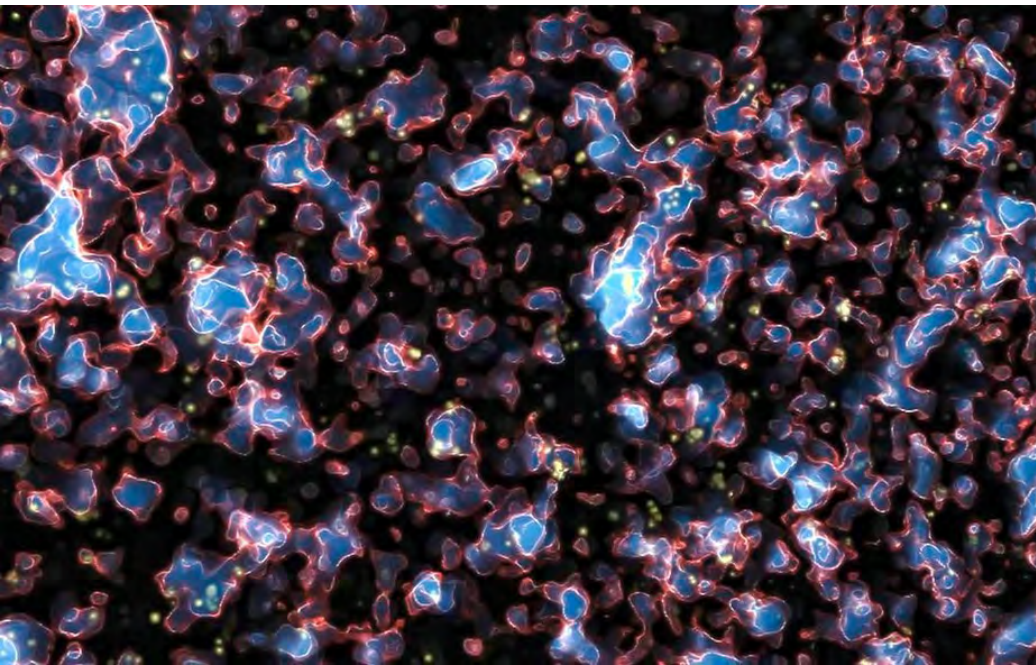




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Galaxies à l'époque de réionisation Milieu inter-galactique



Françoise Combes



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

Les différents aspects

→ Effets de la réionisation sur le milieu intergalactique

Raies d'absorption devant les quasars

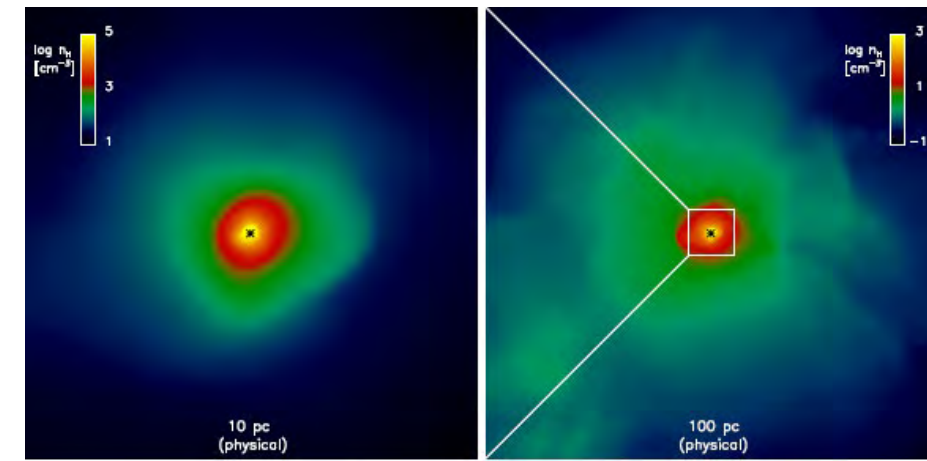
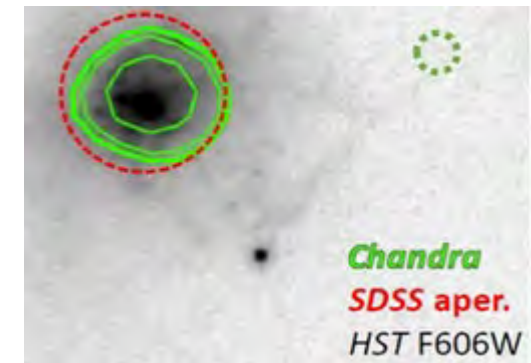
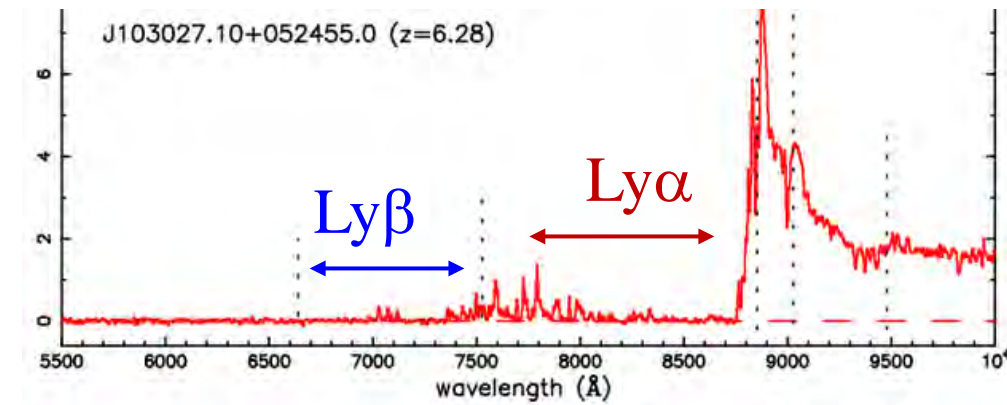
→ Taux de formation d'étoiles, et contribution à la réionisation

Fraction de rayonnement UV qui s'échappe

Rôle des trous noirs, micro-quasars

→ Etoiles massives exceptionnelles et PopIII

IMF à grand z



Durée de l'époque de réionisation

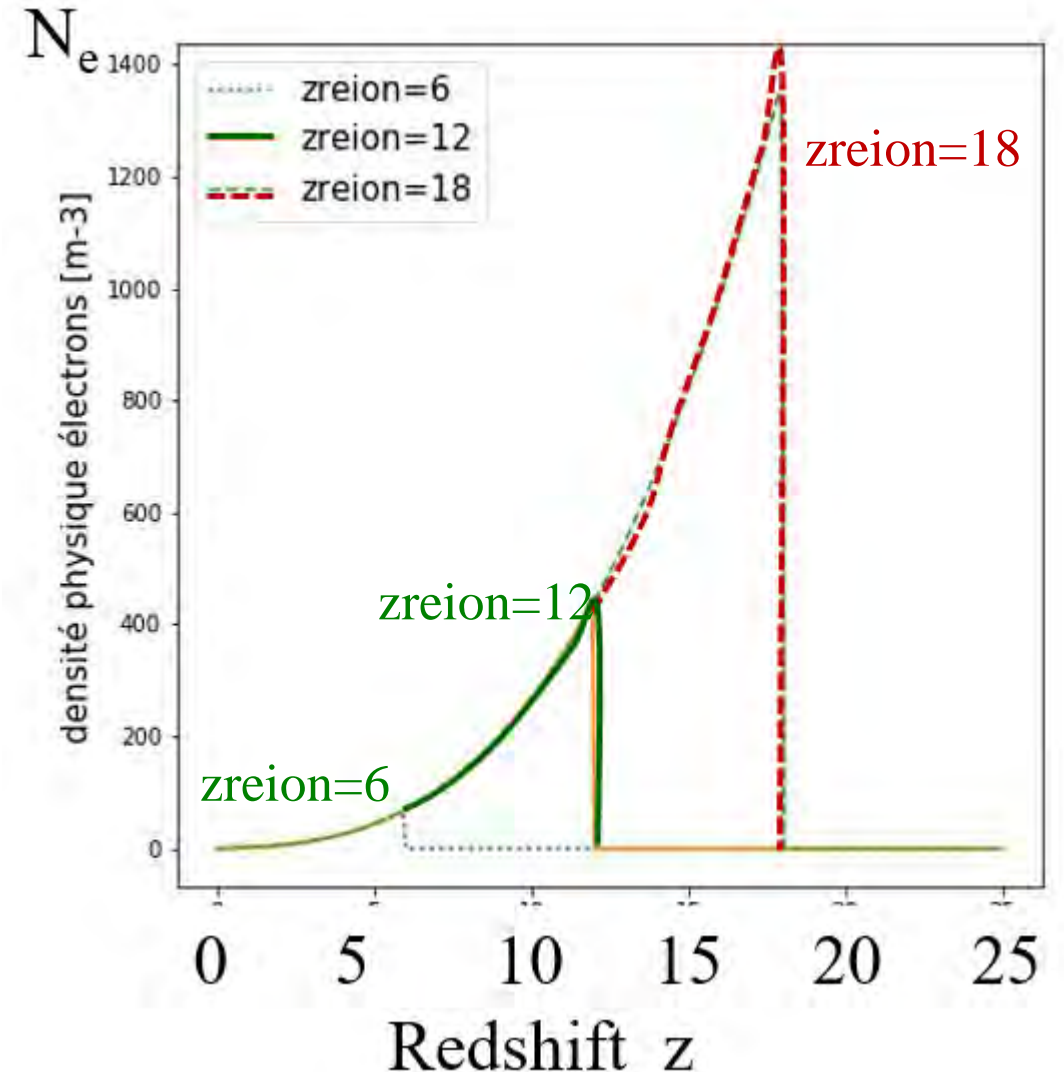
$$\tau = 0.0590_{\pm 006} \text{ Pagano et al 2019}$$
$$Z_{\text{re}} = 8.14 \pm 0.61$$

Contrainte du rayonnement fossile
du Big-Bang

compte le nombre de diffusions
Thomson des photons sur les électrons
libérés lors de la réionisation

L'épaisseur optique décroît avec le temps,
la densité de protons et d'électrons
décroissant comme $1/R(t)^3$

$$\tau = \int dt c \sigma_T n_e = \int \frac{dz}{H(z)(1+z)} c \sigma_T n_e(z)$$



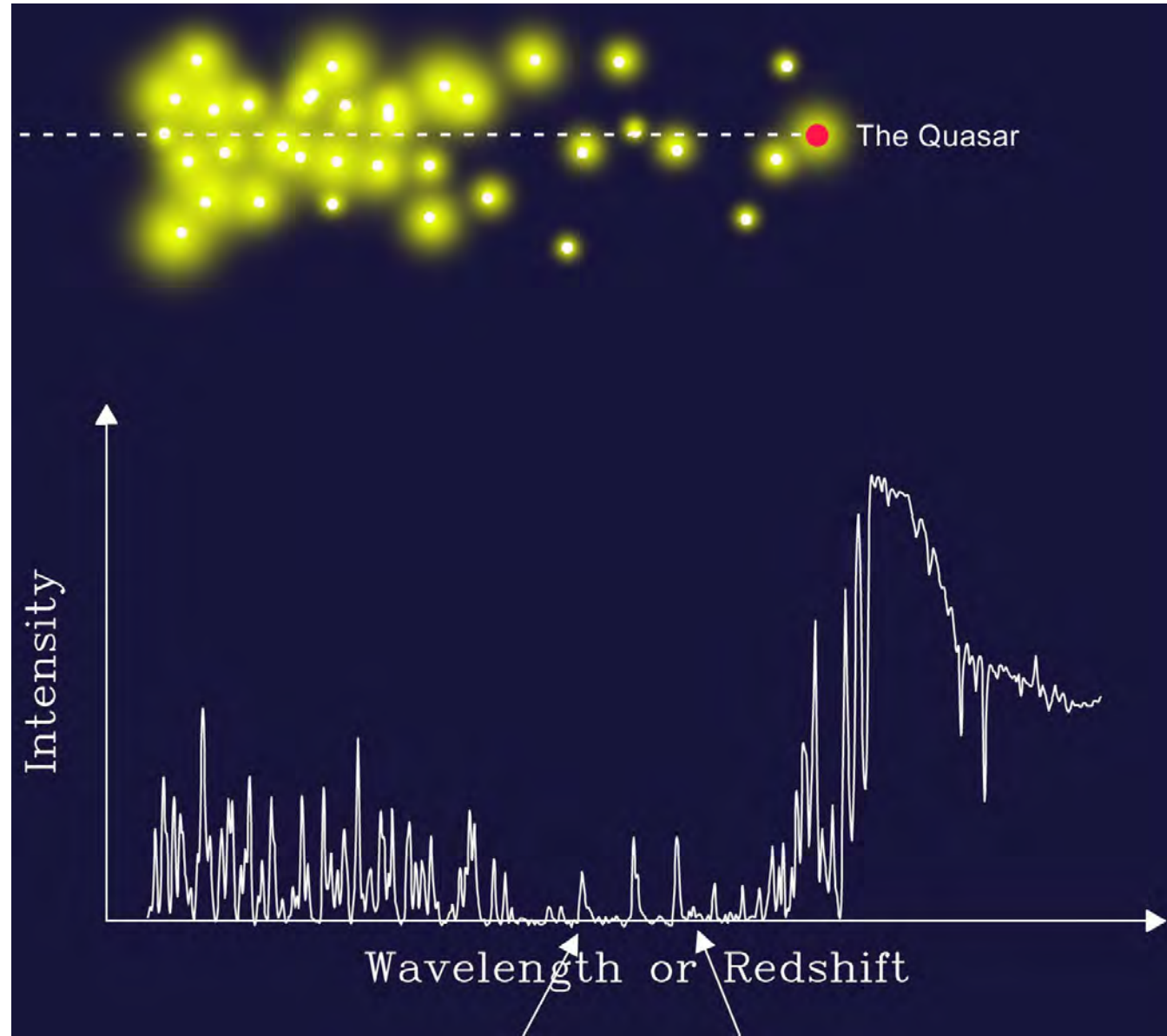
Flux des QSO à zéro durant l'âge sombre

Ligne de visée
devant un quasar

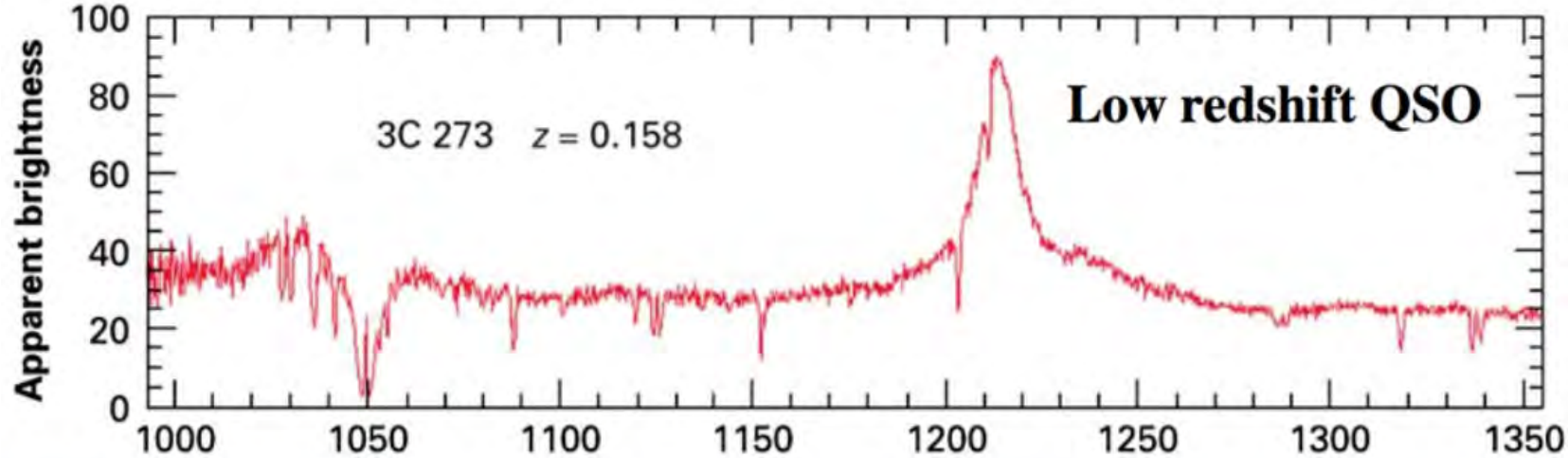
Spectre en absorption
Forêt Lyman-alpha

ou absorption
continue totale
→ **Effet Gunn-Peterson**
Prédiction en 1965
1ère observation en 2001
avec le SDSS

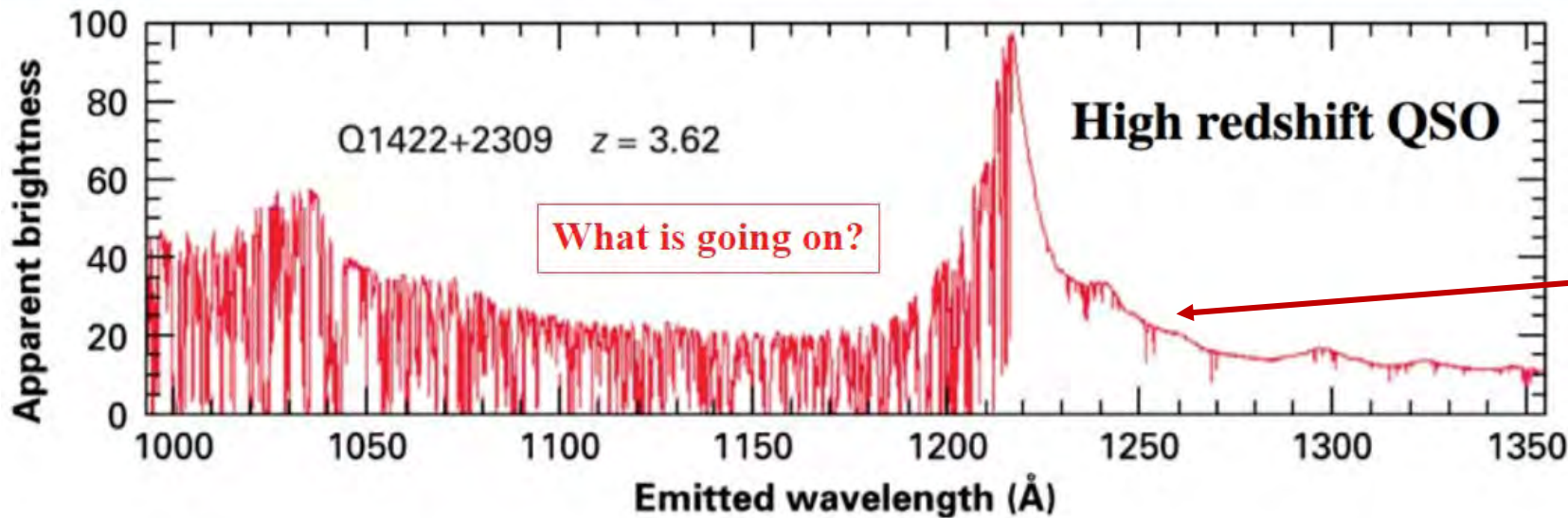
Djorgovski et al 2001



Variations de la forêt selon le redshift



Enrichissement de la forêt Ly α
 $Z = 0.01 Z_{\odot}$
→ Efficacité du feedback?

