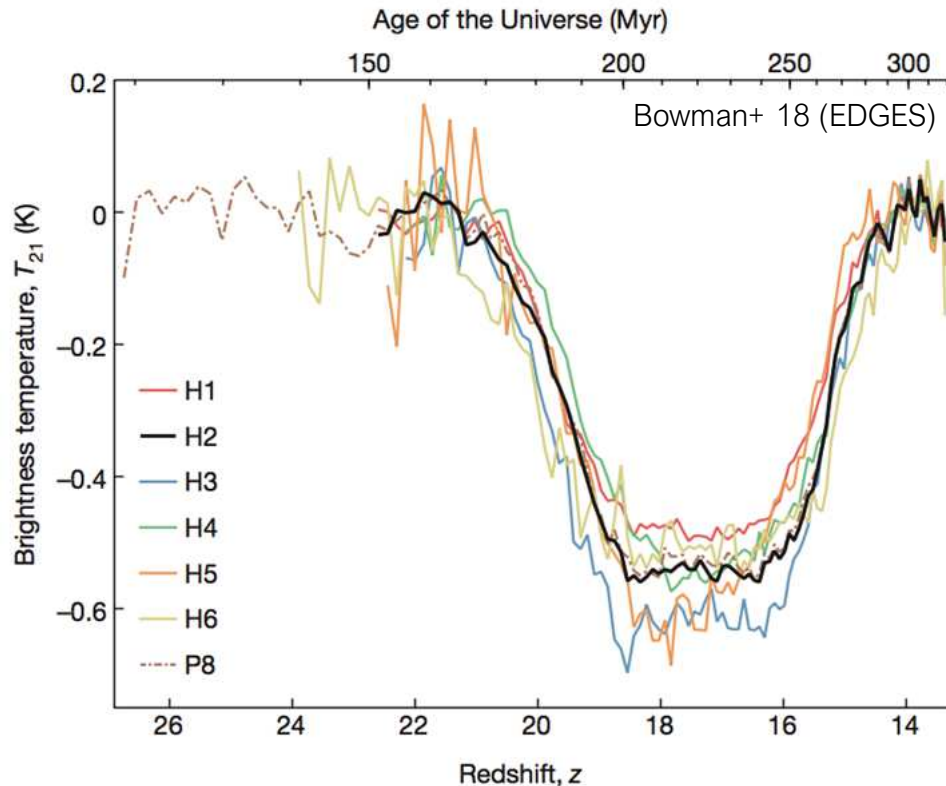
2 hypothèses :

- il faut invoquer une contribution significative de sources à forte variance spatiale (quasars ?)
- il faut **retarder l'époque de réionisation** (terminée en deçà de 5.5)

# Une réionisation tardive ?



# EDGES : Un premier signal de l'aube cosmique ?



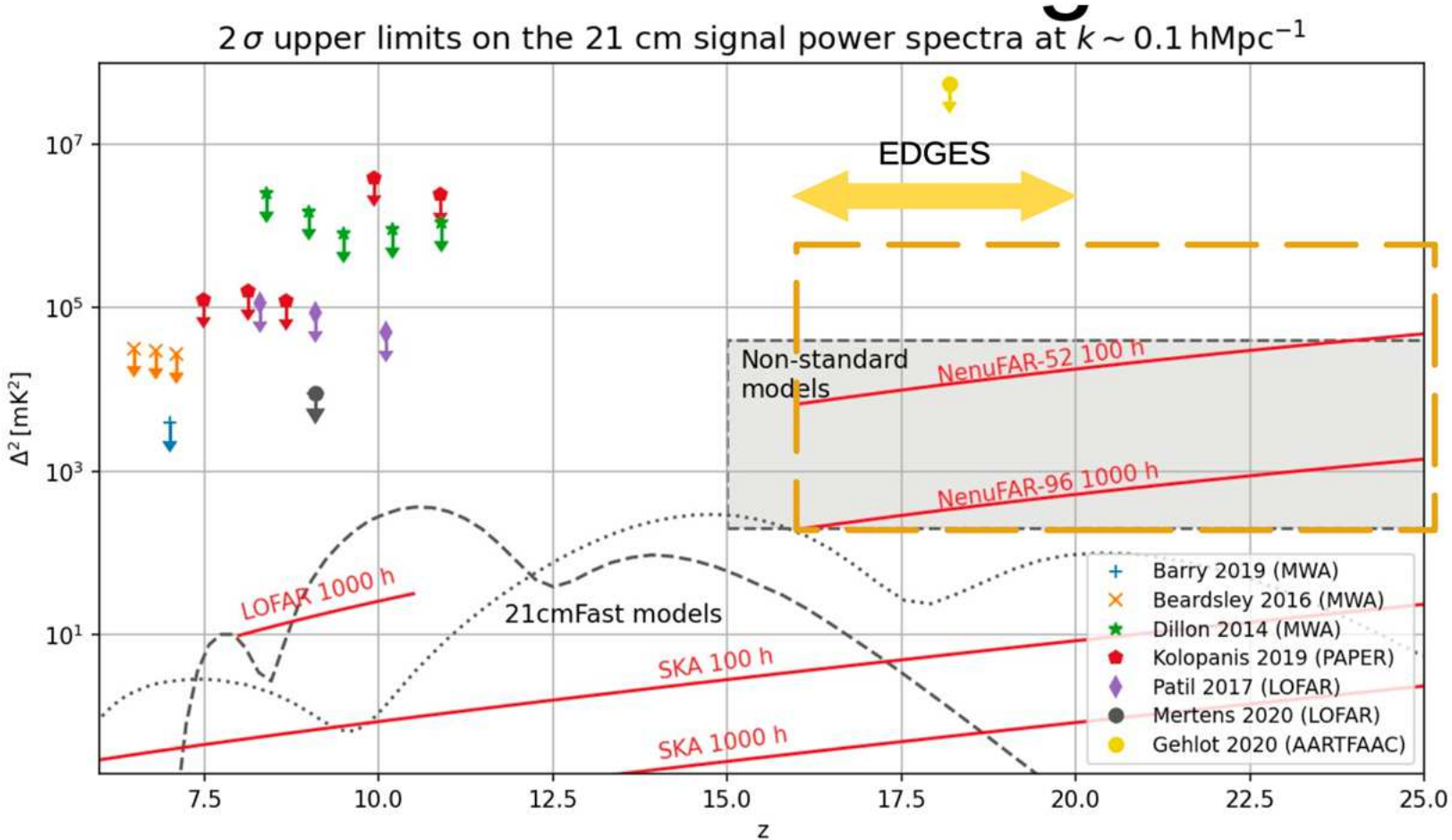
Signal très intense :

- gaz plus froid qu'attendu ? Physique Exotique ?
  - CMB plus chaud qu'attendu ?
- = > **non confirmé par SARAS (Singh+ 2021)**

A voir avec Nenufar ?

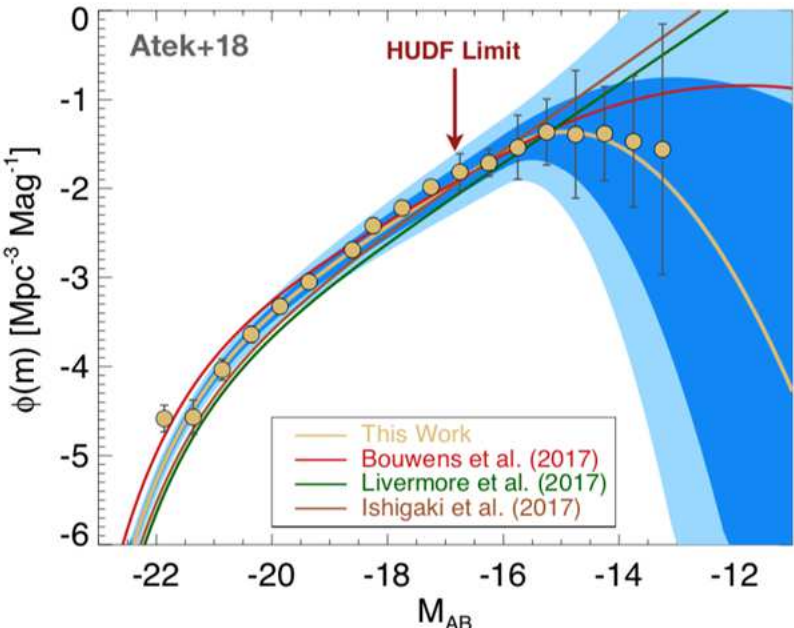
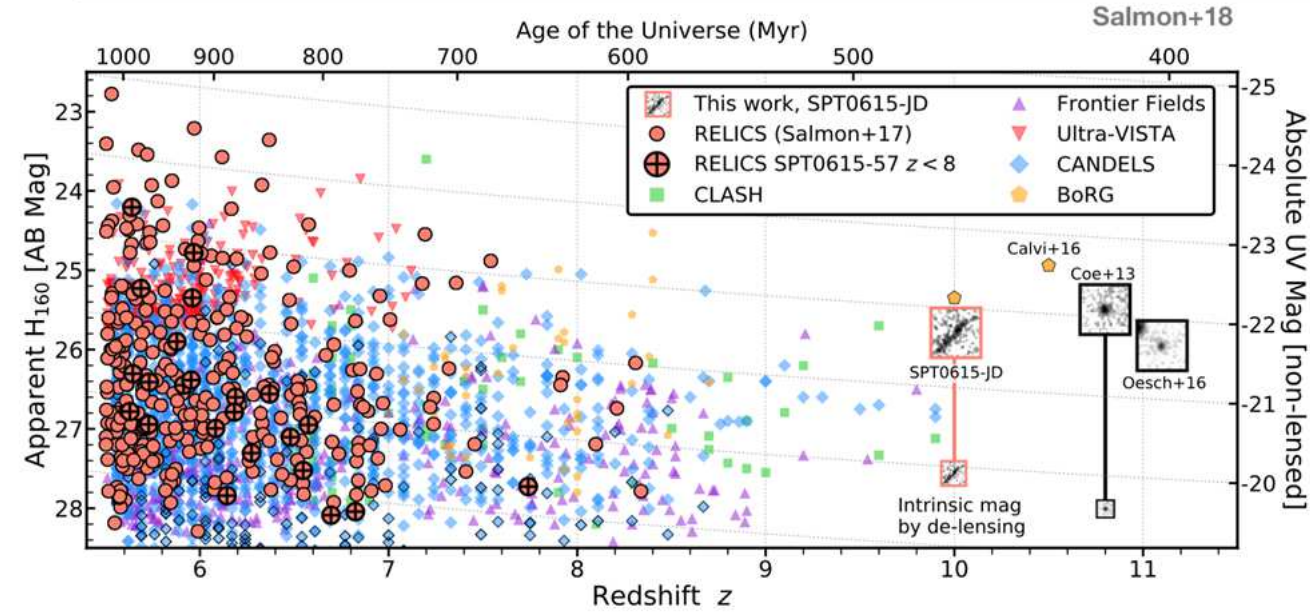


# Le 21cm de l'Univers Jeune : un énorme défi observationnel/traitement du signal

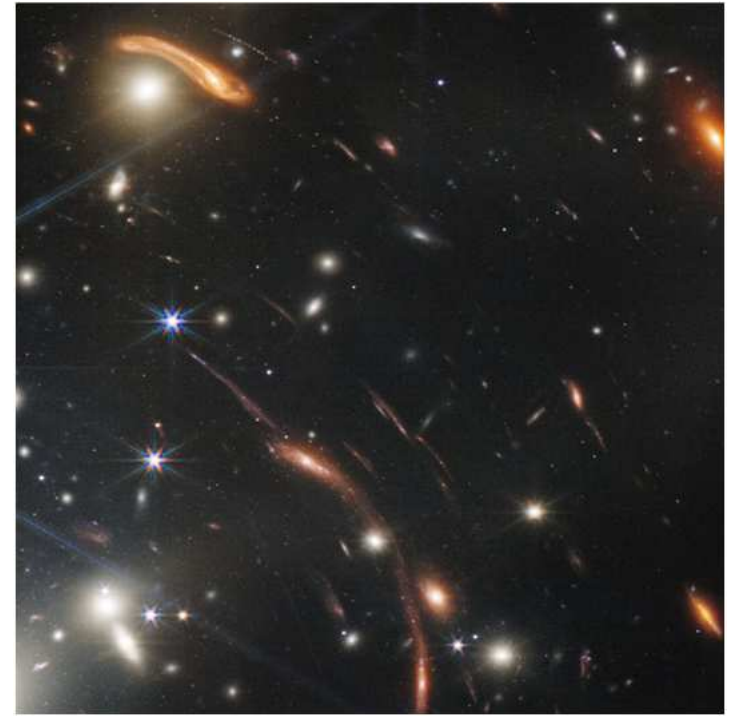
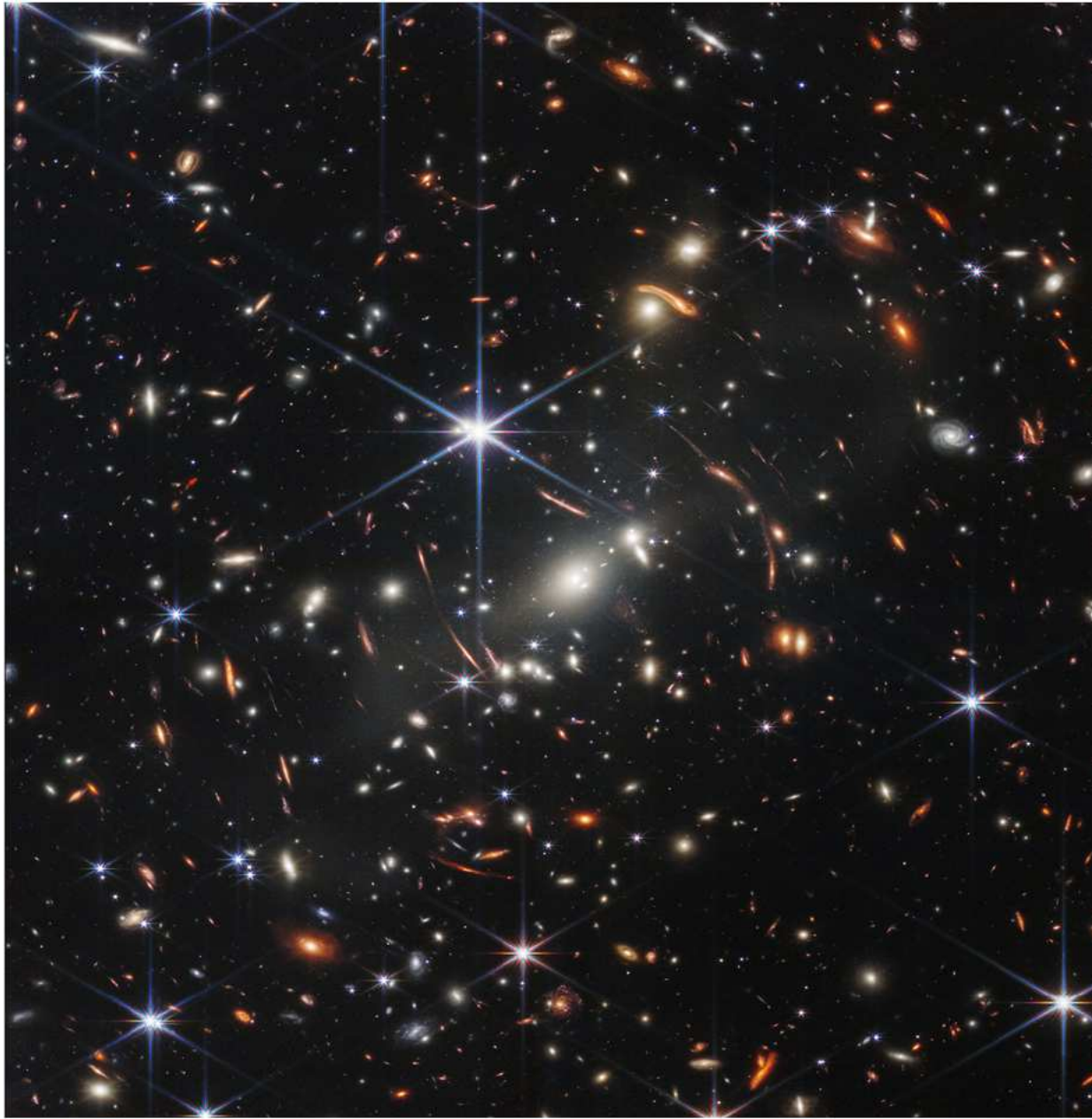


Mertens 2020

# Premiers Résultats JWST sur les premières galaxies (Pré-JWST)



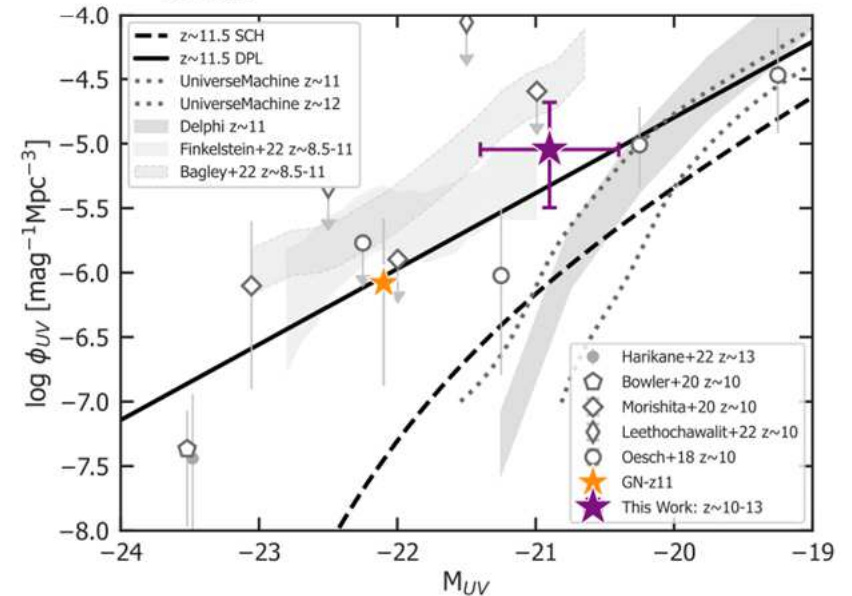
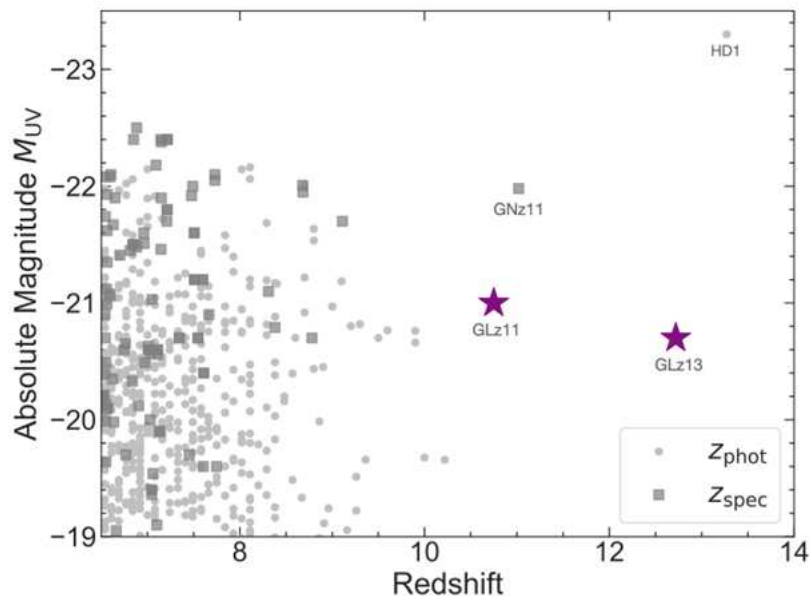
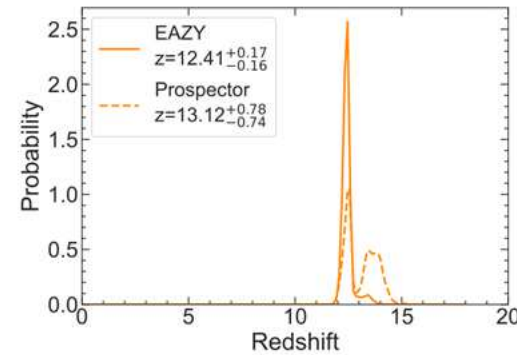
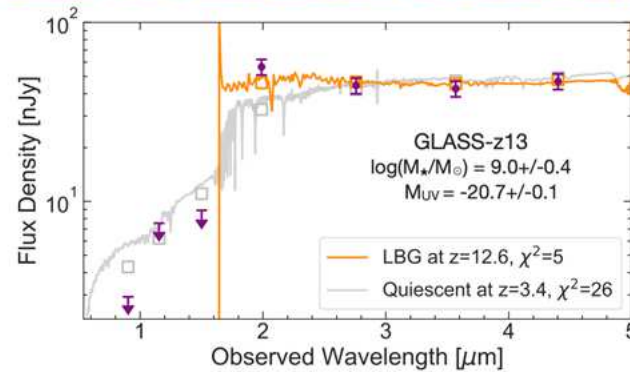
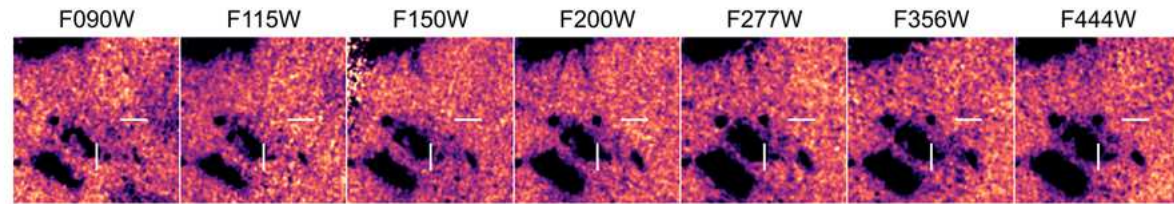
# Premiers Résultats JWST sur les premières galaxies : SMACS 0723 => 12-13 Juillet 2023





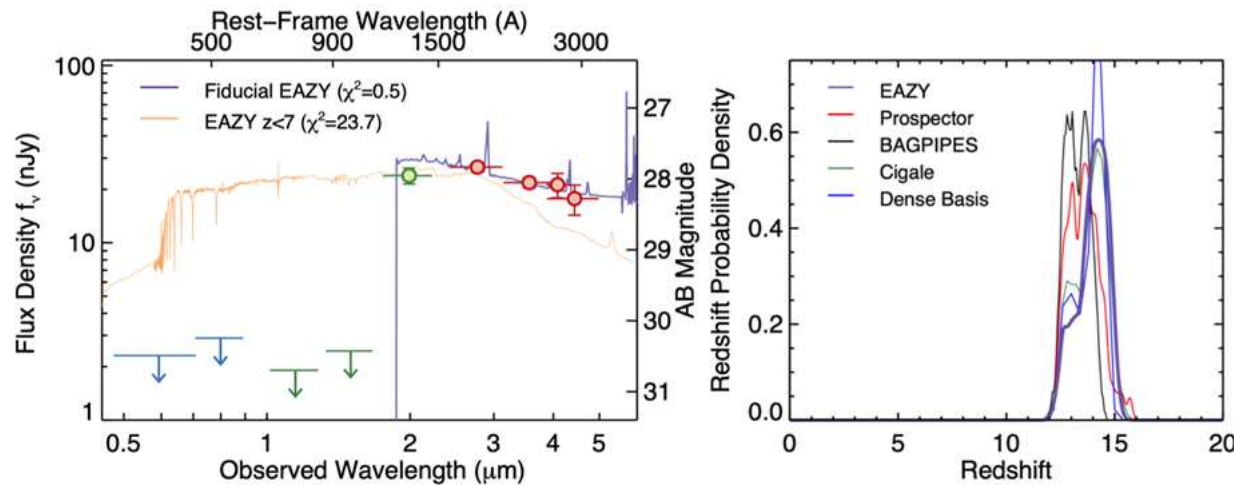
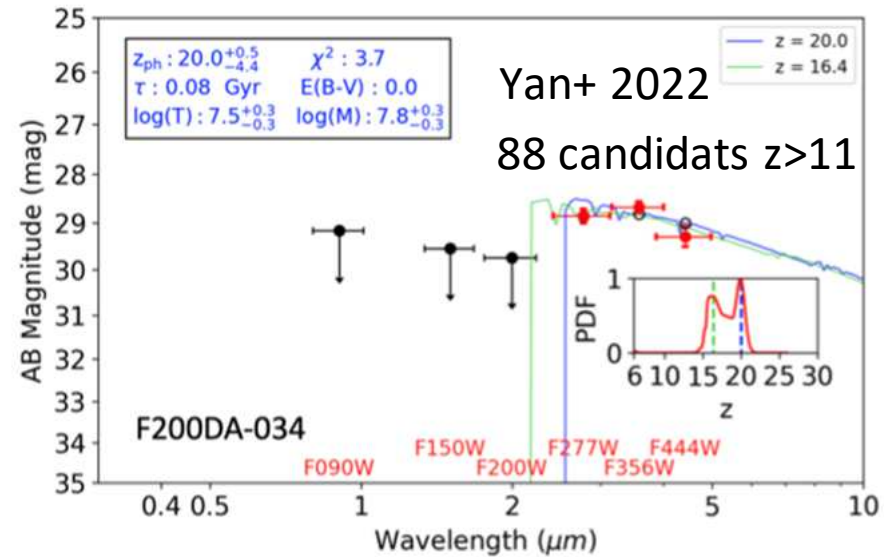
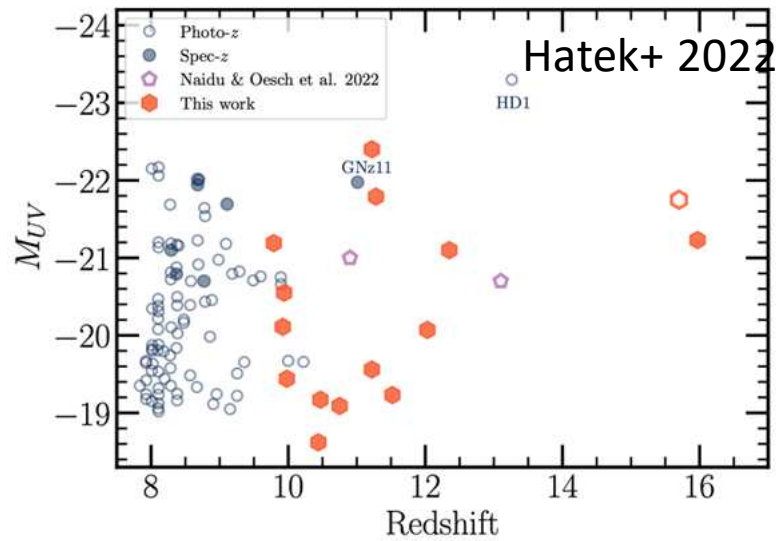
# Premiers Résultats JWST sur les premières galaxies : SMACS 0723

## Naidu+ 2022 : 2 galaxies très brillantes à $z \sim 11$ et 13 (20/7/2022)



# Premiers Résultats JWST sur les premières galaxies : SMACS 0723

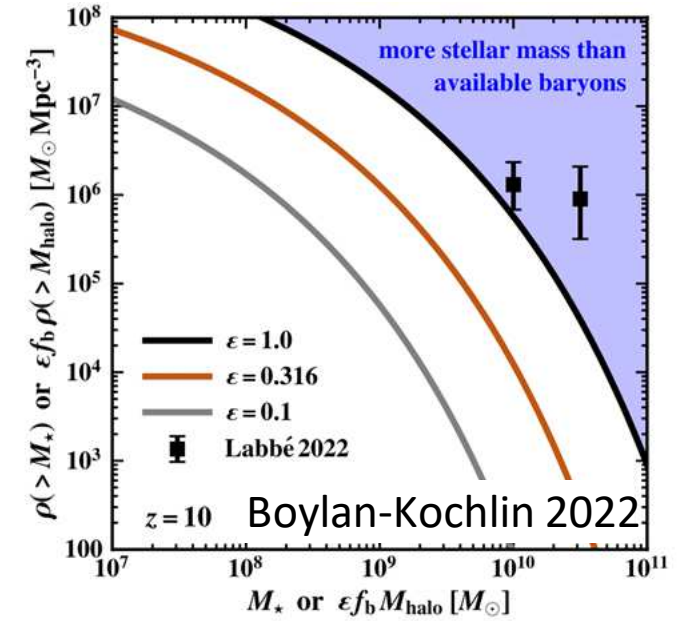
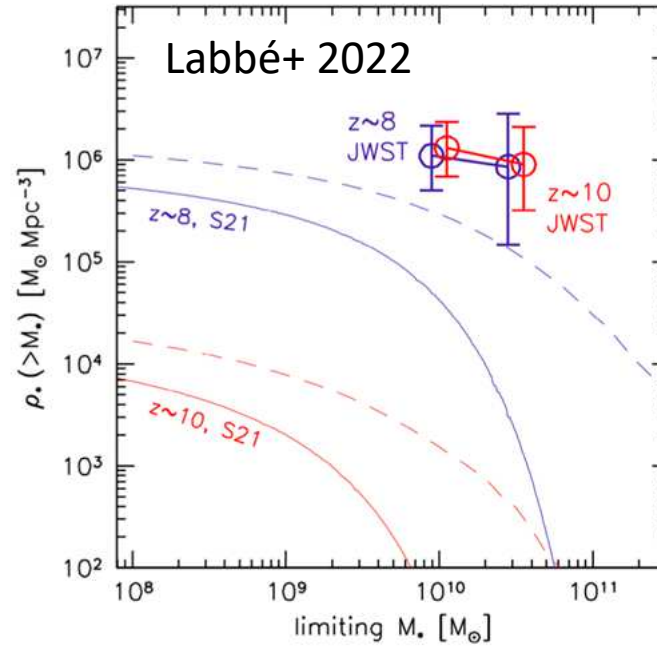
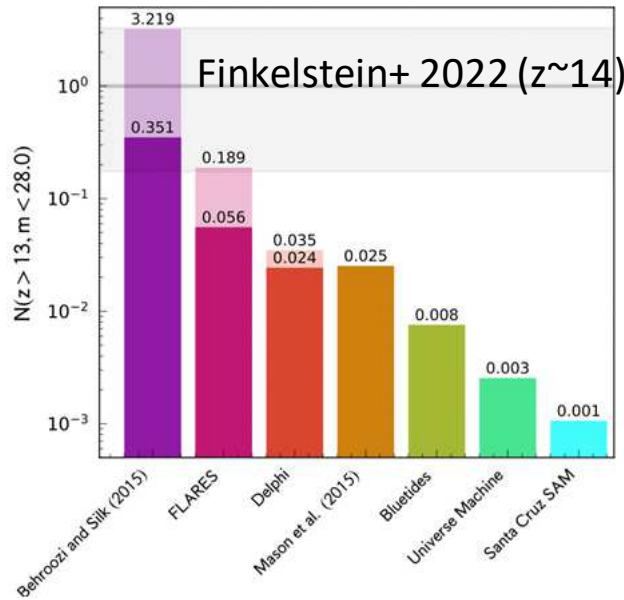
## Des objets jusqu'à $z=20$ !! (26-27 juillet 2022)



Finkelstein+ 2022, 'Maisie'

# Premiers Résultats JWST sur les premières galaxies : SMACS 0723

## Trop massives, trop brillantes, trop tôt

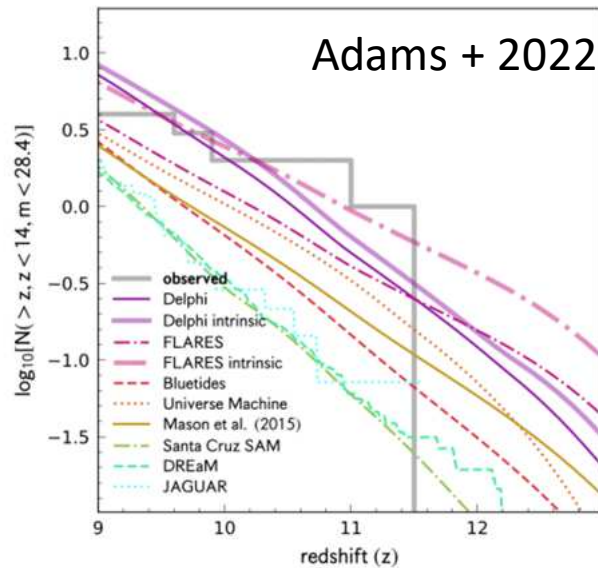


Très difficile à expliquer dans le modèle standard LCDM de formation des structures ...



# Premiers Résultats JWST sur les premières galaxies : SMACS 0723

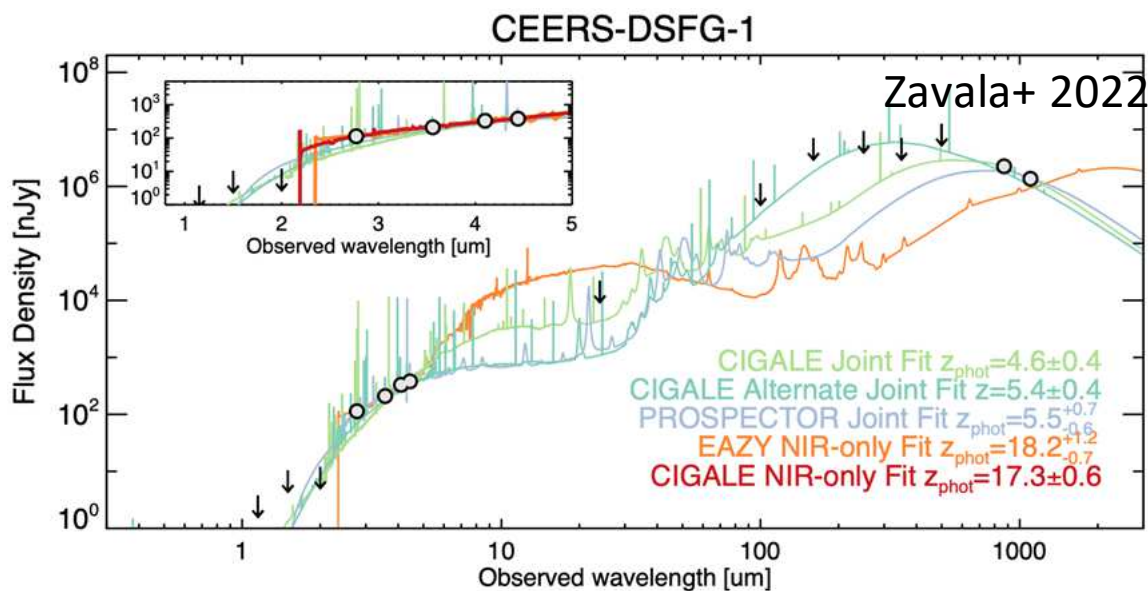
## On respire un peu (aujourd'hui).



and we find redshifts of 11.10, 12.09 and 15.39 for these sources. For the other sources reported by [Atek et al. \(2022\)](#) with  $z > 9$ , we find they have solutions with  $z < 7$  in our analysis.

The majority of the [Yan et al. \(2022\)](#) are very faint, a total of 16 cross matched sources are reported as being brighter than magnitude 28 in the F444W band. Out of all of these objects, we find only one of them has a redshift in agreement with our photometric redshifts within 15 per cent. This is F150DA-063, which has a reported redshift of 7.4 in [Yan et al. \(2022\)](#) and a redshift of 6.9 in our own. For the remaining objects, we either find a significant F090W detection or extremely red slopes across the NIRCcam bands, leading to solutions of very dusty galaxies ( $E(B - V) > 0.6$ ) at redshifts 2-5.

Différences de pipeline ?

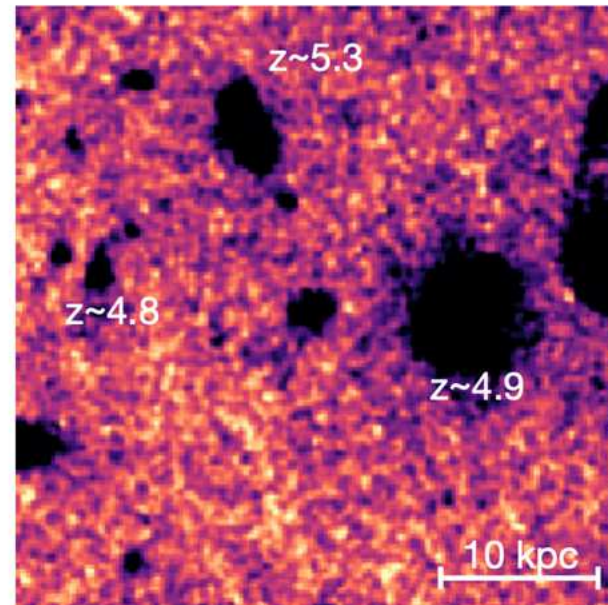
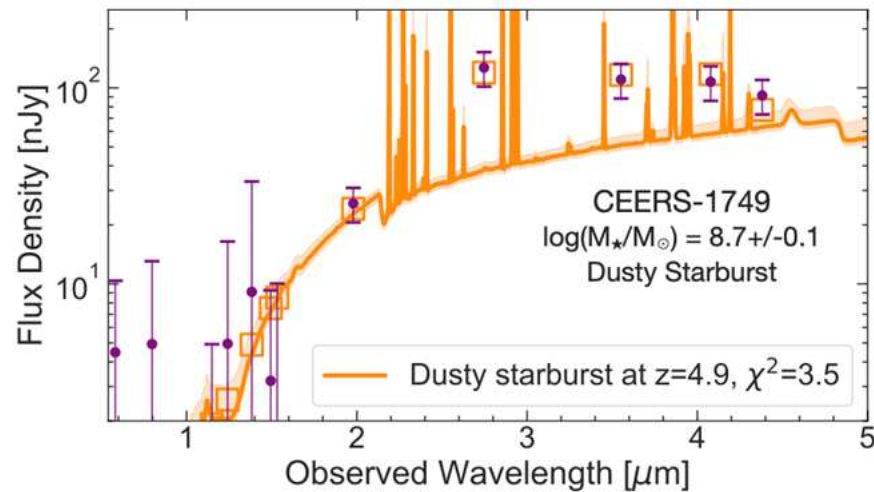


### Dusty starburst Galaxy à $z=5.4$

This is illustrated by studying the source CEERS-DSFG-1, a  $850\mu\text{m}$ -selected galaxy with robust interferometric observations at 1.1mm by NOEMA. The results from an SED fitting using the JWST photometry alone suggest  $z \sim 18$ , whereas a joint SED fitting analysis including the NIRCcam constraints and the long-wavelength (sub-)millimeter data implies a photometric redshift of  $4.6 \pm 0.4$  (with physical properties that resemble other DSFGs:  $M_* = (5.3 \pm 1.3) \times 10^{10}$ ;  $\text{SFR} = 152 \pm 66$ ;  $L_{\text{dust}} = (1.9 \pm 0.6) \times 10^{12} L_{\odot}$ ).