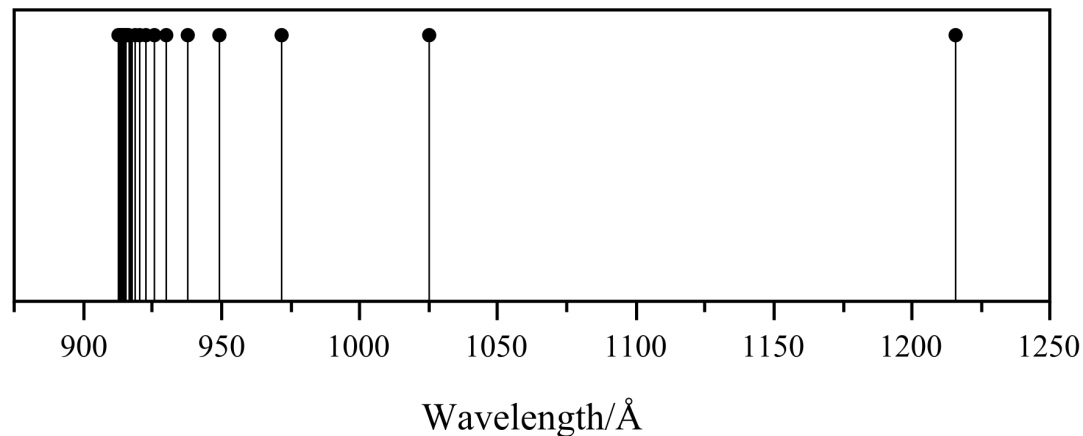


Raies métalliques
CIV, NV, OVI, MgII

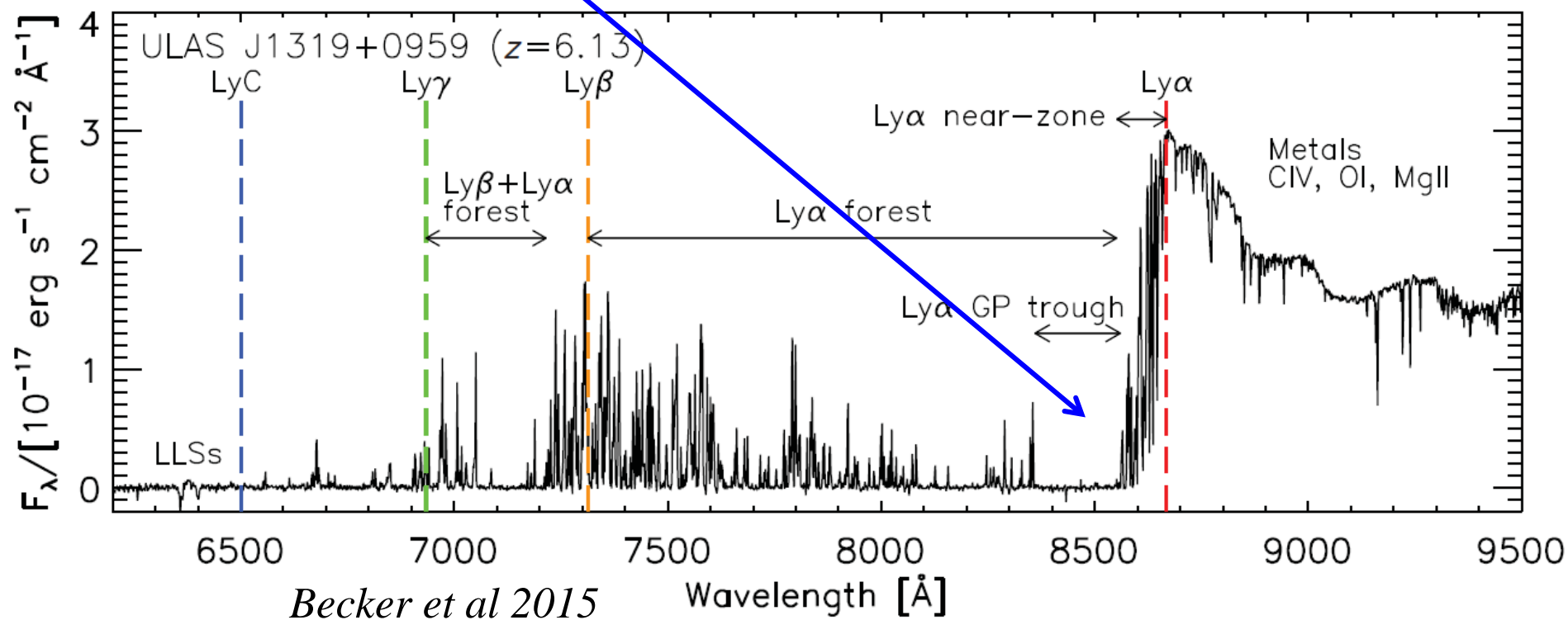
Surprise de Weymann et al 1981: abondance de nuages sur la ligne de visée, avec $z_{abs} < z_{em}$

La forêt Ly α peut disparaître

Limit ... Ly- γ Ly- β Lyman- α
912 Å 972 Å 1026 Å 1216 Å



GP= le fossé de
Gunn-Peterson



Forêt et grandes structures

IGM (Inter Galactic Medium) contient la plupart des baryons

- Hiérarchie de structures

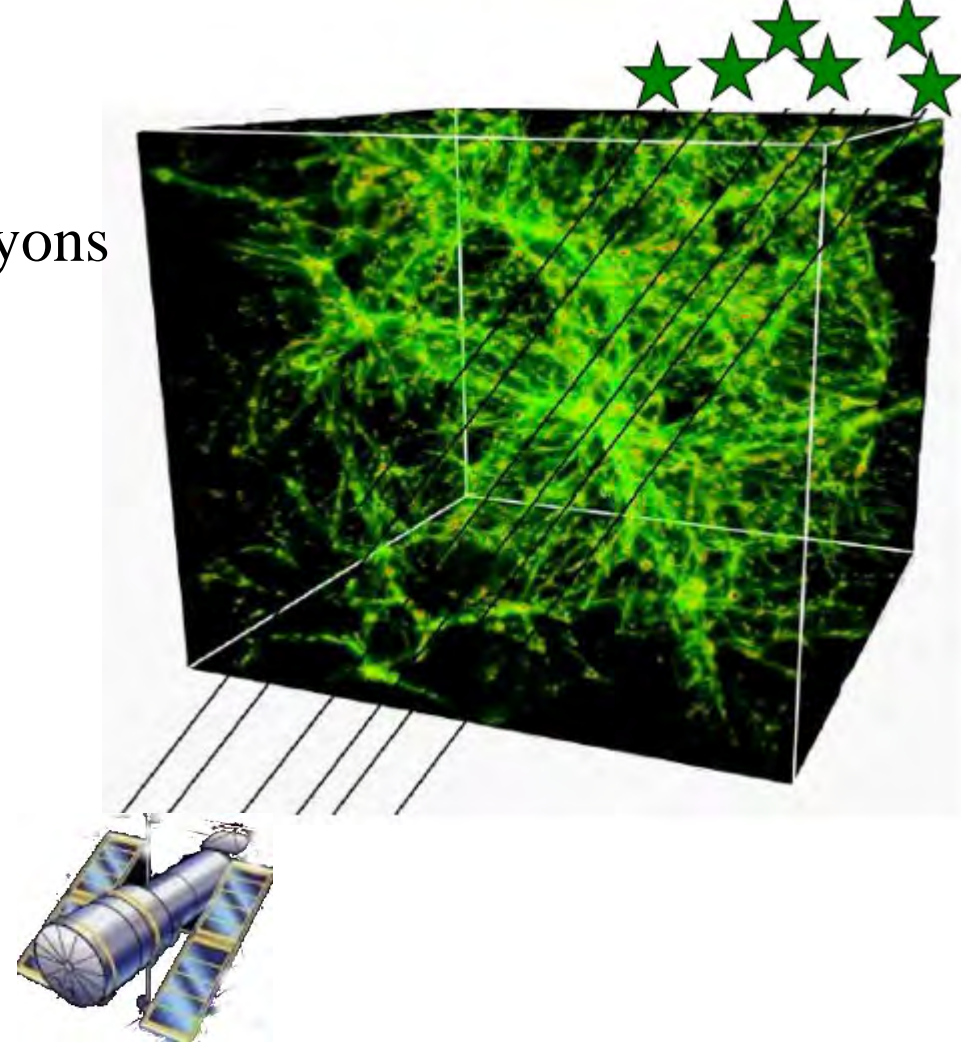
- **Feuilles** pour $N_{\text{HI}} < 10^{14} \text{ cm}^{-2}$
- **Filaments** pour $N_{\text{HI}} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$
- **Nuages** quand $N_{\text{HI}} > 10^{16} \text{ cm}^{-2}$

- Les plus petites raies viennent du gaz froid, mais de faible densité

L'expansion de Hubble domine la largeur des raies

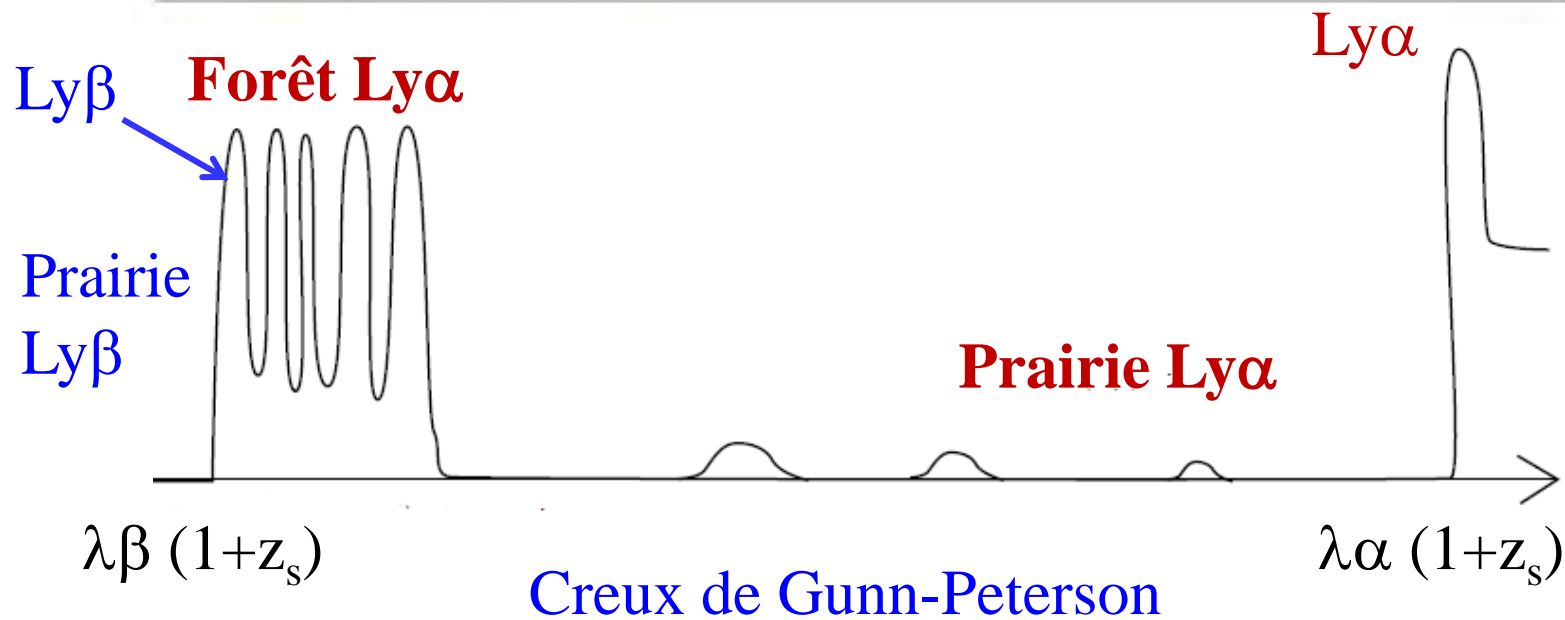
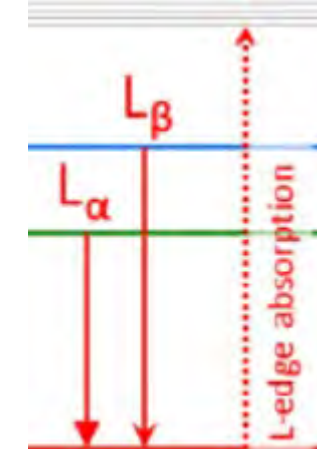
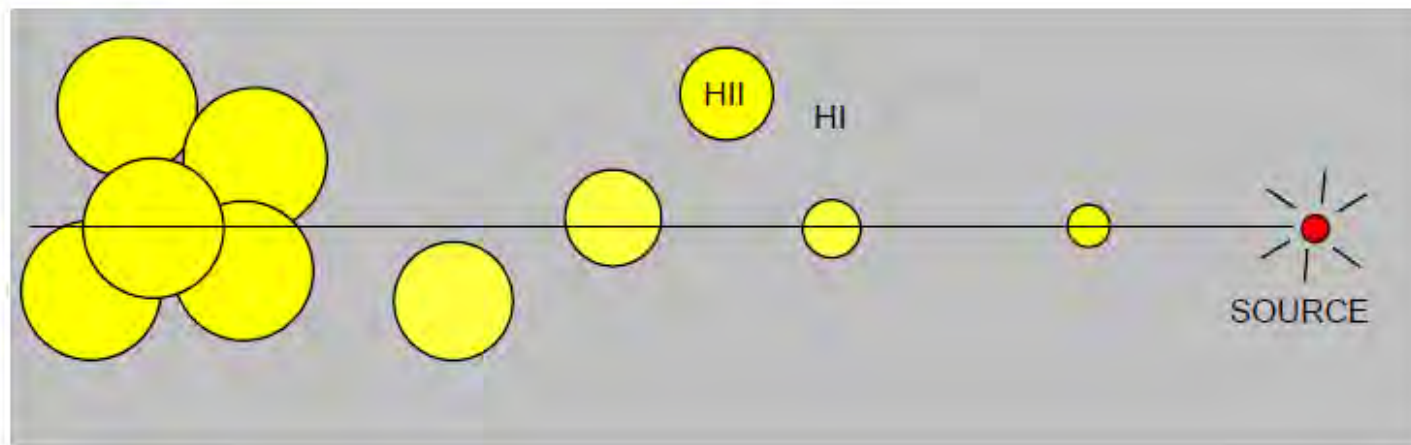
- Les spectres de la forêt Ly α ne dépendent que très peu de la cosmologie (Ω , Λ) ou de l'hydrodynamique (P, T)

→ Très bon accord avec la théorie



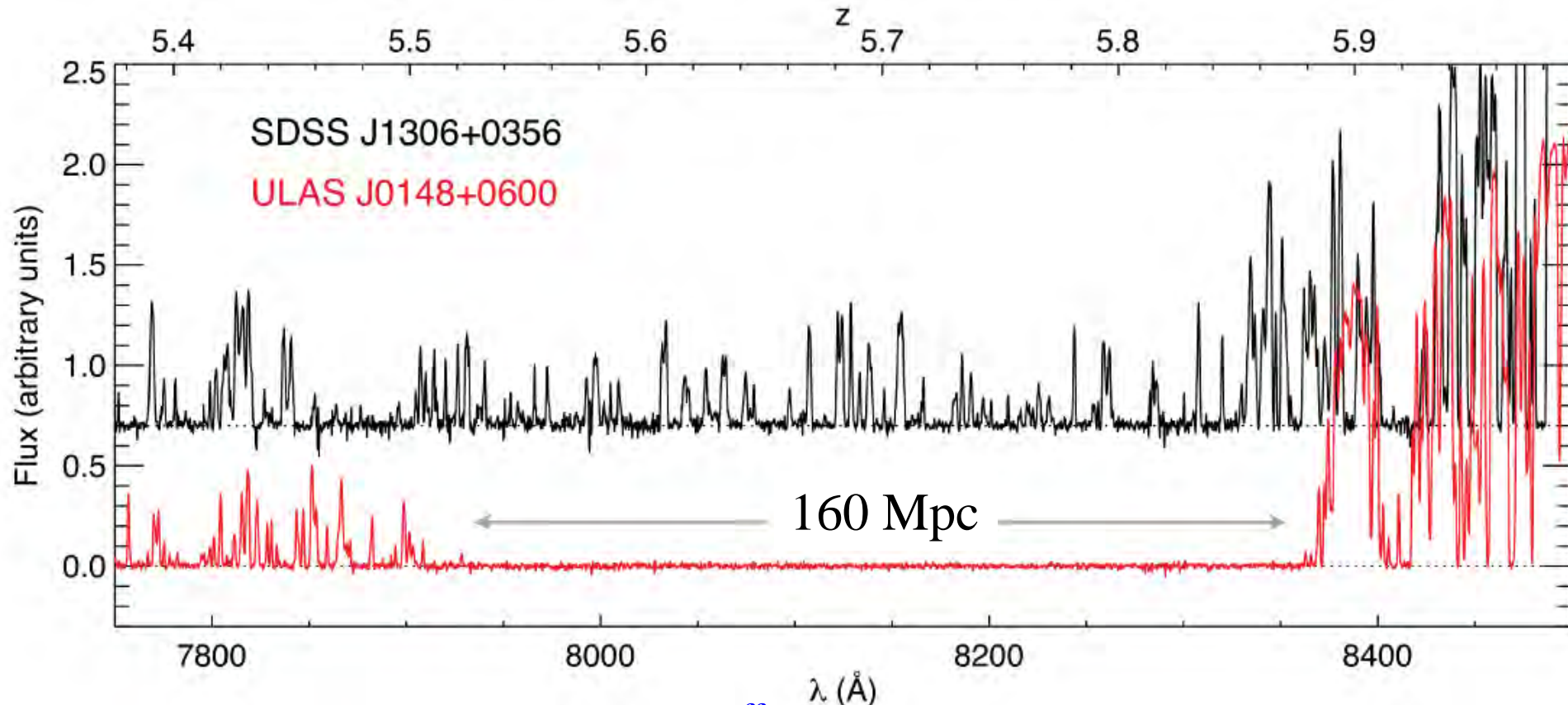
La ré-ionisation est très inhomogène

La forêt devient prairie



Fluctuations spatiales/temporelles

On peut lire l'histoire de la réionisation sur chaque ligne de visée
→ Très différente d'une ligne à une autre, aux mêmes z