# Premiers Résultats JWST sur les premières galaxies : SMACS 0723

## On respire un peu (aujourd'hui).

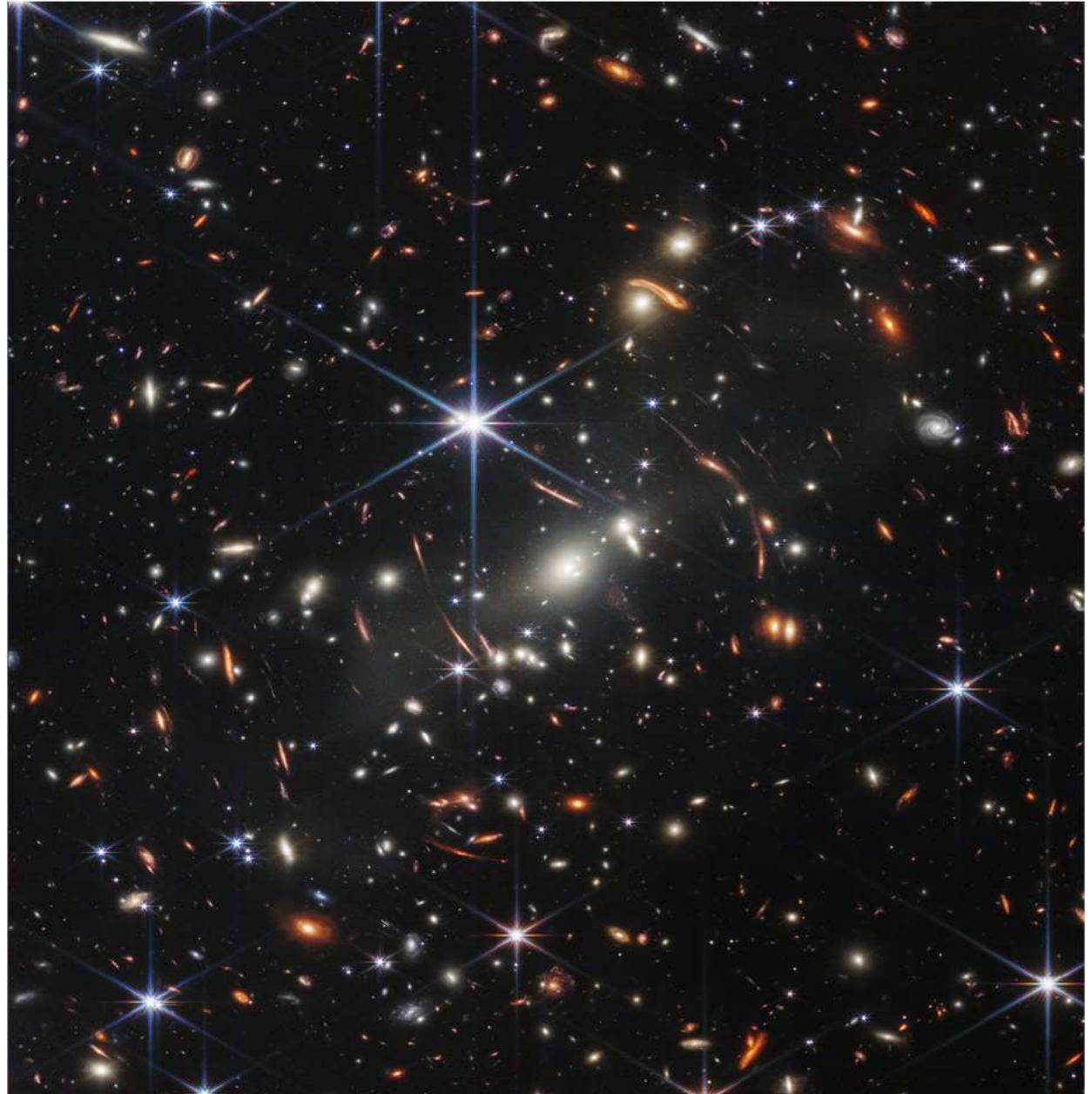


1749's photometry. The emission lines at  $z \approx 5$  conspire to boost the  $> 2\mu\text{m}$  photometry, producing an apparent blue slope as well as a strong break in the SED. Such a perfectly disguised contaminant is possible only in a narrow redshift window ( $\Delta z \lesssim 0.1$ ), implying that the permitted volume for such interlopers may not be a major concern for  $z > 10$  searches, particularly when medium-bands are deployed. If CEERS-1749 is confirmed to lie at  $z \approx 5$ , it will be the highest-redshift quiescent galaxy, or one of the lowest mass dusty galaxies of the early Universe detected to-date ( $A_{5500} \approx 1.2$  mag,  $M_* \approx 5 \times 10^8 M_\odot$ ). Both redshift solutions of this intriguing galaxy hold the potential to challenge existing models of early galaxy evolution, making spectroscopic follow-up of this source critical.



# Pour Conclure

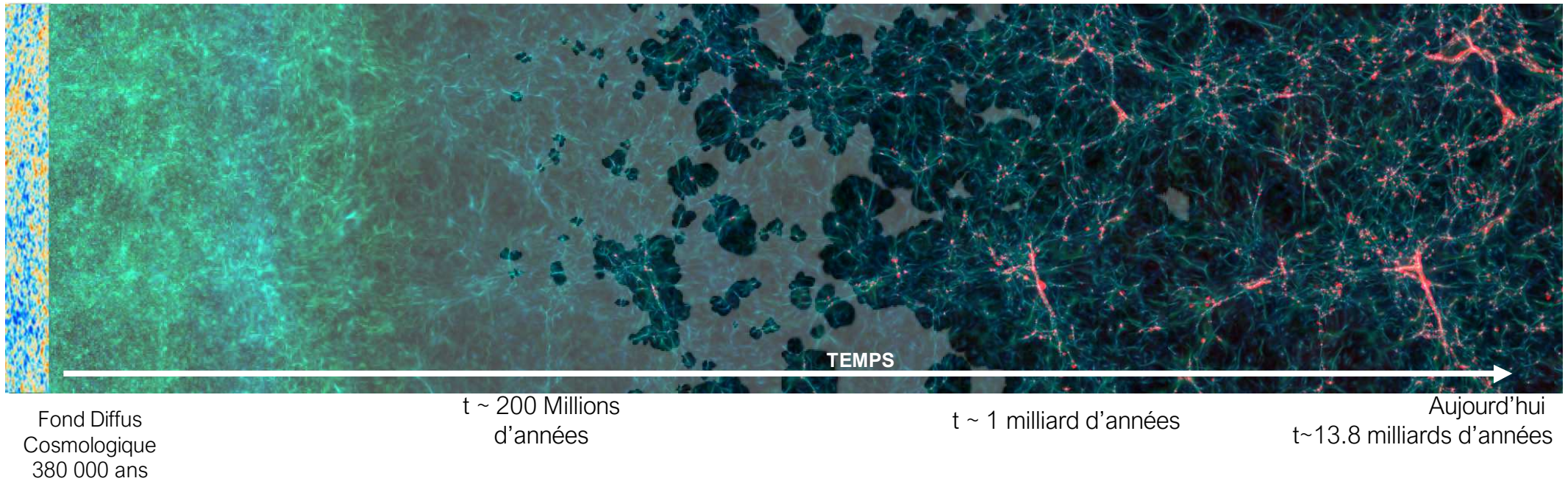
- L'Univers des premières structures, étant par nature peu évolué, offre une vue sur les conditions initiales. Cela permet de sonder une physique fondamentale ou des mécanismes astrophysiques parfois « brouillés » par 13 milliards d'années d'évolution.
- la prochaine décennie est riche de promesses quand à l'observation de l'Univers jeune, par exemple avec JWST ou SKA
- Dès à présent la communauté est amenée à relever des défis substantiels que ce soit du côté de l'acquisition des données ou leur interprétation par des modèles ou théories
- JWST en quelques semaines a déjà sérieusement rebattu les cartes... rendez-vous dans 20 ans !





# La formation des grandes structures de l'Univers

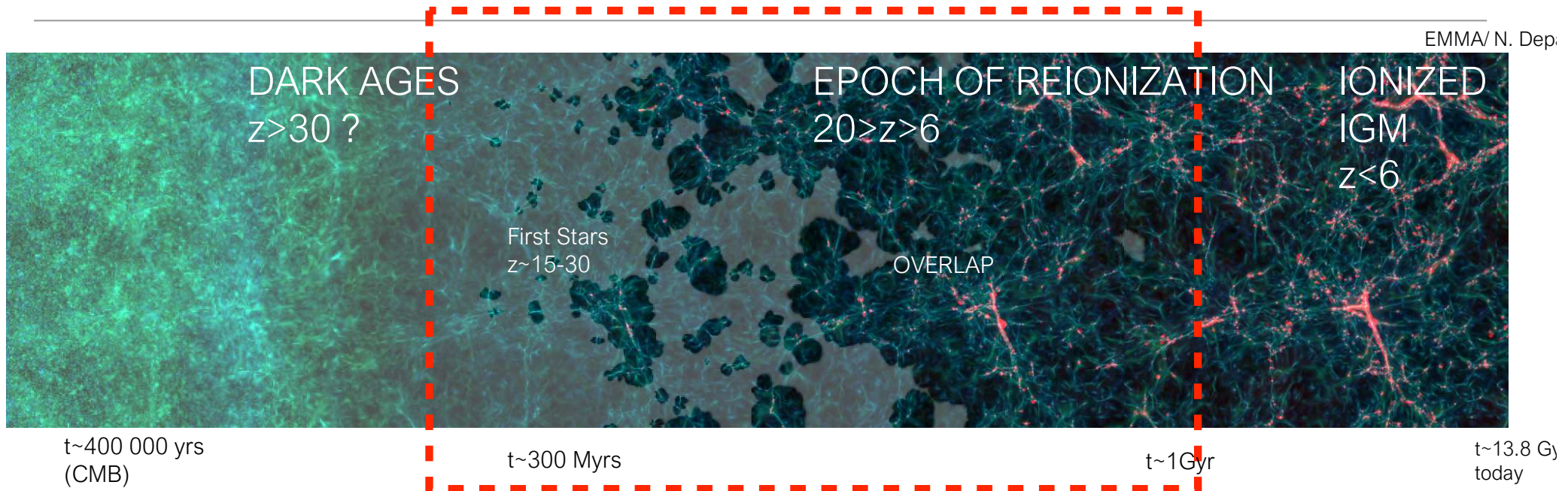
Visu : N. Deparis



La **gravitation** pousse à l'apparition des **grandes structures** de l'Univers et conduit à la formation des **galaxies**.

**En rouge** les régions contenant des galaxies, en clair la distribution d'hydrogène neutre, en sombre celle de l'hydrogène ionisé.

# The epoch of Reionization



## Reionization

= end by  $z \sim 6$  //  $t \sim 1$  Gyr

= a great and rapid cosmological transition (few 100s Myrs)

= Driven by IONIZING LIGHT and the first sources (and dominated by stars)

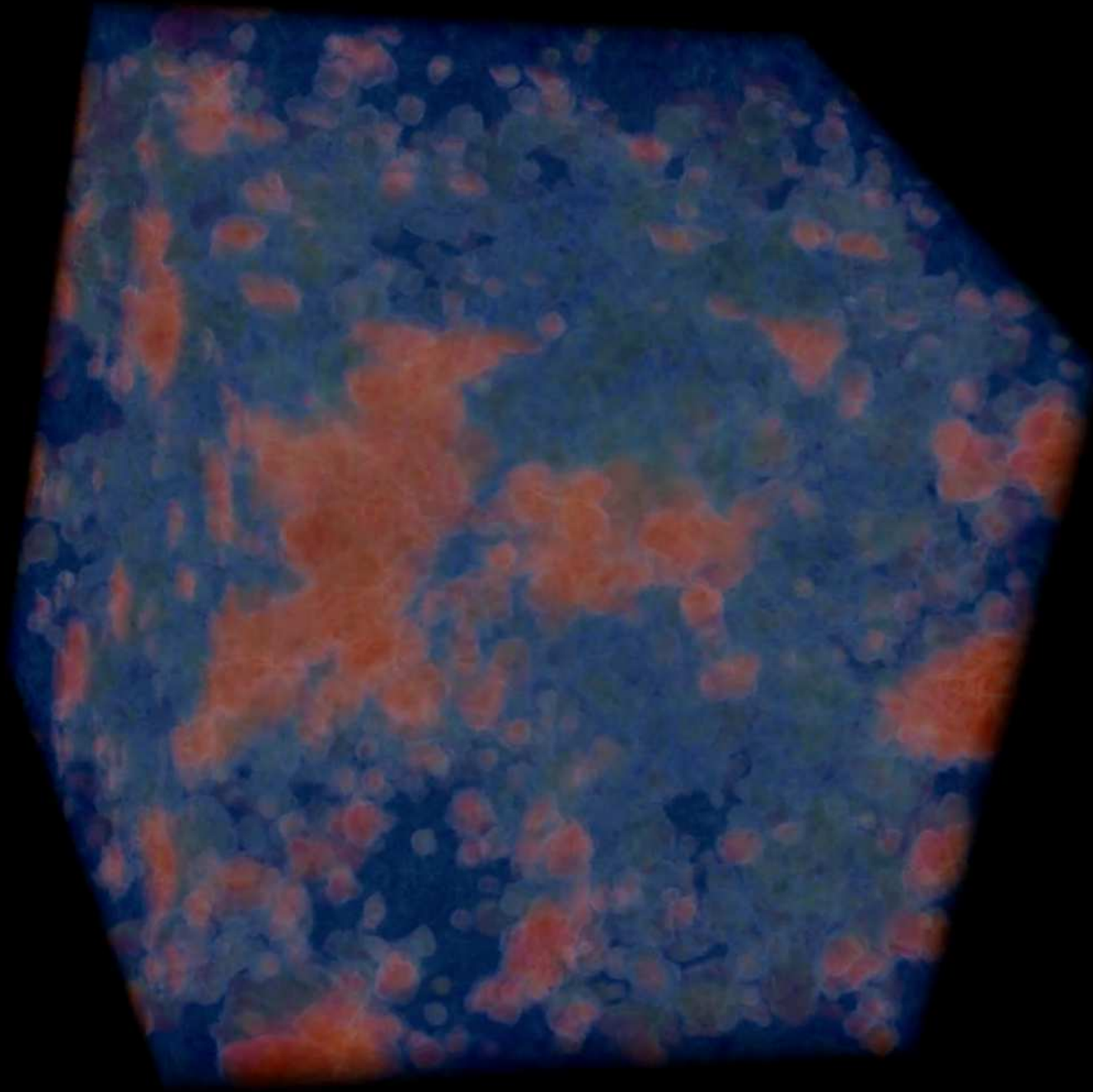
= network of HII regions (ionized bubbles)

= ionization (0.9999) & heating ( $\sim 10\,000$  K) of IGM (by stars and quasars)

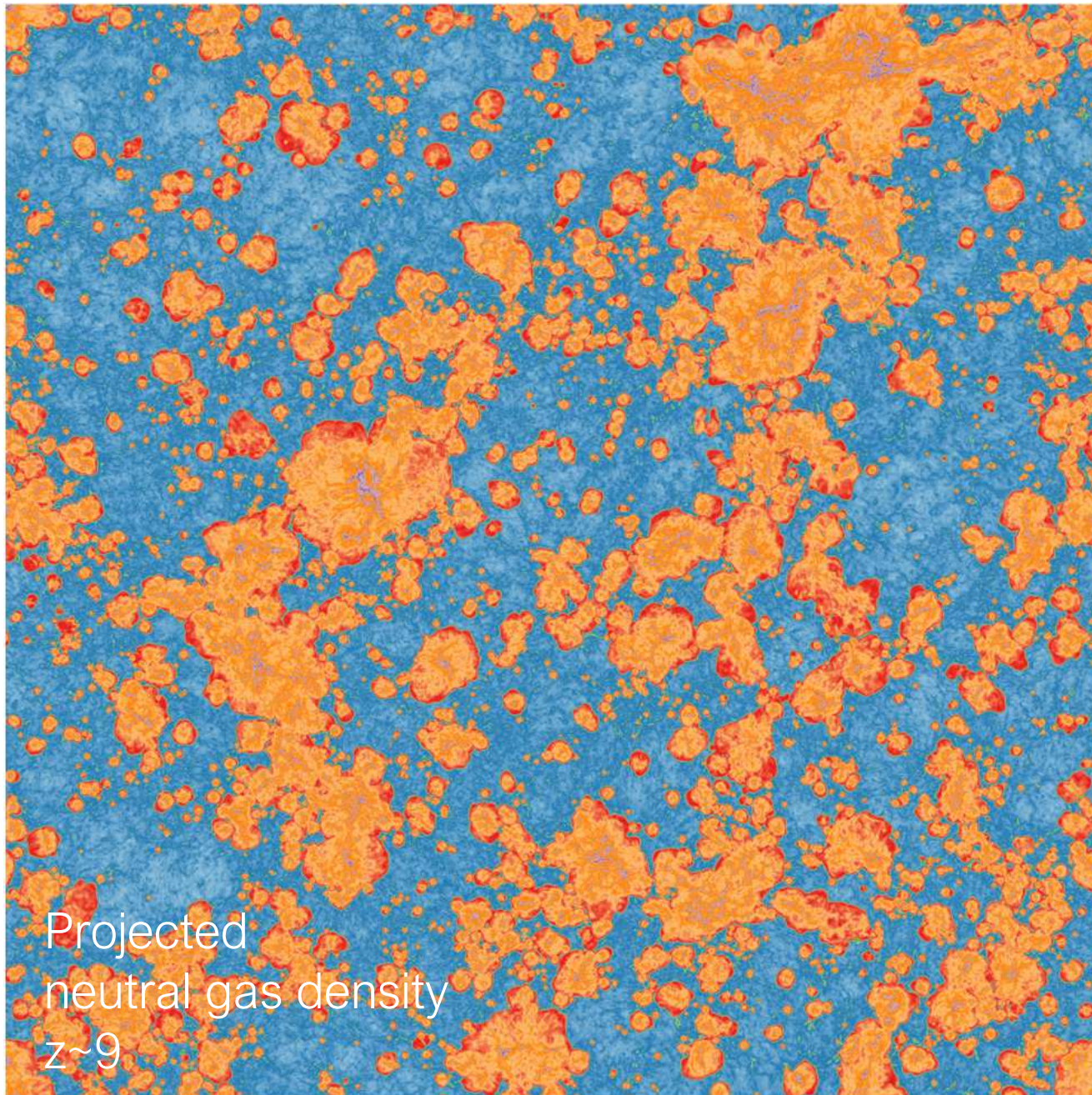
= UV Background

= the initial stages of galaxy formation









**The Epoch of Reionization**  
Theory - Simulations - Observations

Strasbourg, France, 23-27 April 2012  
<http://eor-2012.u-strasbg.fr>

SOC : ABEL Tom - AUBERT Dominique - BRIGGS Frank  
CIARDI Benedetta - MELLEMA Garrelt - PRITCHARD Jonathan  
SCHAEFER Daniel - SEMELIN Benoît - TEYSSIER Romain  
TRAC Hy - PETITJEAN Patrick - ZAROUBI Soleem

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG   CNRS   Région Alsace   UPMC

CODA-I AMR simulation:  
Aubert+ 2018

91 Mpc /  $2048^3$  /  
32768 CPUS+ 4096 GPUS  
(Titan/ORNL)  
Jan-Feb 2017



# Looking at the Reionization : The flood

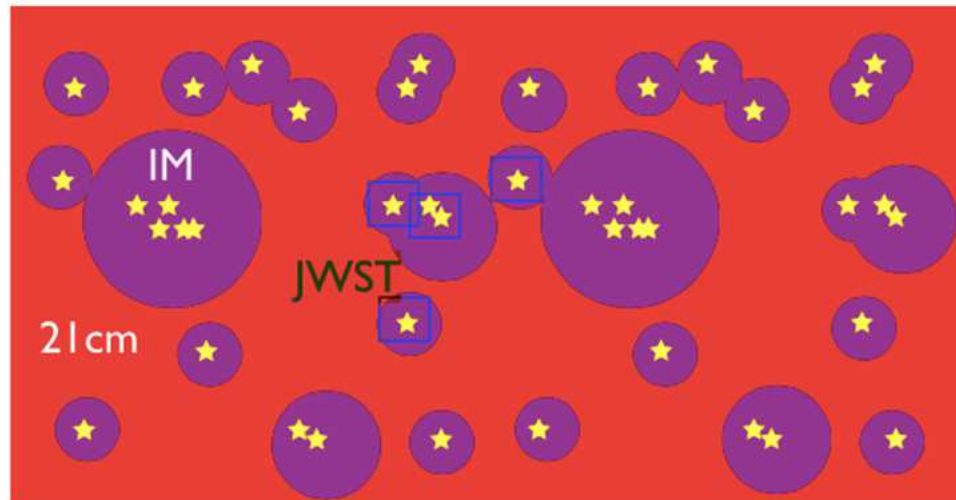
Athena (ESA)- 2028



JWST (NASA) - 2021



21cm SKA - 2020+  
precursors (LOFAR, PAPER, MWA, EDGES)



+ Pritchard & Loeb, 2012

+ ALMA, LSST, GSMT, EELT, SPICA, SVOM, next-gen CMB

The next decade is extremely promising in

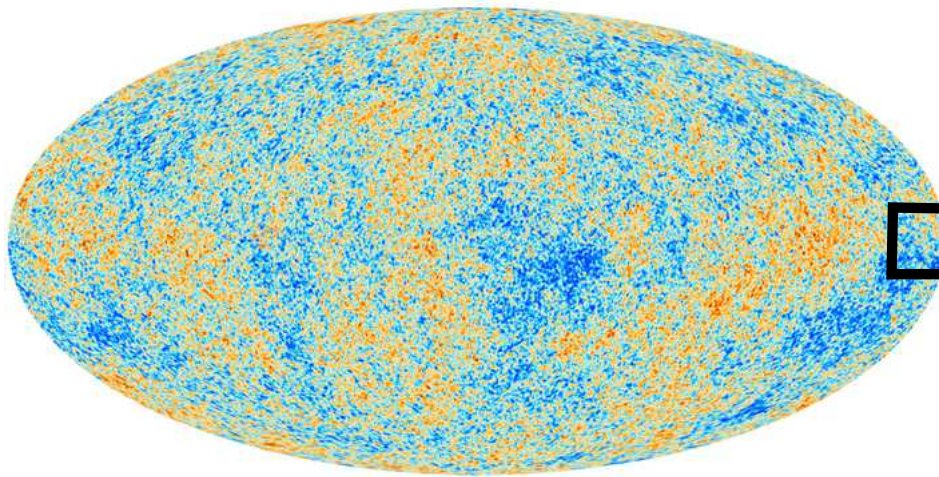
« Grands Principes »



# La formation des grandes structures

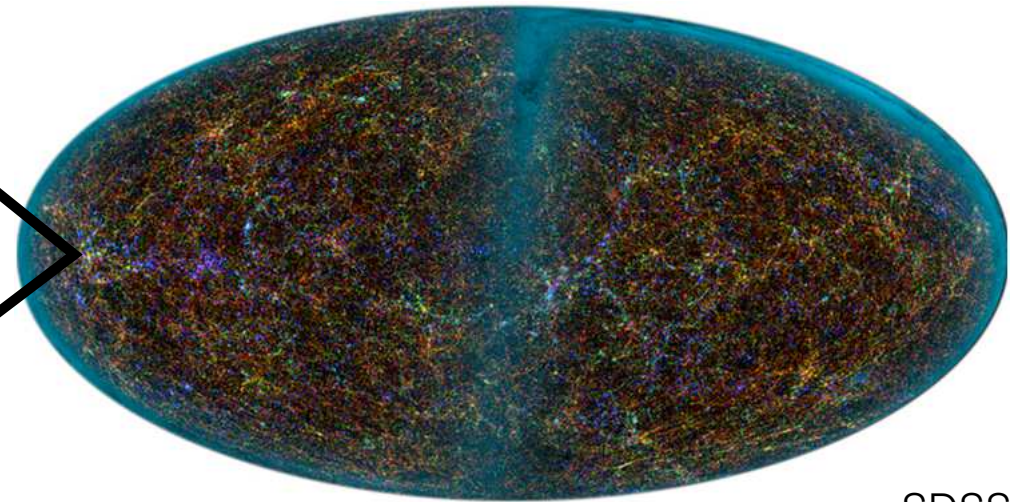
---

$t = 380\,000$  ans  
contraste = 0.001%



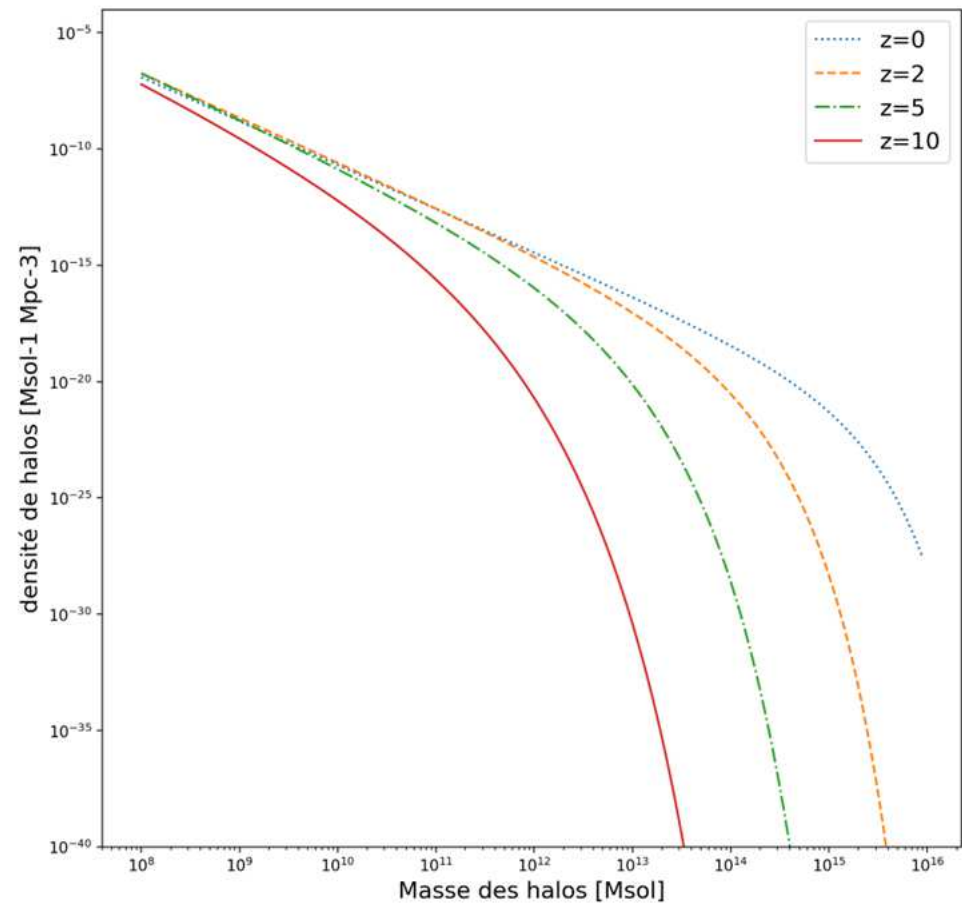
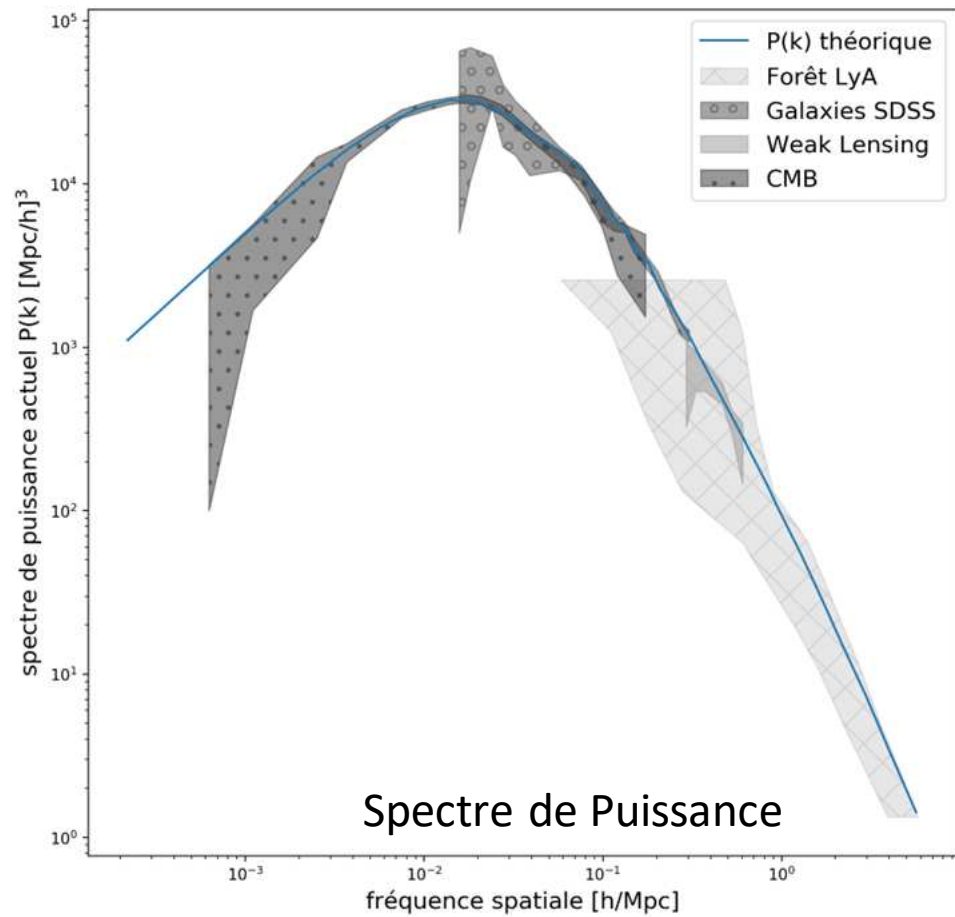
PLANCK

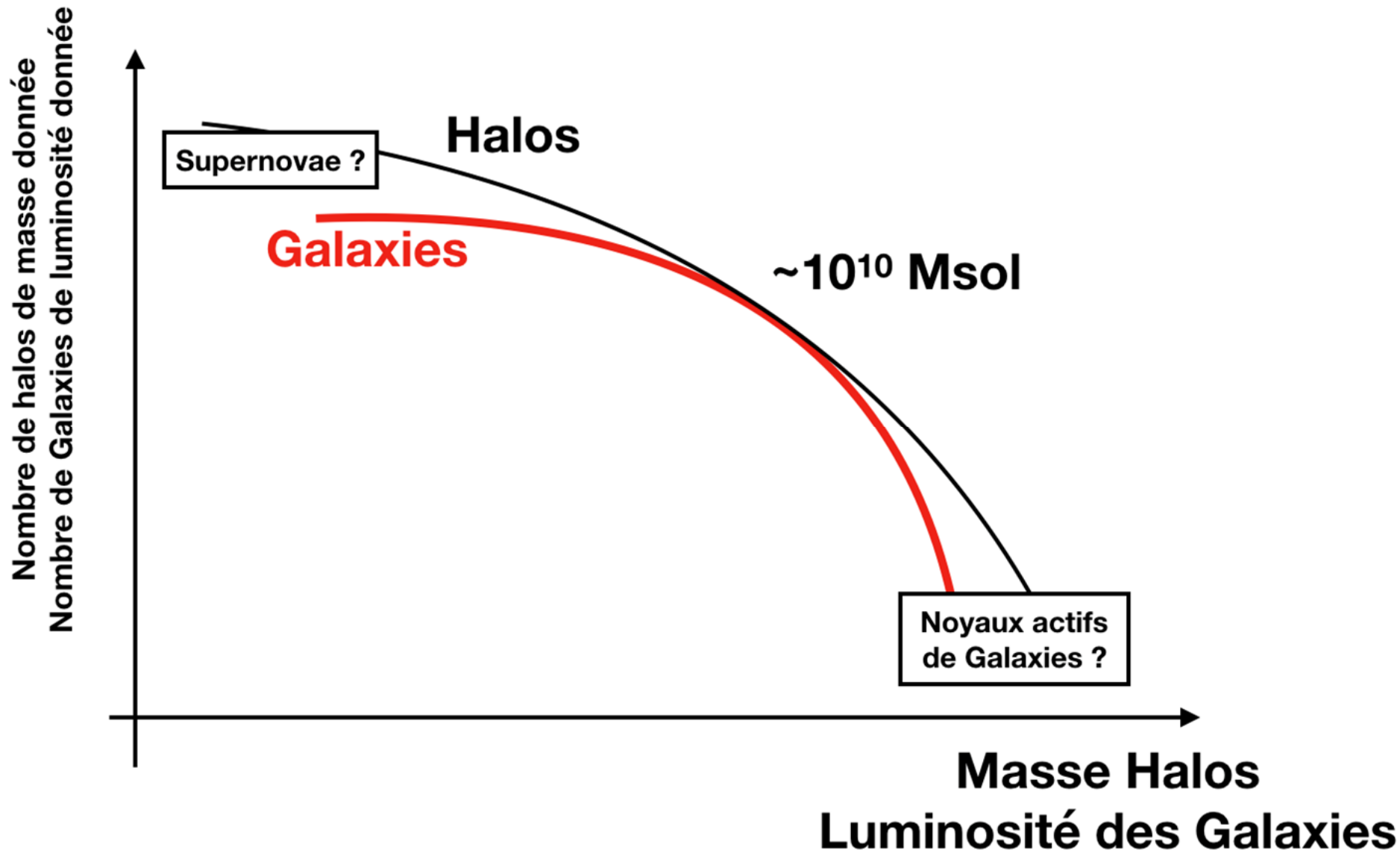
$t = 13.8$  milliards d'années  
contraste = 1 000 000%



SDSS

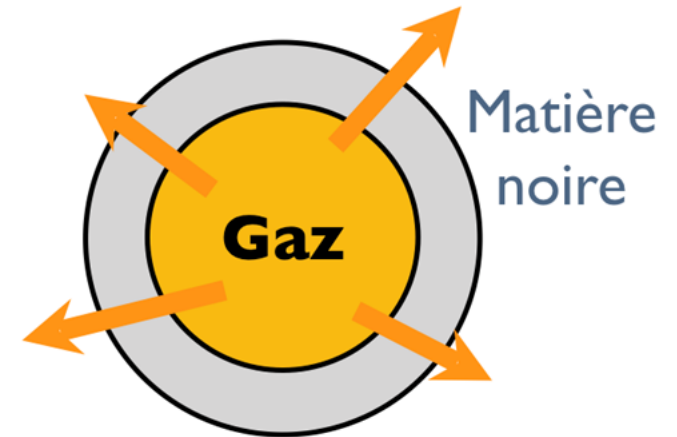
Régi par le mécanisme d'instabilité gravitationnelle



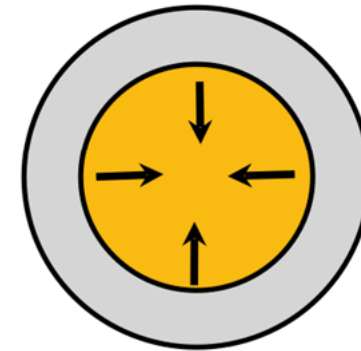




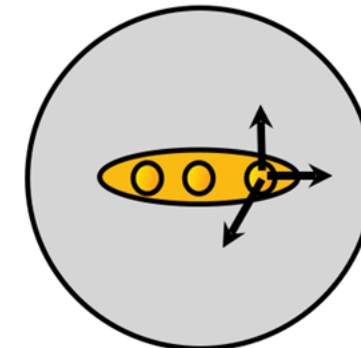
Le gaz rayonne et refroidit dans le puits de potentiel de la matière noire



Le gaz se contracte en rotation pour former un disque

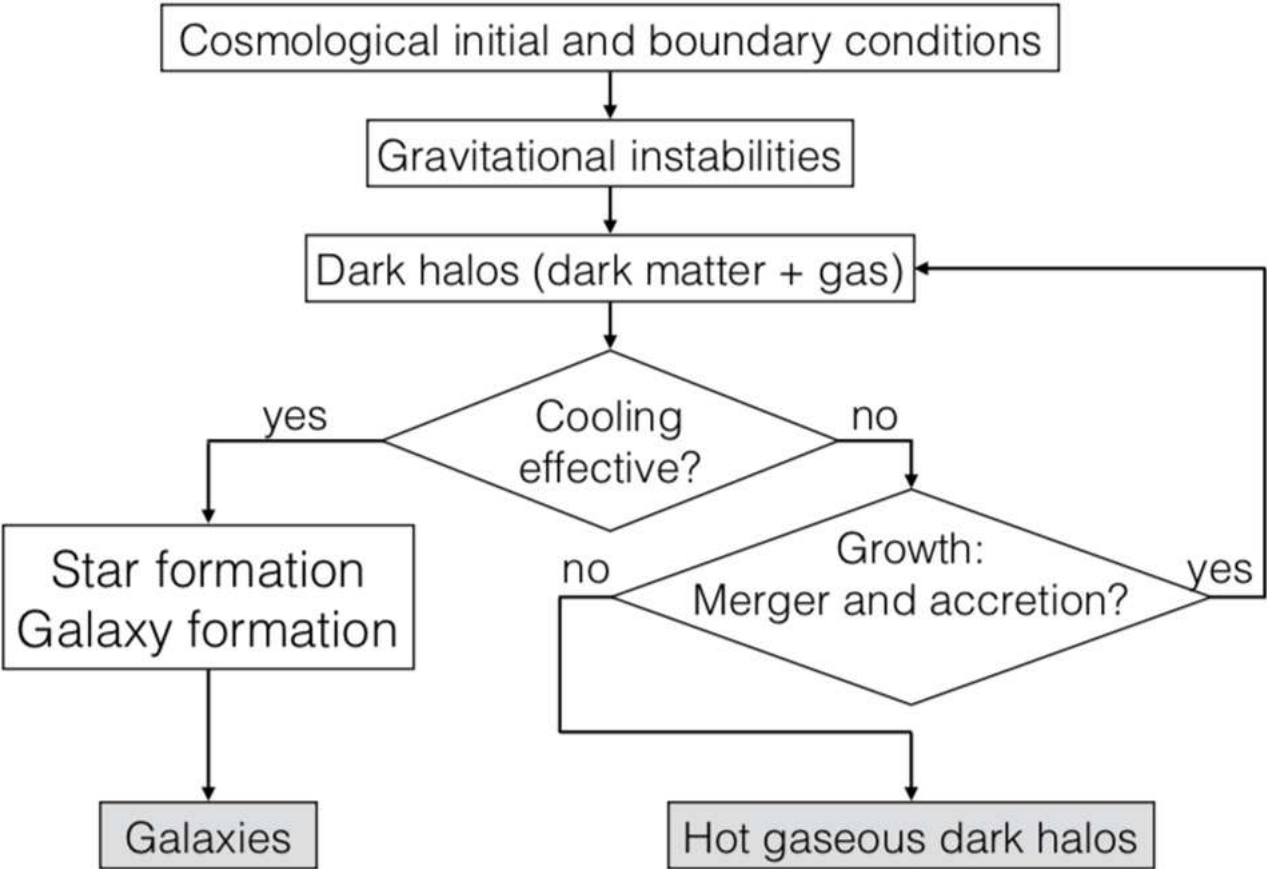


Les étoiles se forment et injectent de l'énergie dans le gaz en explosant en fin de vie