Becker et al 2015

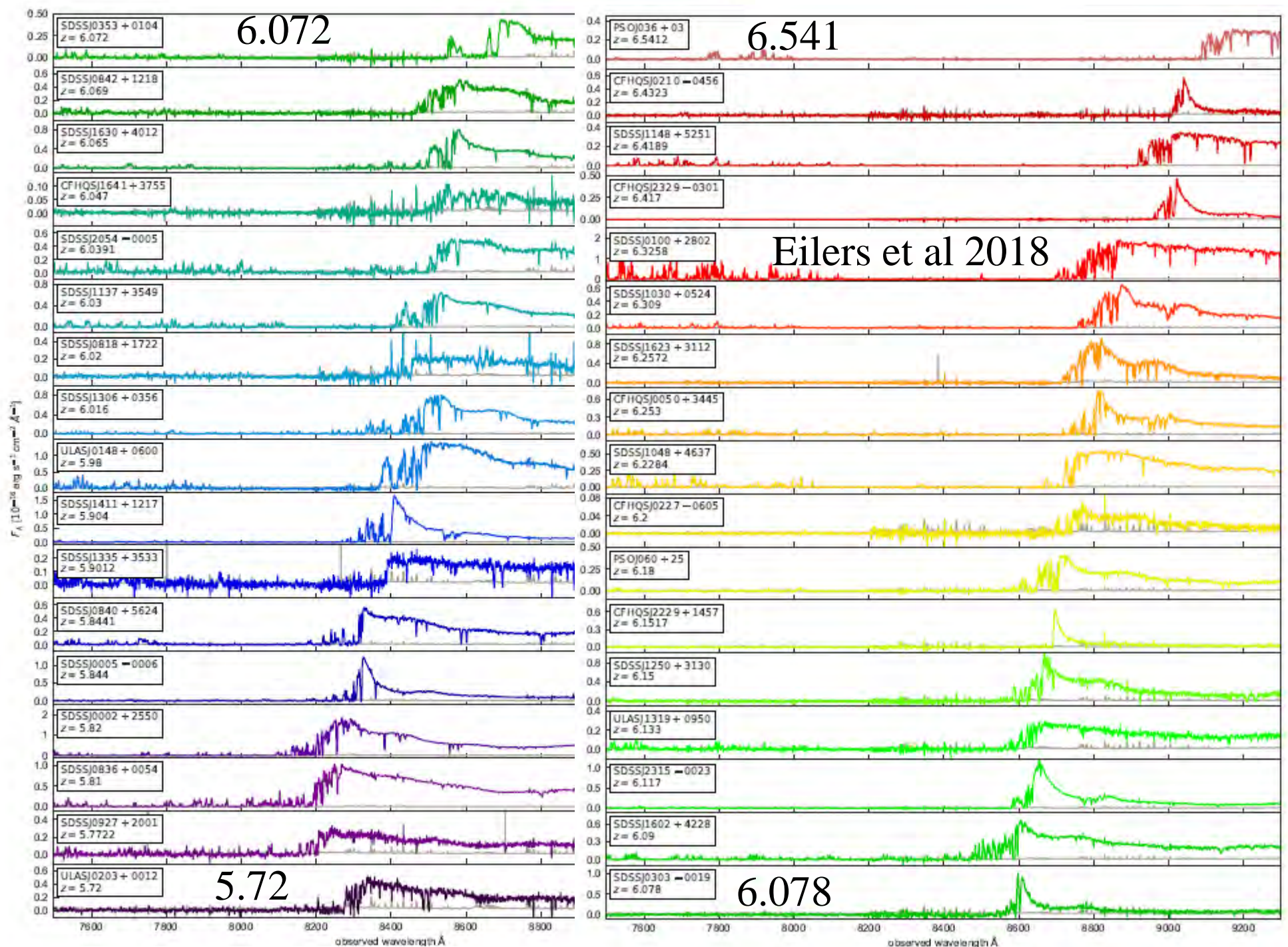
$$\langle F \rangle = \exp^{-\tau_{\text{eff}}}$$

Épaisseur optique efficace τ_{eff} , sur 50 cMpc/h

Profils très
Différents

$z=5.72$ à 6.54

Prairie plus ou
moins fournie



Age sombre -- Aube cosmique -- Epoque de réionisation

Selon la température $T_k(\text{gaz})$

$$T_k \propto (1+z)^2$$

Et la température d'excitation

$$T_{\text{ex}} = T_{\text{spin}}$$

Age sombre: forte densité

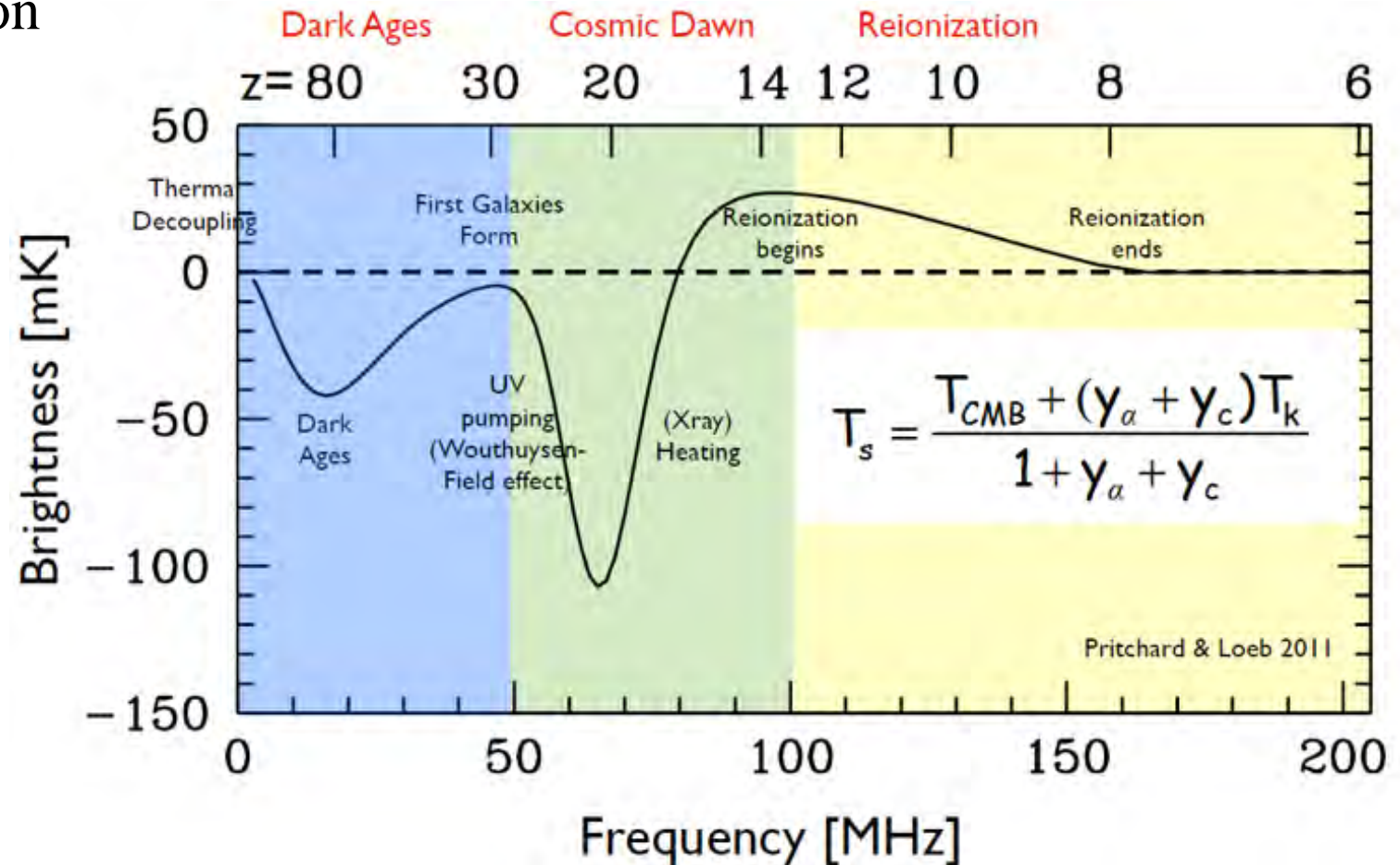
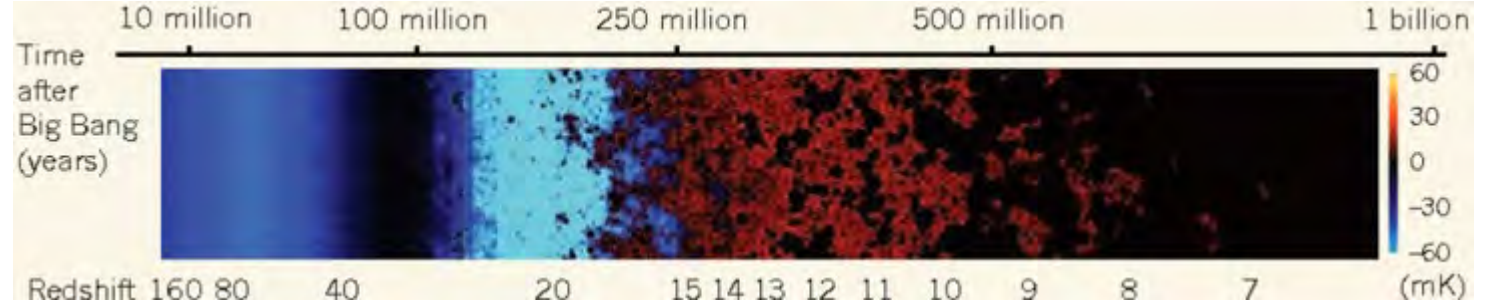
$$T_{\text{ex}} \sim T_k$$

Aube cosmique

Pompage $\text{Ly}\alpha$

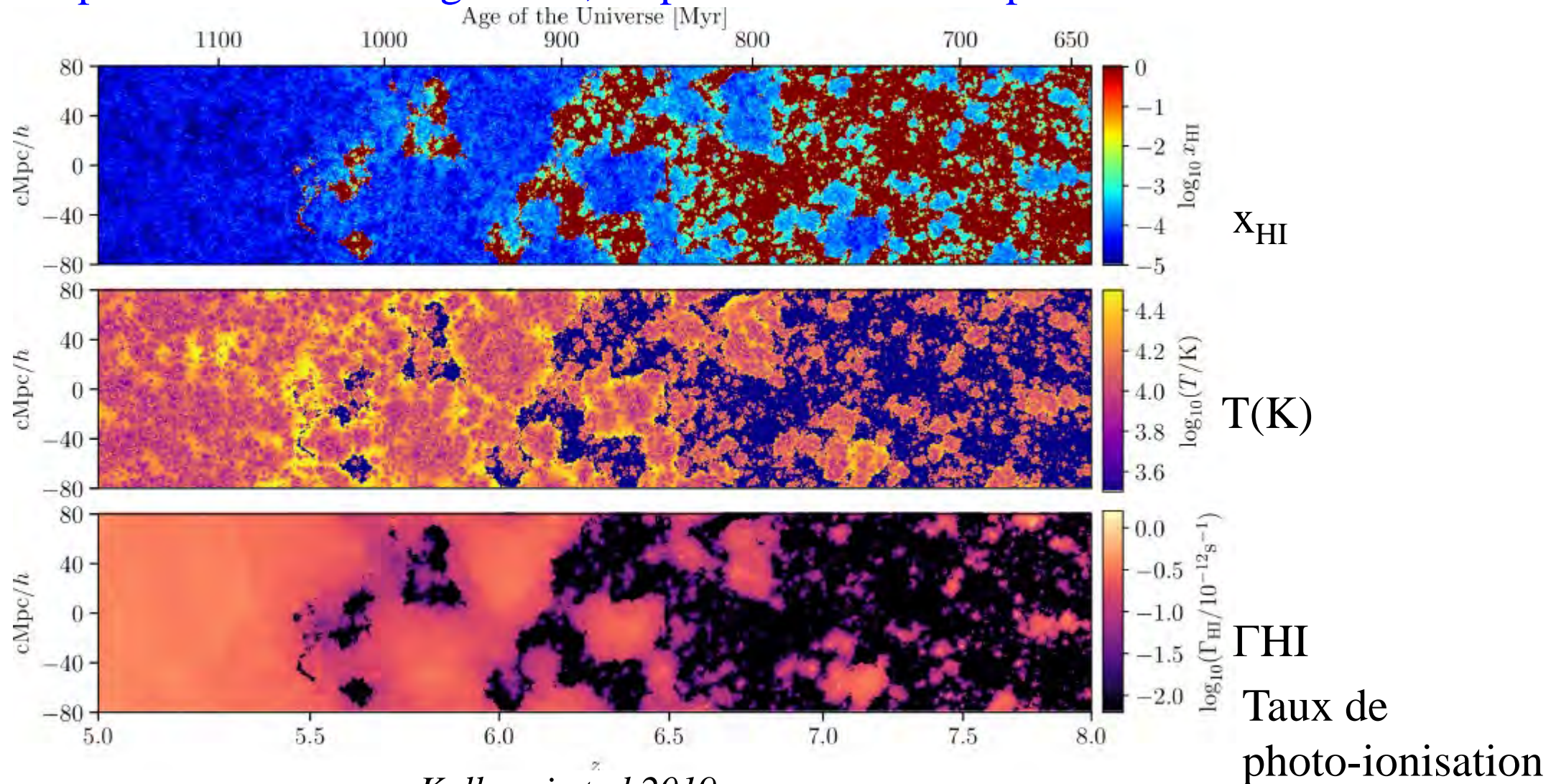
Puis $T_k(\text{gaz})$ augmente

Chauffage des étoiles



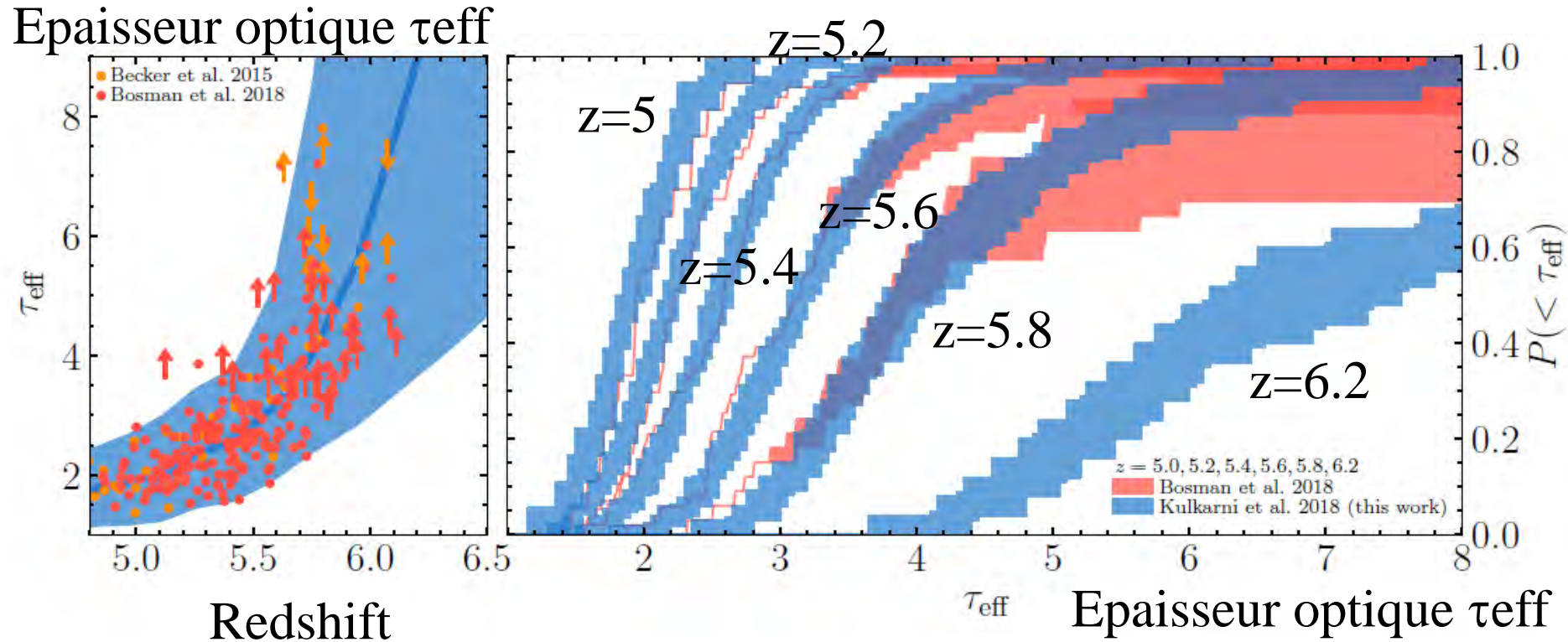
Simulations avec transfert radiatif

Réionisation à moitié à $z=7.5$ et terminée à $z=5.3$, avec des poches de HI assez grandes, responsables de la dispersion de τ_{eff}