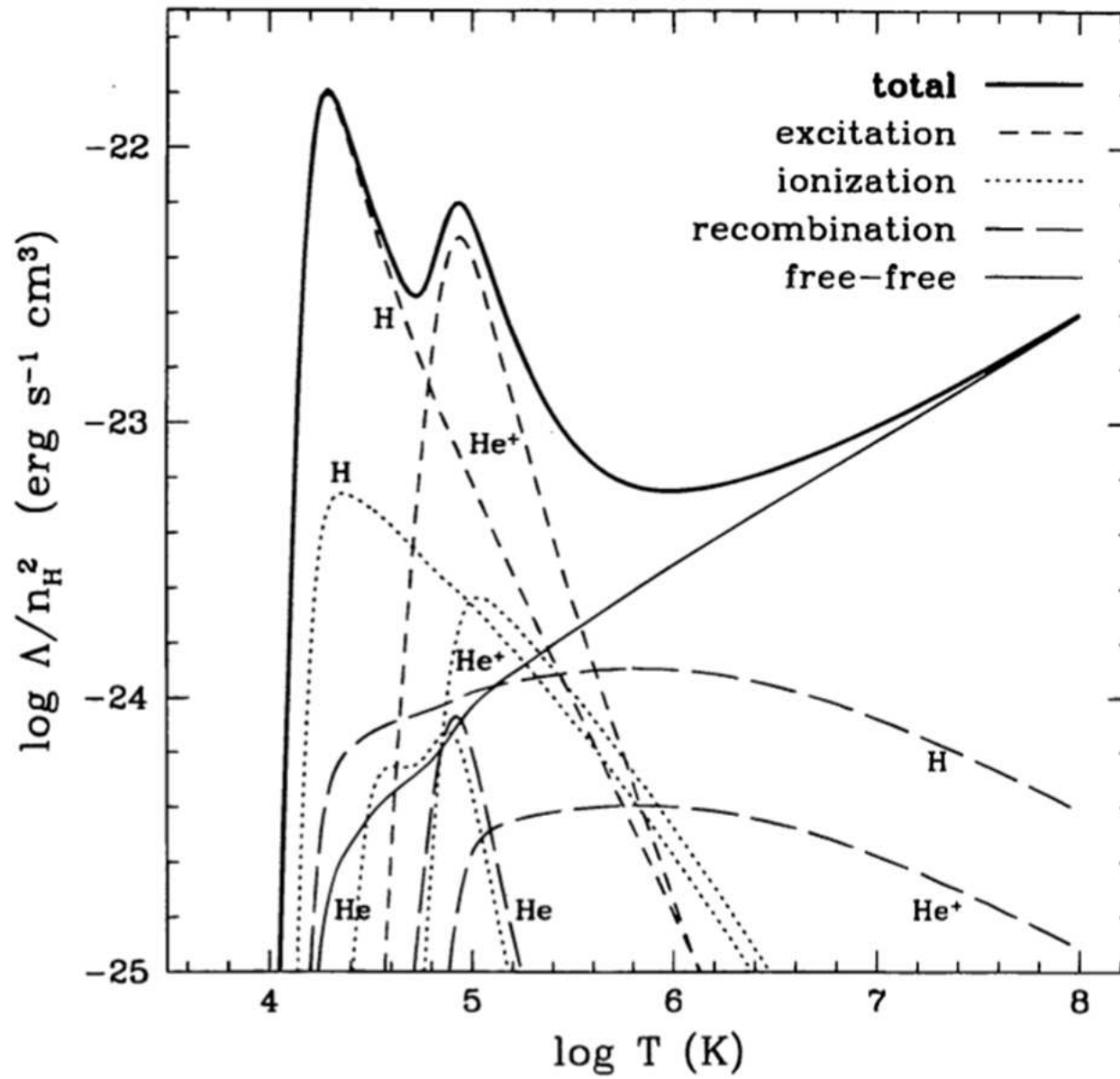


# How to form the first structures

---



# Cooling

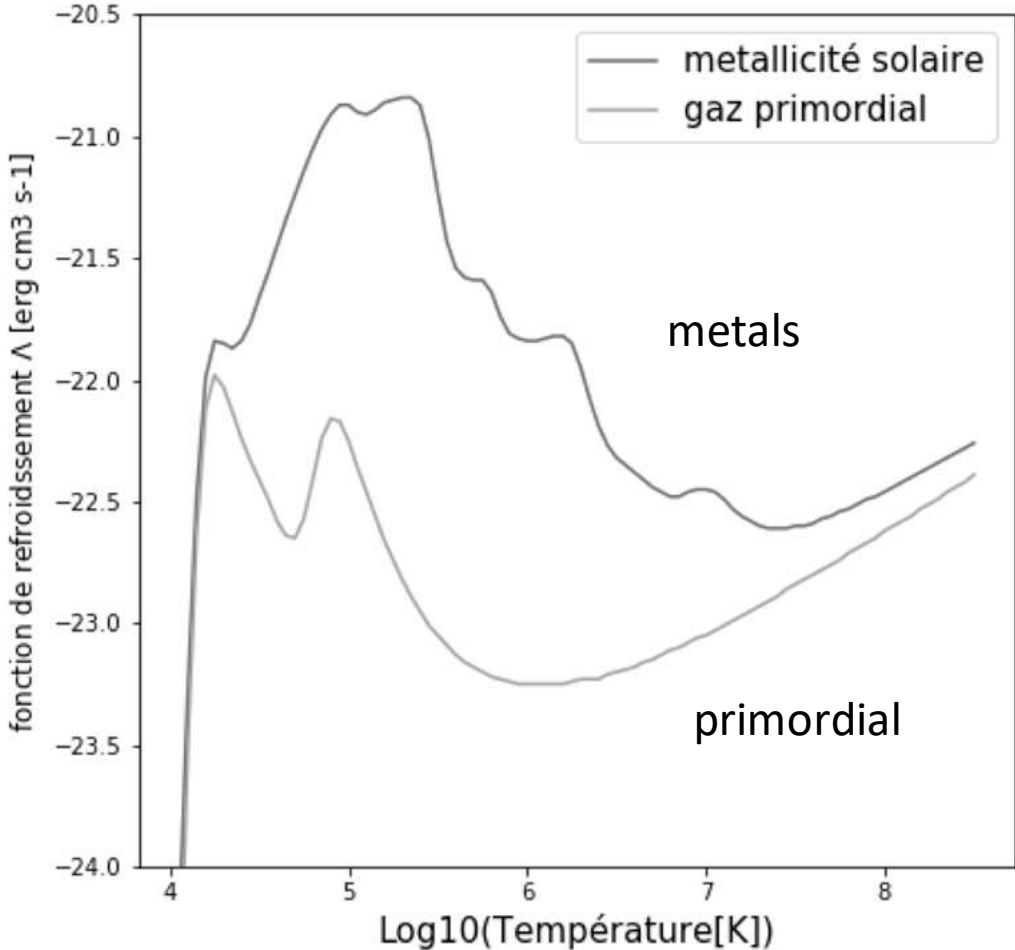
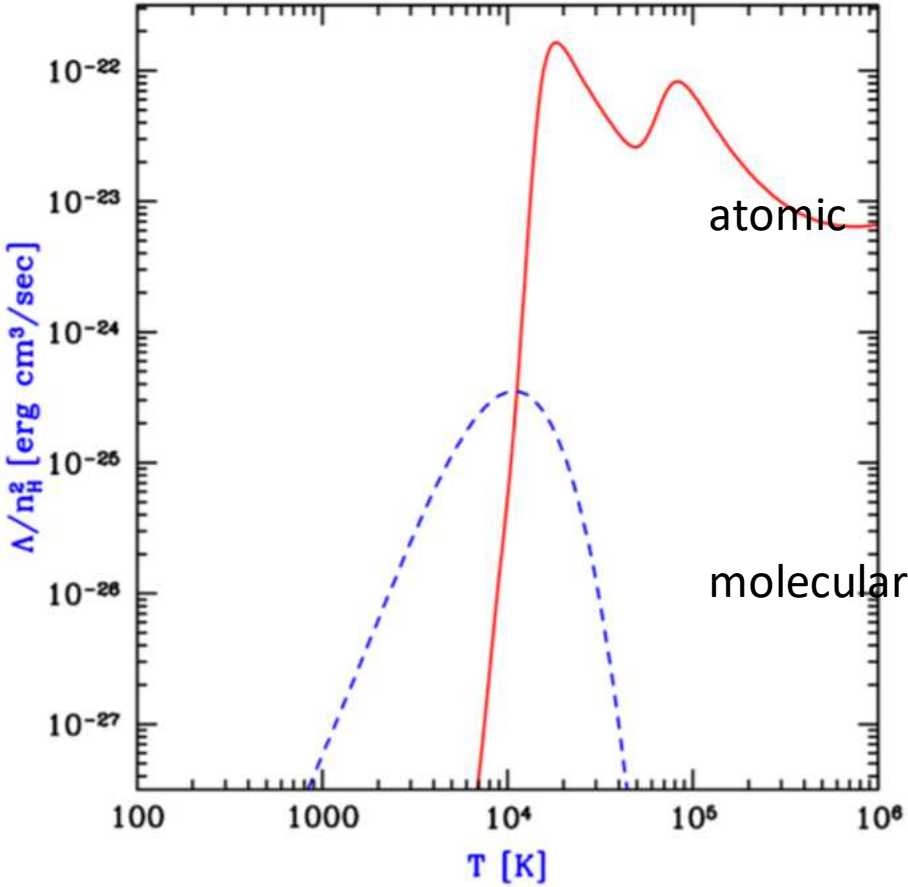


Cooling is set  
by atomic/molecular  
scales

Note the 10 000K  
Threshold

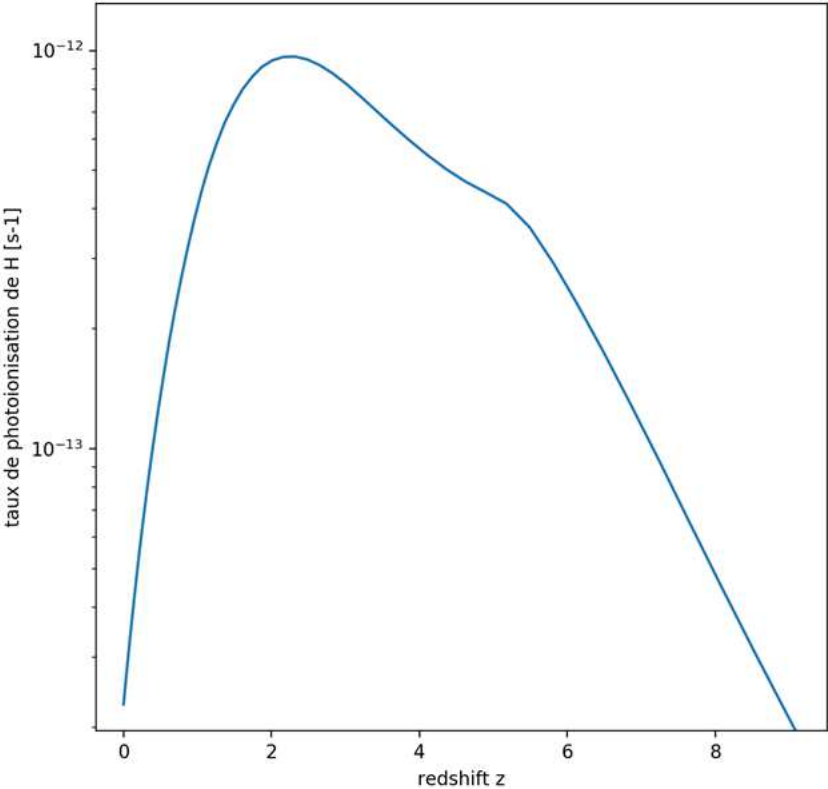


# Cooling



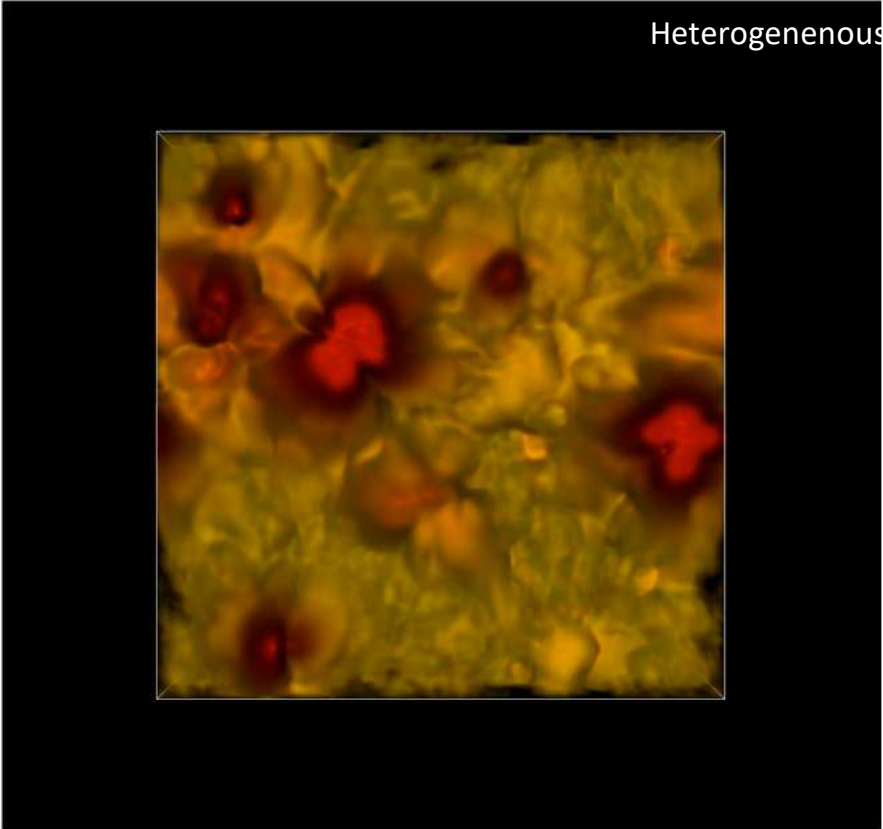
# Heating

Homogeneous background



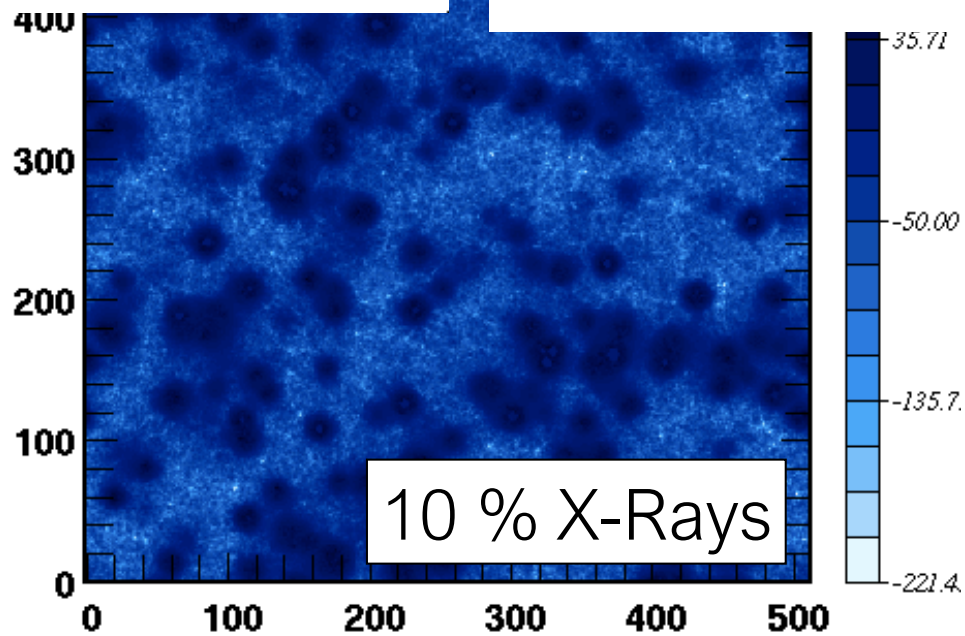
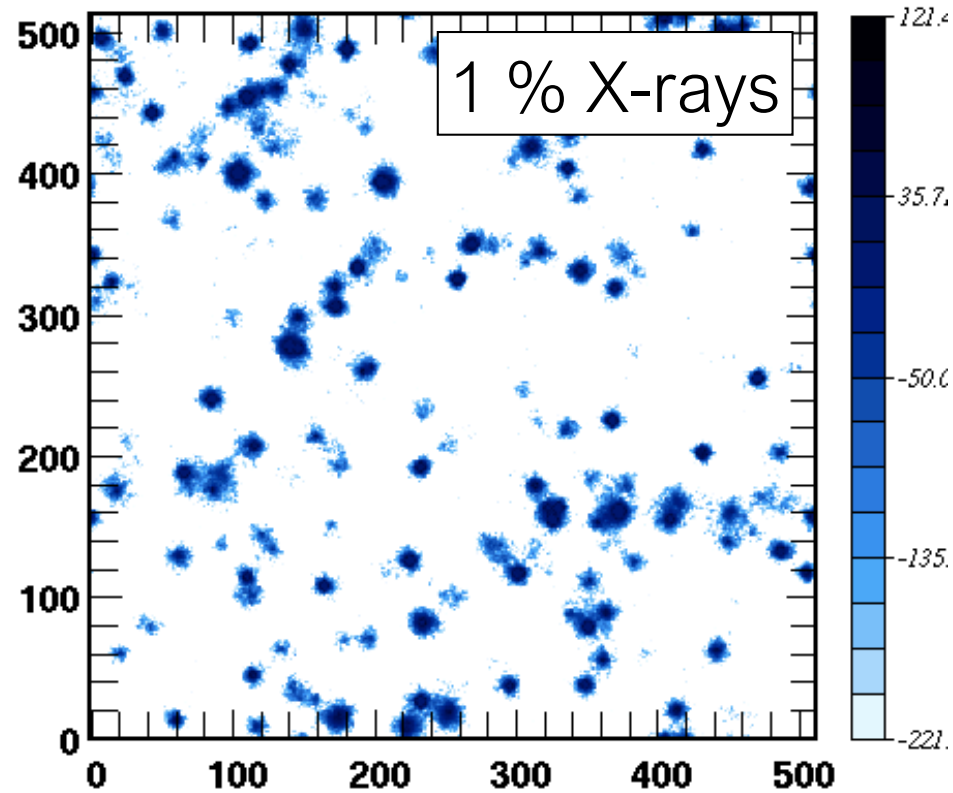
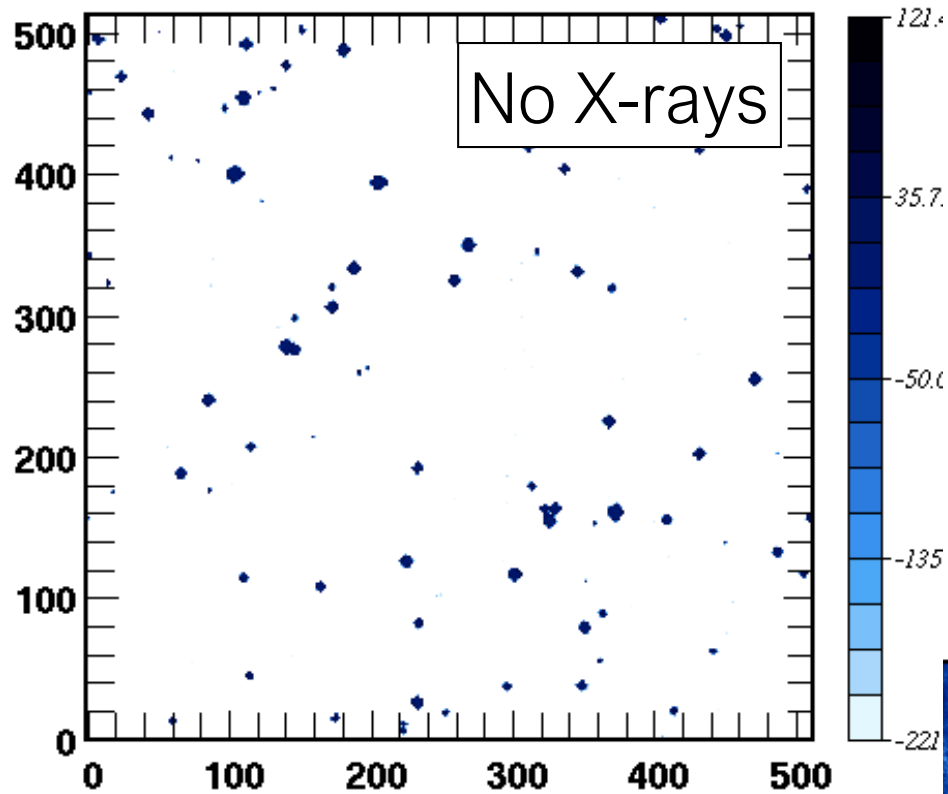
Haardt & Madau 2012

Heterogeneous background



Aubert & Teyssier 2010

The UV flux from star forming galaxies heats and reionizes the IGM  
The X-ray flux (e.g. from Quasars) heats and reionizes the IGM



$x = 0.5$

$z = 10$



# Cooling is highly dependent on ionization state

Katz et al. 96

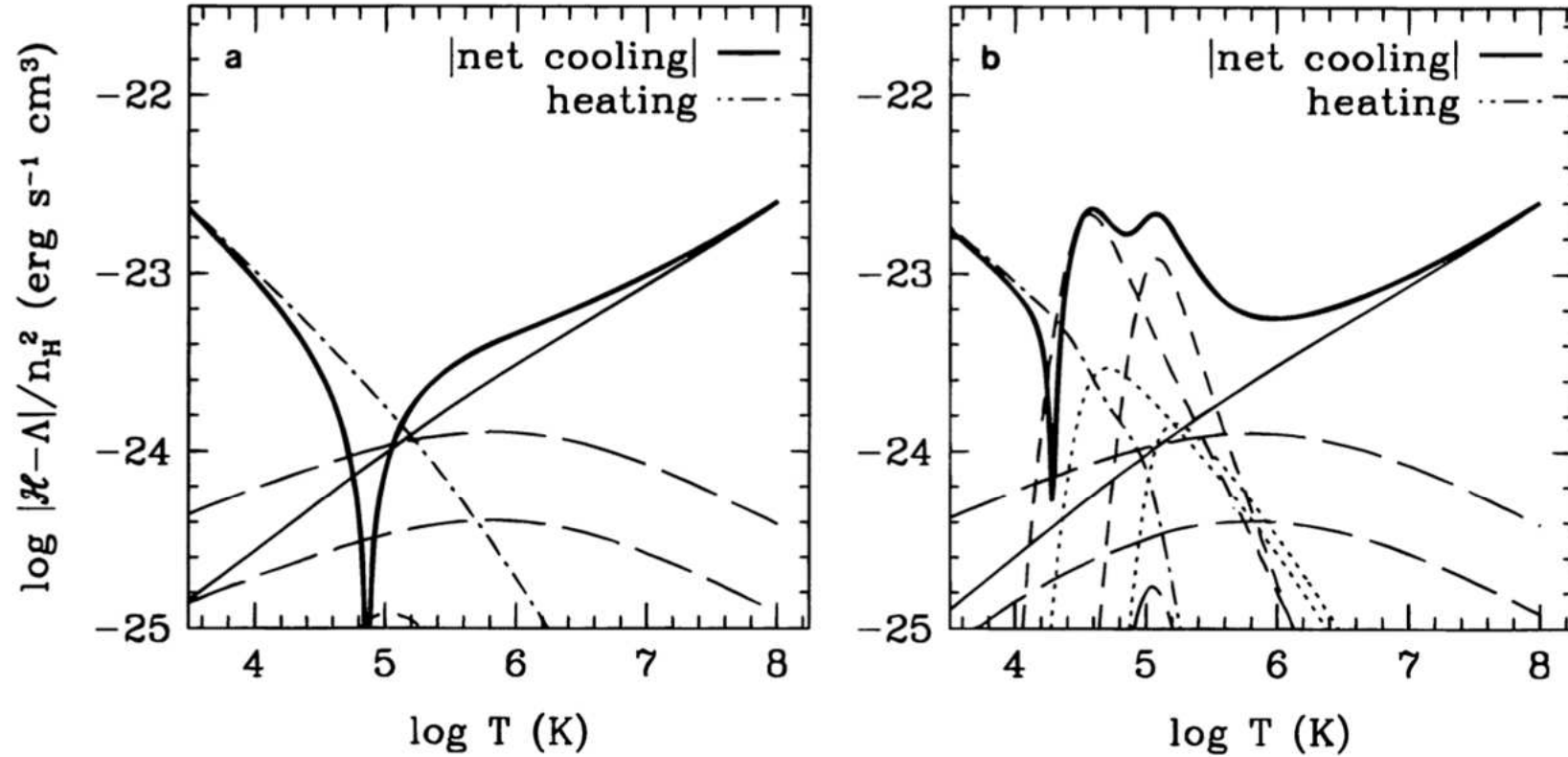


FIG. 2.—Net cooling rates as a function of temperature for primordial composition gas in ionization equilibrium with a UV radiation background of intensity  $J(\nu) = 10^{-22}(\nu_{\text{L}}/\nu)$  ergs s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> Hz<sup>-1</sup>. (a) Gas density  $n_{\text{H}}$  equal to the cosmic mean at  $z = 2$ , for  $\Omega_{\text{b}} h^2 = 0.0125$  ( $n_{\text{H}} = 2.89 \times 10^{-6}$  cm<sup>-3</sup>). (b) Overdensity of 1000 at  $z = 2$  ( $n_{\text{H}} = 2.89 \times 10^{-3}$  cm<sup>-3</sup>). In each panel, the dot-dashed line shows the rate of heating by photoionization, and the heavy solid curve shows the absolute value of the net cooling rate; heating dominates at low temperatures and cooling at high temperatures. Other lines show contributions from different physical processes as in Fig. 1: recombination (*long-dashed line*), free-free (*thin solid line*), collisional excitation (*short-dashed line*) and collisional ionization (*dotted line*).

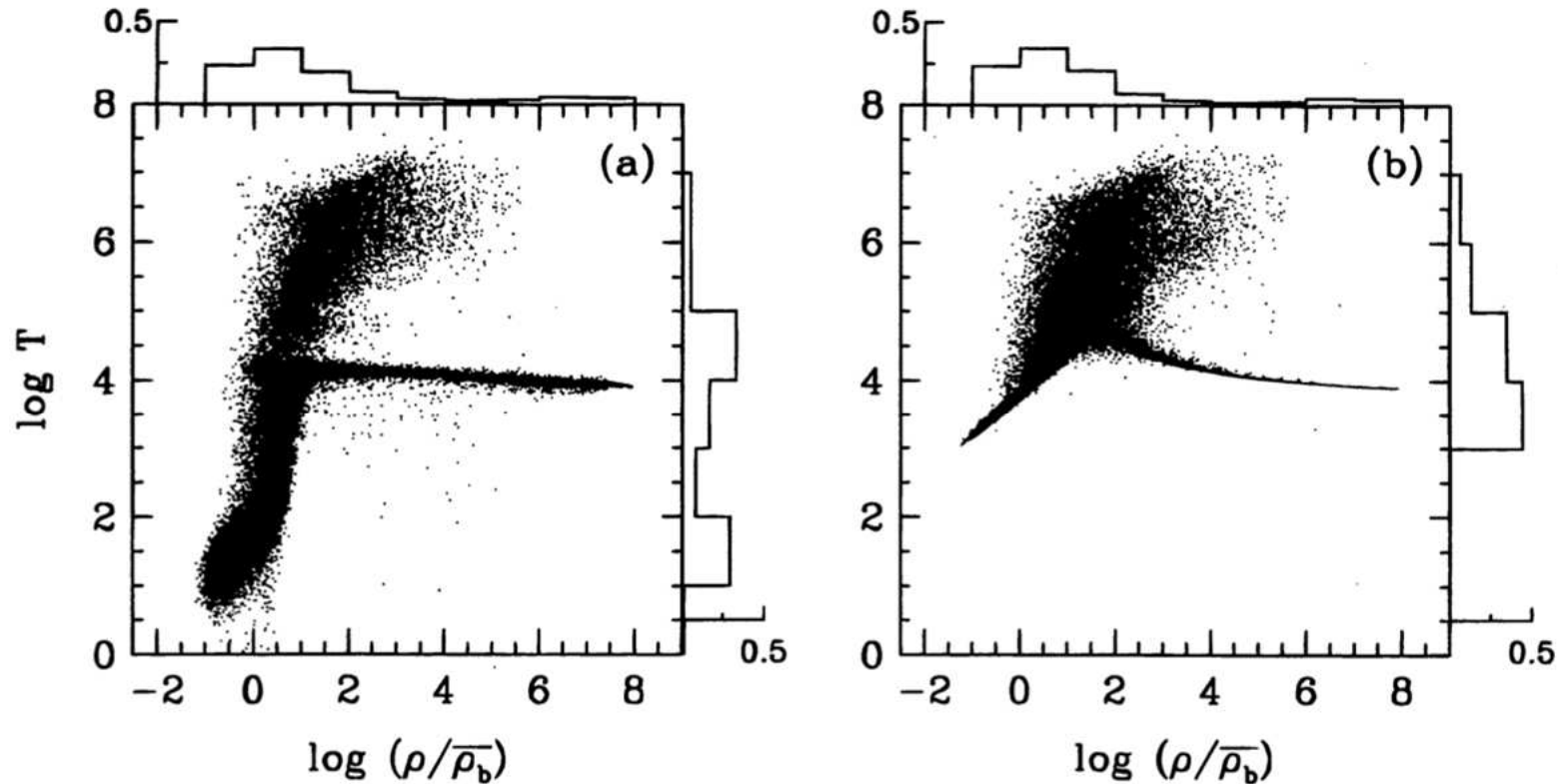
# Basic models of photo-heating = uniform UV Background

1996ApJS...105...19K

No. 1, 1996

COSMOLOGICAL SIMULATIONS WITH TreeSPH

27



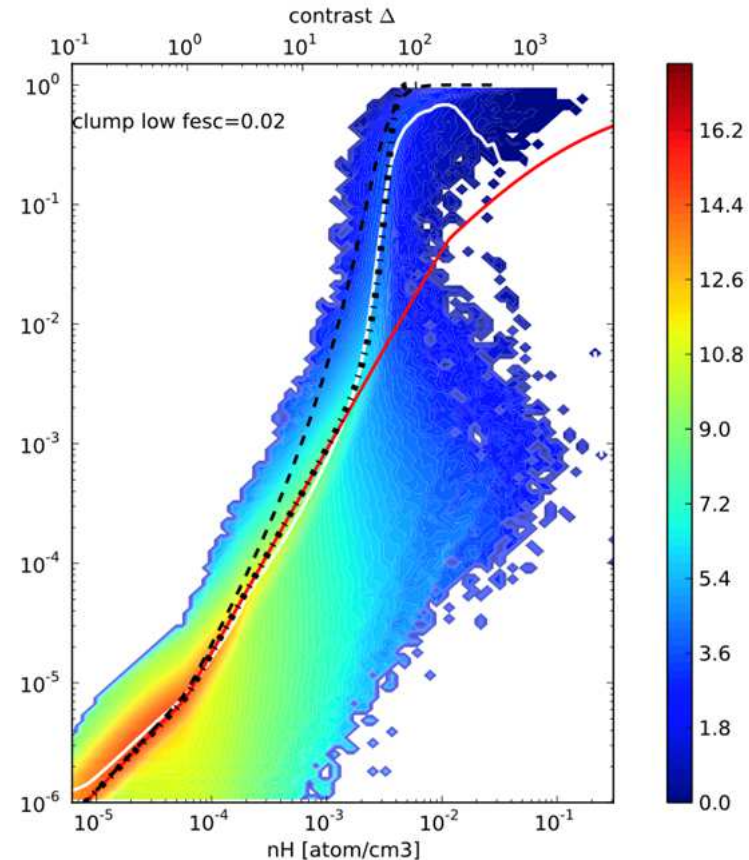
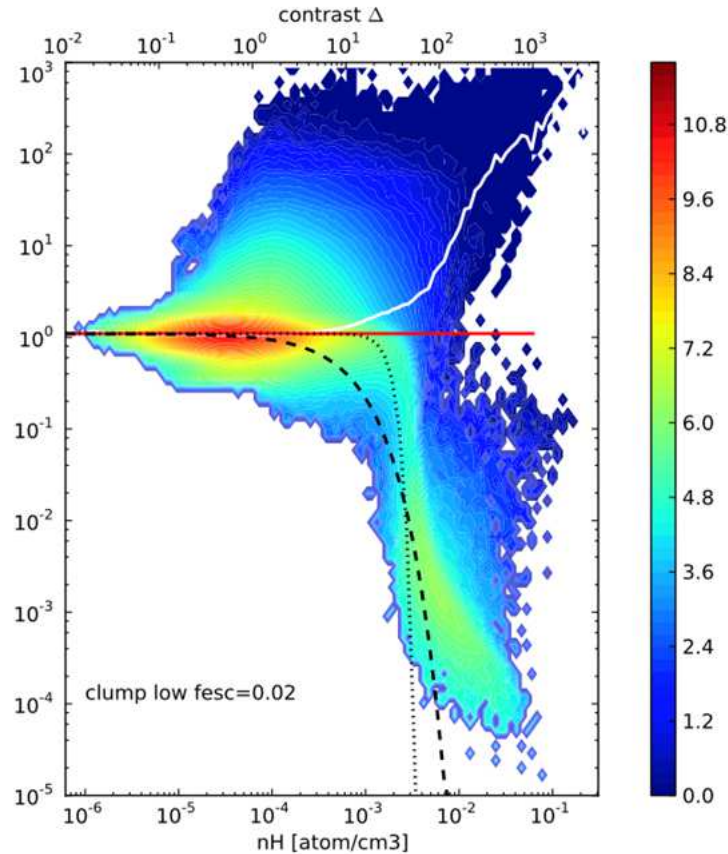
Katz et al. 9

FIG. 3.—Distribution of gas in the density-temperature plane at  $z = 2$  in CDM simulations (a) without an ionizing background and (b) with an ionizing background. Each point represents a single SPH particle; temperatures are in K, and densities are scaled to the mean baryon density. Histograms show the one-dimensional marginal distributions, i.e., the fraction of particles in each decade of density and of temperature.

Standard models by Haardt & Madau (otl

# UV Background + Equilibrium

Aubert & Teyssier

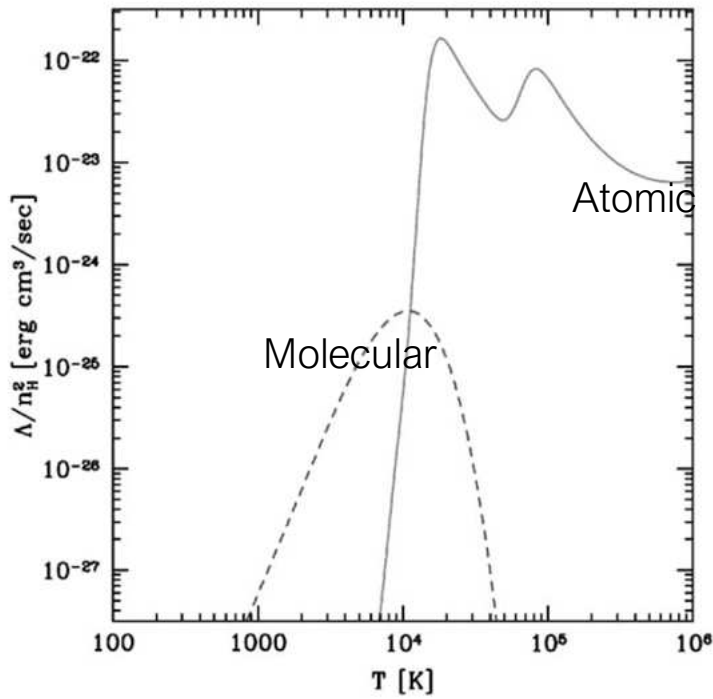


$$\frac{dn_H}{dt} = \alpha n_H^2 x^2 - \Gamma n_H (1 - x) \sim 0$$

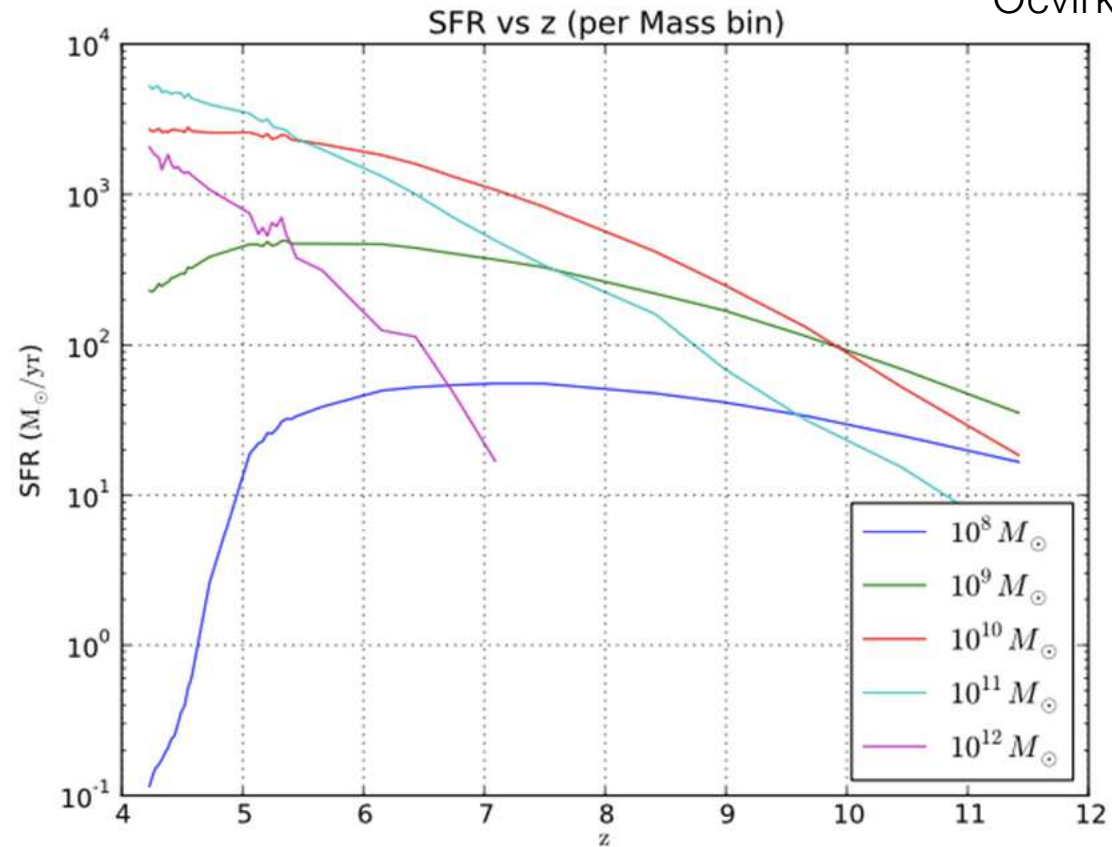
Non RT simulations assume a UV background and chemical equilibrium quite valid in fact



# Impact on Star formation in galaxies



Barkana & Loeb 2001

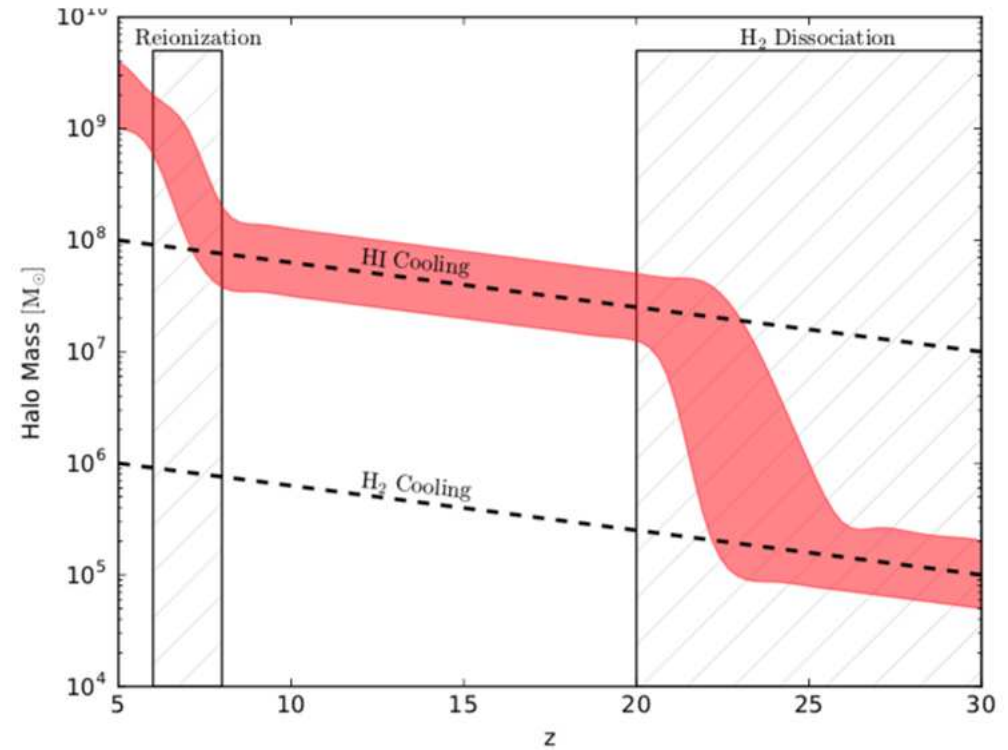
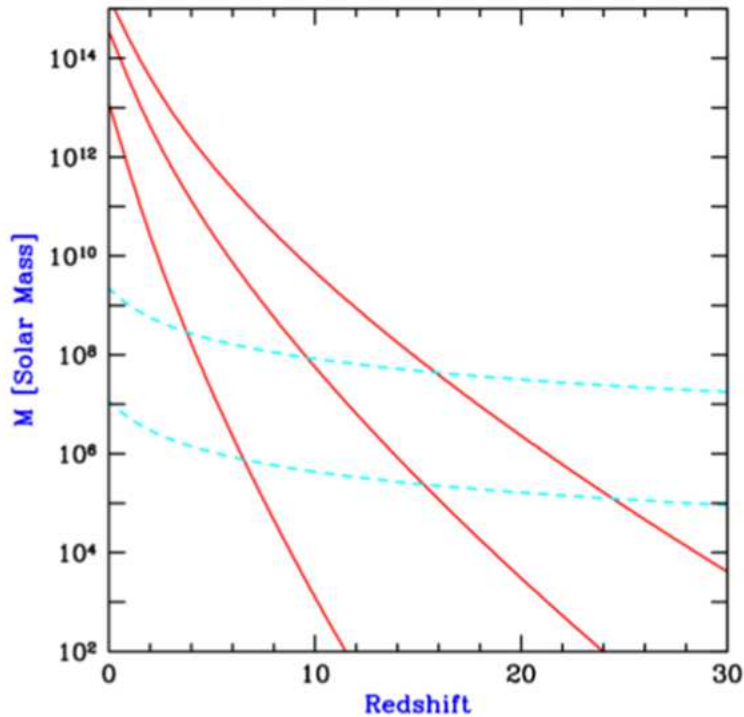


Ocvirk et al. 2001

$$T_{\text{vir}} = \frac{\mu m_p V_c^2}{2k_B} = 1.98 \times 10^4 \left( \frac{\mu}{0.6} \right) \left( \frac{M}{10^8 h^{-1} M_\odot} \right)^{2/3} \left[ \frac{\Omega_m}{\Omega_m^z} \frac{\Delta_c}{18\pi^2} \right]^{1/3} \left( \frac{1+z}{10} \right) \text{ K}$$

# Star forming haloes

N. Gillet PhD thesis



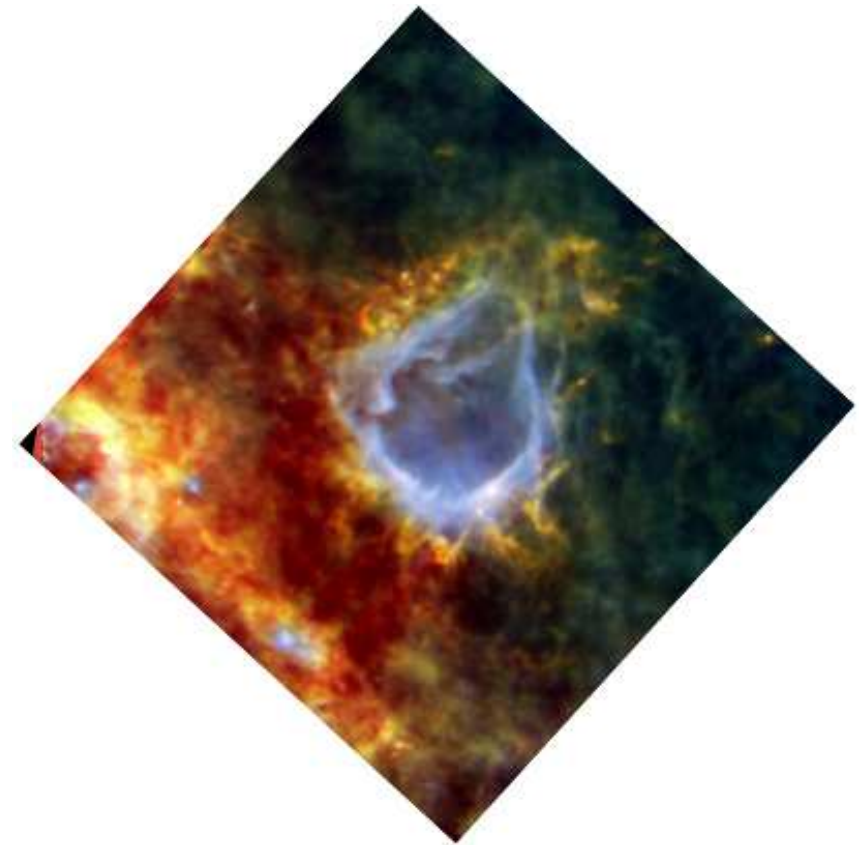
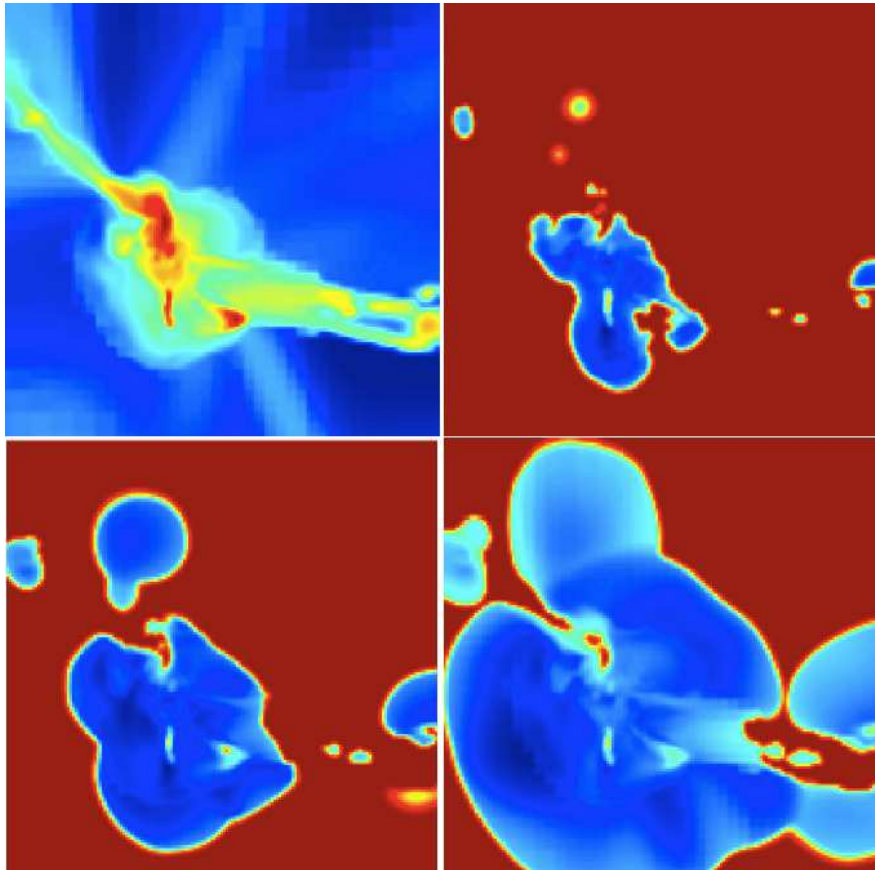
Backgrounds (-> heating and dissociation) suppress 1  
 First stars  $z \sim 60$  in  $10^5 M_{\odot}$  halos ? (Naoz+2007)

Lead to massive metal-free (Pop III) stars ~few 10s to  
 (e.g. Bromm & Larson 2004)

Increased metallicity leads to smaller pop II stars

# HII regions

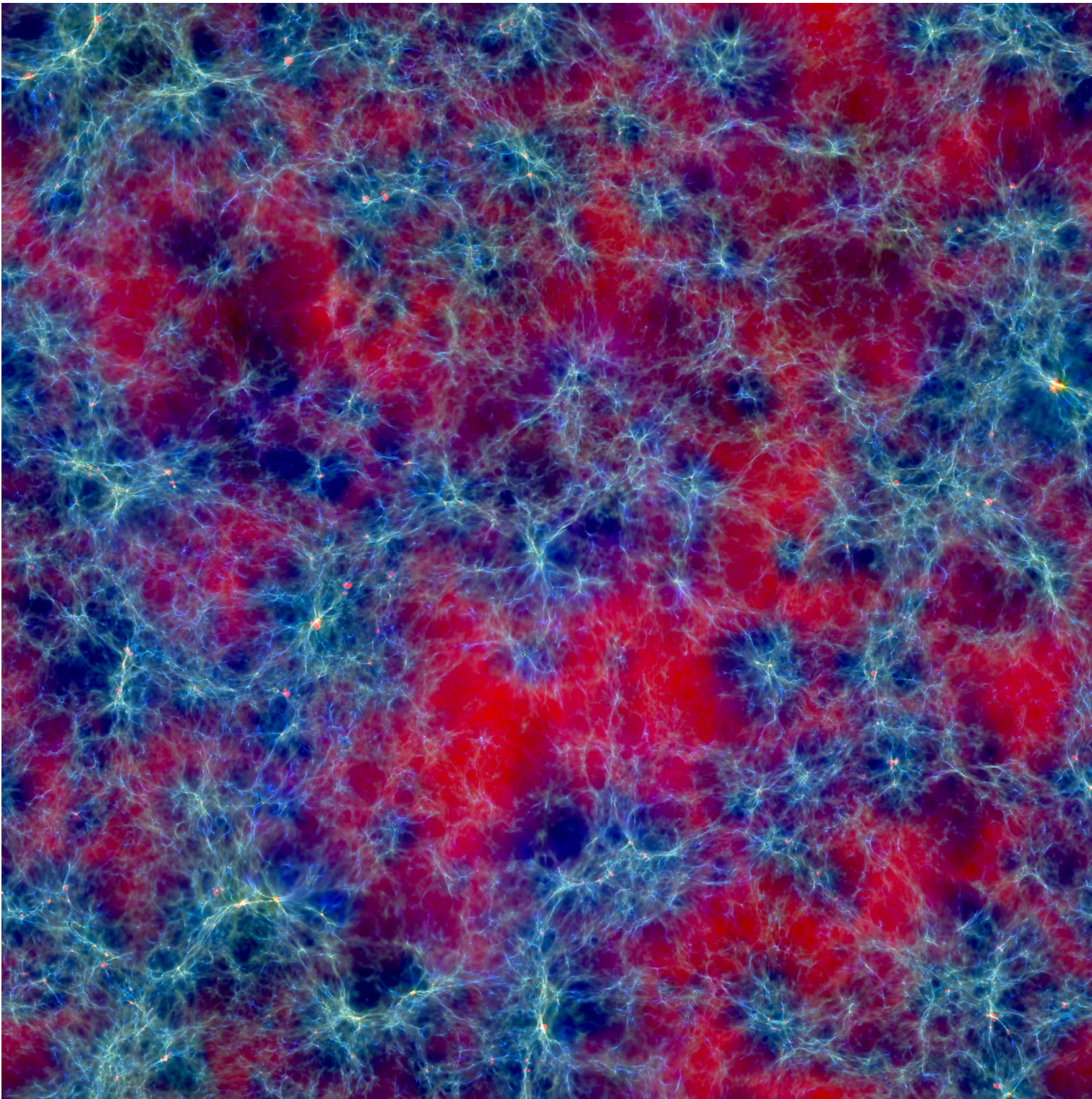
---



ESA, PACS & SPIRE Consortia, A. Zavagno

L'apparition de sources (étoiles) au s





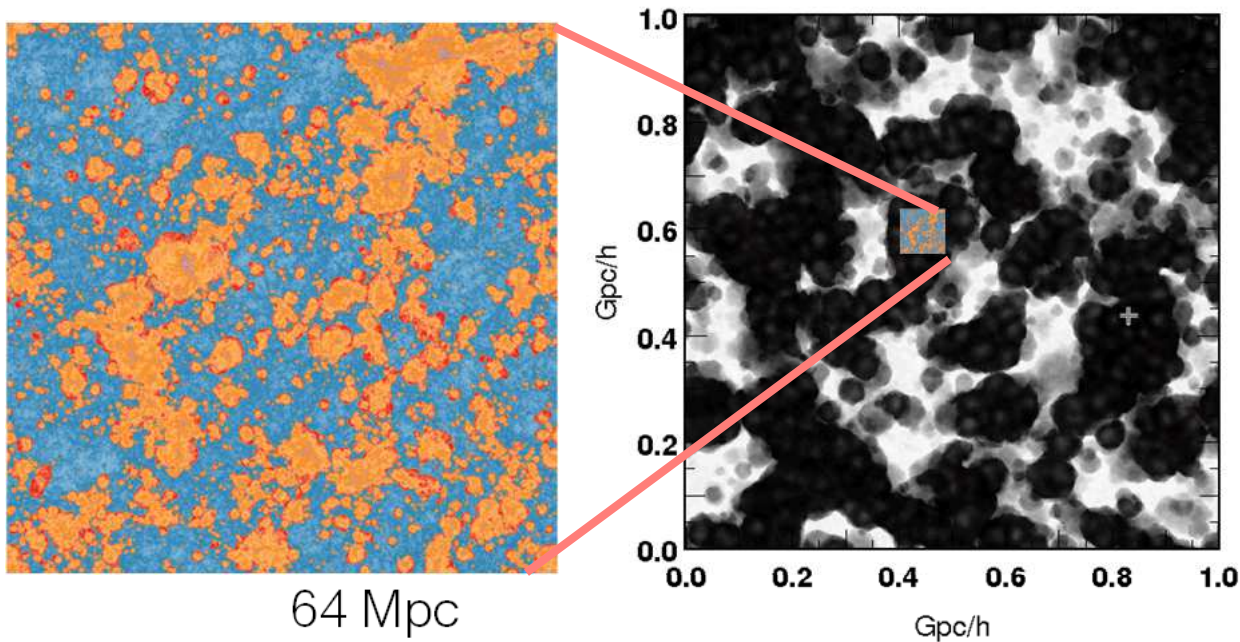
CODA-I AMR  
91 Mpc/2048<sup>3</sup>  
16 billions  
resolution elements  
@ z=6

32768 cores +  
4096 GPUs on  
Titan(DOE/ORNL)  
using EMMA  
20+ millions  
cpu hours  
Jan-Mar 2017

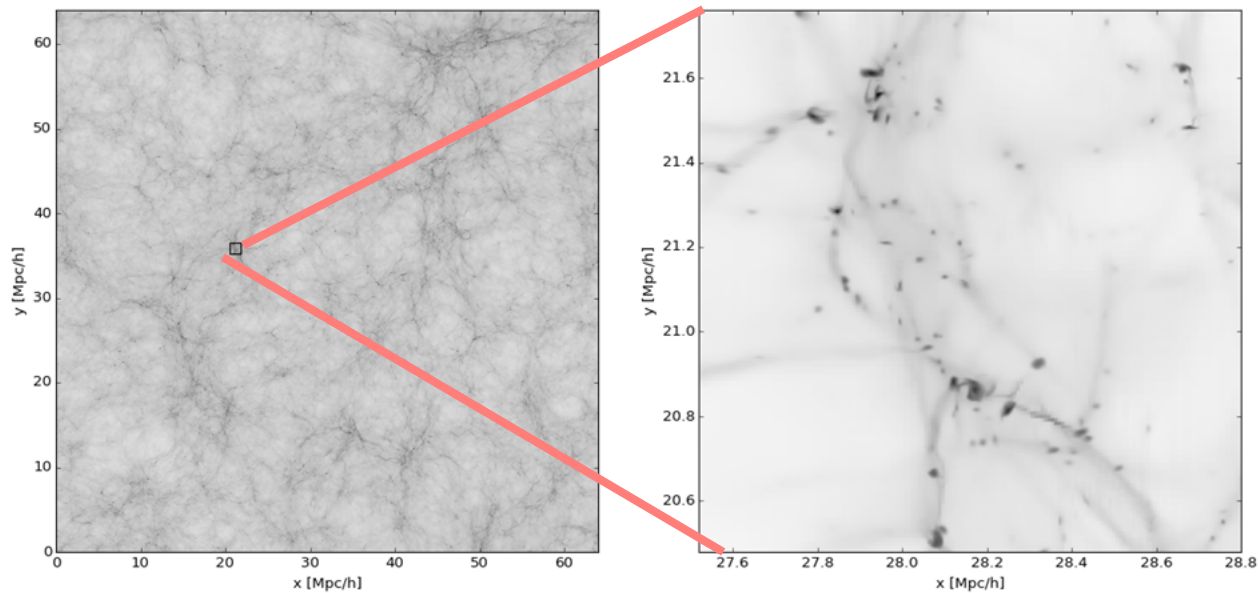
INCITE -  
CODA collaboration:  
Ocvirk, Deparis  
(Strasbourg)  
Gillet (Pisa)  
Gottlober + CLUES  
(Potsdam)  
Shapiro (Austin)  
Iliev (Bristol)  
Teyssier(Zurich)



# Scales

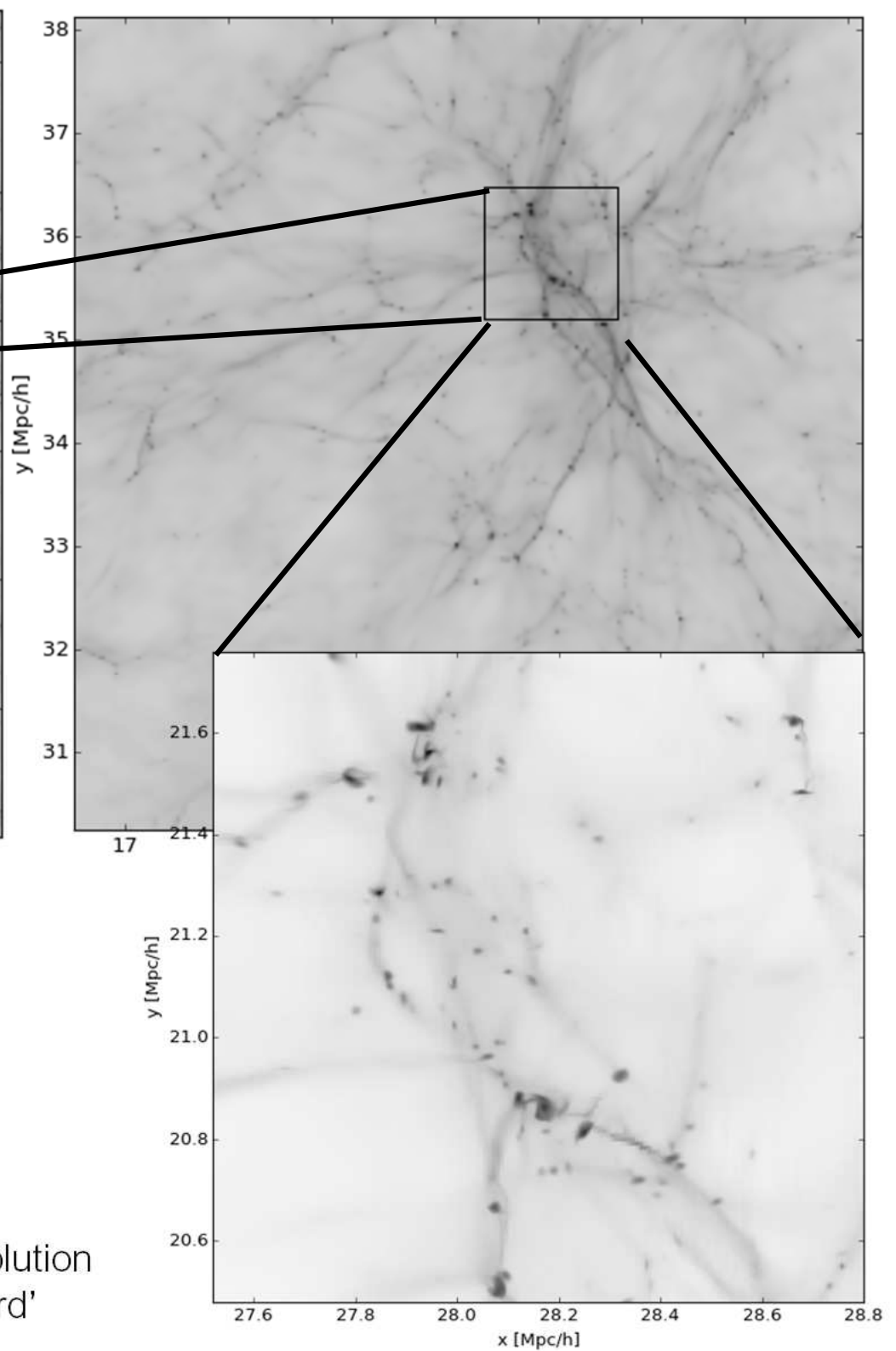
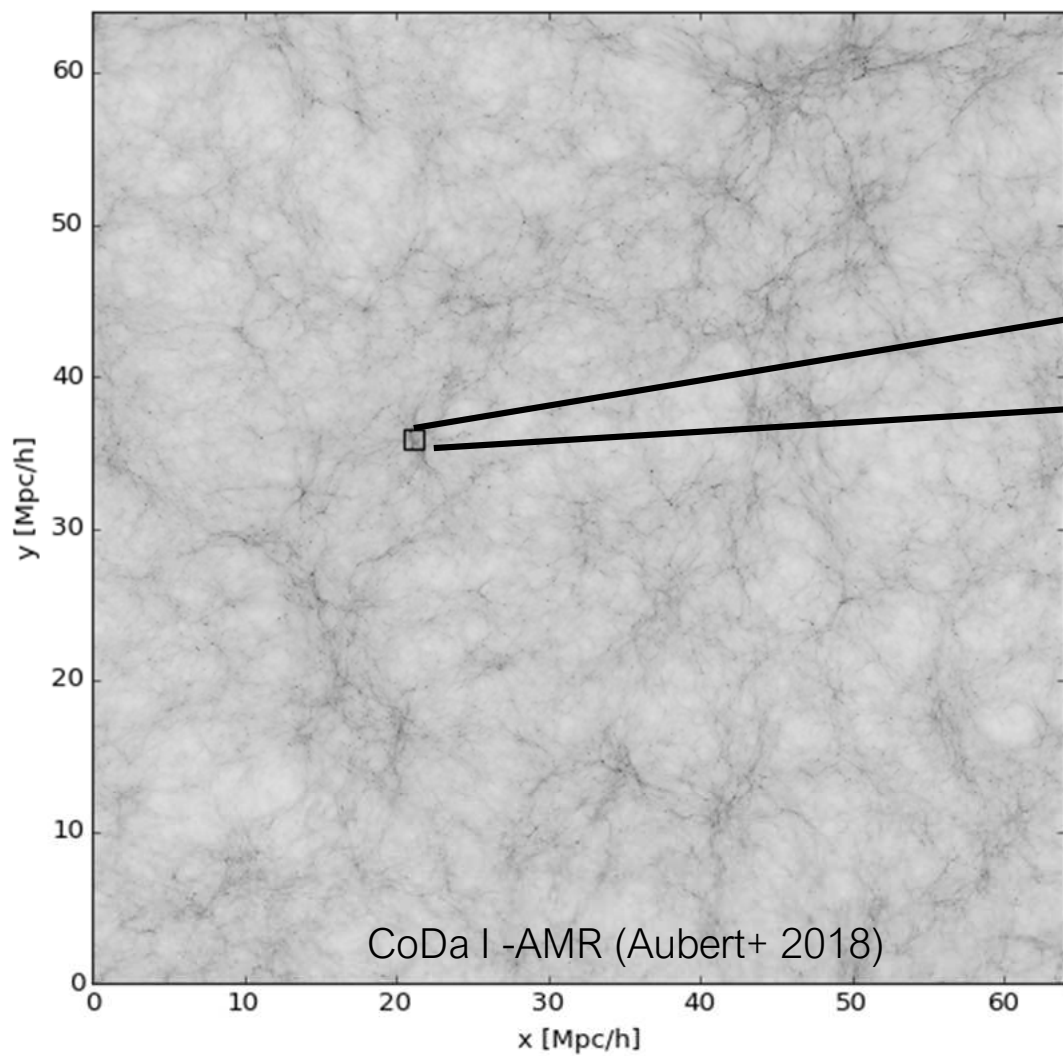


HI regions can be as large as 10s or 100s of Mpc



Meanwhile Sources  $\sim 0.01$  Mpc scales

Subscale clumping  
escape fraction ?



Modèles bâtis sur des simulations cosmologiques

2 défis importants:

- une grande dynamique d'échelles
- un traitement du transfert radiatif extrêmement coûteux.

1-2 ordres de grandeurs perdus en taille ou en résolution par rapport aux simulations cosmologiques 'standard'



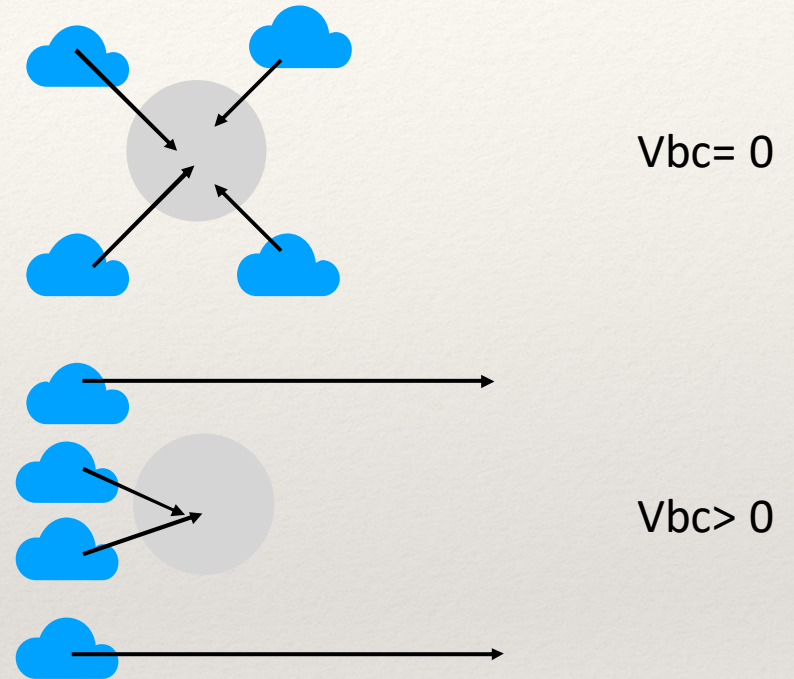
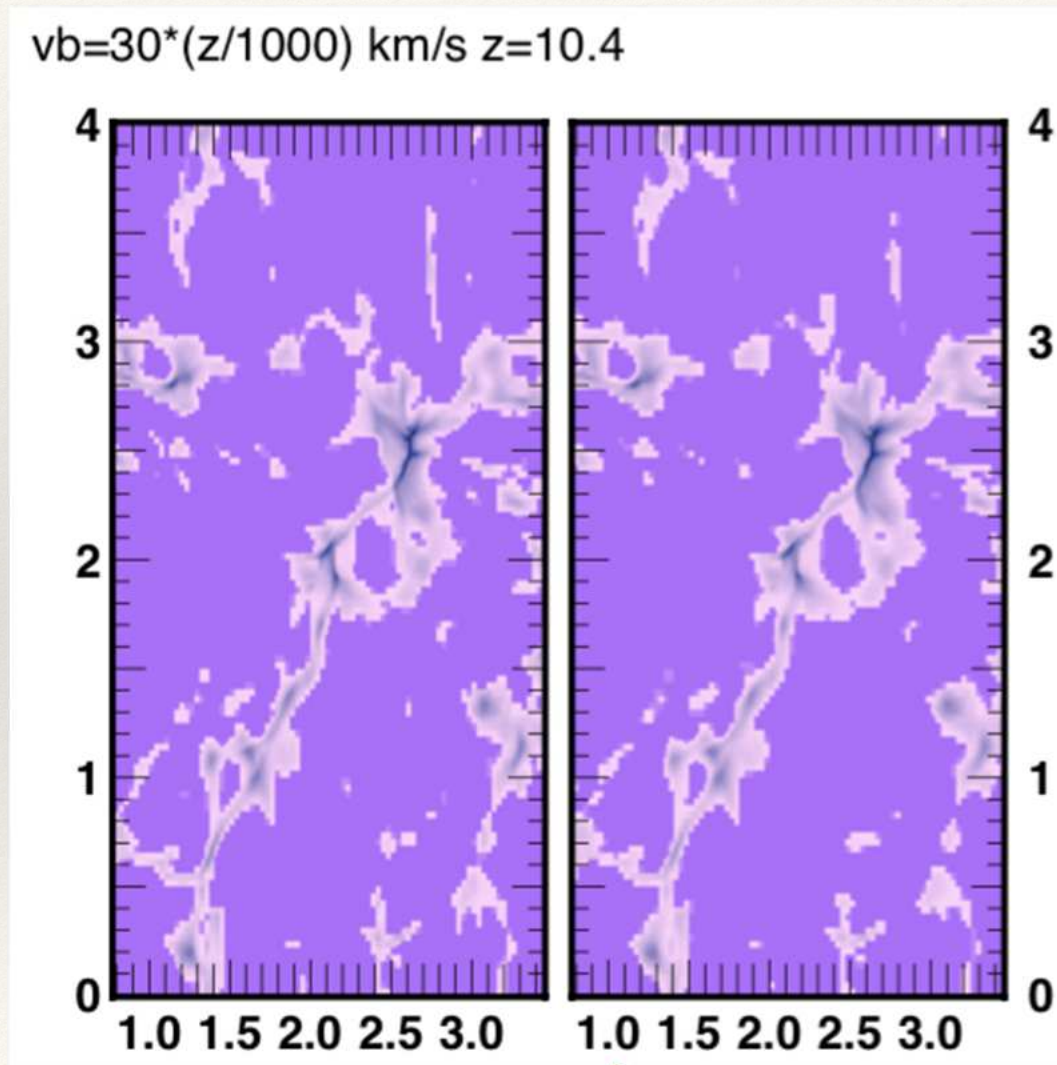


Depuis 2009, j'ai développé des codes de reposant sur des **cartes graphiques (GP**  
- collab Observatoire + Méso-Centre de C

GPUs= machines parallèles « de poche »  
traitement efficace de grands nombres tâc  
accélération entre x10 et x100 par rapport

# Effet Tseliakovich-Hirata

Tseliakovich & Hirata



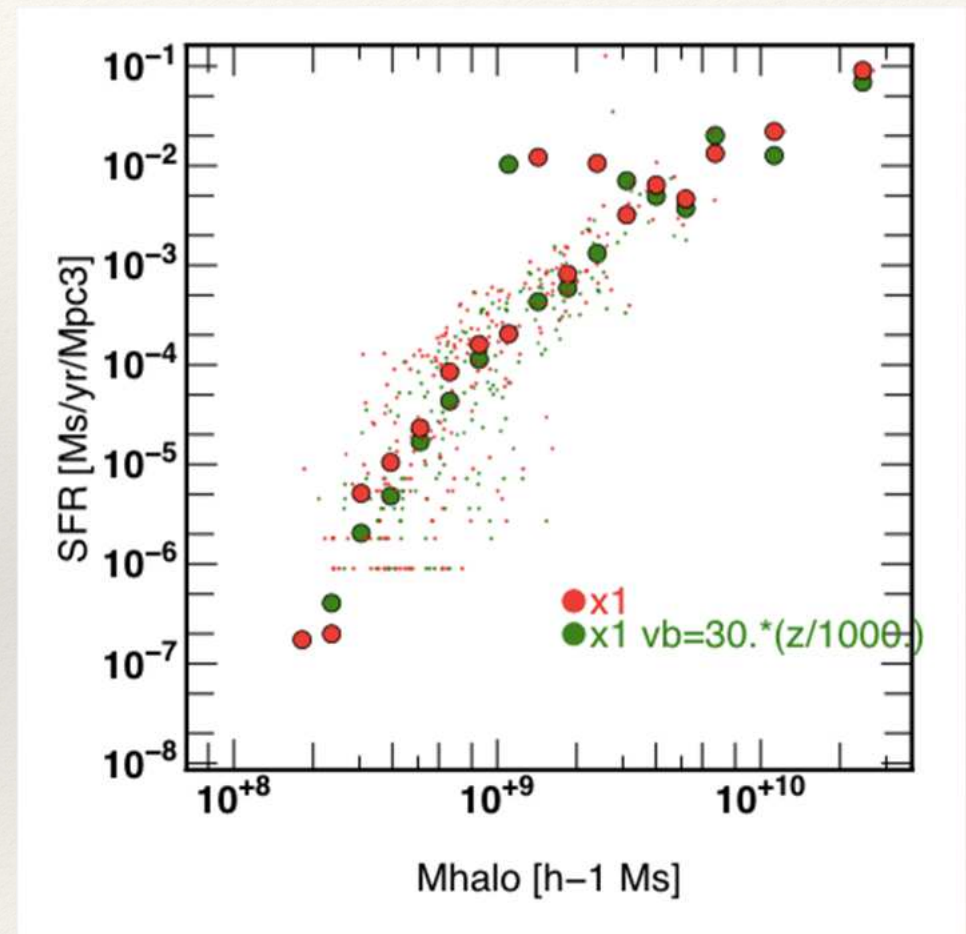
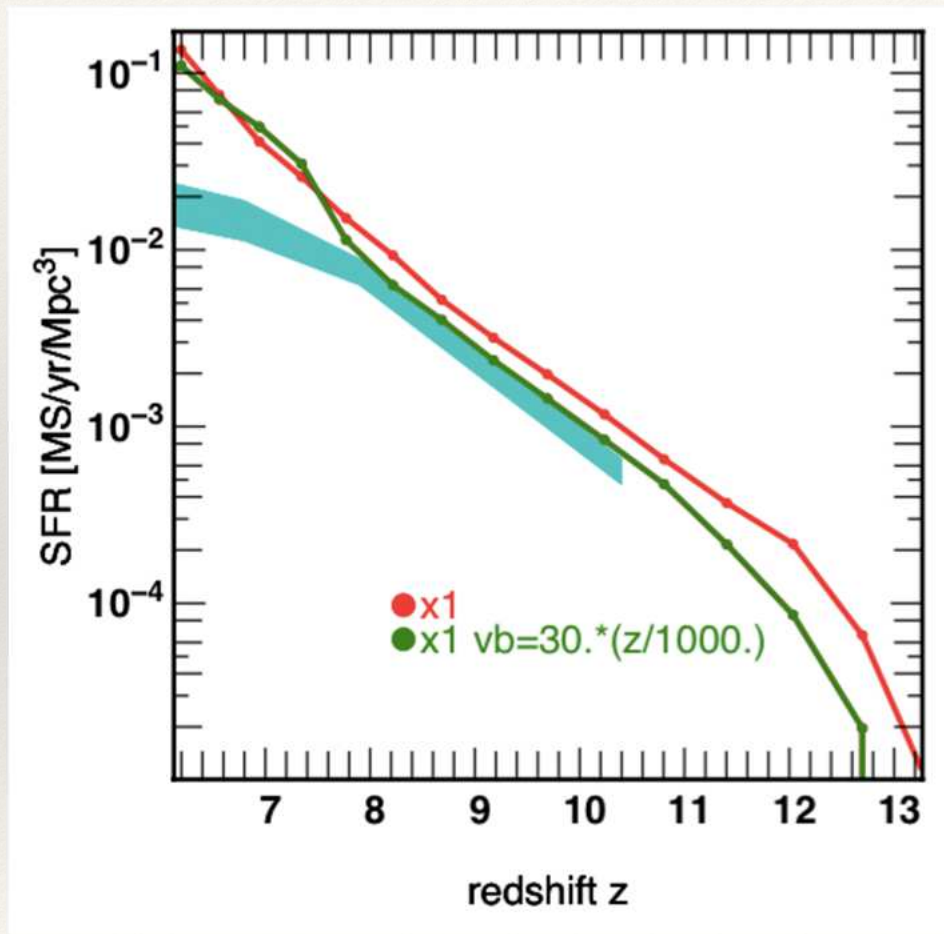
Vitesse Baryons différente de DM  
à la recombinaison

$\Delta V \sim \text{qq km/s}$  à  $z=100$  cohérent sur  
qqes Mpc



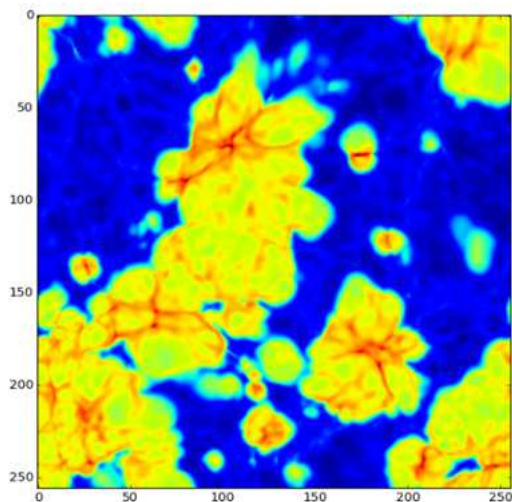


# Effet Tseliakovich-Hirata

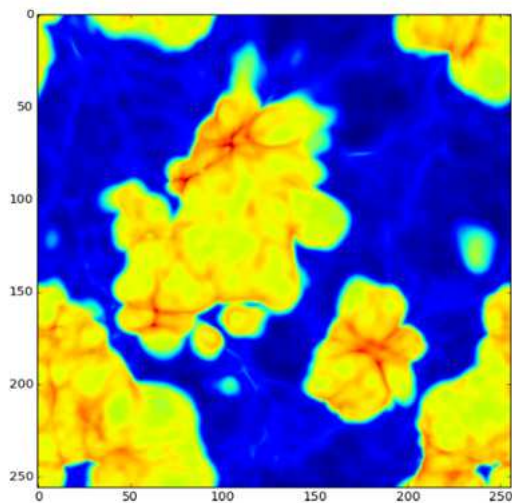




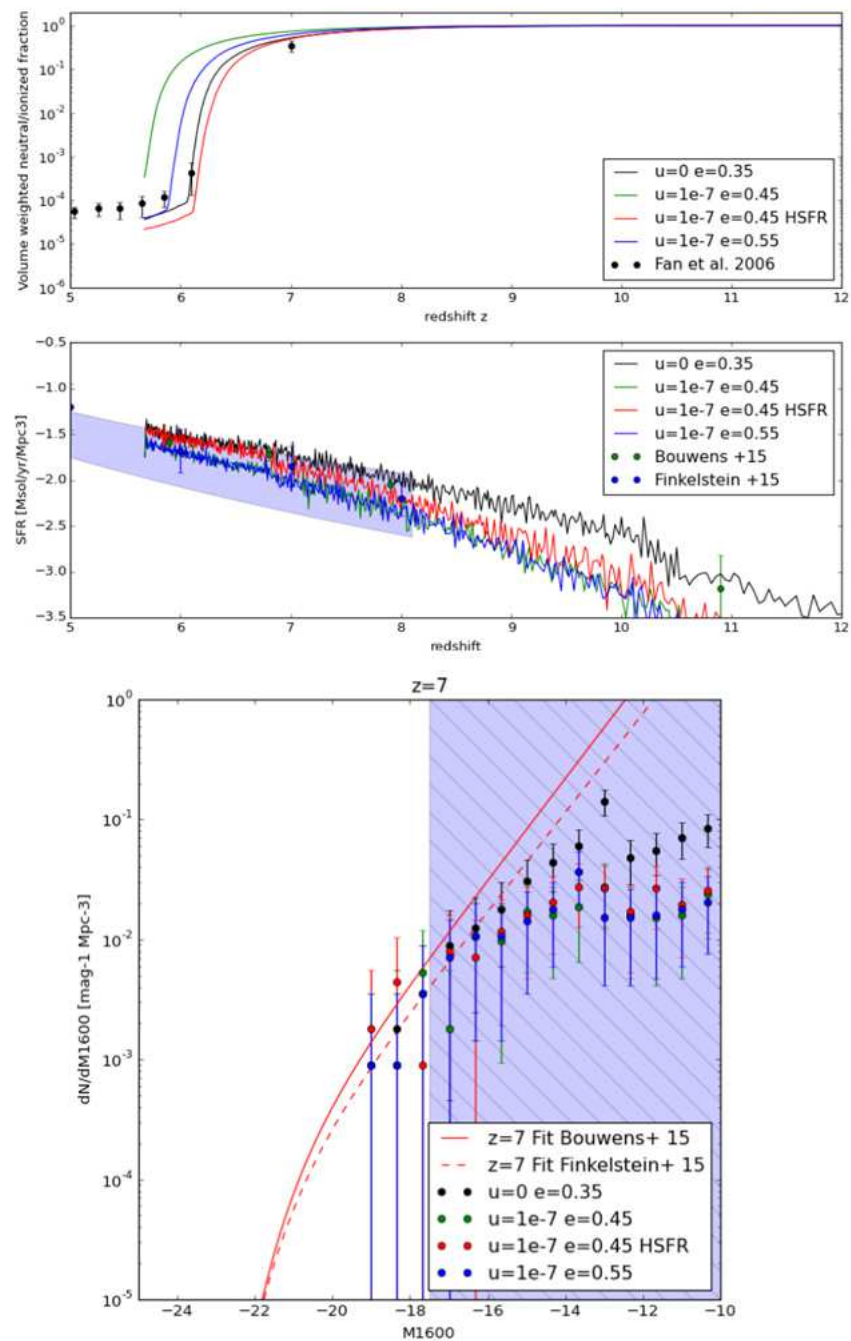
# Interacting Dark-Matter



**Fig. 4.** Ionized density field at  $z=7$  in SDM simulation. Blue is neutral, red is ionized.



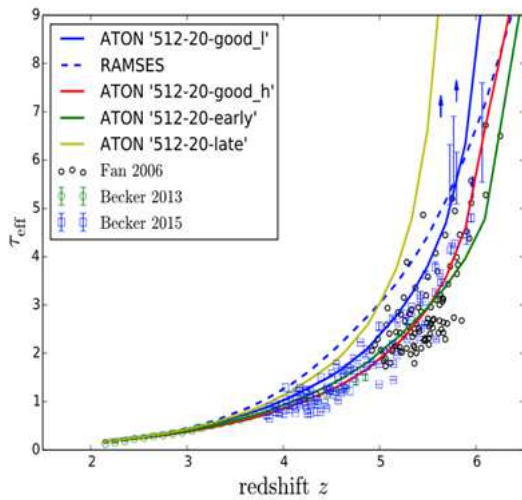
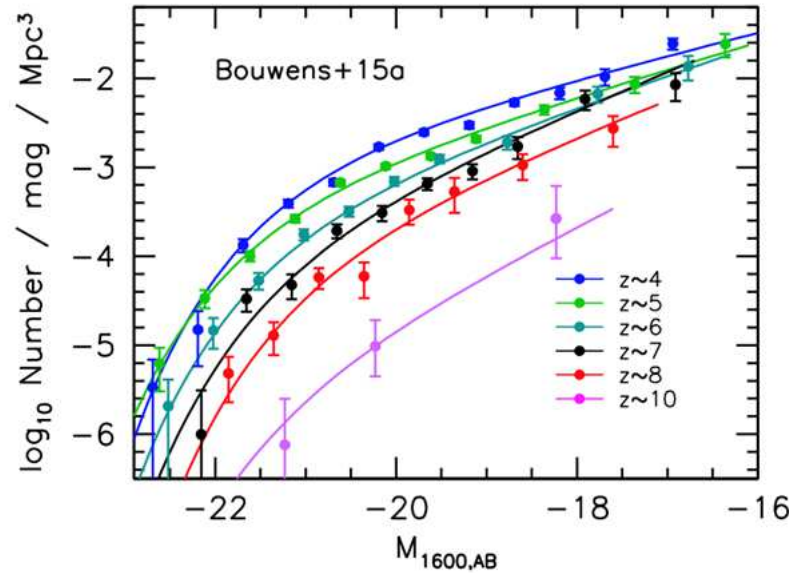
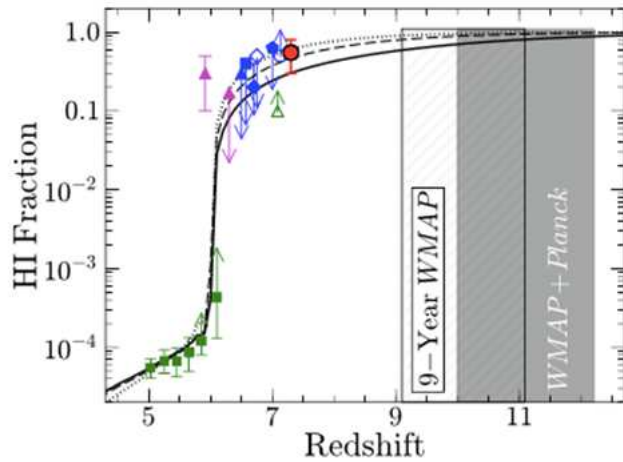
**Fig. 5.** Ionized density field at  $z=7$  in IDM simulation. Blue is neutral, red is ionized.