Prédictions des absorptions Ly α

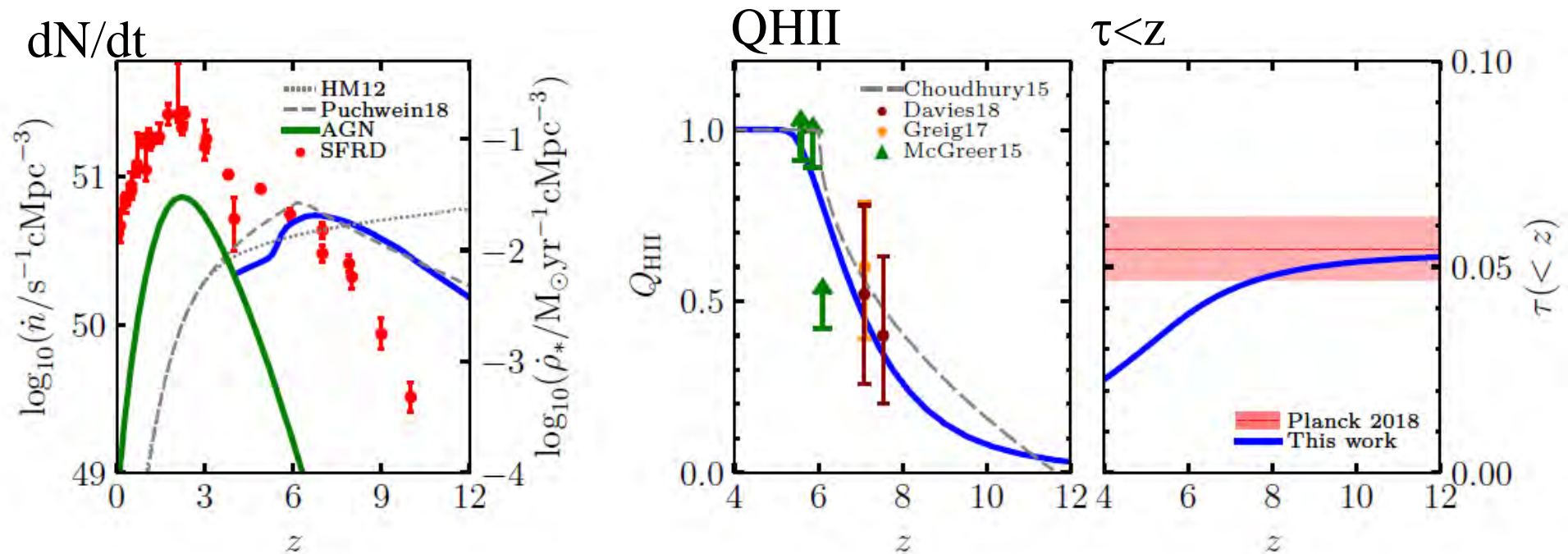
Beaucoup de dispersion dans les spectres de quasars
et les taux d'absorption Ly α



Bleu=modèle Rouge=data

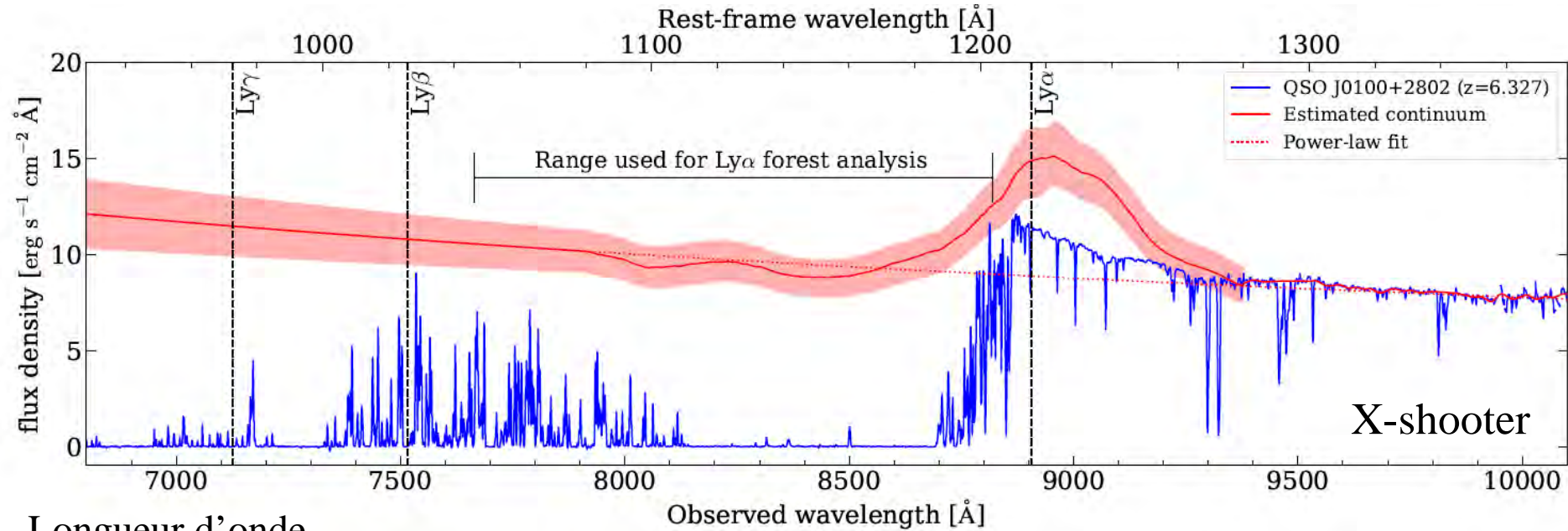
Les observations donnent le SFR ionisant

Simulations, avec le taux de formation d'étoiles SFRD + AGN
Nécessaires pour rendre compte des Quasars et de la forêt Ly α
+ émetteurs Ly α + épaisseur optique de Planck



Émissivité ionisante HM12 (*Haardt & Madau 12*), SFR *Oesch 2014,18*
Fraction ionisée QHII (à $z=7$, disparition des émetteurs Ly α)

EIGER: 117 émetteurs [OIII] avec le JWST



Longueur d'onde

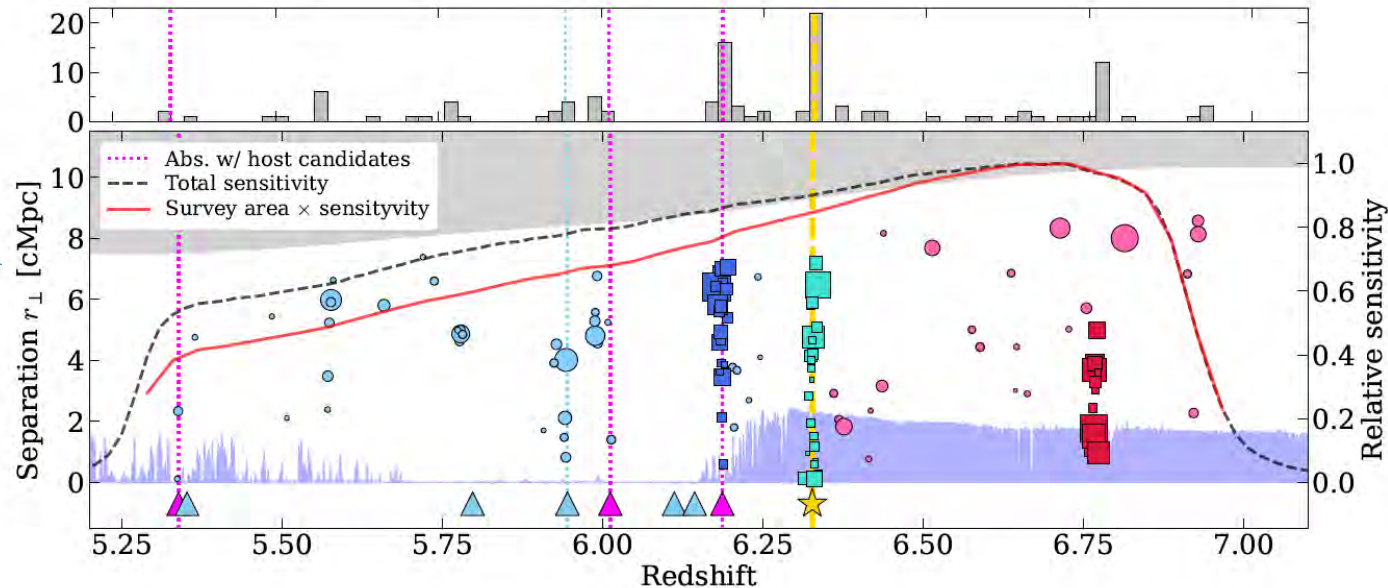
QSO J0100+2802

à z=6.327

117 émetteurs [OIII]

5.33 < z < 6.93

3 sur-densités de galaxies [OIII]



Absorption

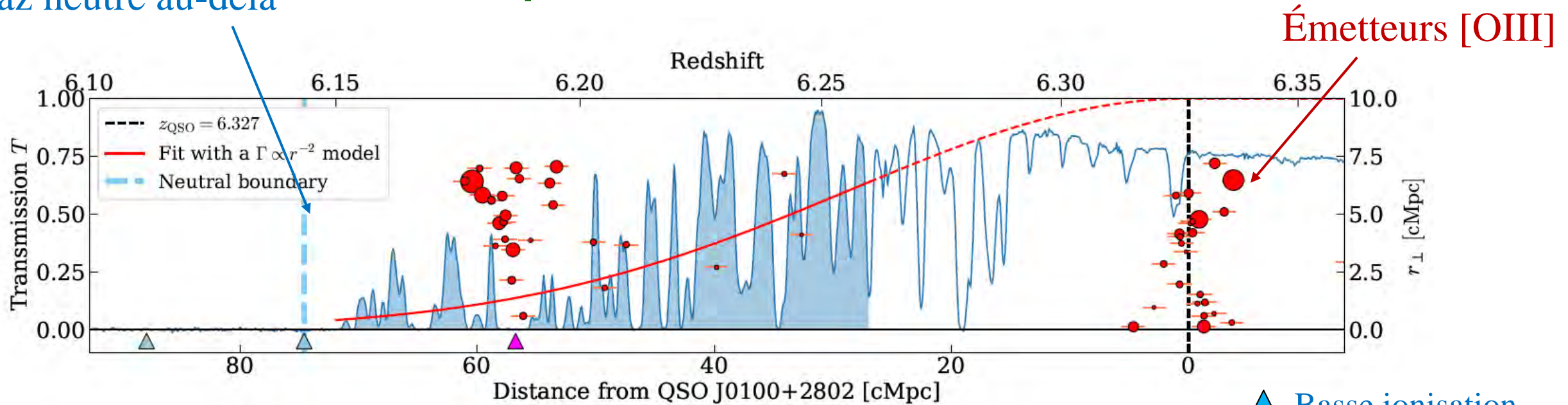
Jusqu'à 200kpc

du QSO

Kashino et al 2022

Absorption dans des surdensités

Gaz neutre au-delà



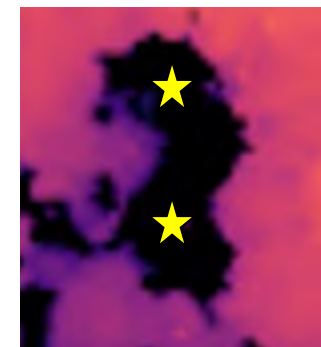
Autour du QSO $z=6.327$, surdensité de 24 galaxies

Une autre à $z=6.18$, et une autre derrière à $z=6.78$

Raies d'absorption métalliques, associées à des surdensités

Transmission $\text{Ly}\alpha$ et $\text{Ly}\beta$, et comportement près des galaxies?

→ A bas z , non monotone, comme à plus haut z



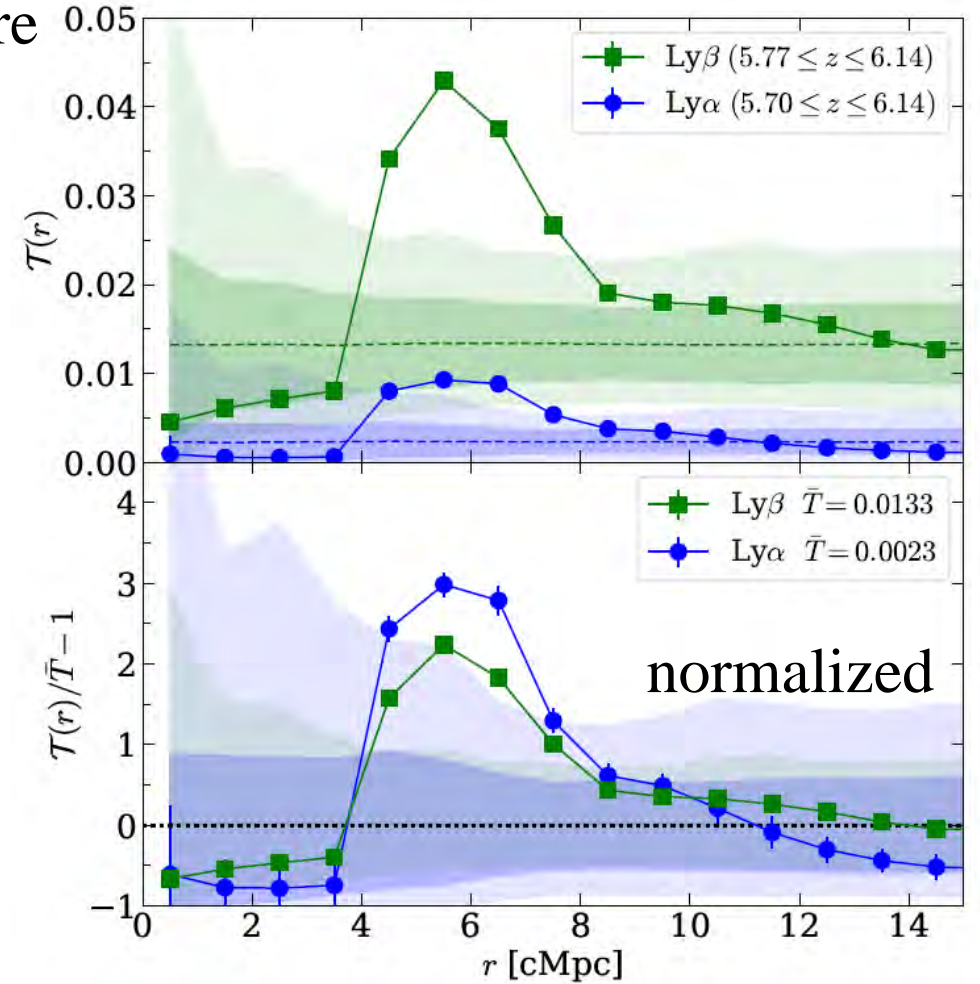
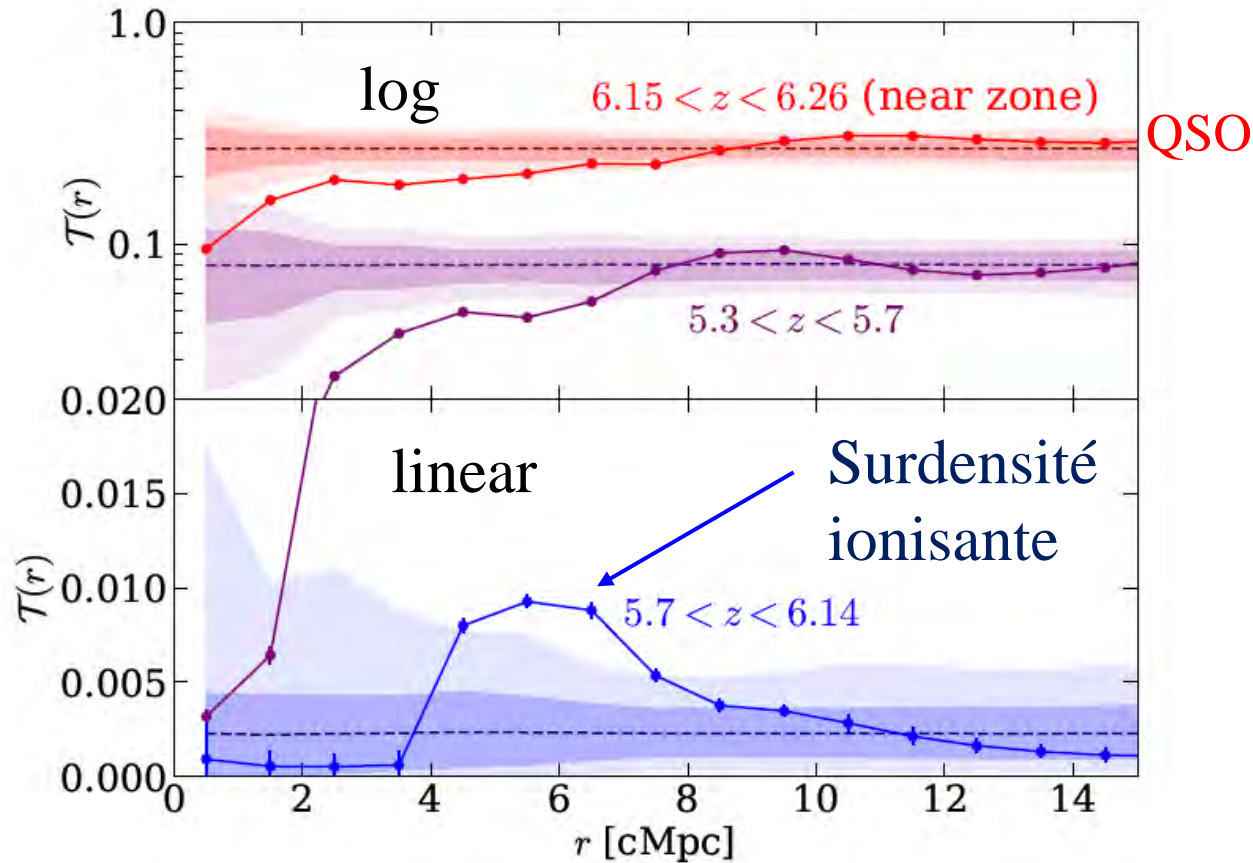
neutre