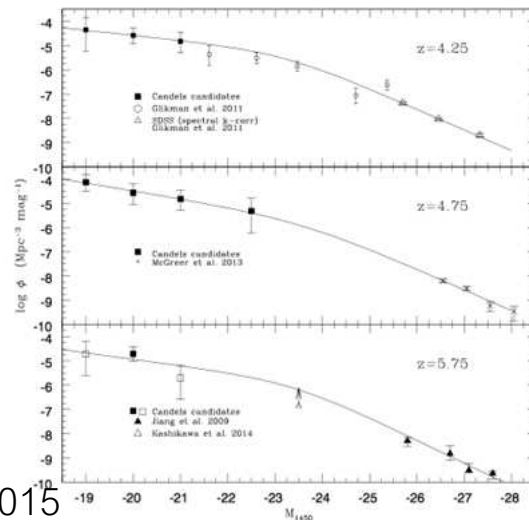
**Fig. 2.** Luminosity functions measured at  $z=7$  in the 4 simulations and compared to Bouwens and Finkelstein fits to data. The shaded area corresponds to magnitudes NOT probed by observations.

Les premières structures - milieu intergalactique

# The EoR : a key epoch to understand the buildup of large scale structures



IGM Becker et al. 2015



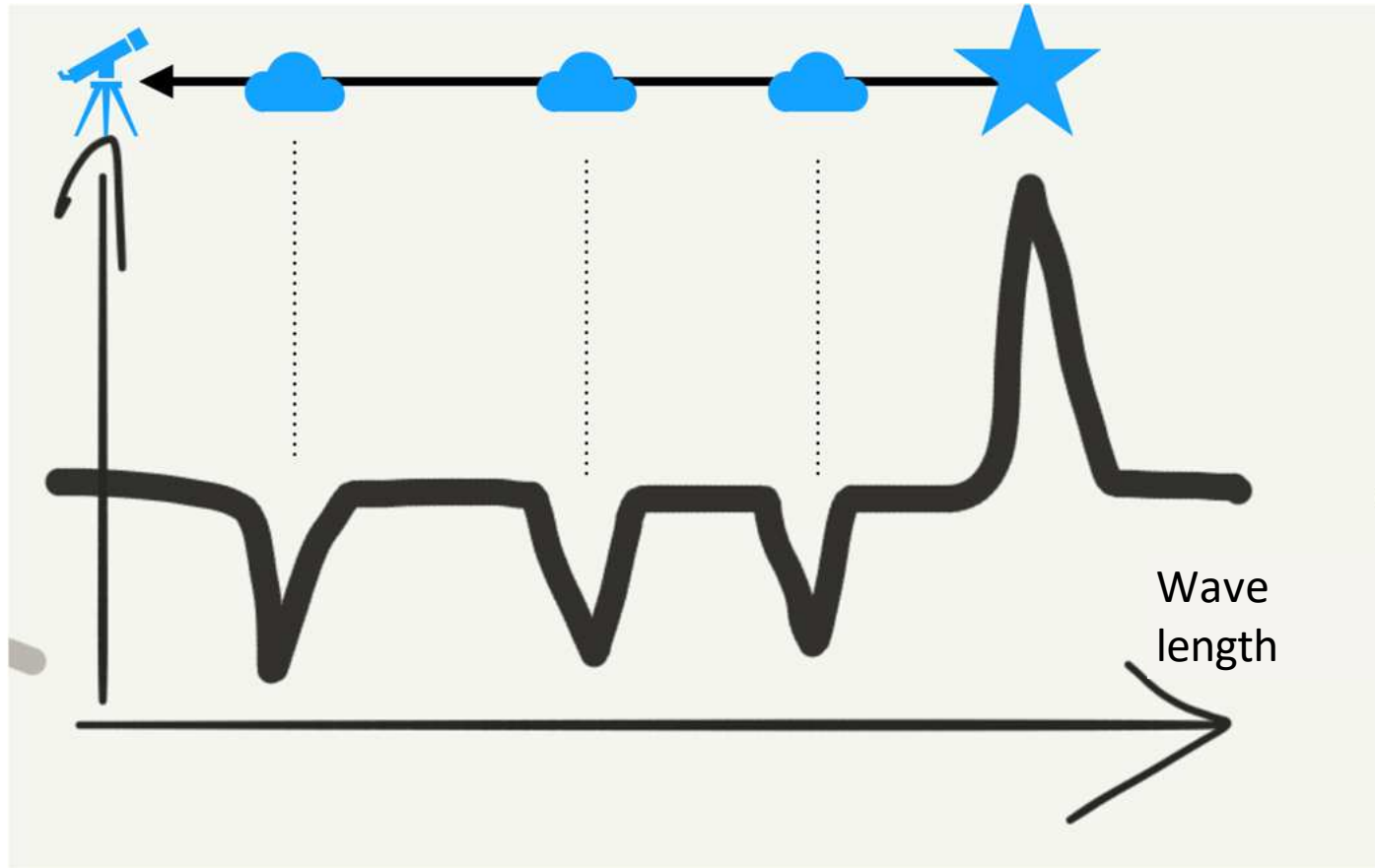
AGNs LFs Giallongo et al. 2015

Multiple objects : galaxies, AGNs, IGMs, CMB  
Spatial and timing constraints

- Initial stages, (low degeneracies from integrated evolution)
- Multiple observational probes

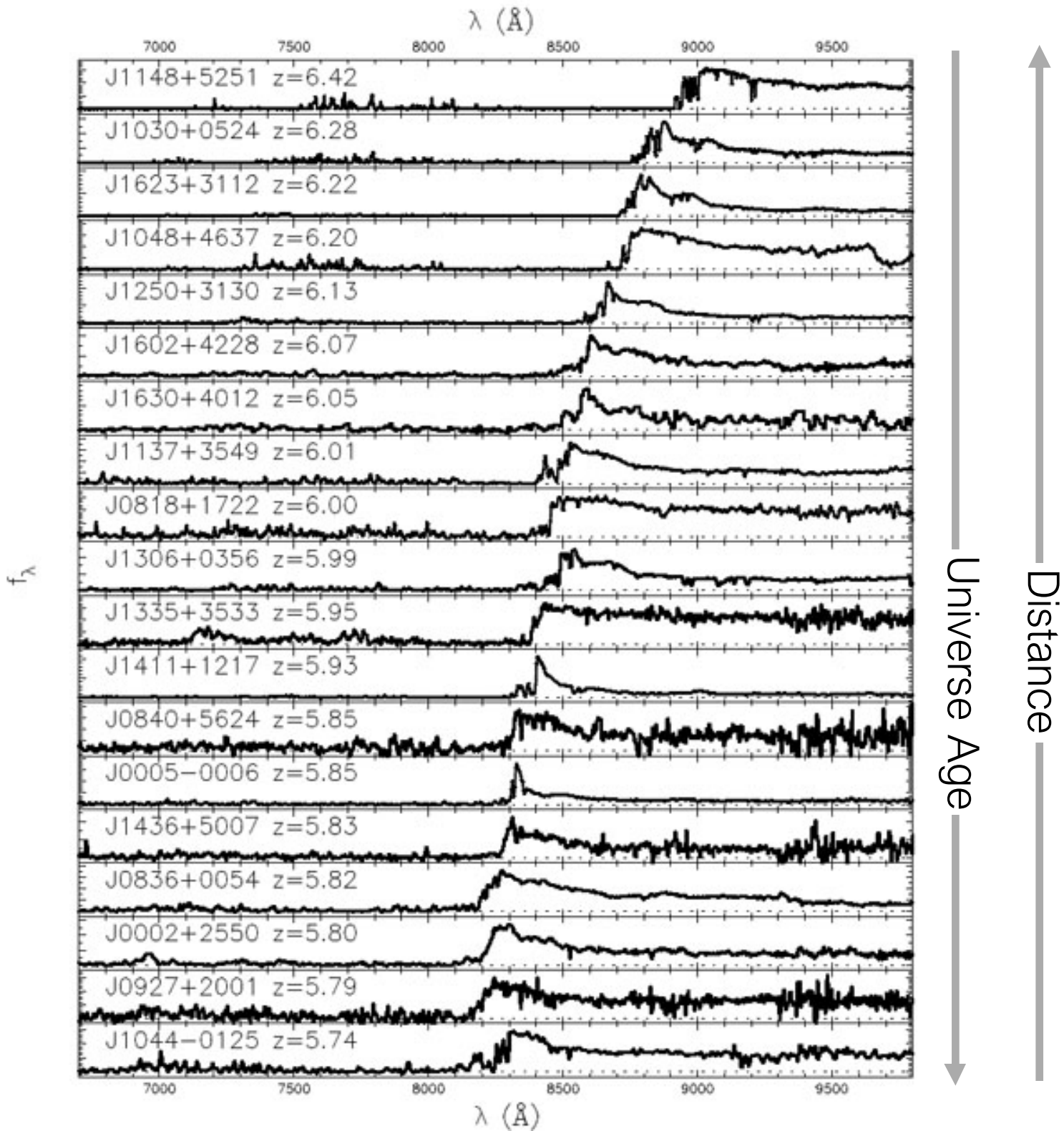


# Lyman-Alpha Forest



Absorbers along the line of sight appear as features at shorter wavelengths

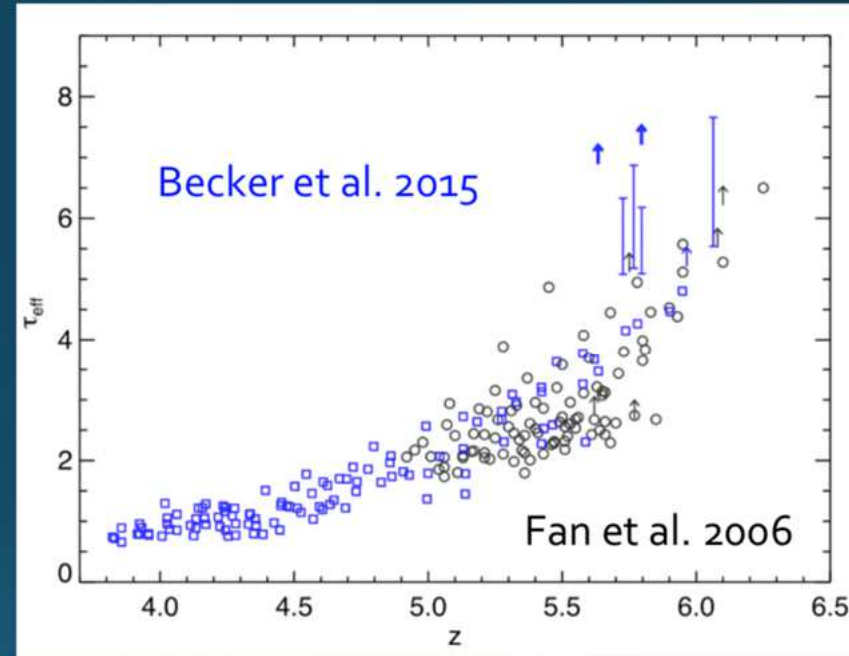
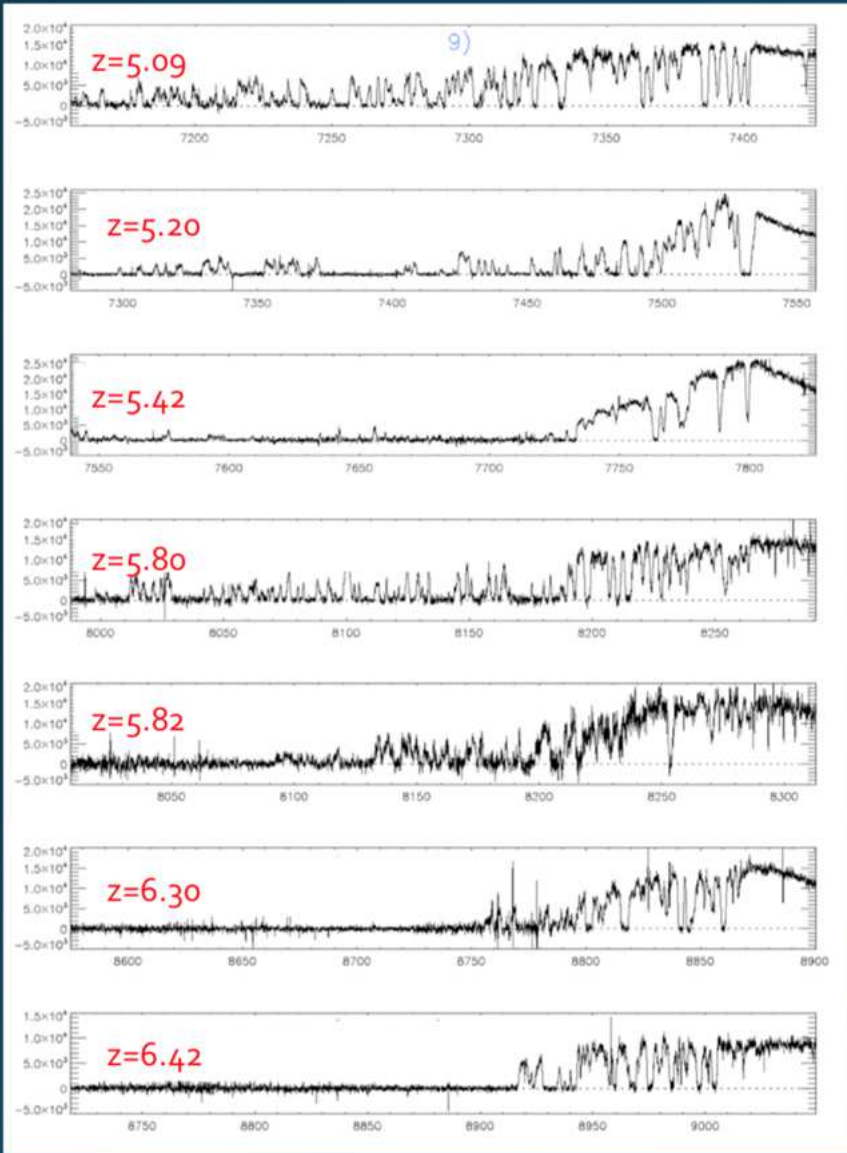
For the distant Universe ( $z > 3$ ) quasars can be used a  
For ( $z > 5$ ) the reionization can be probed



The further the quasar, the stronger the absorption

At high  $z$ , large patches of neutral gas can be encountered

Gunn-Peterson Throughs



21 June 2018

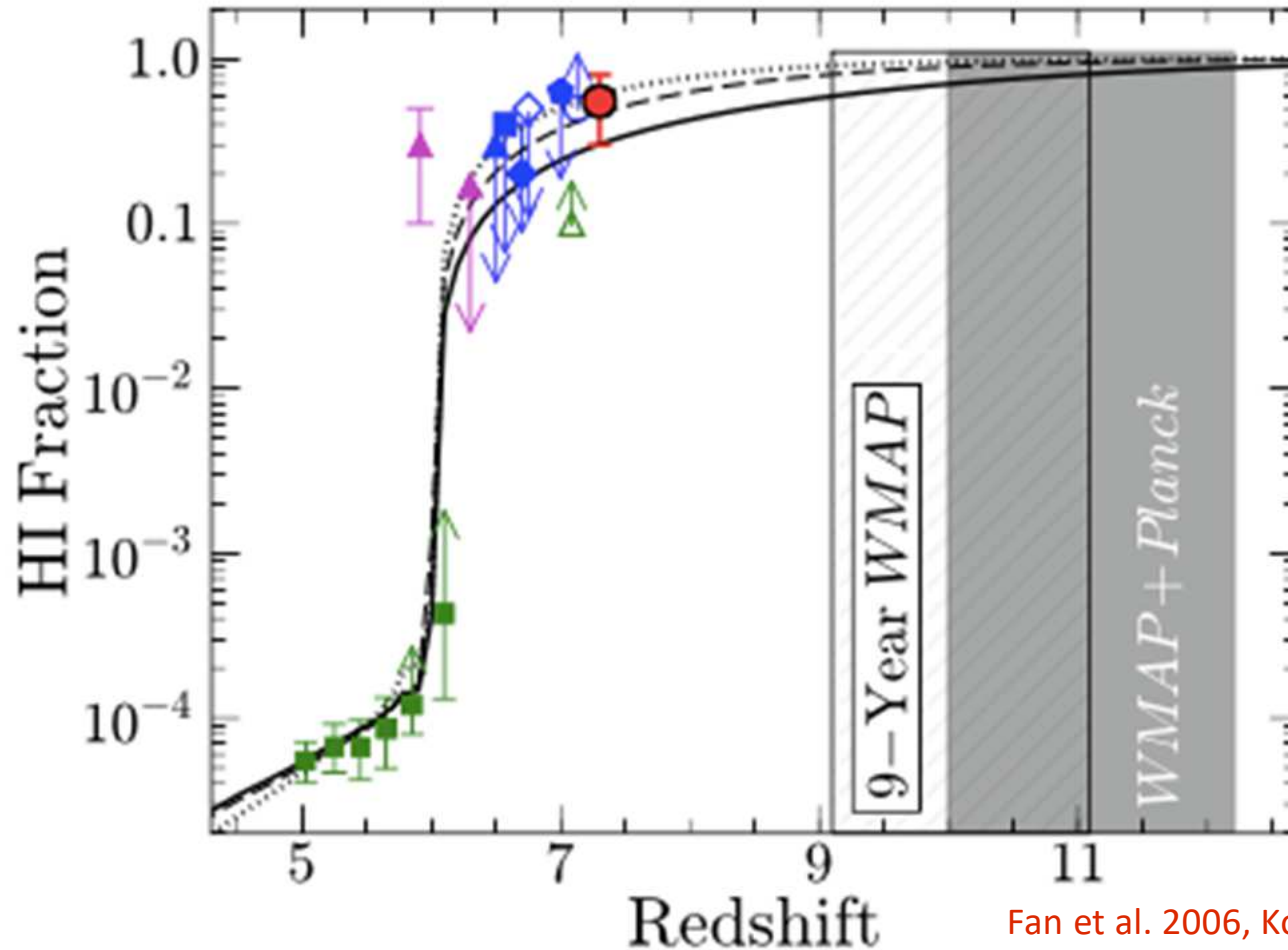
Shine and Rise, Strasbourg



From Haenhelt presentat



# Reionization History

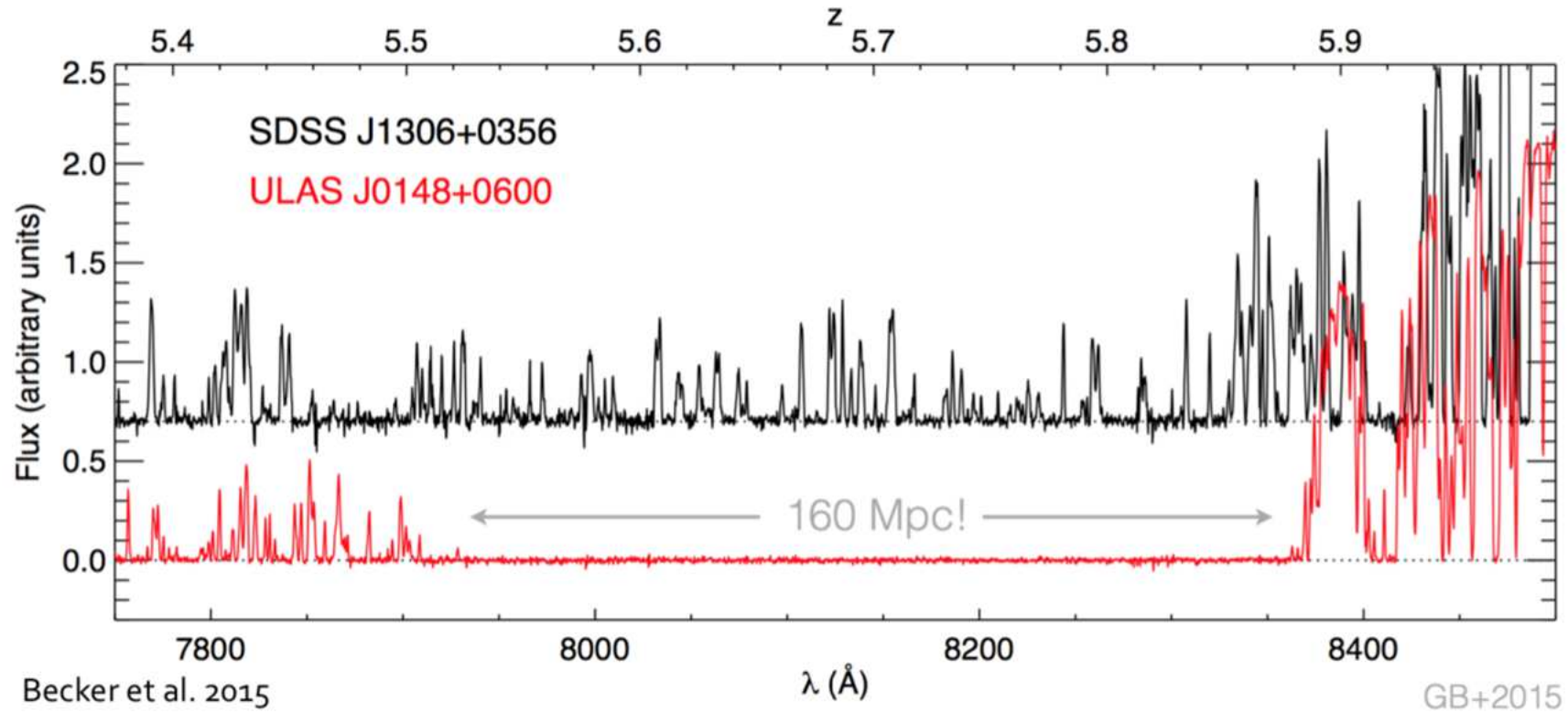


Fan et al. 2006, Konno et al. 2014

$$x_{\text{HII}} = \frac{n_{\text{HII}}}{n_{\text{HI}} + n_{\text{HII}}} = 1 - x_{\text{HI}}$$

Absorption features in quasar spectra predict a fully reionized Universe by  $z \sim 6$ ,  $t \sim 1$  Gyrs after the Big-Bang

# Large variations of transmissions at $z \sim 5.5$

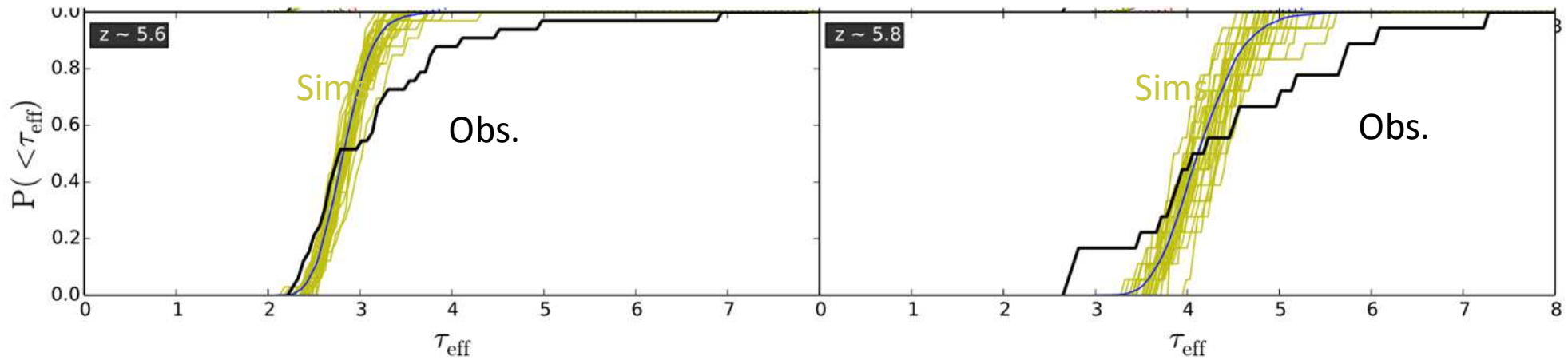


Large patches of neutral gas are still present after the

From Haehnelt presentati

# A challenge for models

Chardin et al. 2015

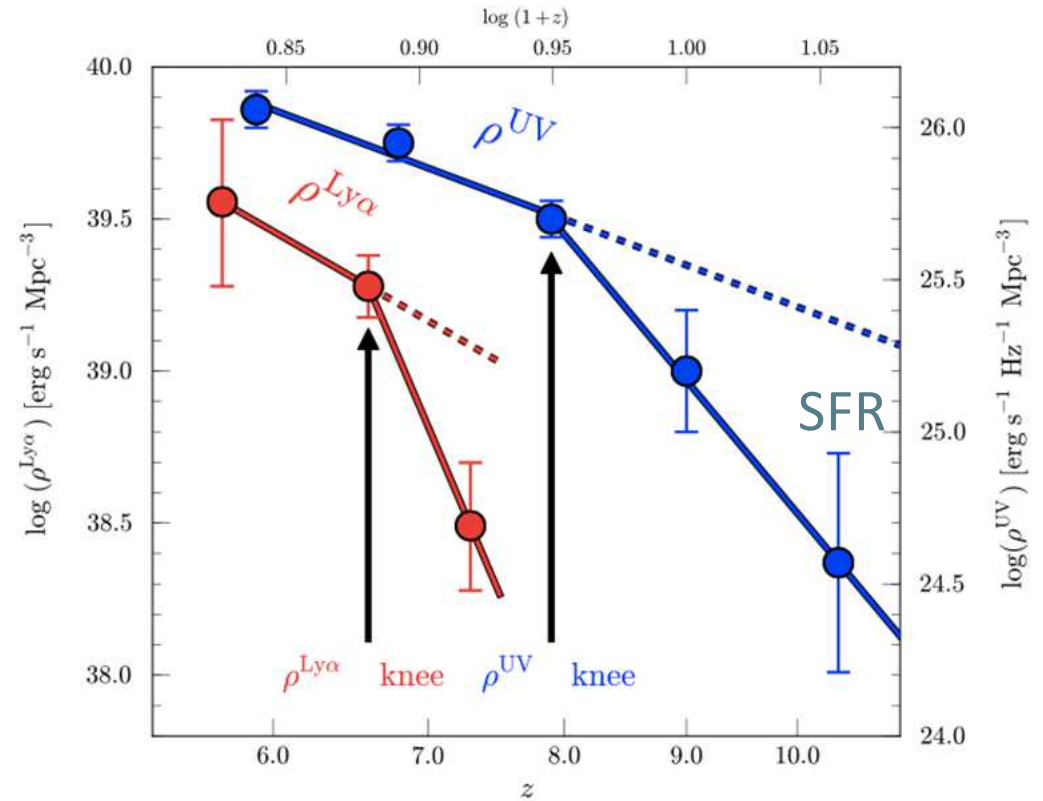
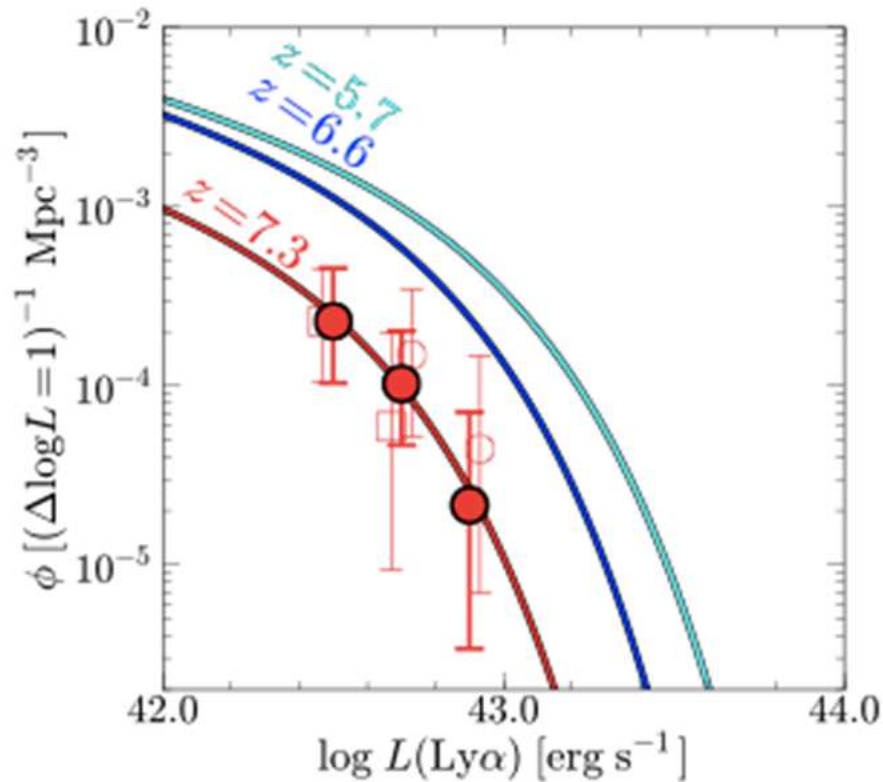


For the moment,  
simulations are not able to reproduce the large scatter  
in IGM opacities

Should we consider sources others than star-forming  
Such as e.g. rare and bright AGNs ?



# LyA Luminosity of galaxies



Konno et al. 2014

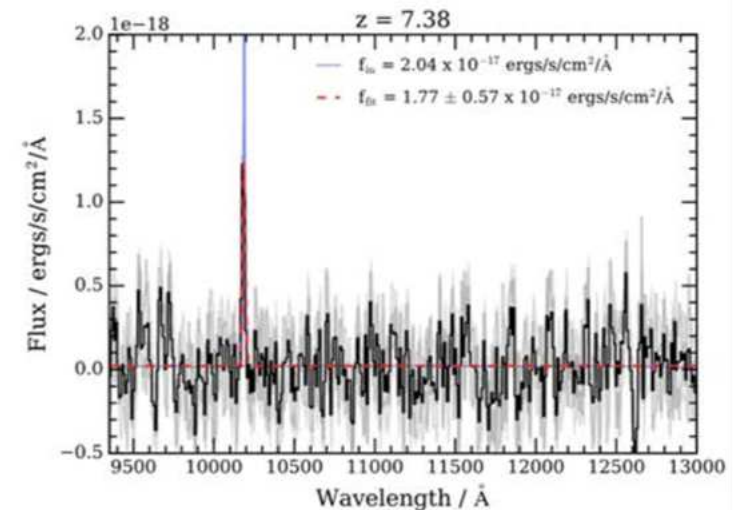
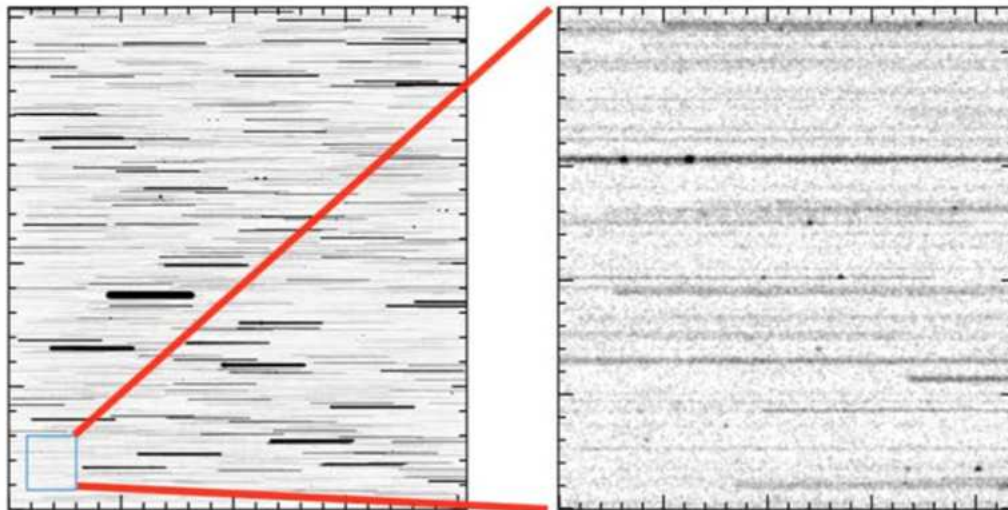
Rapid evolution of the LyA emission of distant galaxies  
 Evolution faster than SFR evolution ?  
 -> evolution of the neutral state of the surrounding

# Euclid Deep Survey: estimating Ly $\alpha$ emitters number counts

Blue grism 0.92-1.3 micron, corresponds to :  $6.5 < z(\text{Ly}\alpha) < 9.7$

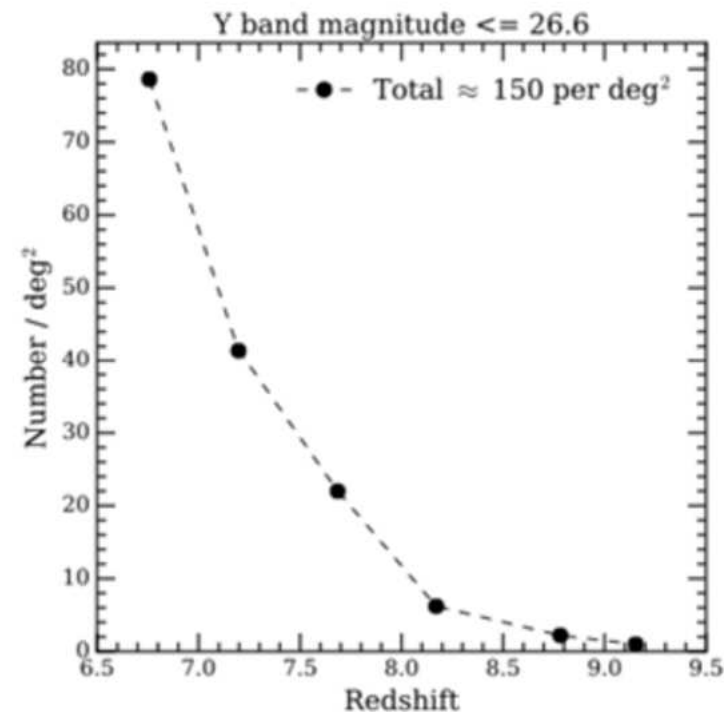
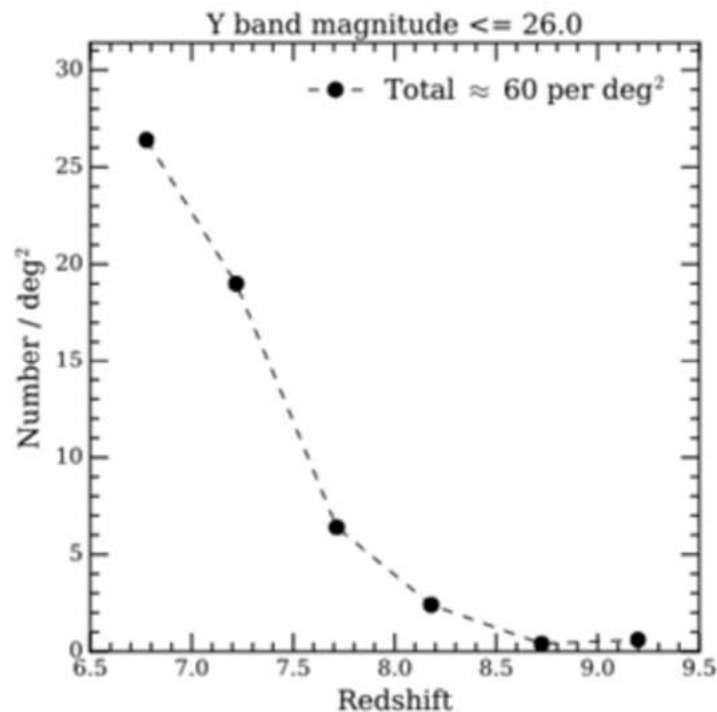
## Method:

- run a deep survey simulation using empirical galaxy catalog generator (EGG, Schreiber et al 2016) + aXeSIM
- Extrapolate EGG to  $z > 6$  + Ly $\alpha$  emitters, consistent with Matthee et al 2015,  $f_{\text{esc}} = \text{constant} = 30\%$
- Simulated a full 10h exposure with Euclid grisms over 0.5 deg<sup>2</sup>



Slide 14

# Predicted number of LAEs in the deep fields with Y band detection



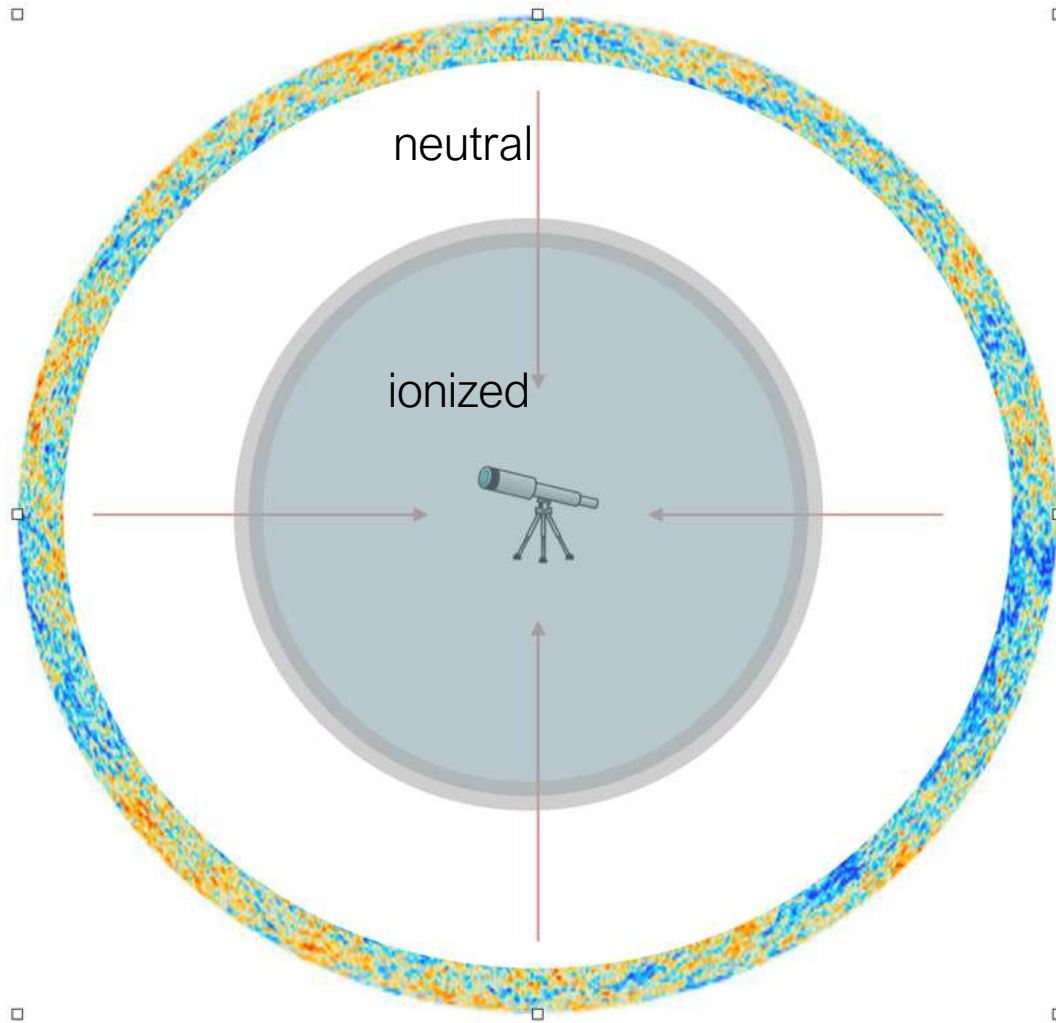
Note we assume that we can retrieve spectra only if there is a detection in the photometry bands.

Bagley et al (2017) estimate 70 per deg<sup>2</sup>

→ **Caveat:** Marchetti, Serjeant & Vaccari MNRAS(2017) find 0.85-1.82 deg<sup>-2</sup>, this number includes lensed Ly $\alpha$  emitters.



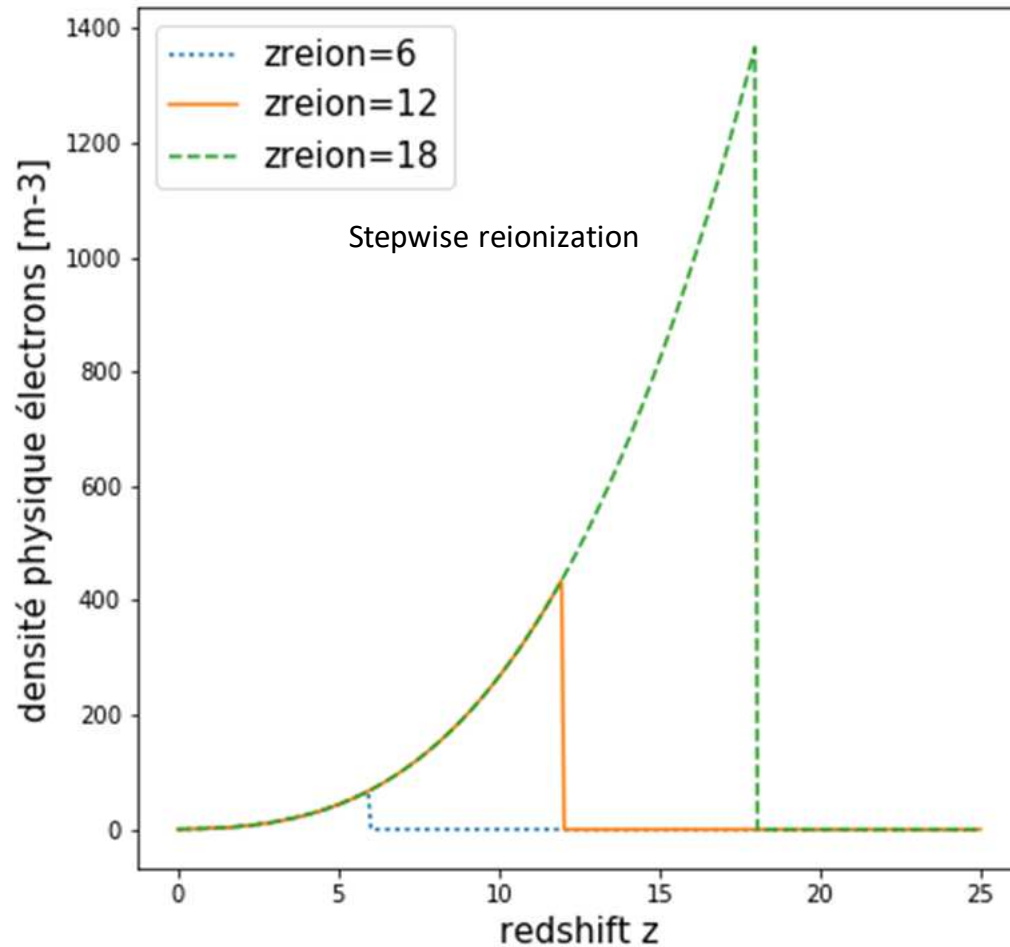
# Reionization and CMB



$$\tau = c\sigma_T \int_{z=0}^{z_{\text{rec}}} n_e(t) dt$$

History of free electrons production  
~ History of reionization  
~ History of the first structures

# History of electron production



$$\tau = c\sigma_T \int_{z=0}^{z_{\text{rec}}} n_e(t) dt$$

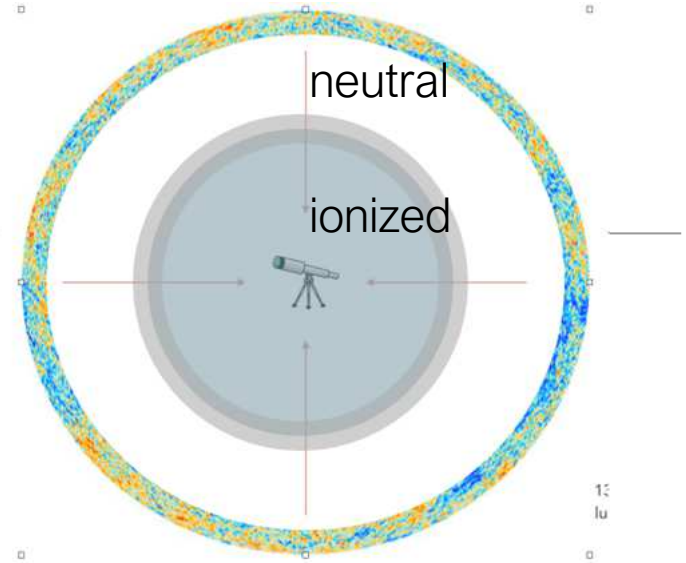
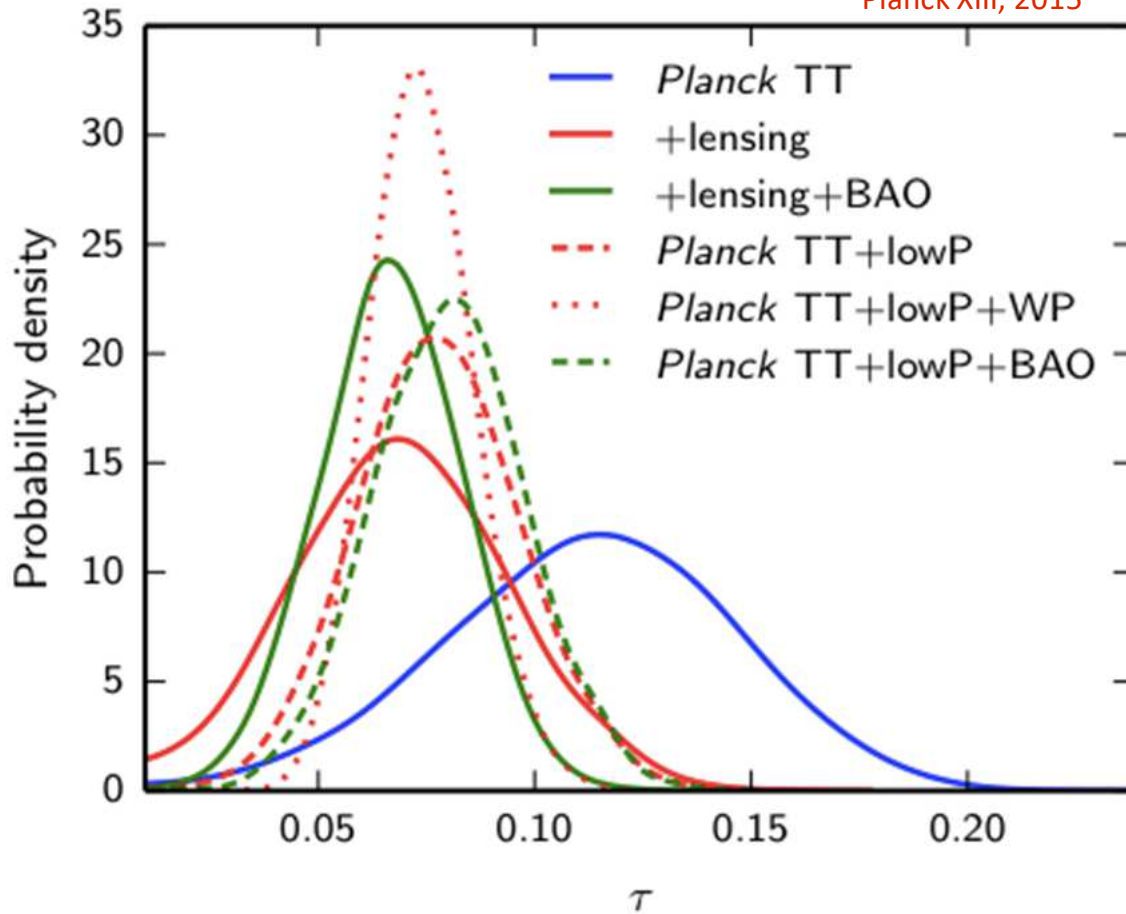
<sup>14</sup>For reference, the ionization fraction  $x_e = n_e/n_H$  in the tanh model is assumed to have the redshift dependence:

$$x_e = \frac{1 + n_{\text{He}}/n_H}{2} \left[ 1 + \tanh\left(\frac{y(z_{\text{re}}) - y(z)}{\Delta y}\right) \right],$$

where  $y(z) = (1+z)^{3/2}$ ,  $\Delta y = \frac{3}{2}(1+z_{\text{re}})^{1/2}\Delta z$ , with  $\Delta z = 0.5$ . Helium is assumed to be singly ionized with hydrogen at  $z \gg 3$ , but at lower redshifts we add the very small contribution from the second reionization of helium with a similar tanh transition at  $z = 3.5$ .

# CMB & Reionization

Planck XIII, 2015

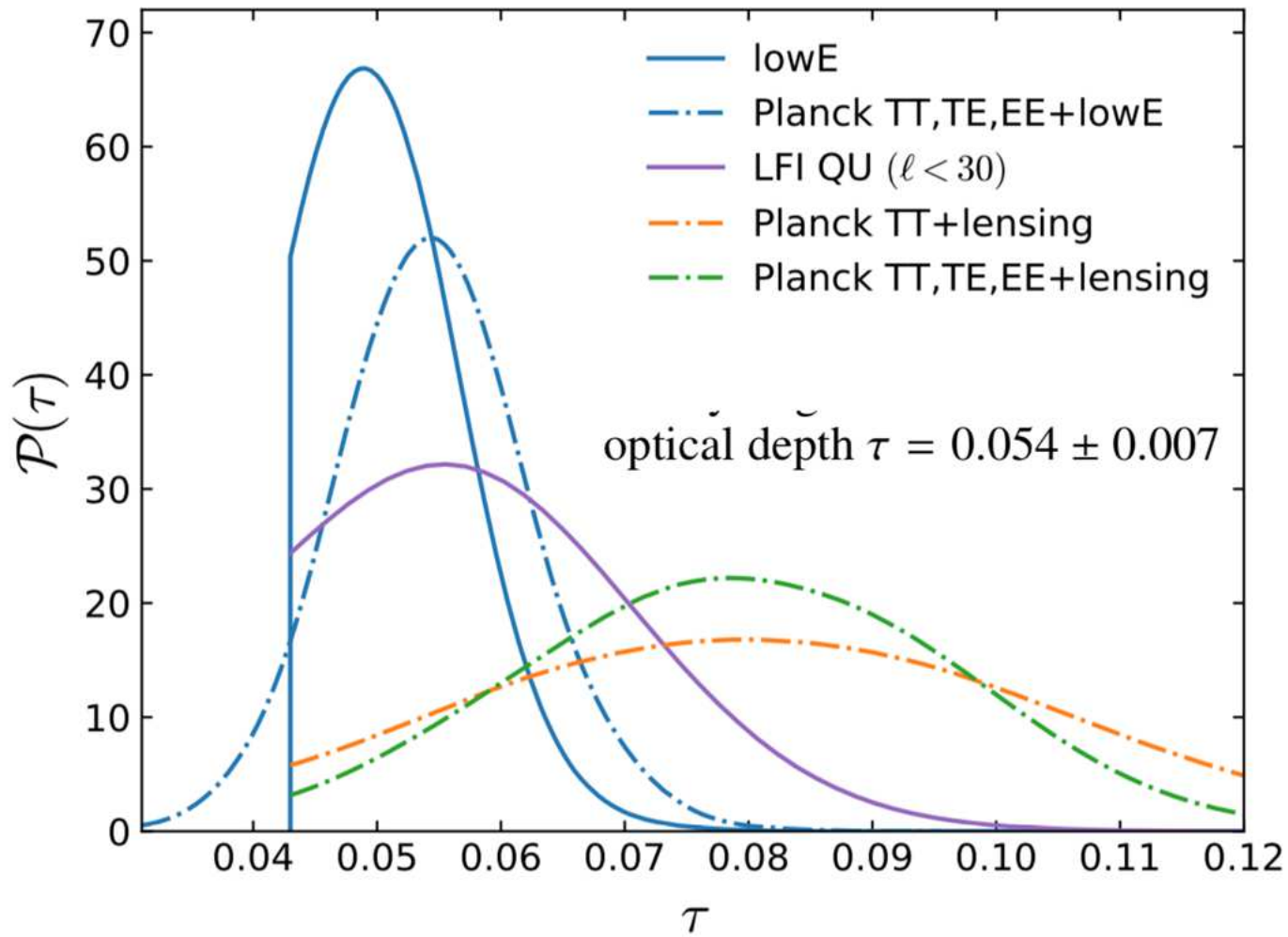


$$\tau = c\sigma_T \int_{z=0}^{z_{\text{rec}}} n_e(t) dt$$

History of free electrons production  
 ~ History of reionization

with the Low Frequency Instrument at large angular scales. Combined with the *Planck* temperature and lensing data, these measurements give a reionization optical depth of  $\tau = 0.066 \pm 0.016$ , corresponding to a reionization redshift of  $z_{\text{re}} = 8.8^{+1.7}_{-1.4}$ . These results are consistent with those



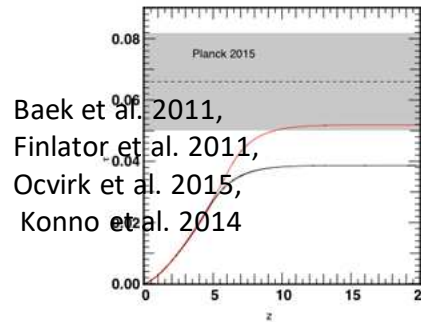
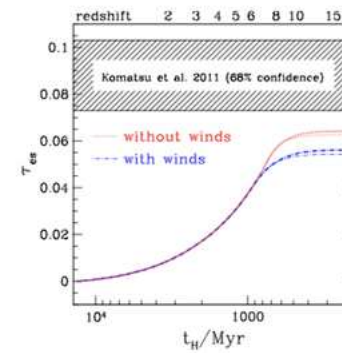
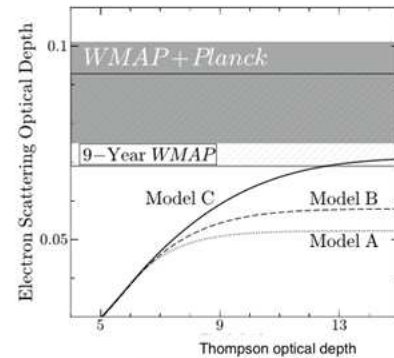
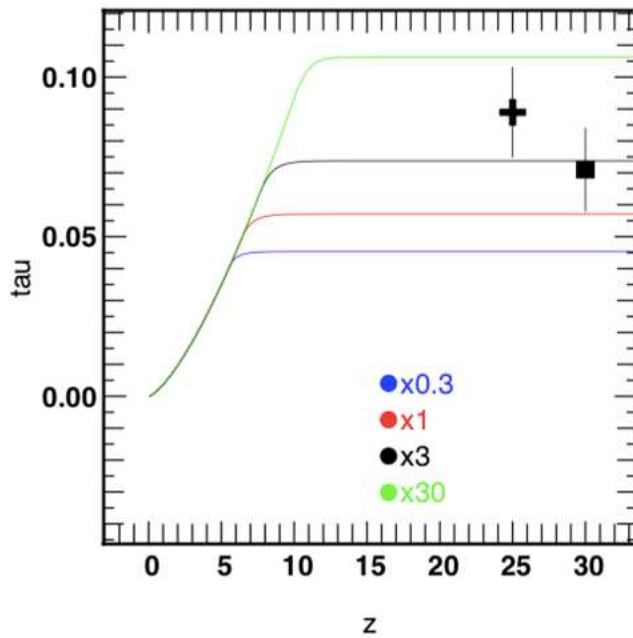


Planck VI 2018

Gives a 50 % reionization around  $z=7.68$

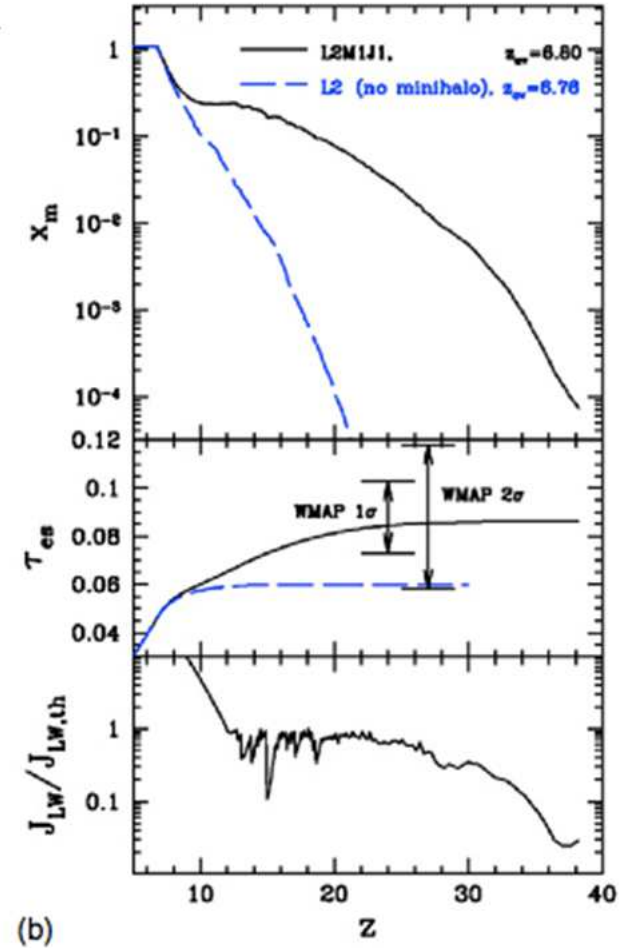
# A few words about Tau

Ahn et al. 20:



Baek et al. 2011,  
Finlator et al. 2011,  
Ocvirk et al. 2015,  
Konno et al. 2014

We also computed the Thomson optical depth from the two simulations ignoring the presence of helium. The values are  $\tau = 0.060$  and  $\tau = 0.063$  for S20 and S100 simulations respectively,



Simulations naturally produce a low Tau (i.e. a late reionization). H<sub>2</sub> Cooling Mini-haloes ( $\sim 10^5$ - $10^8$  M<sub>sol</sub>) were usually thought a Planck XIII says  $\tau \sim 0.066$ ...

# Looking at the Reionization : The flood

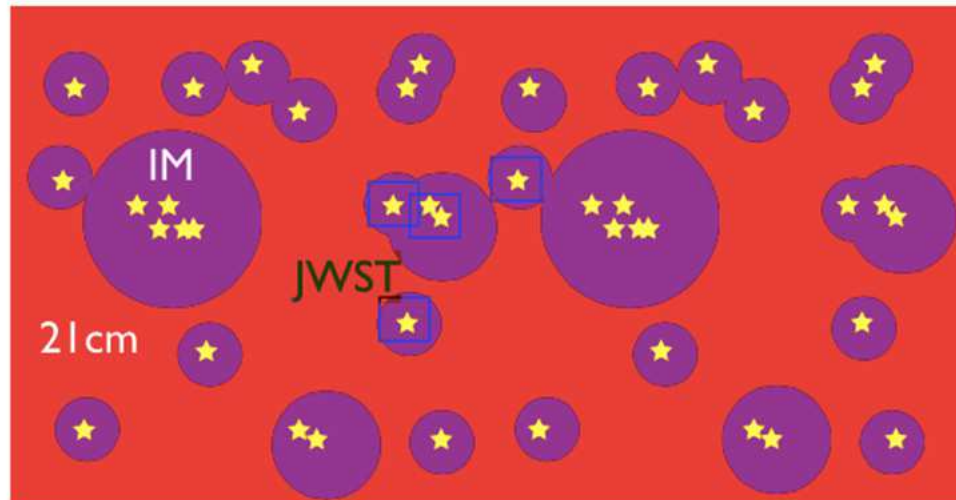
Athena (ESA)- 2028



JWST (NASA) - 2021



21cm SKA - 2020+  
precursors (LOFAR, PAPER, MWA, EDGES)



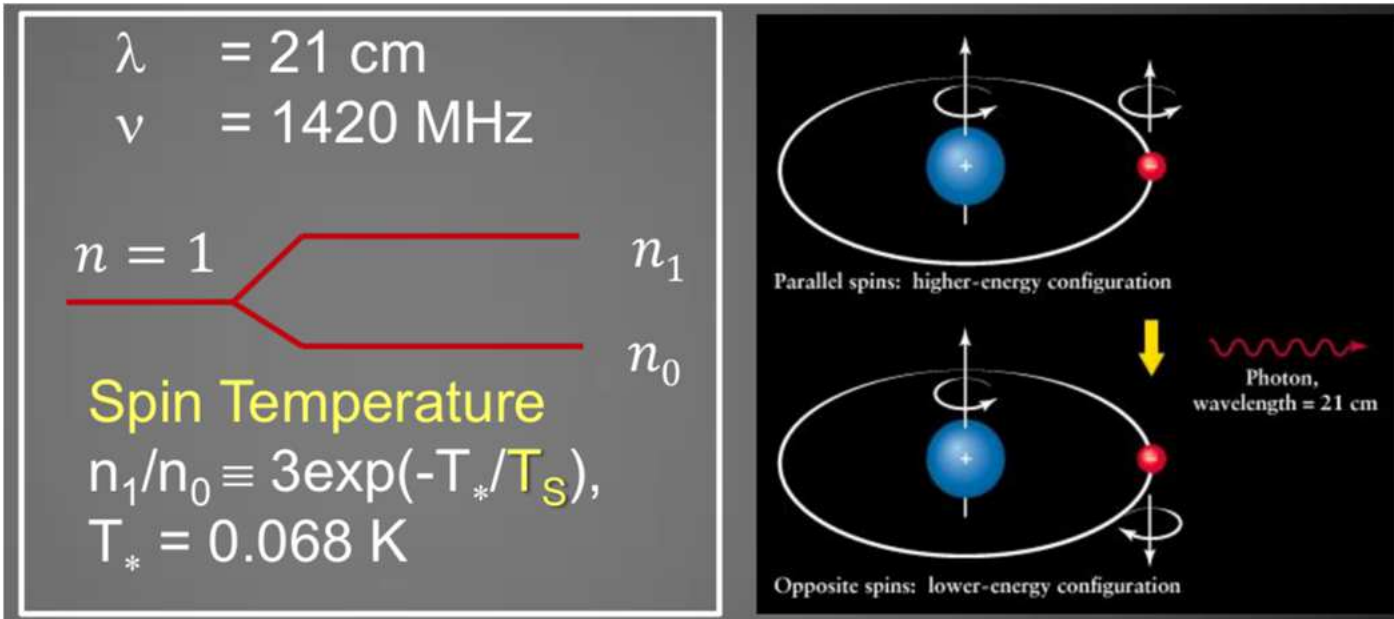
+ Pritchard & Loeb, 2012

+ ALMA, LSST, GSMT, EELT, SPICA, SVOM, next-gen CMB

The next decade is extremely promising in



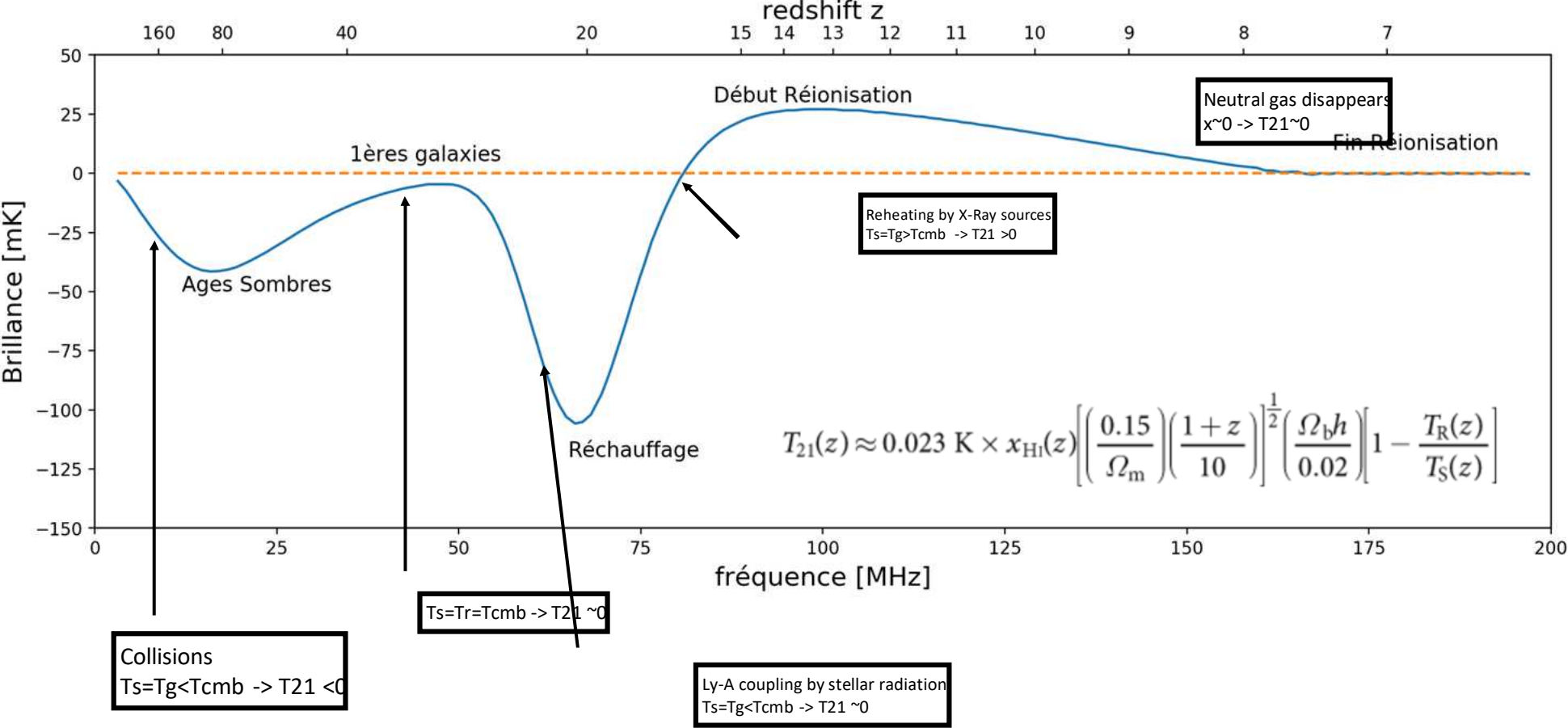
# Physics of 21 cm signal

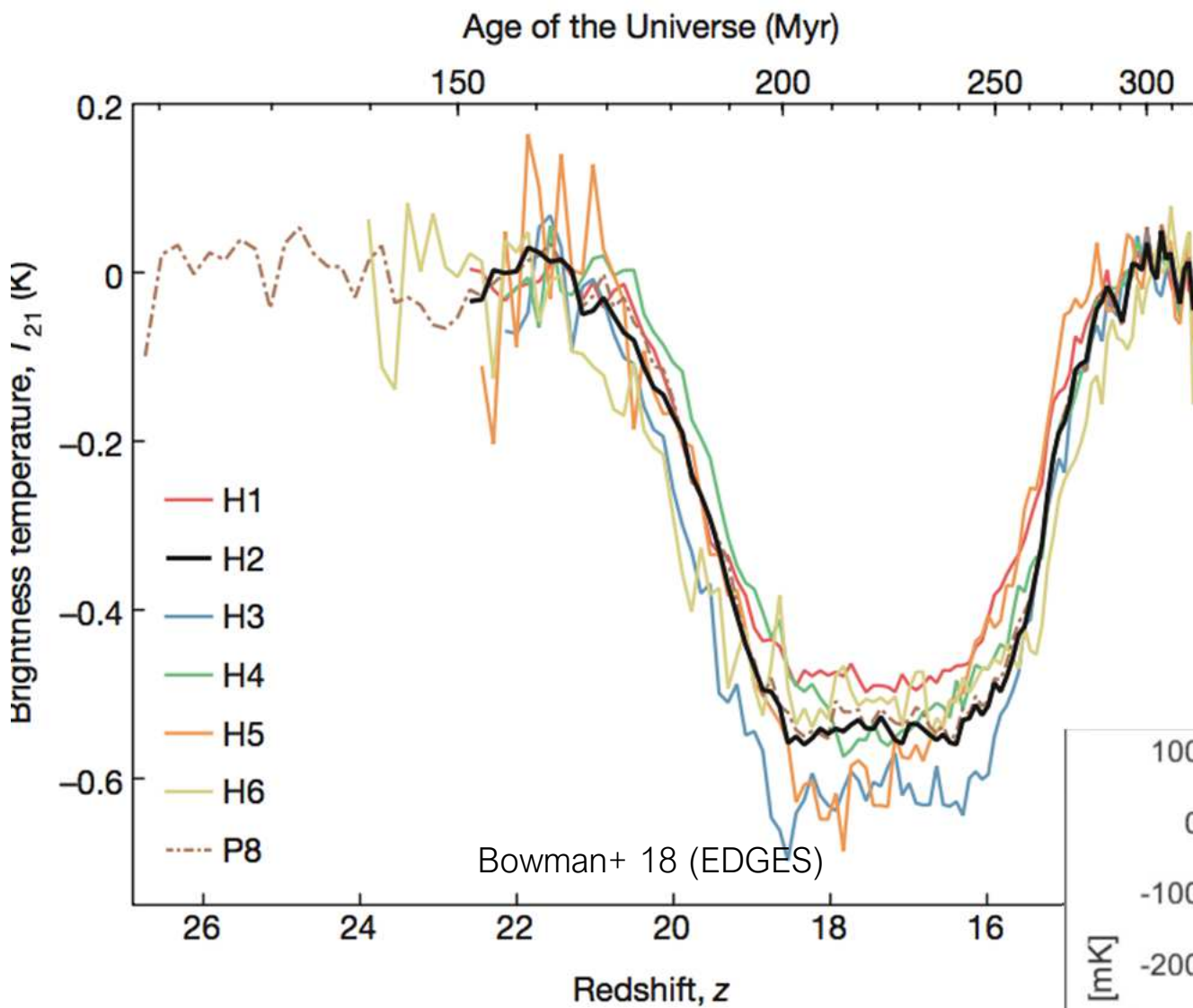


Radio signal produced by neutral gas.  
 Depends on the abundance of atoms in hyperfine ex  
 $T_s \sim T_{\text{gas}}$  or  $T_s \sim T_{\text{cmb}}$

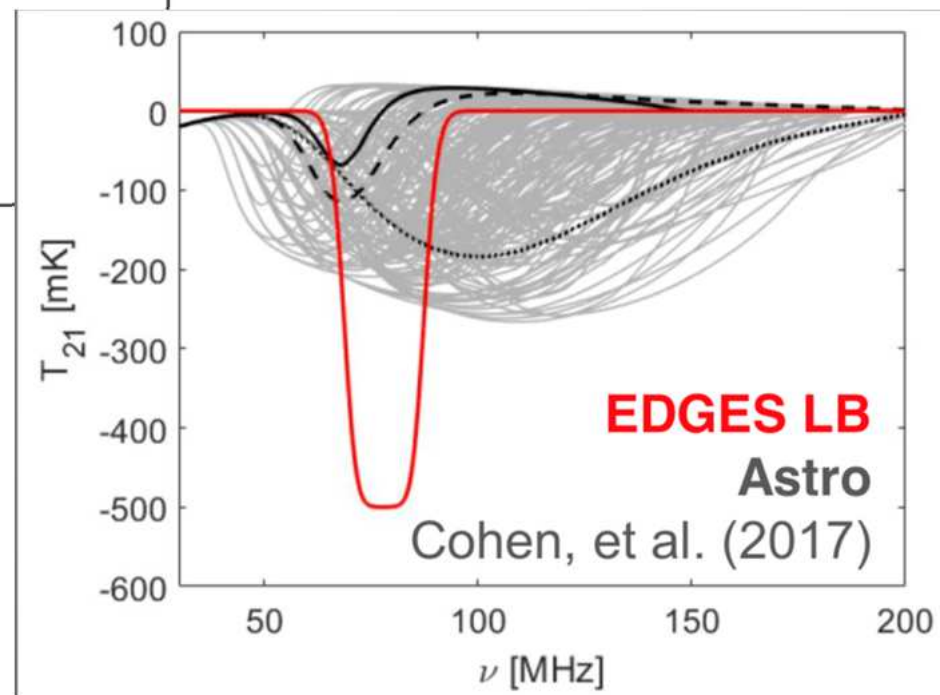
$$T_{21}(z) \approx 0.023 \text{ K} \times x_{\text{HI}}(z) \left[ \left( \frac{0.15}{\Omega_m} \right) \left( \frac{1+z}{10} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\Omega_b h}{0.02} \right) \left[ 1 - \frac{T_R(z)}{T_S(z)} \right]$$