Absorption en fonction de la distance

A bas z , milieu plus neutre autour des galaxies, puis IGM ionisé, comme $z=0$

A plus haut z , c'est le contraire, IGM ionisé, puis neutre

Près des galaxies/QSO



$T(r)$ Transmission $\text{Ly}\alpha$, versus distance à émetteur [OIII]

Kashino et al 2022

Comparaison avec simulation

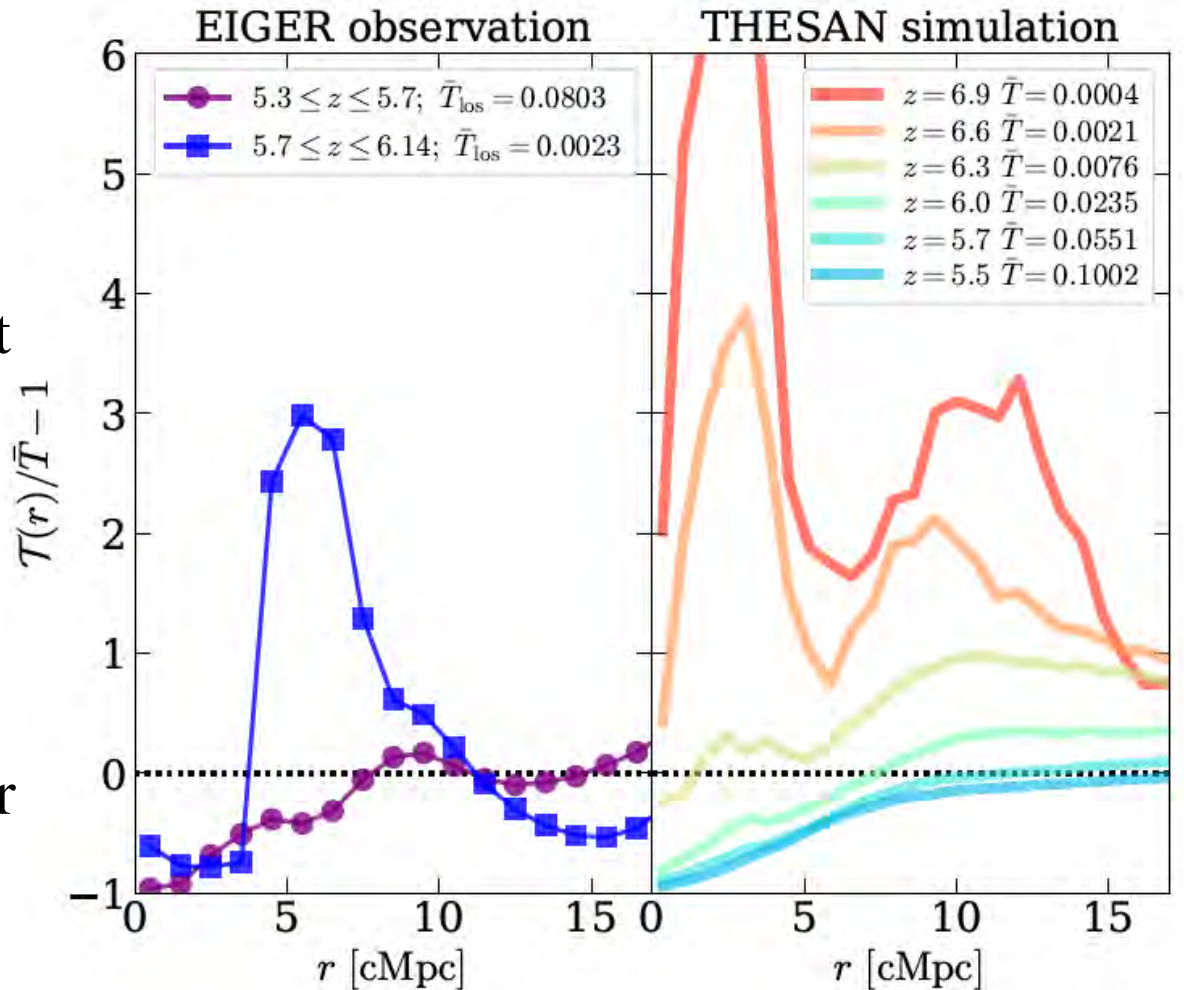
Il y a bien des poches d'ionisation
autour des émetteurs [OIII] (galaxies SF)

La normalisation de la transmission permet
d'éliminer les contaminants

Le pic de la transmission a pour largeur
5cMpc, influence des galaxies ionisantes

THESAN corrobore ces ordres de grandeur

→ JWST permet de découvrir les galaxies
ionisantes



THESAN-HR $m_b = 10^4 M_\odot$

Borrow et al 2022

Réionisation- galaxies primordiales

Moyens d'observation

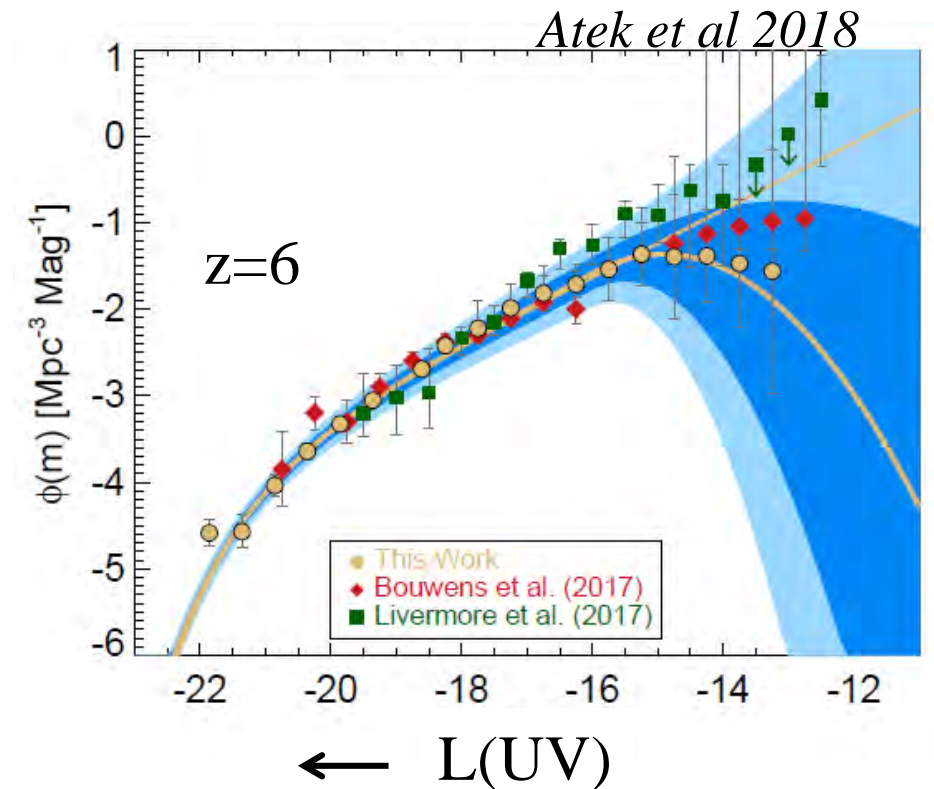
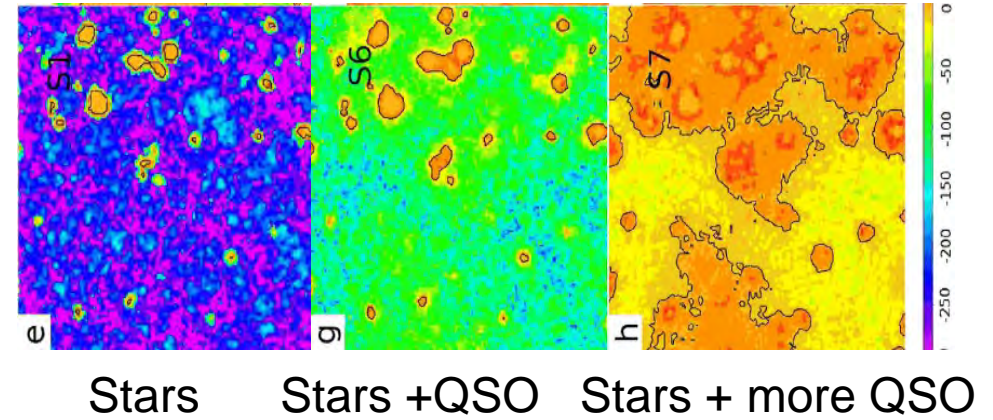
(1) Les **quasars** à grand z et leur émission $\text{Ly}\alpha$
(+absorption, prairie et forêt)

(2) La technique de la cassure Lyman (**LBG**)
permet de tracer la fonction de luminosité versus z

(3) Les émetteurs $\text{Ly}\alpha$, **LAE**

(4) **ALMA**: les raies de **CO**, **[CII]**

→ A grand z : lentilles gravitationnelles



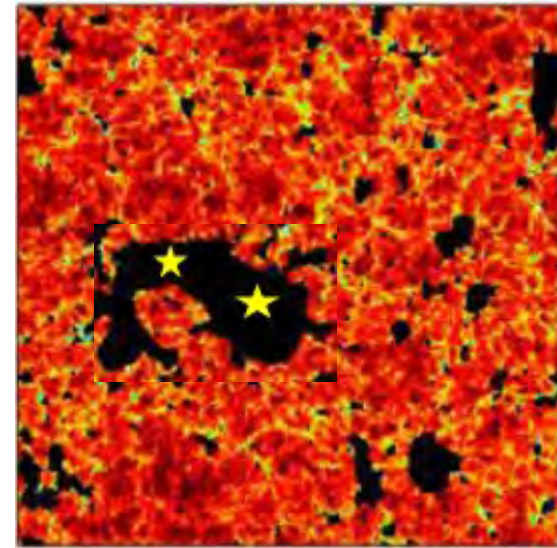
Effet de proximité des quasars

Les quasars puissants ionisent jusqu'à 80Mpc!

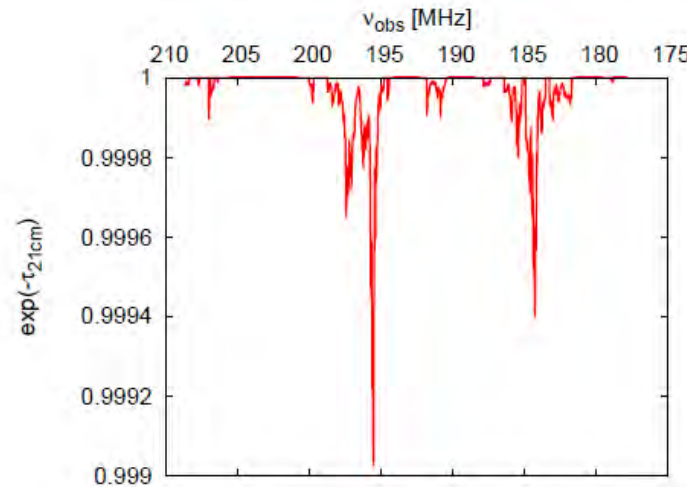
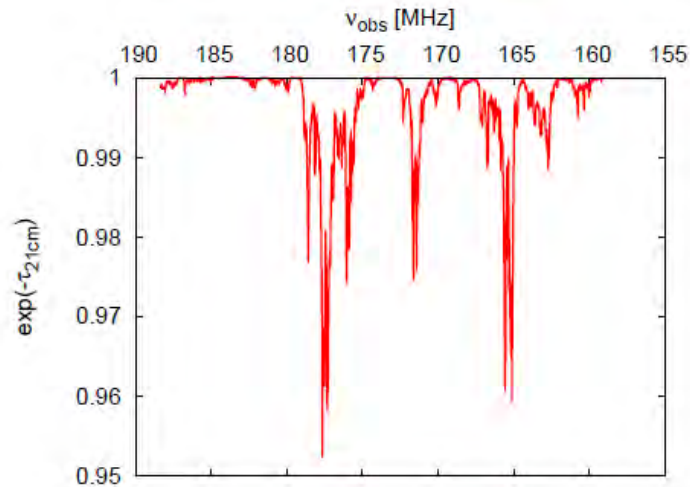
→ Favorisent l'échappement des photons Ly α

Exemple de J0836+0054 à $z = 5.802$

3 LAE observées dans la bulle, derrière le QSO
à 300-800kpc



Avec SKA, détection de la forêt à 21cm



$\langle \tau_{21\text{cm}} \rangle \sim 0.05$ à $z=7.9$, et ~ 0.001 à $z=7$

Micro-quasars

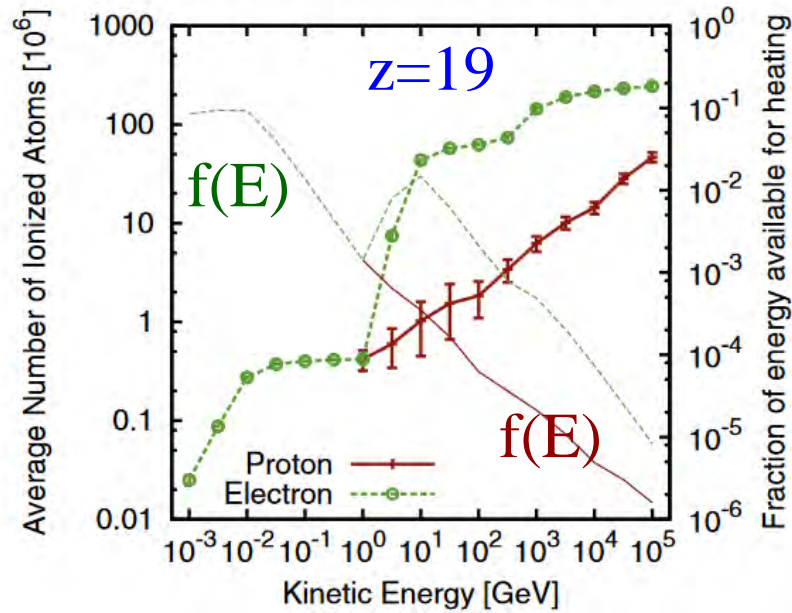
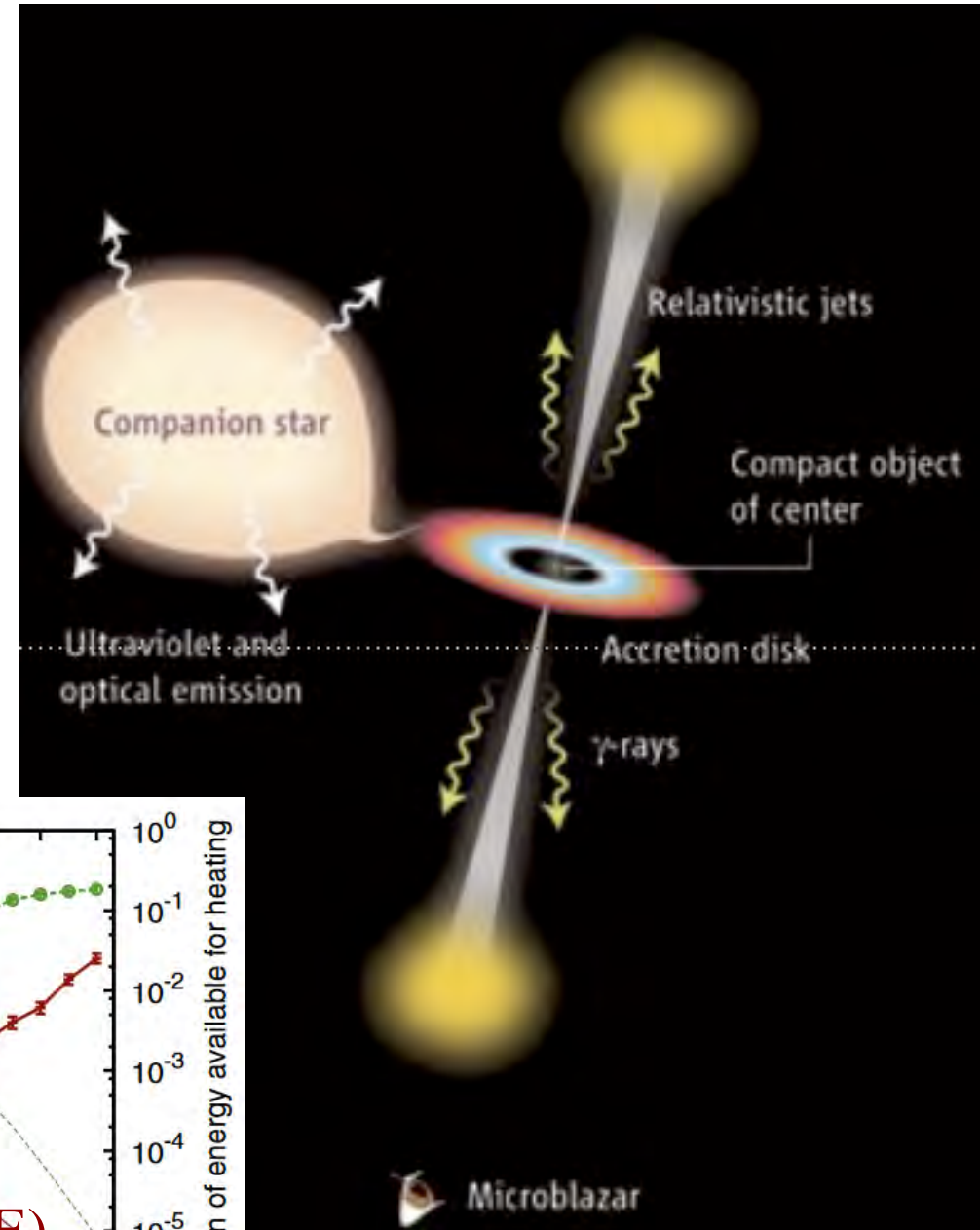
Des binaires X de haute masse (HMXB)
Un trou noir + une étoile compagnon
Fournissant du gaz \rightarrow disque d'accrétion