# 21 cm signal & the First structures

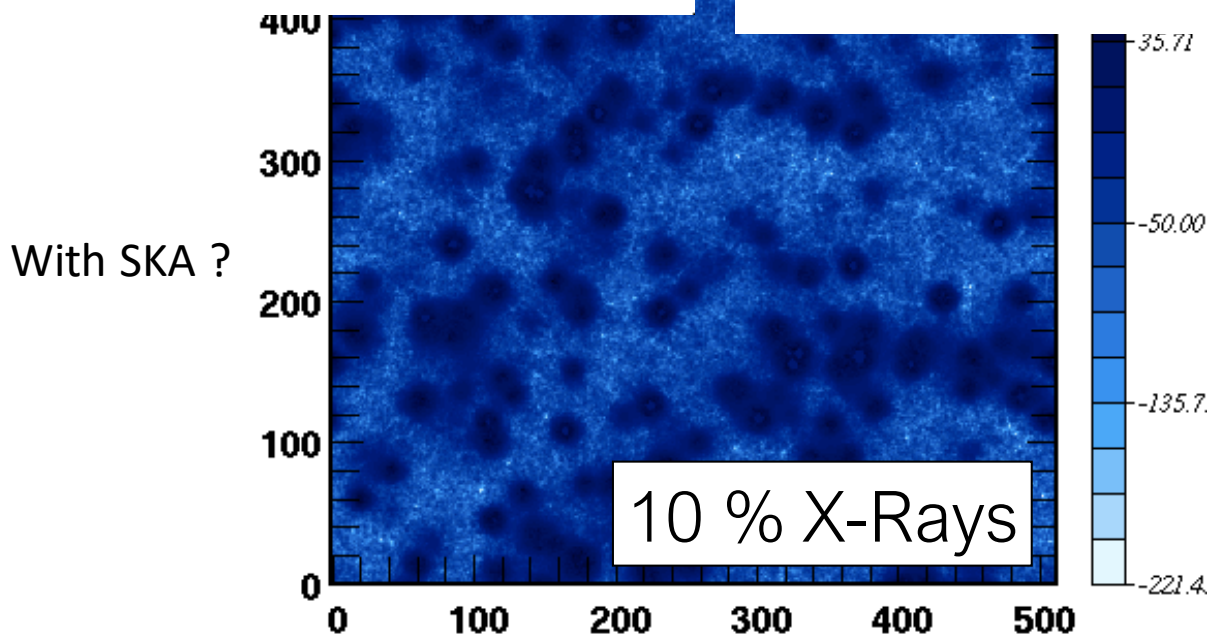
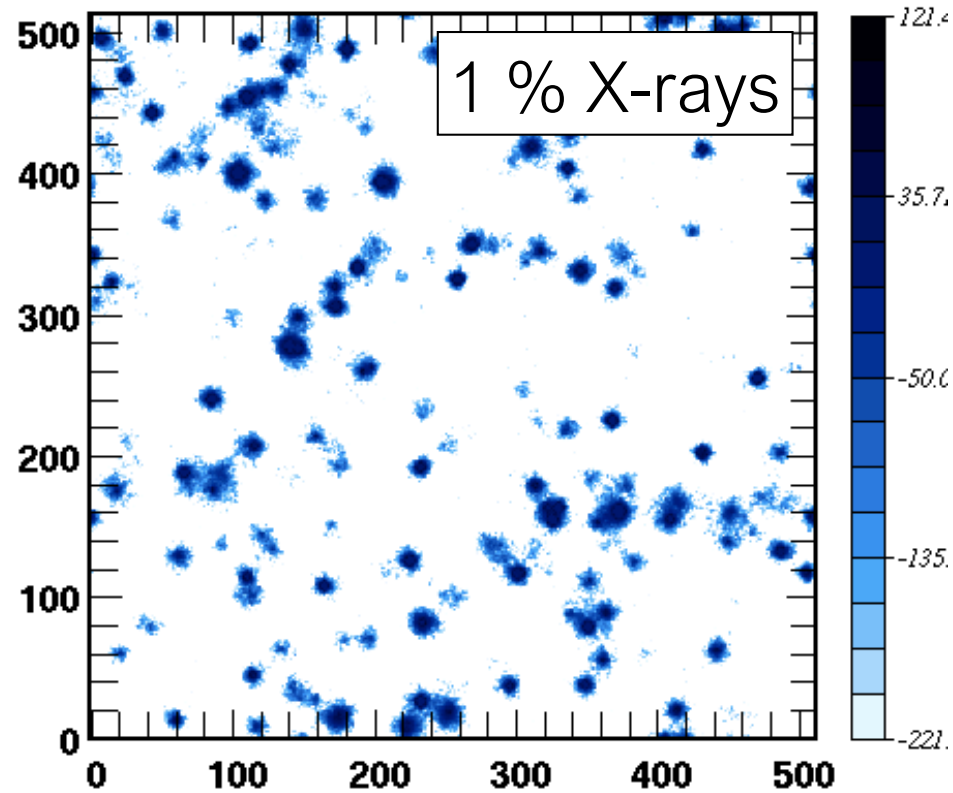
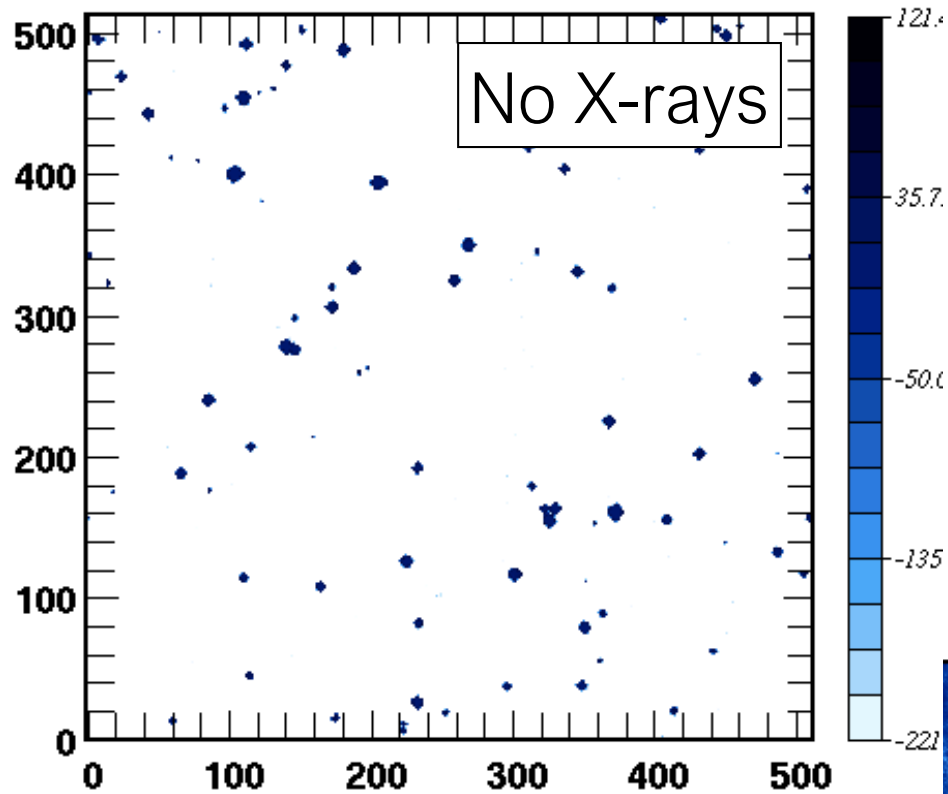




The gas is too cool  
 -> exotic cooling





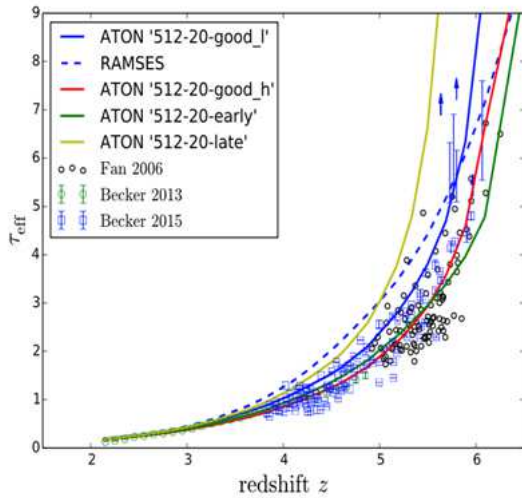
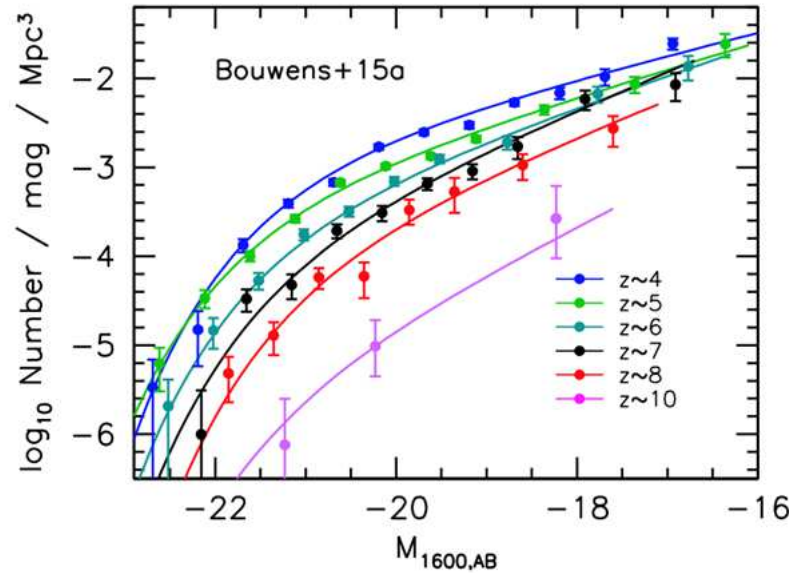
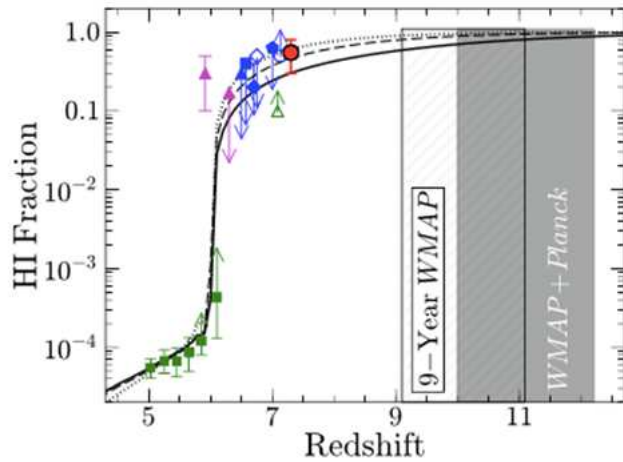


$x = 0.5$

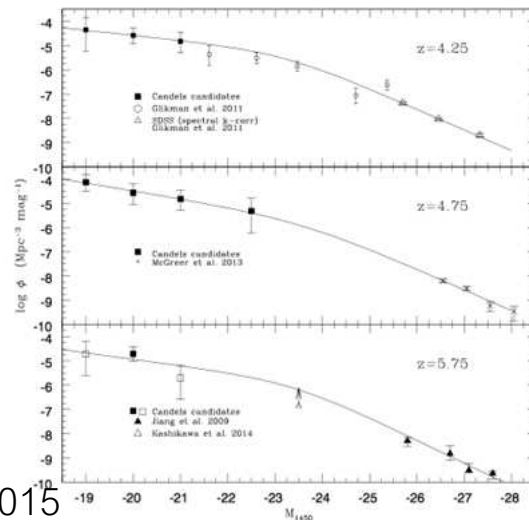
$z = 10$

# Les premières structures - les galaxies

# The EoR : a key epoch to understand the buildup of large scale structures



IGM Becker et al. 2015



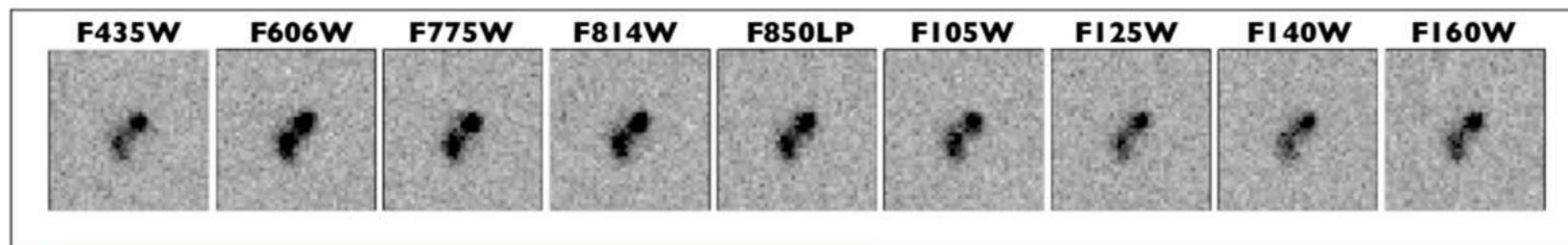
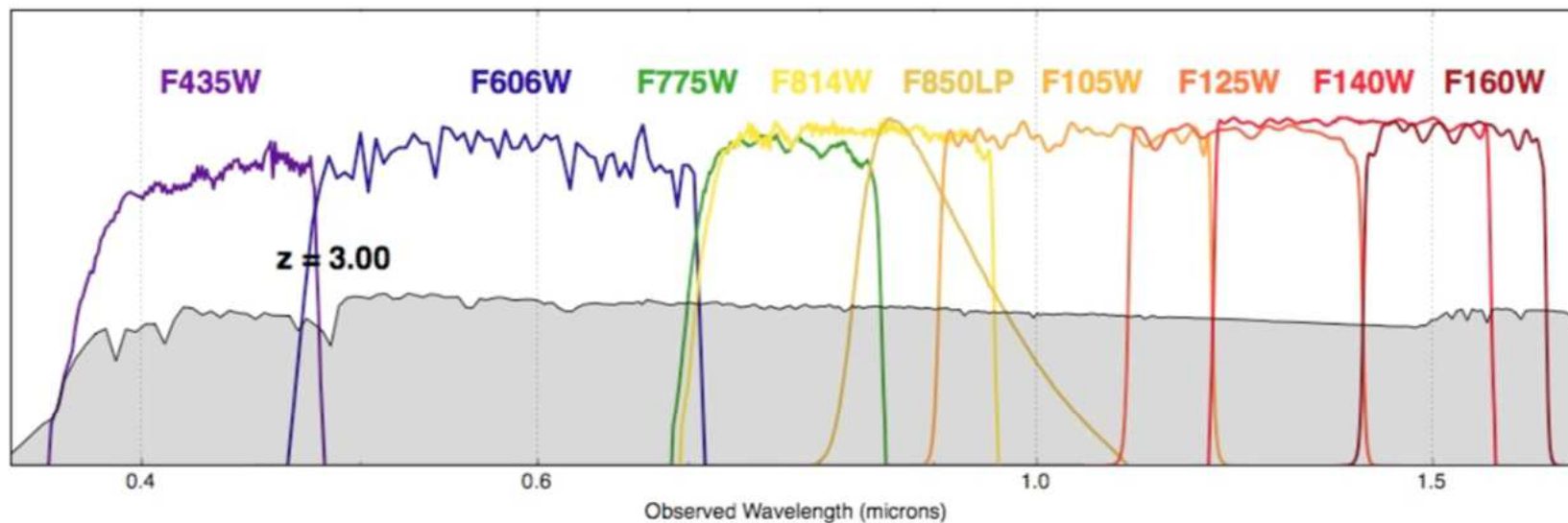
AGNs LFs Giallongo et al. 2015

Multiple objects : galaxies, AGNs, IGMs, CMB  
Spatial and timing constraints

- Initial stages, (low degeneracies from integrated evolution)
- Multiple observational probes



# LBGs with HST: efficient detection out to $z \sim 10-12$



optical ACS

near-IR WFC3/IR



FRONTIER  
FIELDS

Abell 2744

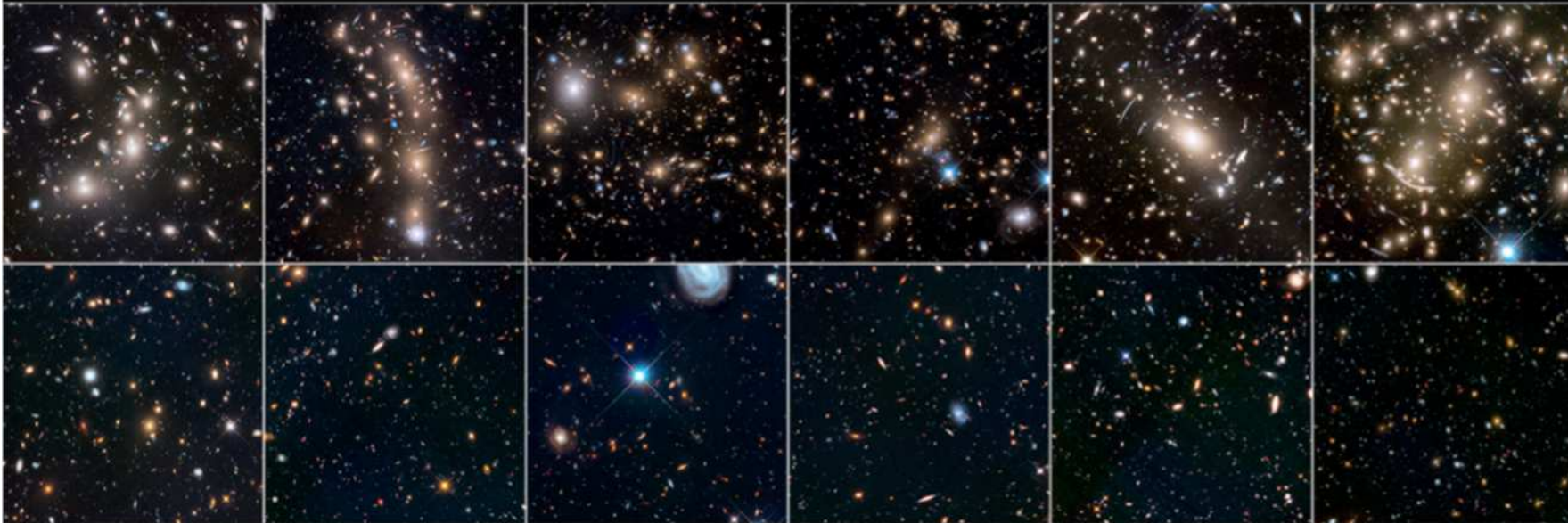
MACS J0416.1-2403

MACS J0717.5+3745

MACS J1149.5+2223

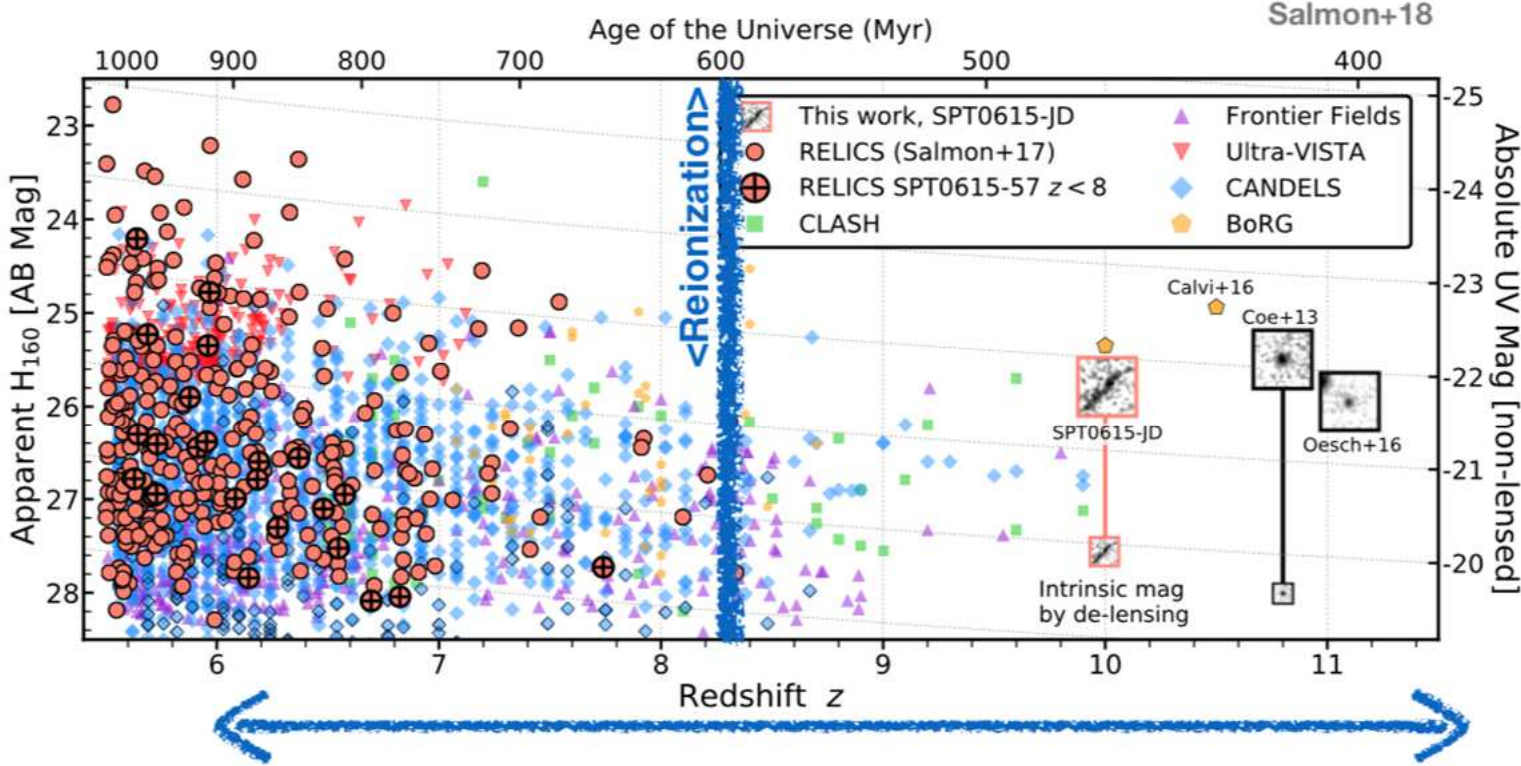
Abell 51063

Abell 370



See Lotz et al. (2017)

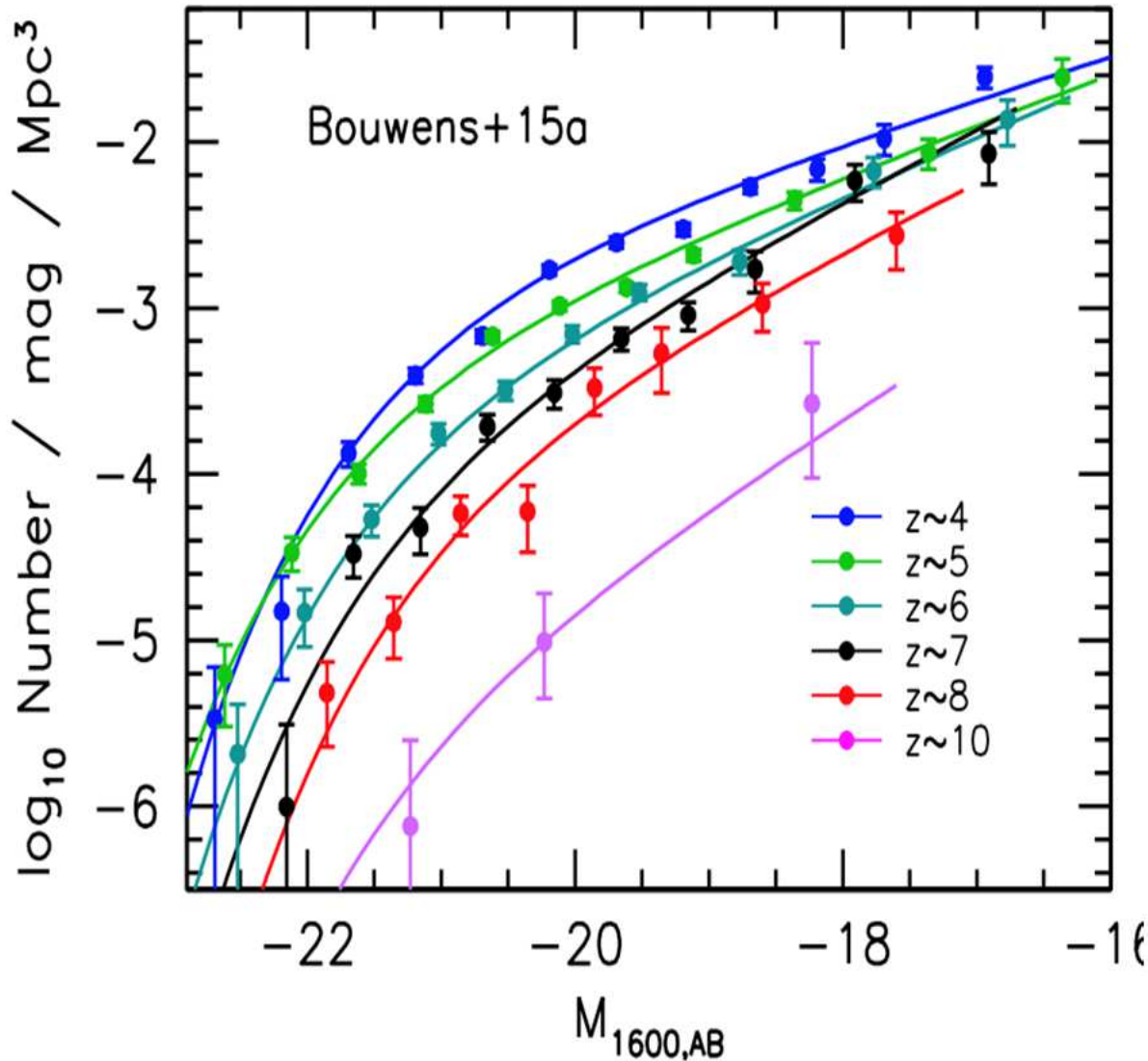
# Our Current Census of High-Redshift Galaxies



Large number of photometrically selected galaxies in the epoch of reionization at  $z > 6$   
 Current frontier:  $z \sim 10-11$



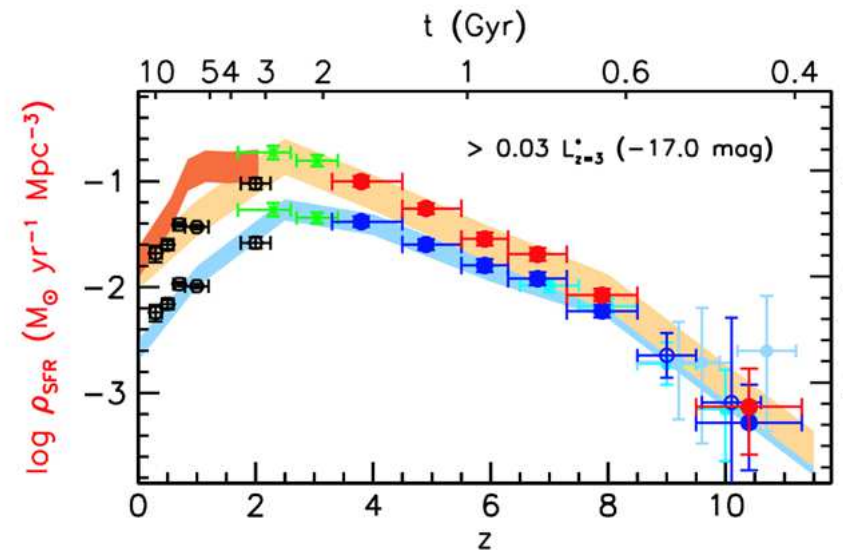
# High-Z Luminosity Functions



What's going on at  $M_{UV} \sim -13$  ?

By simple extrapolation, it should be enough to reionize the cosmos

But we don't know yet



# Respective Role of SF Galaxies and AGNs

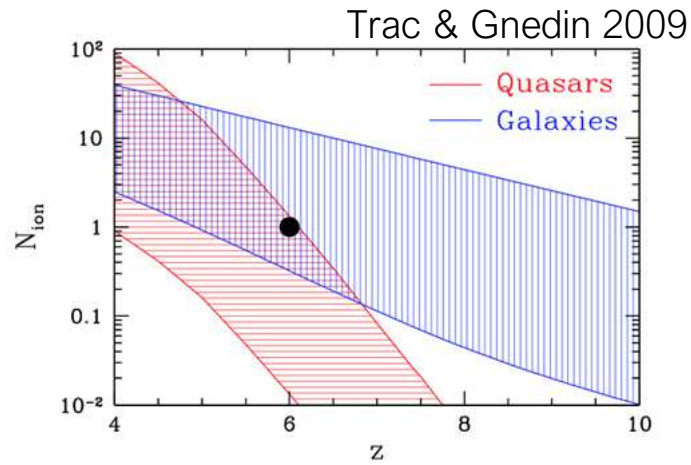
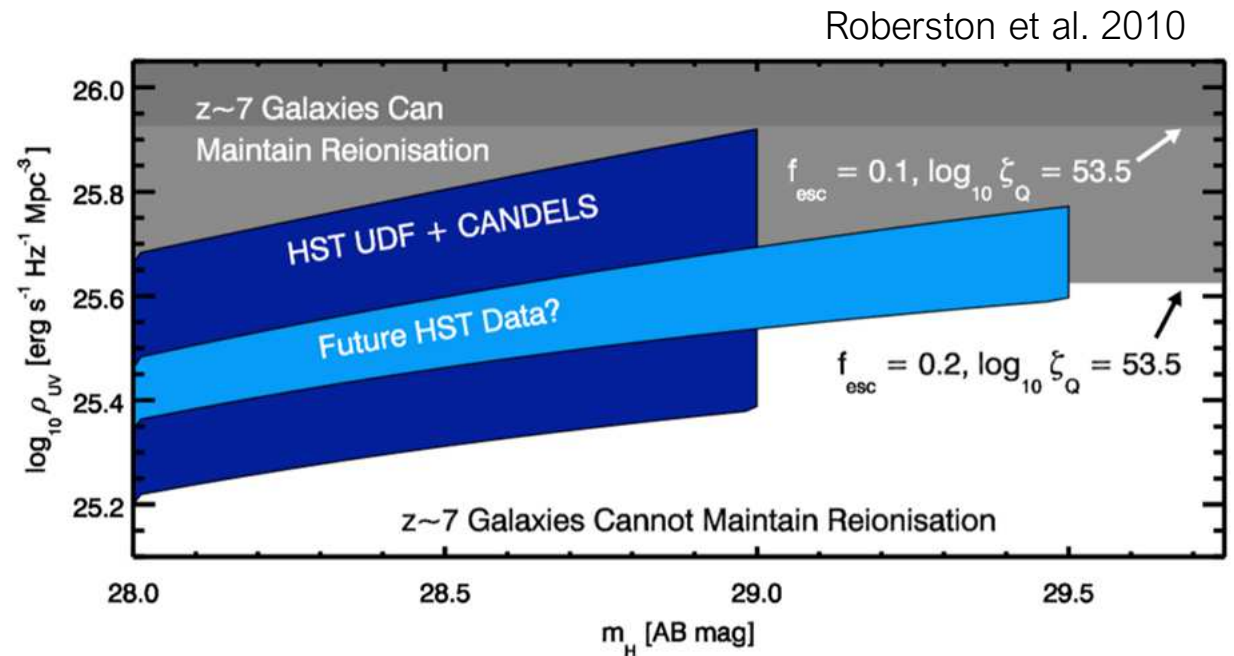


Fig. 2.— Plausible ranges for the number of ionizations per hydrogen atom from quasars (red) and galaxies (blue) - the detailed explanations of adopted limits are given in the text. The large black dot is a necessary reionization conditions of one ionization per hydrogen atom by  $z = 6$ .



It's not clear yet if galaxies are responsible for the reionization

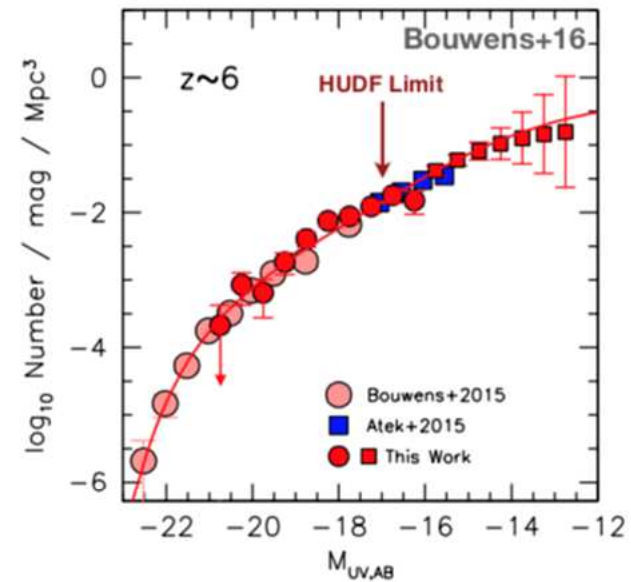
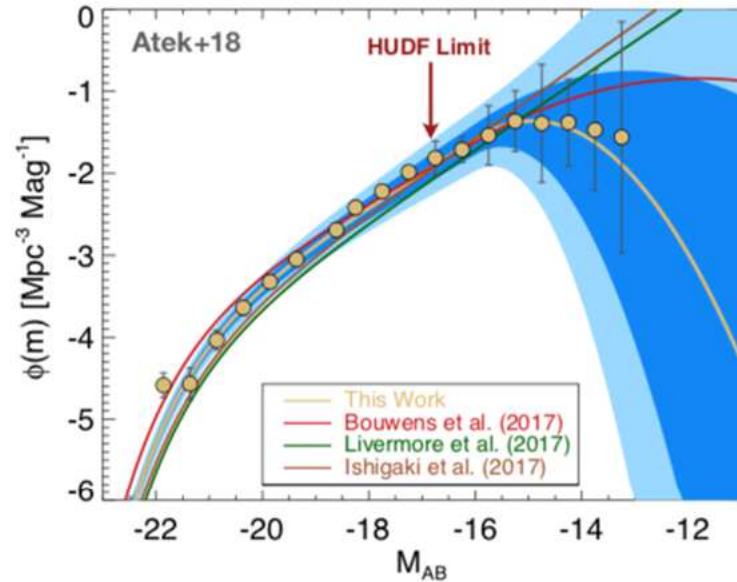
Role of small/faint galaxies ?

Pop III stars ?

Escape fraction ?

We know almost nothing of high-z galaxies

# New Frontier: Faint-End Cutoff/Turnover?

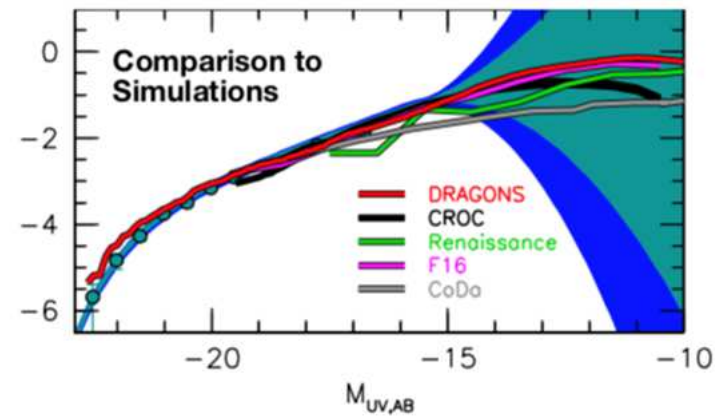


Hubble Frontier Fields: can probe possible turnover in LF at faint luminosities thanks to lensing

Reliable down to  $\sim 3$  mag fainter than HUDF, below that systematics due to lensing blow up

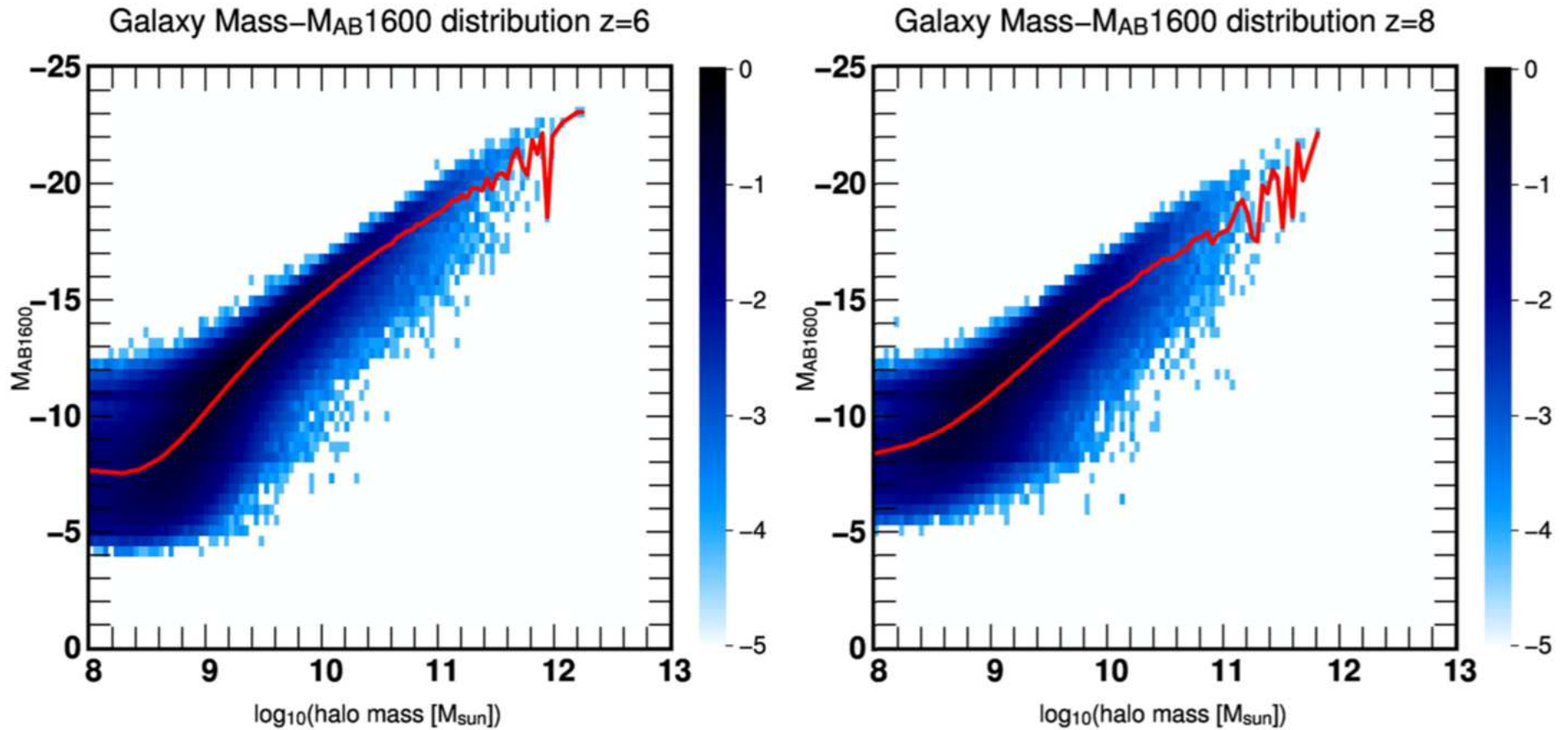
**clear:** LF continues steep at least to  $M_{UV} \sim -15$

**not so clear:** can we detect a turnover?



See also: Atek et al. 2015, Alavi et al. 2014, Castellano et al. 2015, Livermore et al. 2016, ...

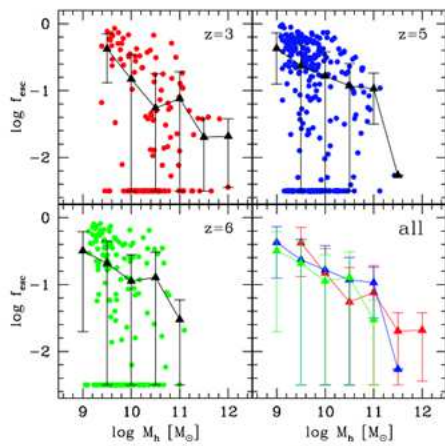




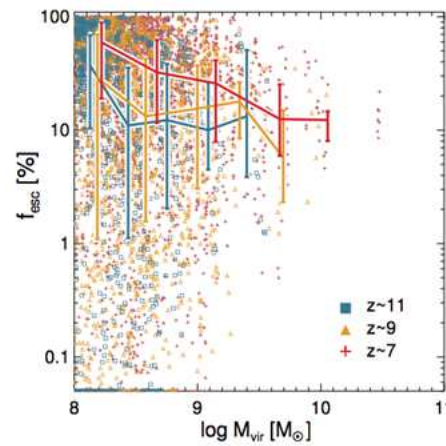
**Figure 8.** Galaxy mass - magnitude distribution at  $z=6$  and  $z=8$ . The color indicates the galaxy number density in  $N/\text{Mpc}^3/\text{Mag}/\log(M_{\odot})$ . The red line indicates the average Magnitude for each mass bin.