Les rayons X vont chauffer le gaz
En pénétrant bien plus loin que les photons Ly

Rayons cosmiques émis par
les micro-quasars

Contribuent à la réionisation?
Mirabel et al 2011, Tuores et al 2014

PopIII \rightarrow GRB \rightarrow rayons cosmiques



Les pois verts (Green Peas)

Certaines galaxies compactes sont des analogues des galaxies à grand z , de l'époque de réionisation:

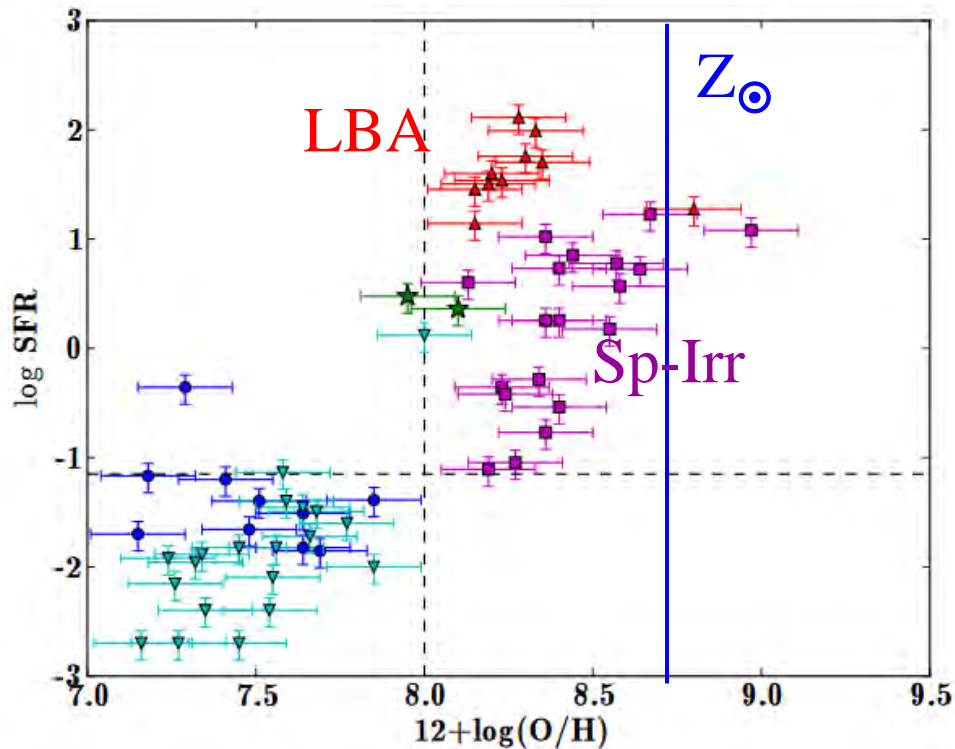
Forte SFR, faible métallicité

Couleur verte due à $[\text{OIII}]\lambda 5007\text{\AA}$, $f_{\text{esc}} \sim 10\%$ (outflow)

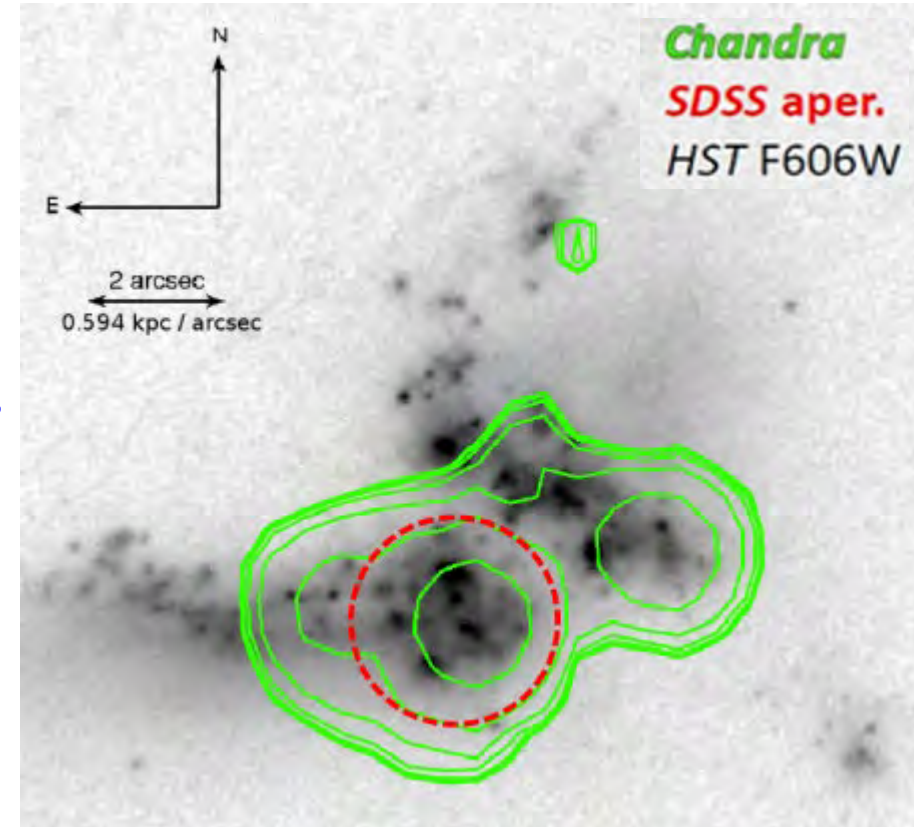
Rayons X dus aux binaires X de forte masse (HMXB)



SDSS



Les HMXB sont
10x plus abondantes
par u de masse
à faible métallicité
Douna et al 2015



Brorby & Kaaret 2017

Fraction de rayons UV qui s'échappent f_{esc}

Pour savoir quand se fait la ré-ionisation et avec quels objets (**étoiles ou quasars**), il faut connaître la fraction d'UV ionisants ($h\nu > 13.6 \text{ eV}$ ou $\lambda < 912 \text{ \AA}$) qui peuvent s'échapper = f_{esc}

→ difficile dans les simulations,

$3\% < f_{\text{esc}} < 80\%$

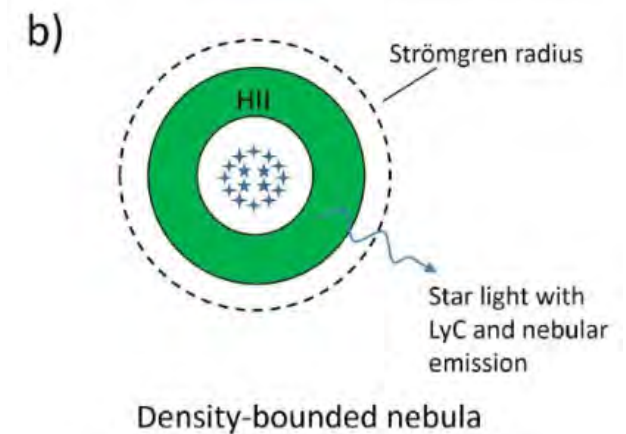
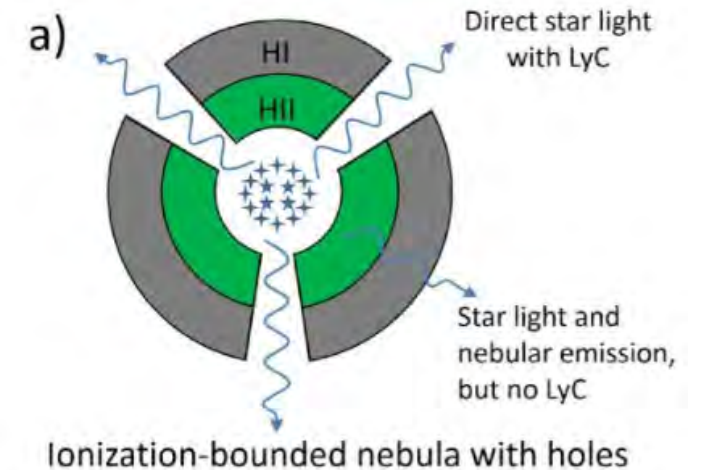
Galaxies primordiales non résolues!

→ Observations des analogues à $z=0$

Green Peas: galaxies compactes

→ Observations de f_{esc} à grand redshift?

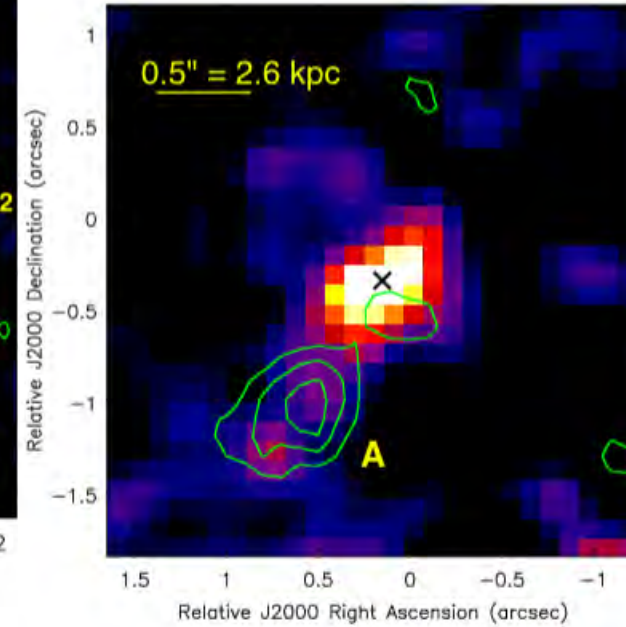
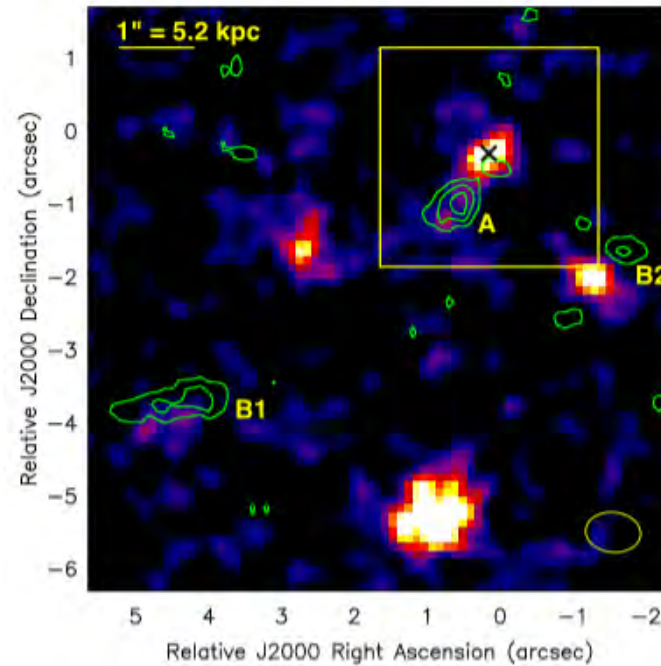
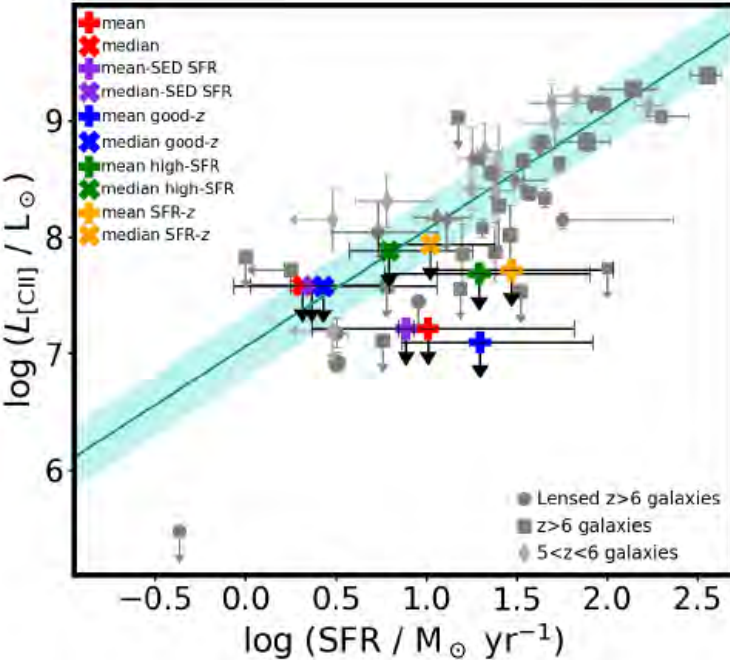
très peu d'objets



Galaxies pendant la réionisation

Raie CII dans les galaxies LBG à $z=6.8-7.1$, avec ALMA (1.3mm)

SFR = 5-15 M_{\odot}/yr



Contours CII
Offset par
Rapport à
l'optique
 $\text{Ly}\alpha/\text{UV}$
de 4kpc
Feedback?
Pas de FIR
faible Z?

Maiolino et al 2015

Recherche sur les galaxies moins massives, SFR $\sim 1-10 M_{\odot}/\text{yr}$

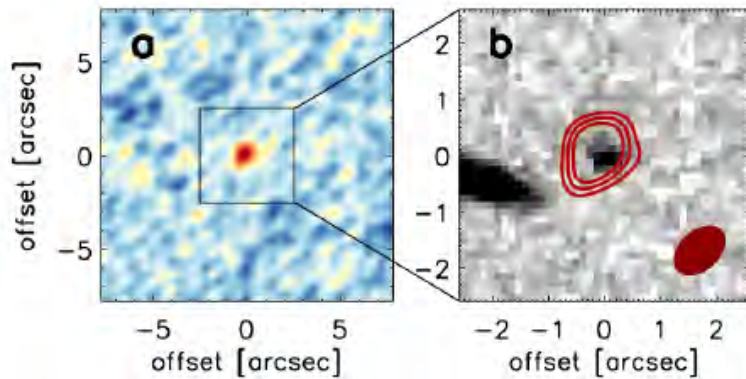
Non détection, compatibles avec $L(\text{[CII]}) - \text{SFR}$ (*Jolly et al 2021*)

Détection par [CII] à grand z

Premières tentatives avec les galaxies Ly α infructueuses (Himiko)

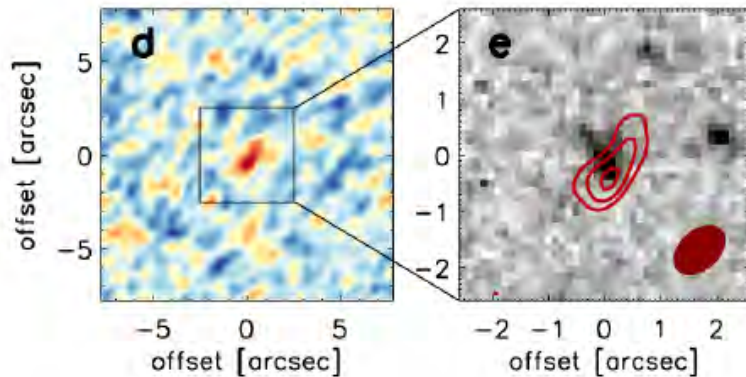
Galaxies sélectionnées en infrarouge $\rightarrow z=6.81-6.85$

Plus de poussière, de métallicité

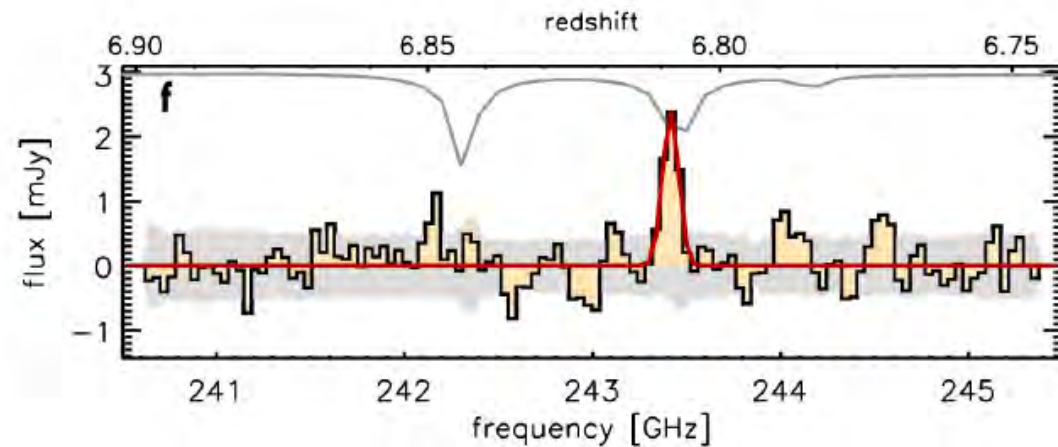
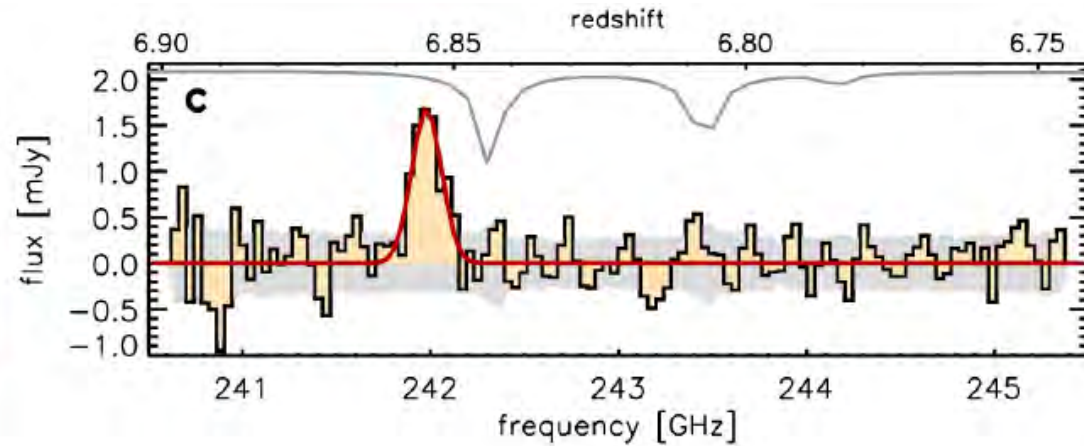