# Escape Fraction

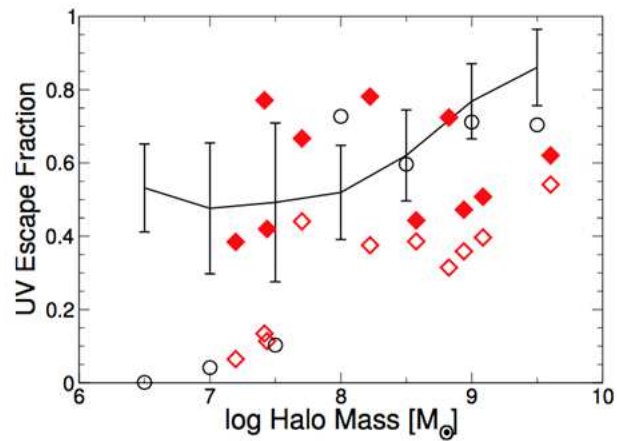
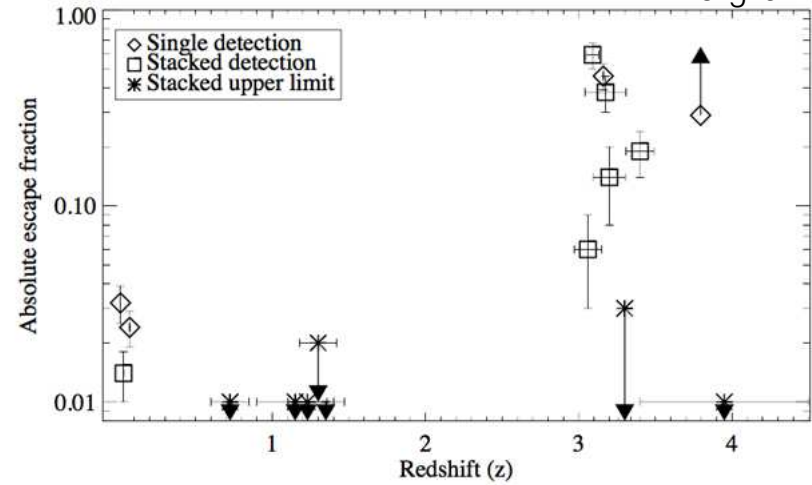
Trebitsch 2016  
Bergvall et al. 201



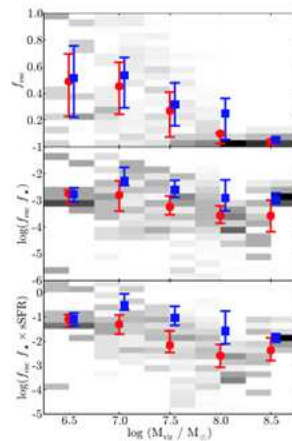
(a) YAJIMA et al. (2014)



(b) KIMM et CEN (2014)



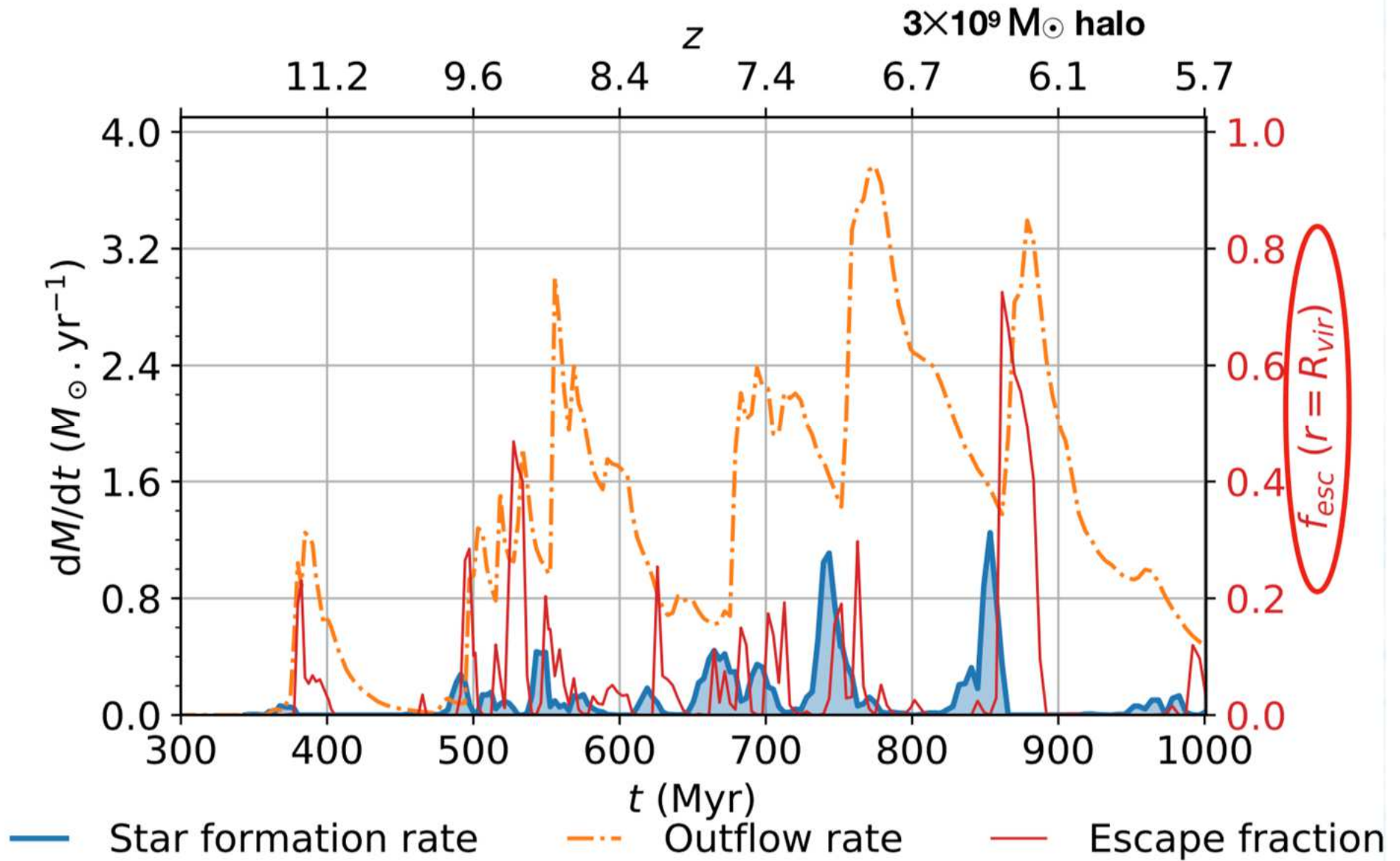
(c) WISE et CEN (2009)



(d) WISE et al. (2014)

Escape fraction = fraction of  
« efficient light »

somewhere between 0 and 1



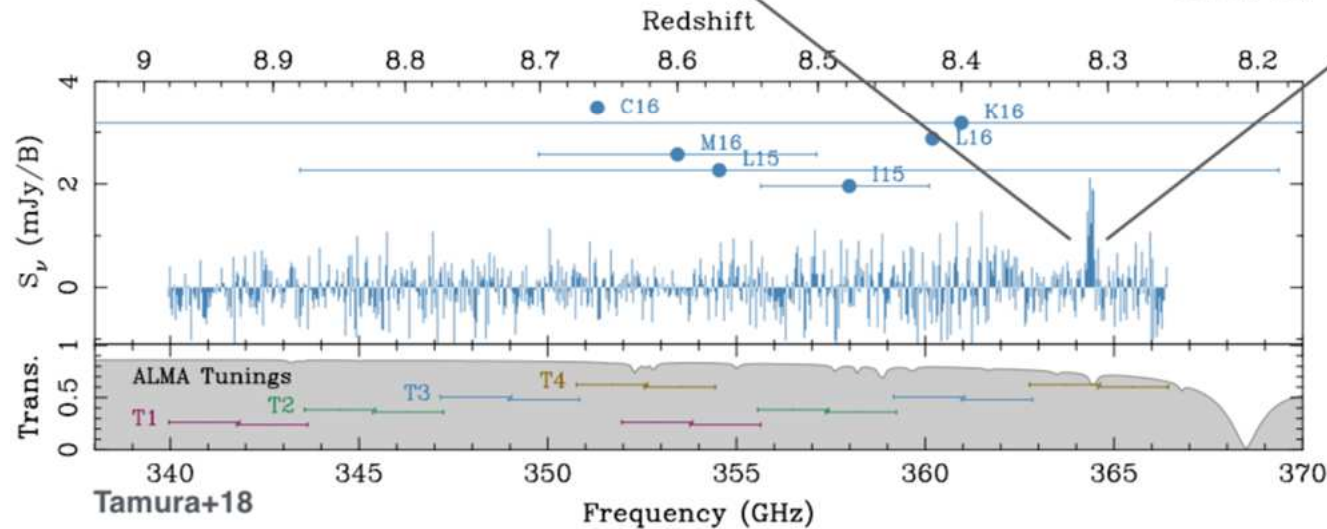
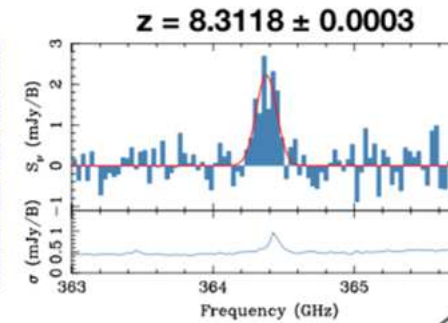
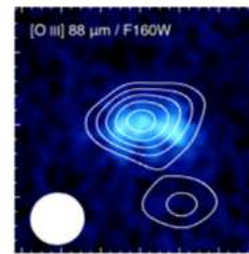


# ALMA as a Redshift Machine! - [OIII]

At low metallicity: [OIII]88 $\mu$ m line can be up to 10x stronger than [CII]158 $\mu$ m (e.g. Inoue+16)

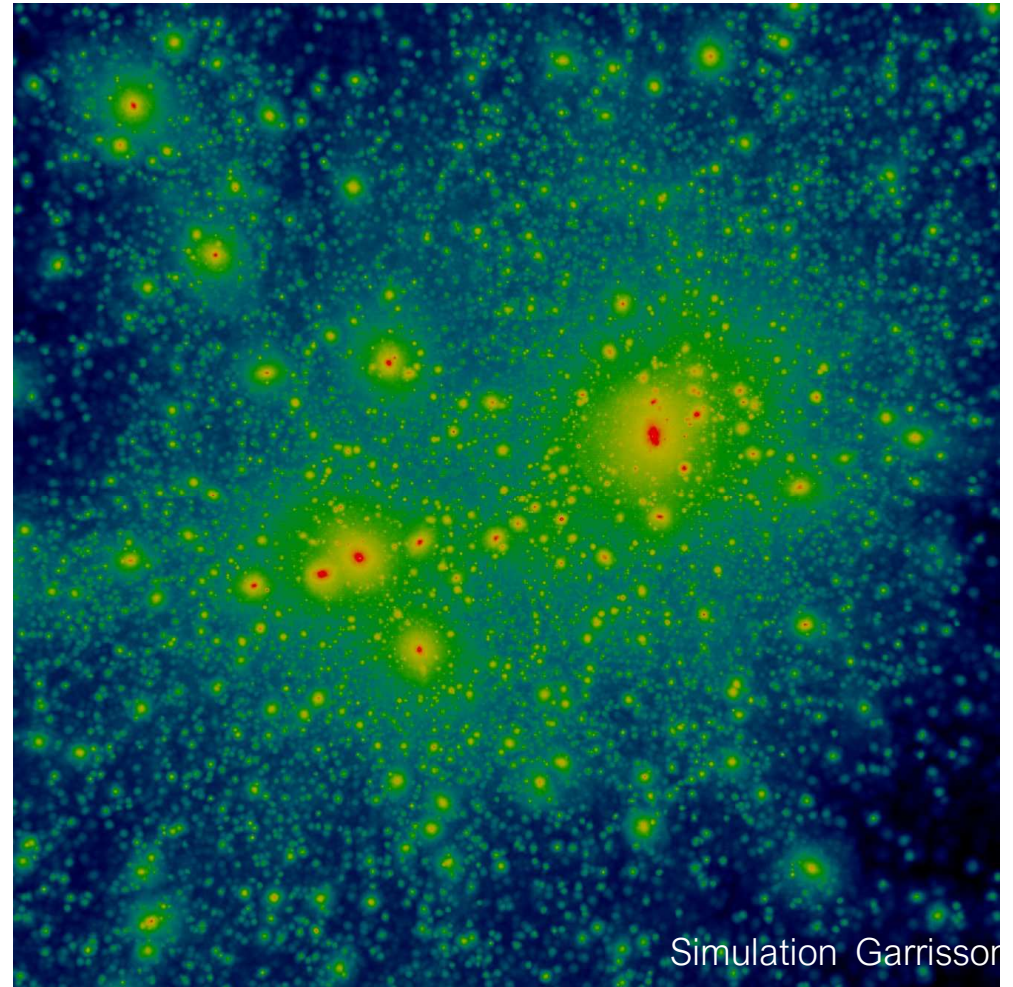
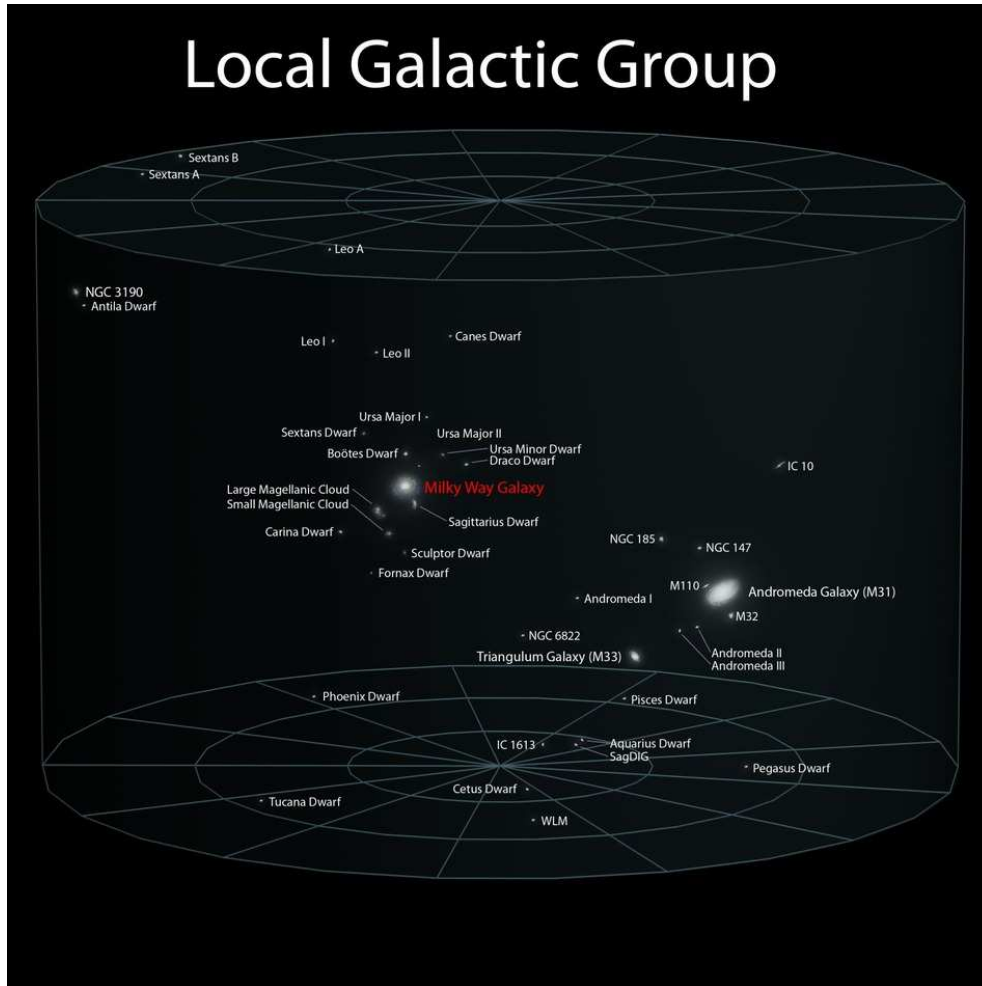
Almost every week now: new [OIII] detection during EoR

Most distant:  $z=9.11$  (Hashimoto+18a)



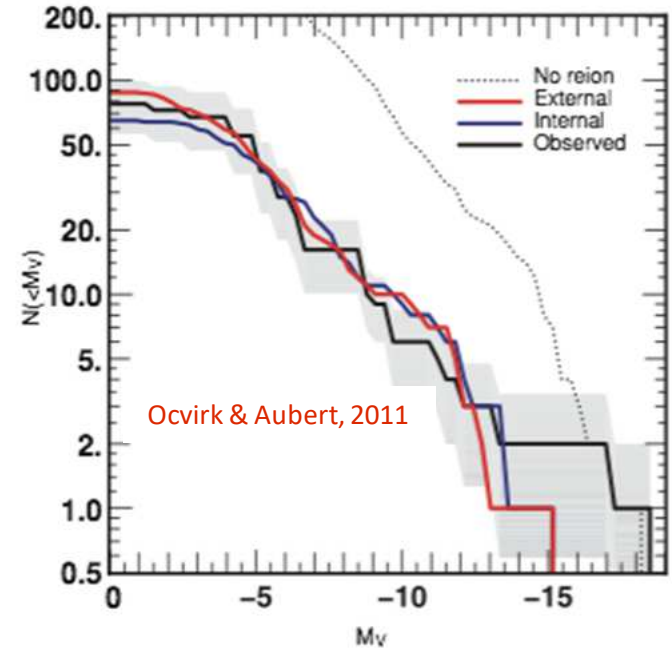
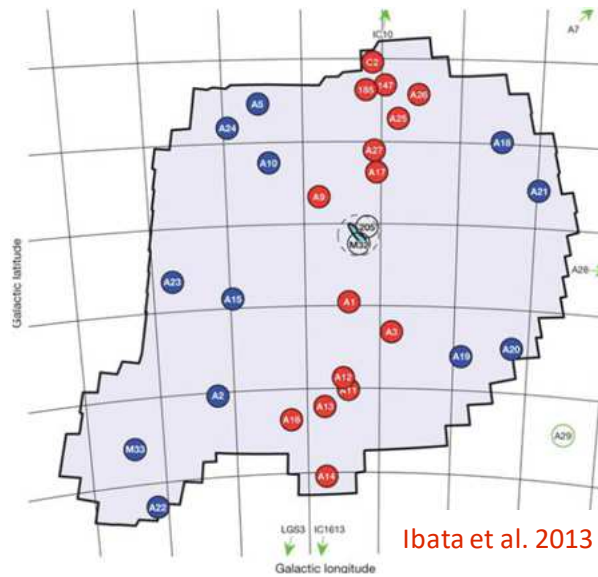
(see also: Inoue+16; Carniani+17; Laporte+17; Marrone+18; Hashimoto+18ab)

# Groupe Local & Réionisation



La faible abondance des structures observées autour de la Voie Lactée pourrait être expliquée par la Réionisation qui coupe la formation d'étoile dans les objets les moins massifs et les rend invisible

# Impact on satellite Galaxies ?



Models:  
100s of DM substructures

Observations:  
~10s of satellites

Local UV flux :  
stops local star fo

UV flux could be essential to explain the discrepancy between the number of predicted substructures in CDM and their observed distribution



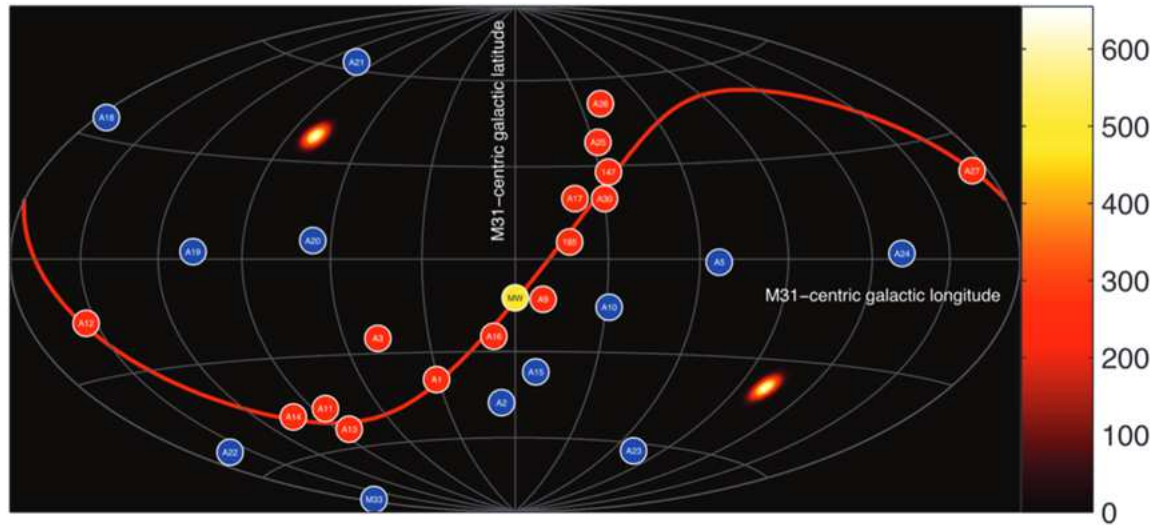
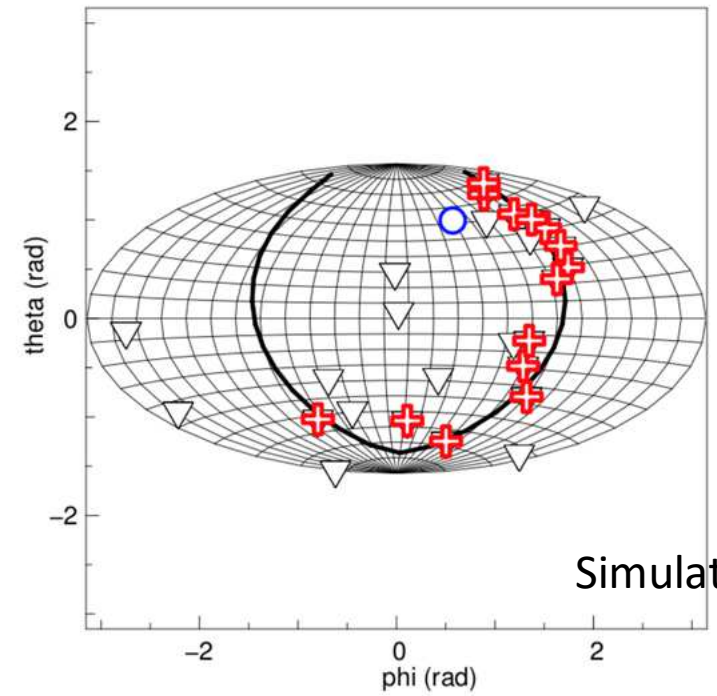


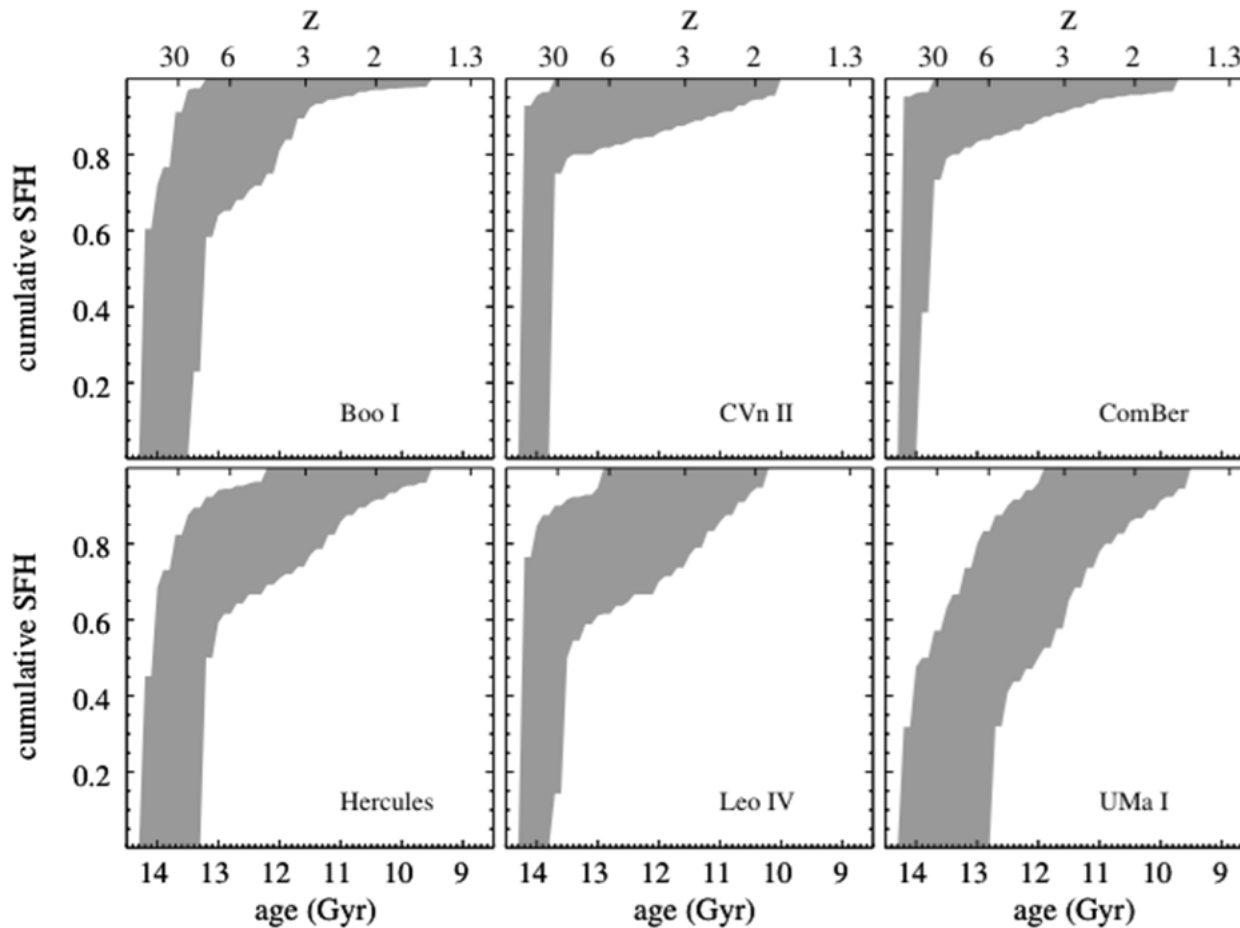
FIGURE 1.18 – Position des satellites vu depuis Andromède par rapport à son disque (équateur). La Voie Lactée est le point jaune proche du centre. Les satellites dans le plan sont en rouge et ceux à l'extérieur en bleu. L'image de fond représente la densité de probabilité de la position des pôles du plan, et le plan le plus probable est représenté par la courbe rouge. Cette figure est extraite de [Ibata et al. \(2013\)](#).

Detected plane: LGB  $z_{\text{reio}} M_{\text{max}}$

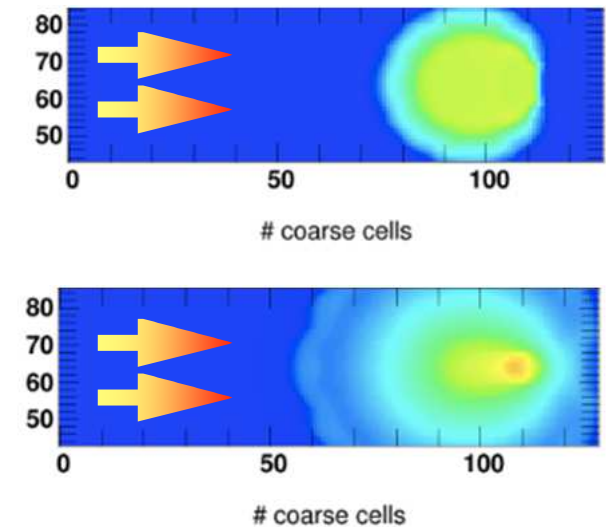


Reionization by the central galaxy could explain sc  
rotating disks of satellites around M31  
(the extent mostly)

# Quenching Star Formation in Ultra Faint Dwarfs?



Brown et al. 2014



Aubert et al., 2015

The vast majority of the stellar population is already present at the end of reionization. Photoheating of small haloes ( $M < 10^8 - 10^9 M_{\odot}$ ) by external UV field?

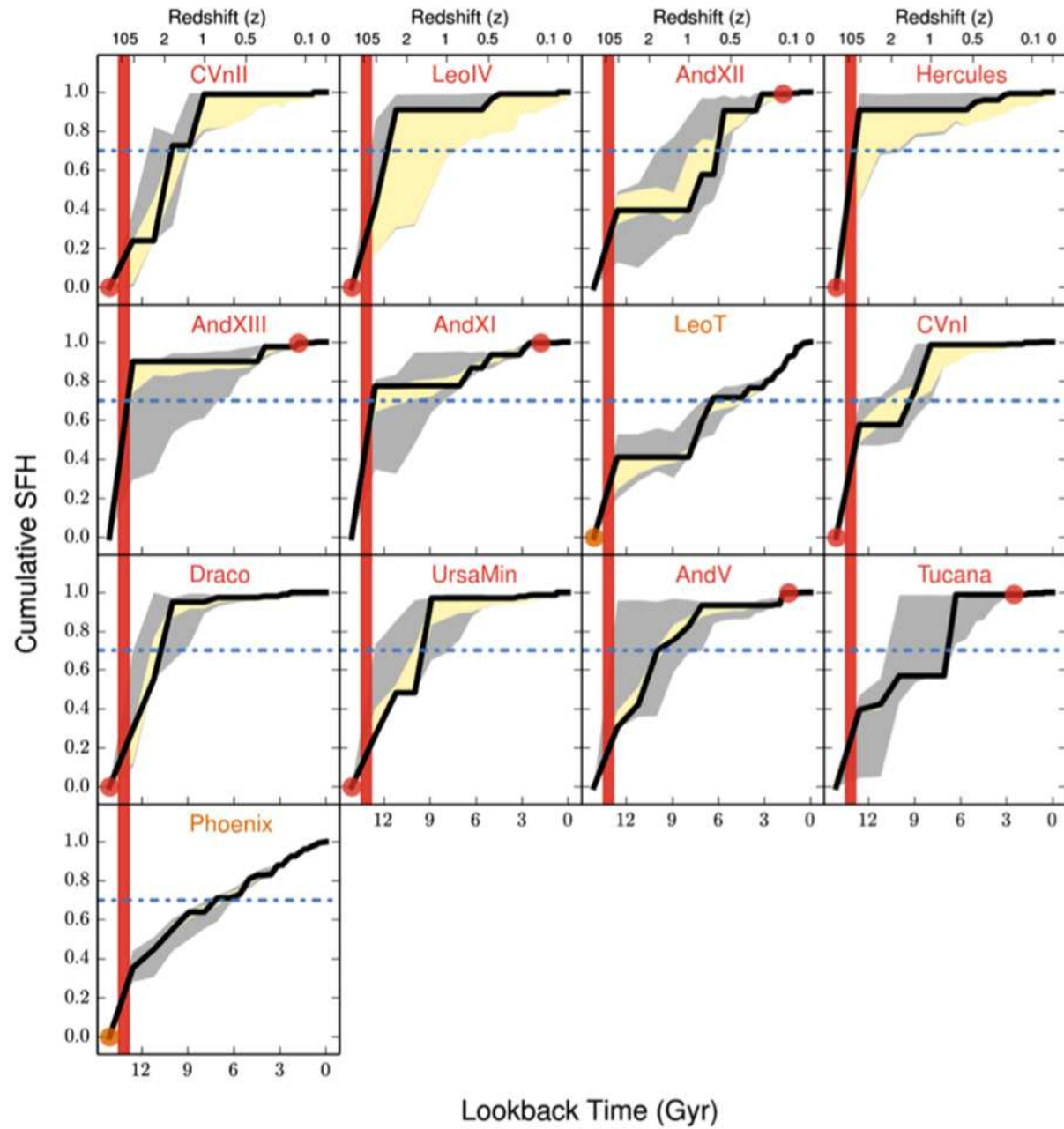
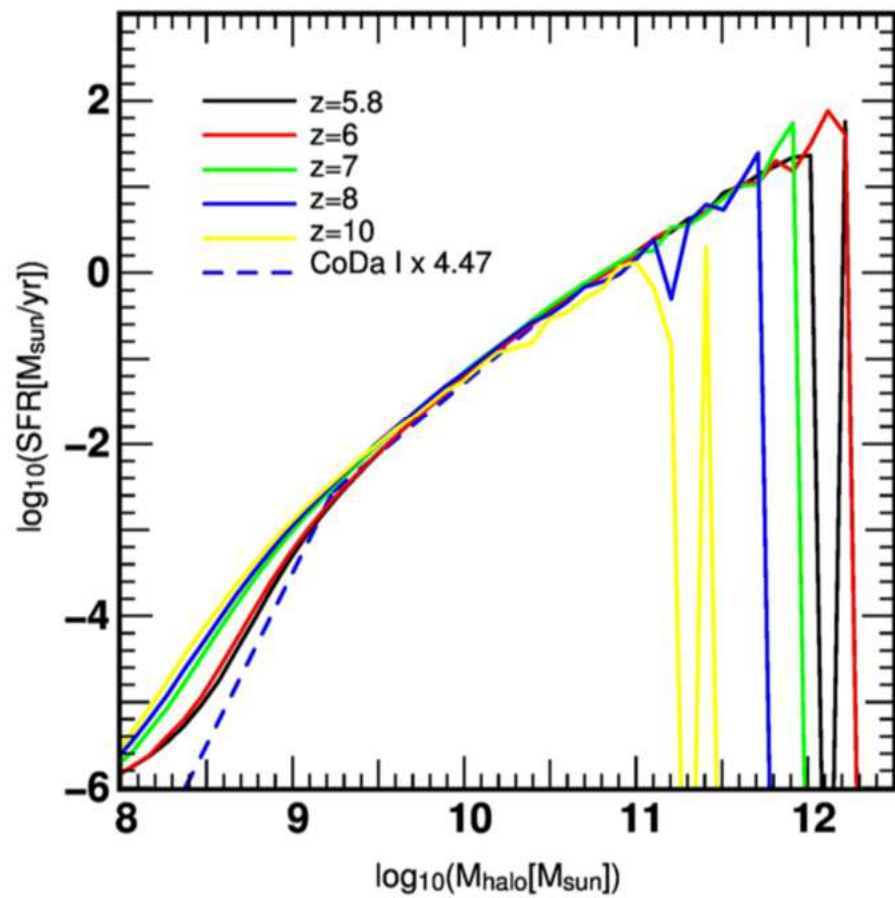


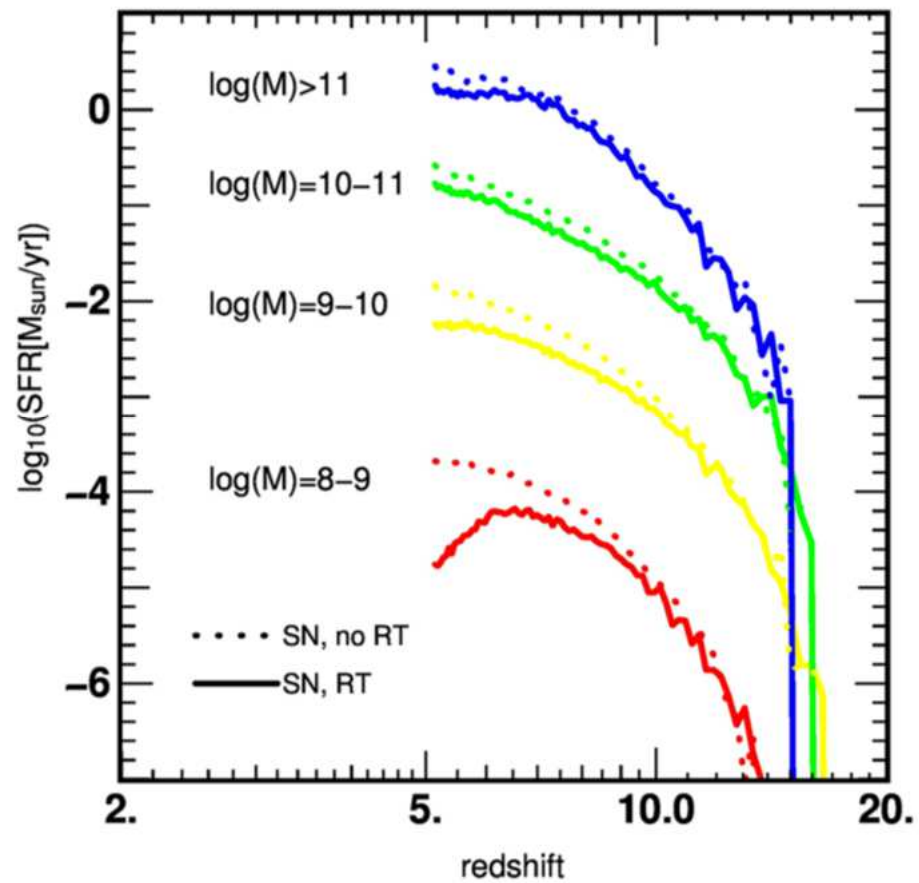
FIGURE 1.19 – SFH cumulées et normalisées de 13 galaxies naines "fossiles" du Groupe Local. Les zones grises et jaunes présentent les incertitudes aléatoires et totales (aléatoire et systématique). La bande rouge indique la Réionisation et le trait bleu horizontal marque les 70 % de SFH. Cette figure est extraite de [Weisz et al. \(2014\)](#).



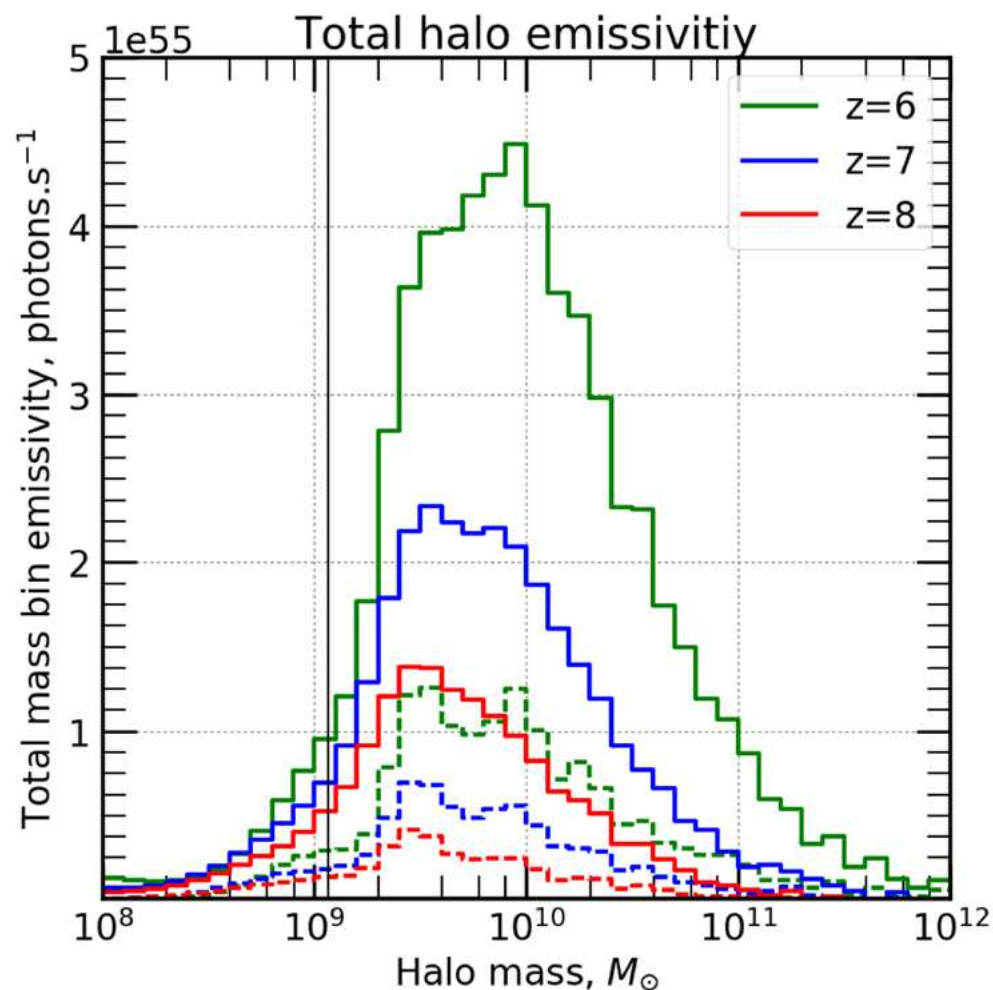
Star formation rate CoDaII



Star formation histories of  $z=5$  haloes



# Total emissivities



- Around 80% of photons produced in haloes of mass  $5 \times 10^{10} M_{\odot} \gtrsim M_{\text{halo}} \gtrsim 10^9 M_{\odot}$ . Mass range is intersection of highest mass function and emissivity values.
- $\sim$  agreement with recent work such as in Katz+18 (arXiv)

Full lines : estimated total emissivities of full sample

Dashed lines : total emissivities of selection sample