ALMA 240GHz

HST



Lobe $\sim 1''$



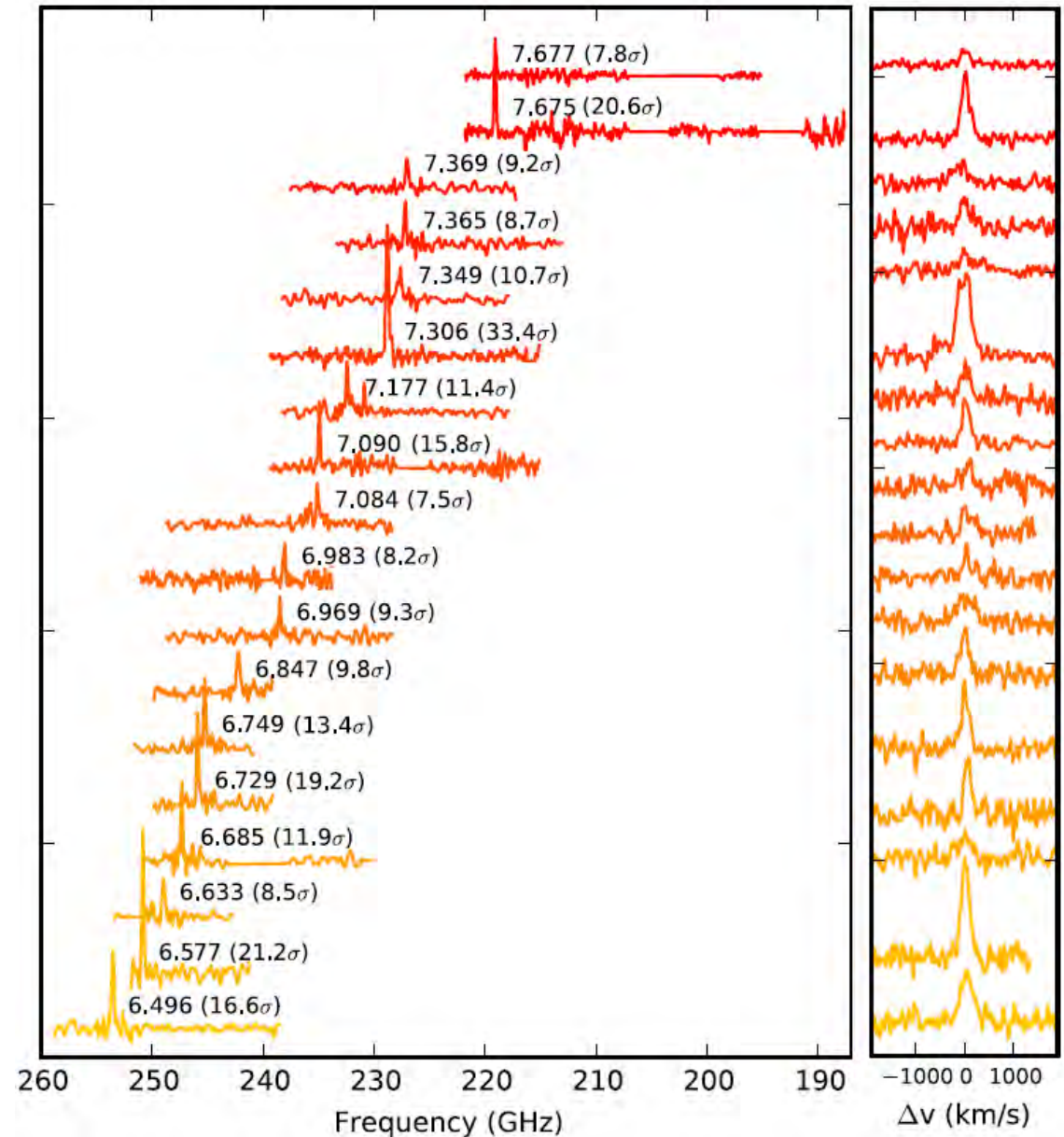
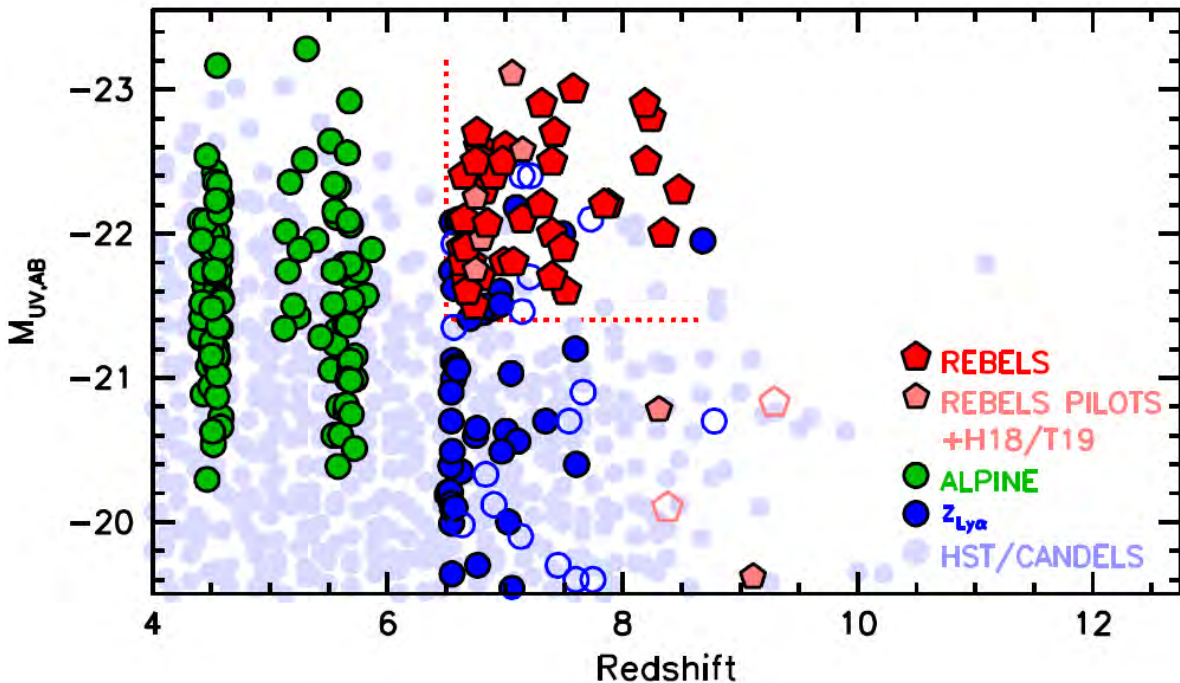
ALMA trouve les redshifts $z > 6.5$

REBELS : 40 sources sélectionnées en UV

Raies de [C II]158 μm and [O III]88 μm

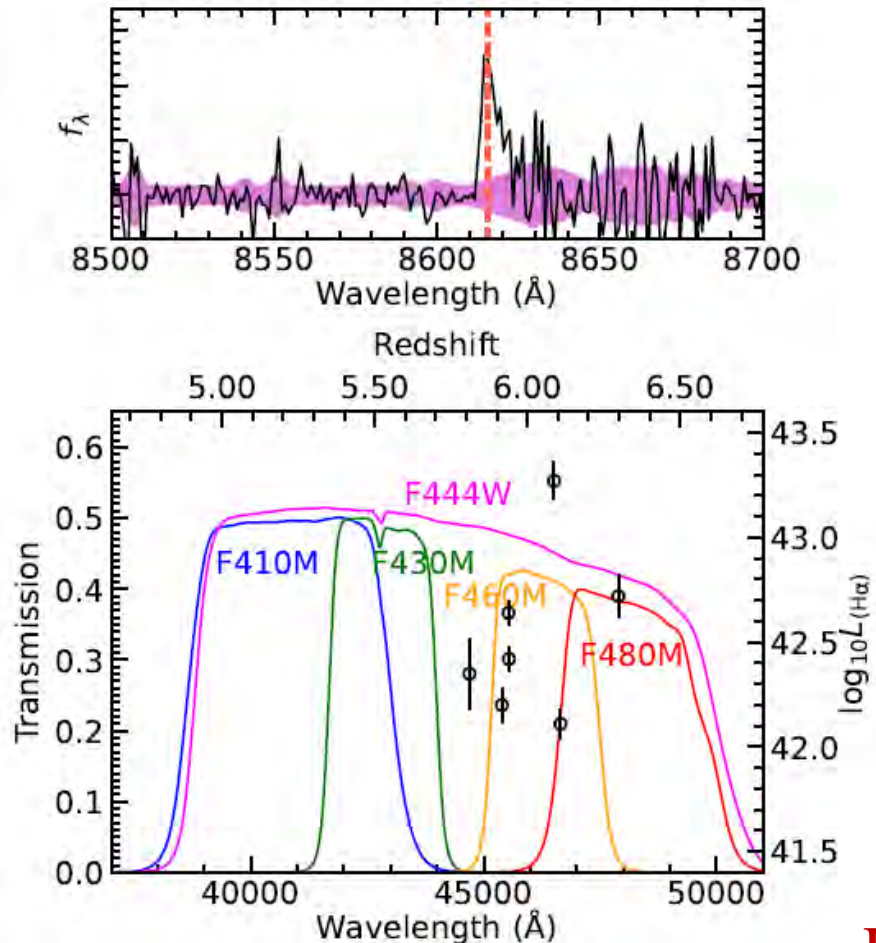
+ continuum émis par la poussière

→ 56% taux de détection

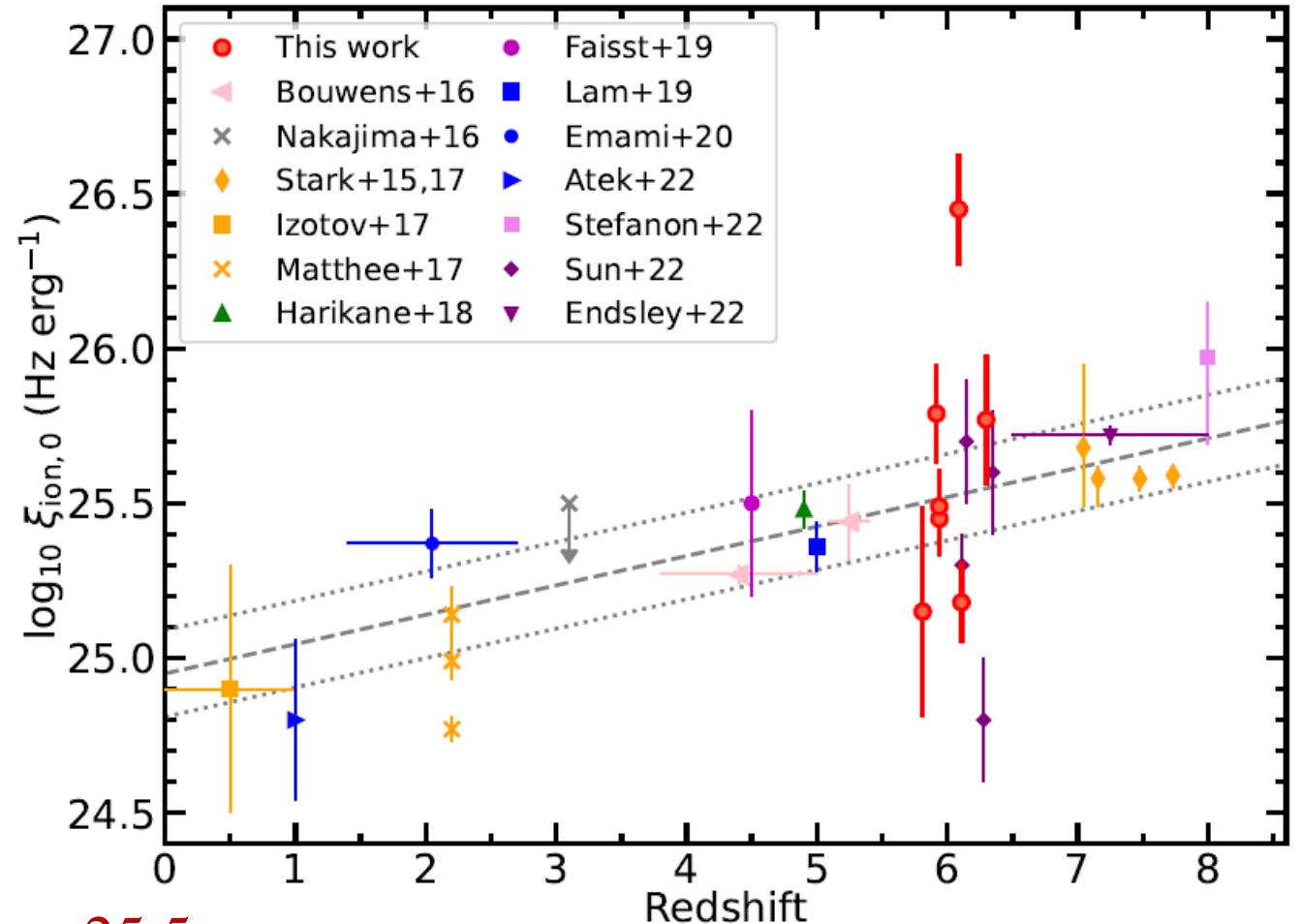


Raies H α des émetteurs Ly α z=6 avec JWST

Plusieurs galaxies émetteurs Ly α à z~6 montrent des LAE capables de réioniser fesc plus grand pour une pente UV β plus bleue



Spectroscopic confirmation



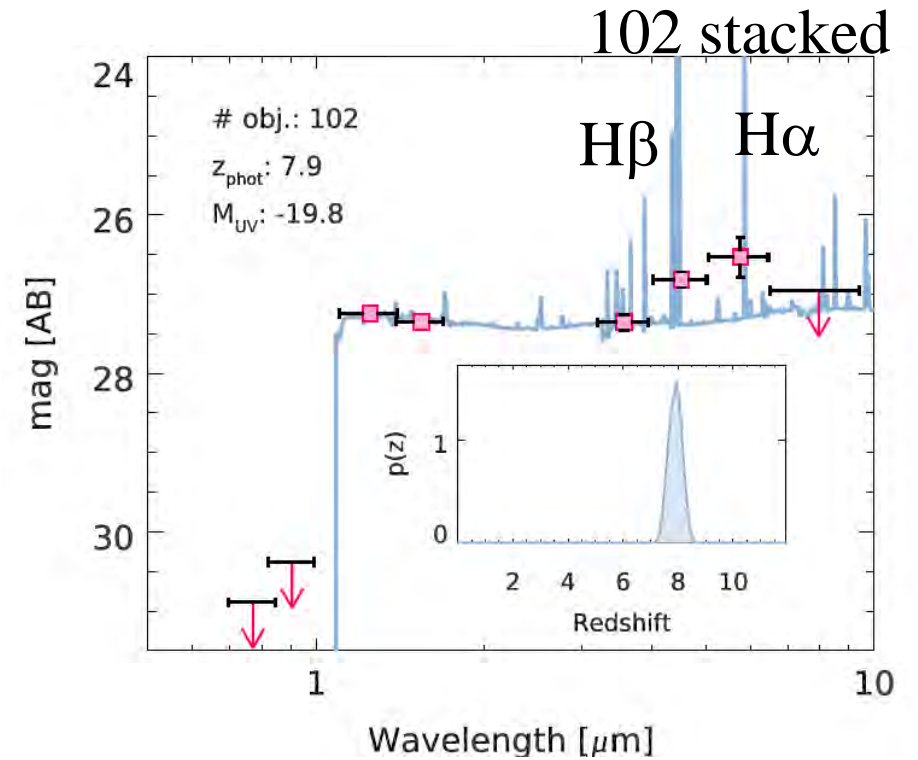
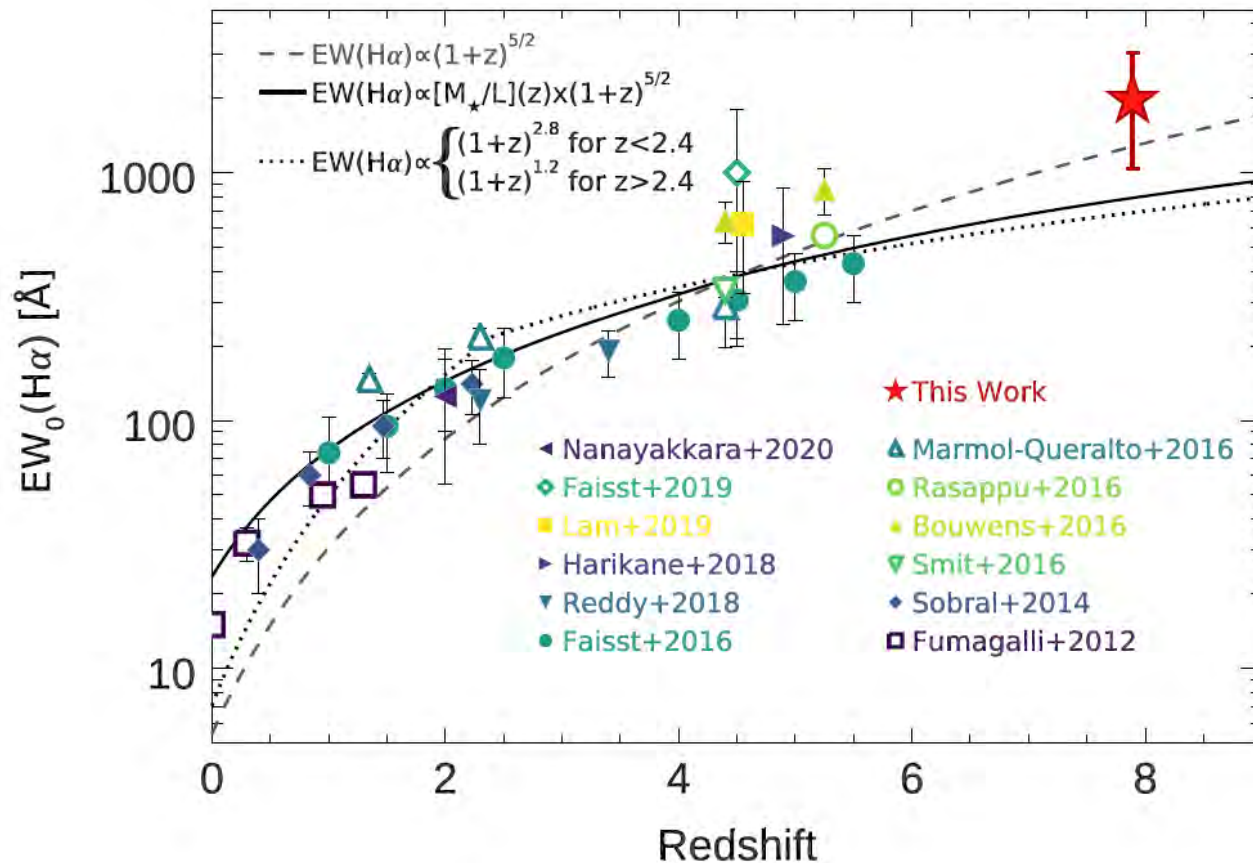
$\text{Log } \xi_{\text{ion}} = 25.5$

$f_{\text{esc}} < 25\%$ suffisante

Ning et al 2022

H α + [NII] des émetteurs Ly α z=8

Forte largeur équivalente (EW) de H α + [NII], il suffit de $f_{\text{esc}} < 0.3$ ($M(\text{UV}) < -18$) pour que les émetteurs Ly α puissent réioniser l'Univers (avec Spitzer/IRAC 4.5, 5.8 μm)



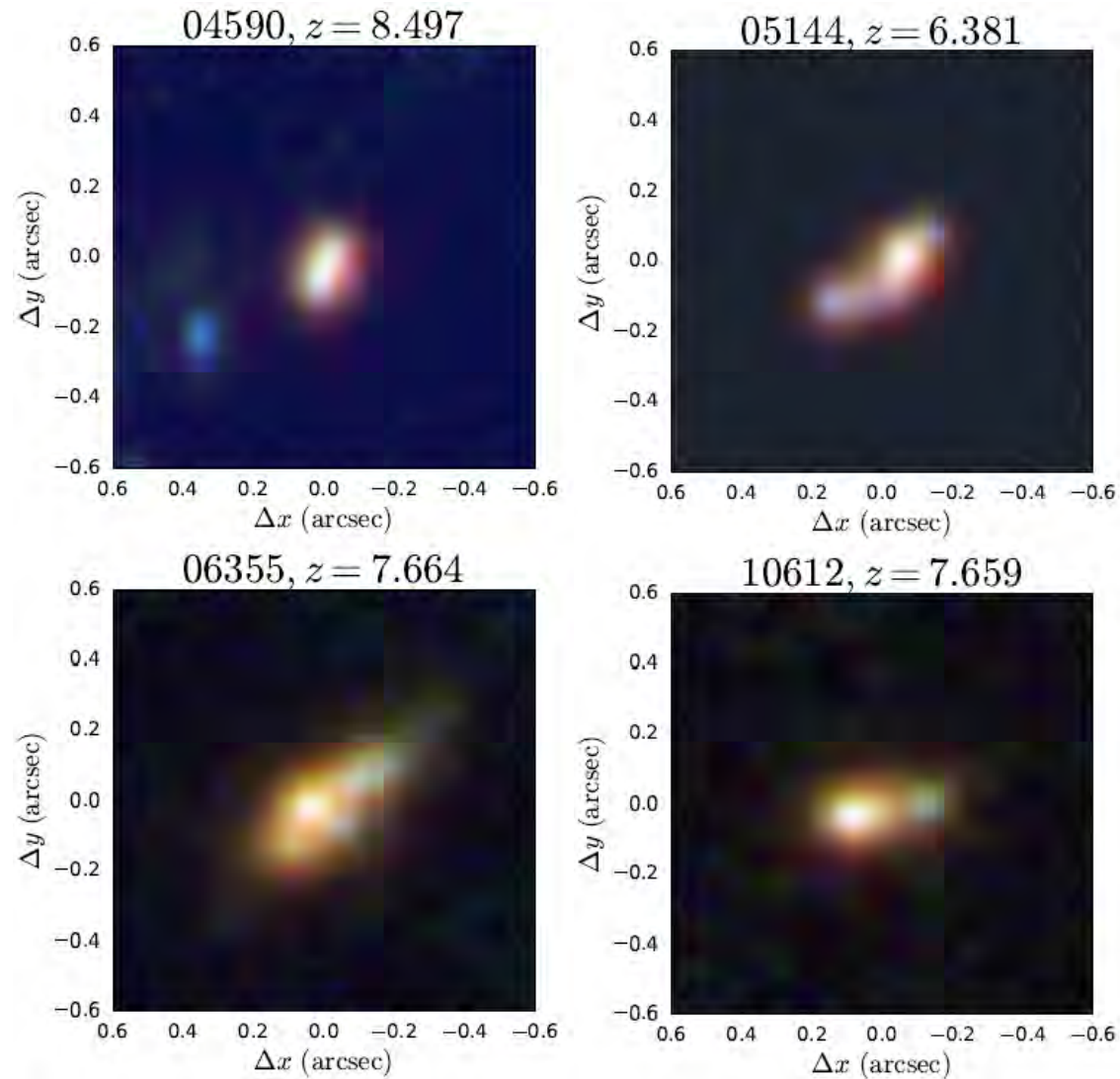
$\text{Log } \xi_{\text{ion}} = 25.97$

$f_{\text{esc}} < 10\%$ suffisant pour $M(\text{UV}) < -13$

Stefanon et al 2022

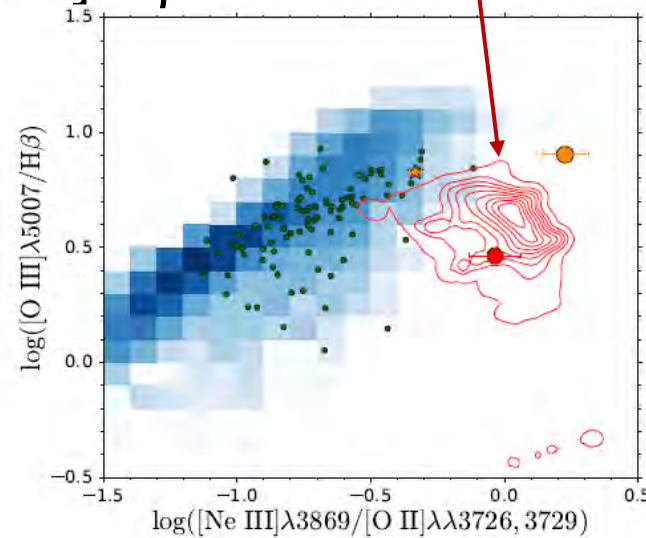
[OIII], H β z=6-8, avec JWST

4 objets dans SMACS 0723

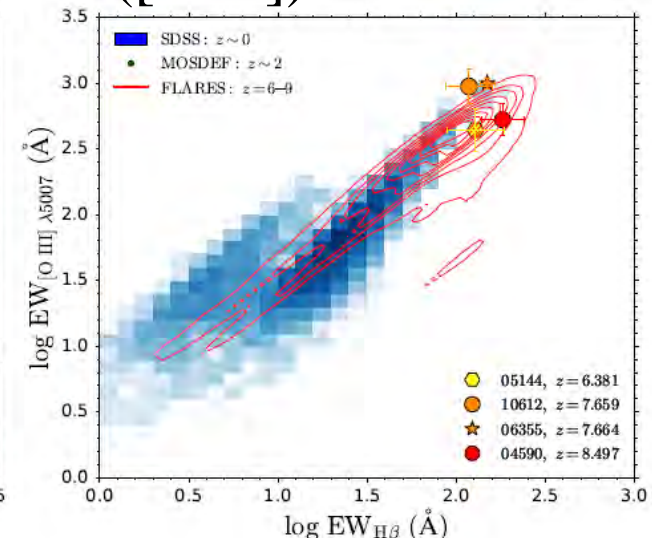


Prédictions FLARES

[OIII]/H β



EW([OIII])



[NeIII]/[OII]

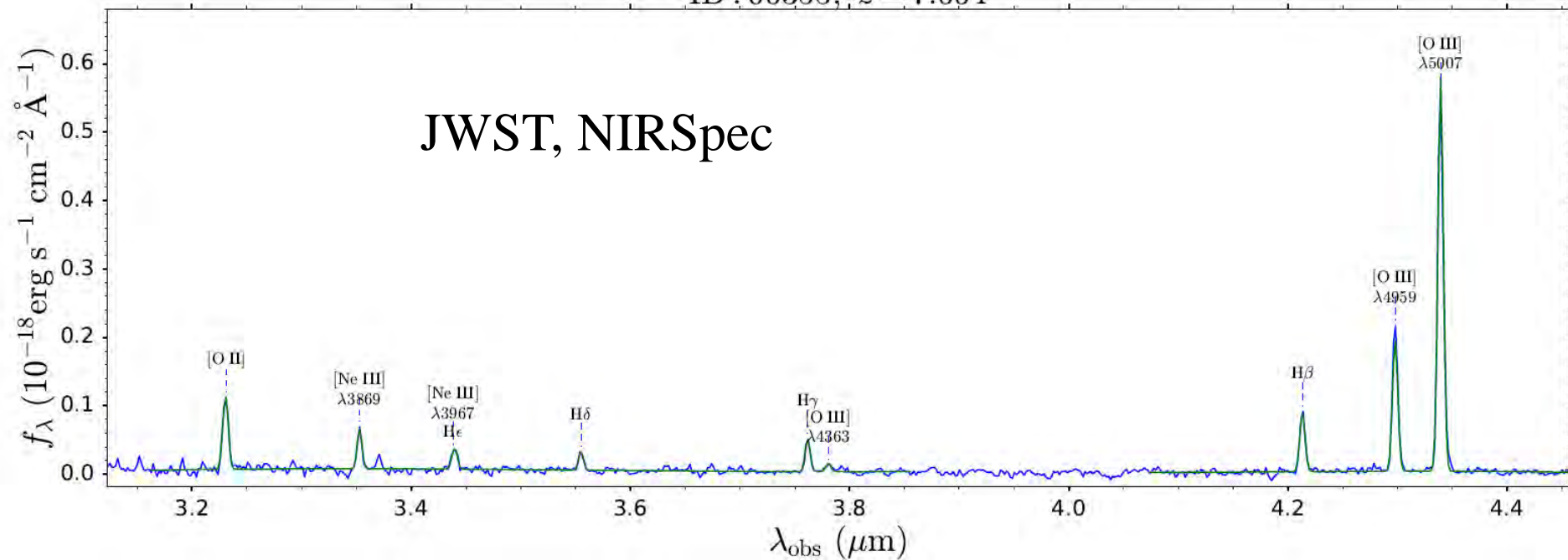
EW(H β)

Le rapport [NeIII]/[OII] est très différent de $z=0$,
Mais correspond aux prédictions des simulations
FLARES

[O III], H β
z=6-8

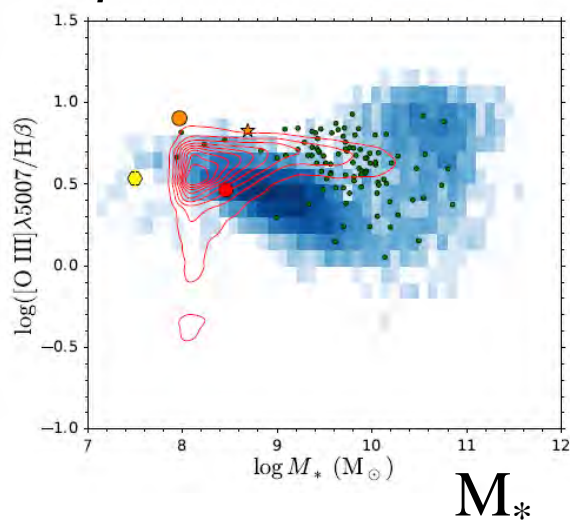
SFR très haut, et
fortes EW

[Ne III]/[O II] élevé
dû à faible Z

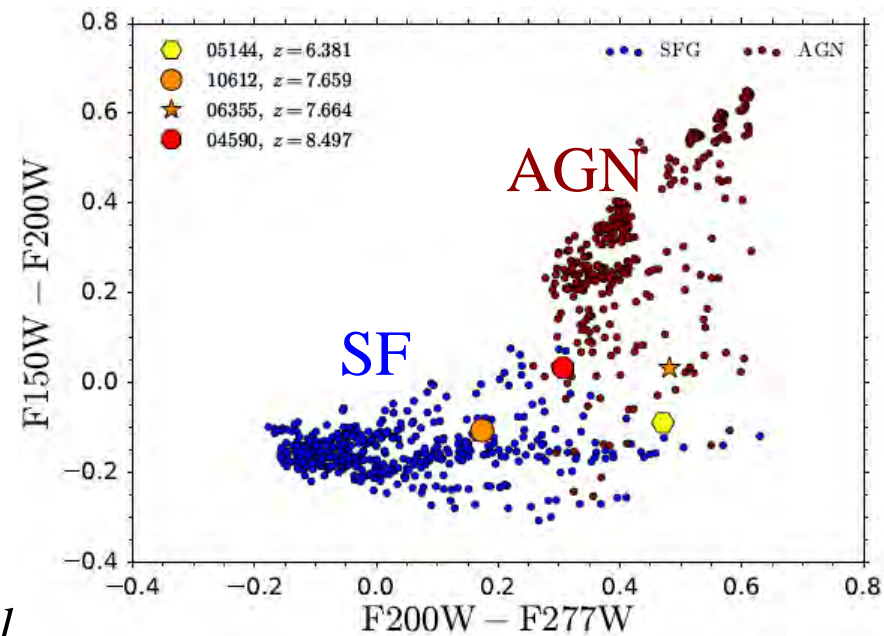
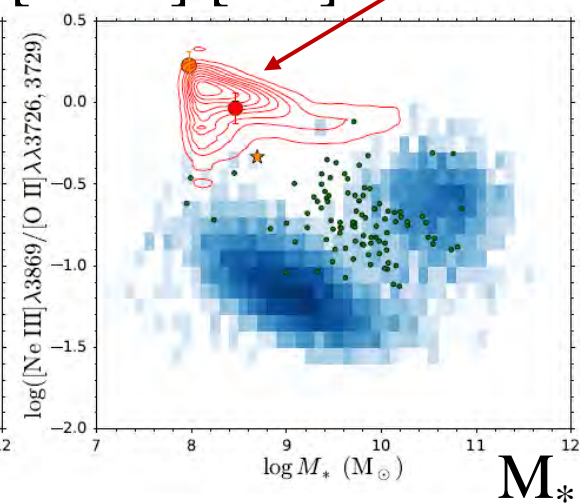


Prédictions FLARES

[O III]/H β



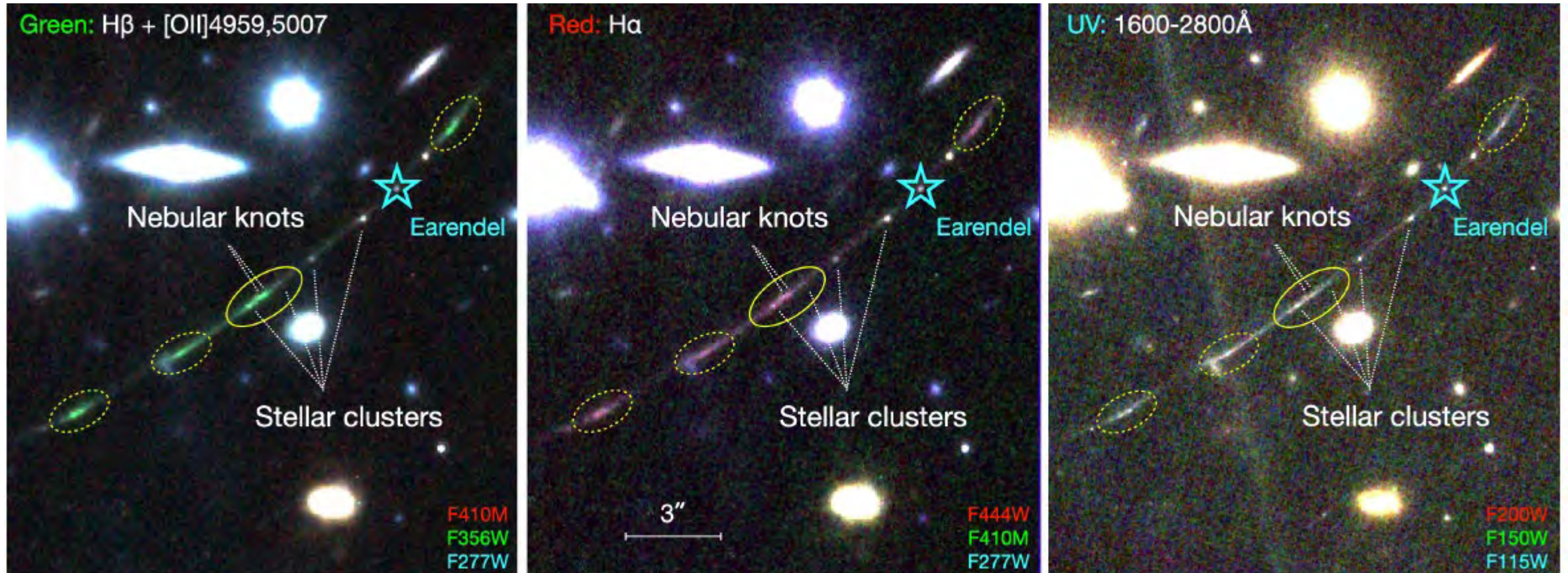
[Ne III]/[O II]



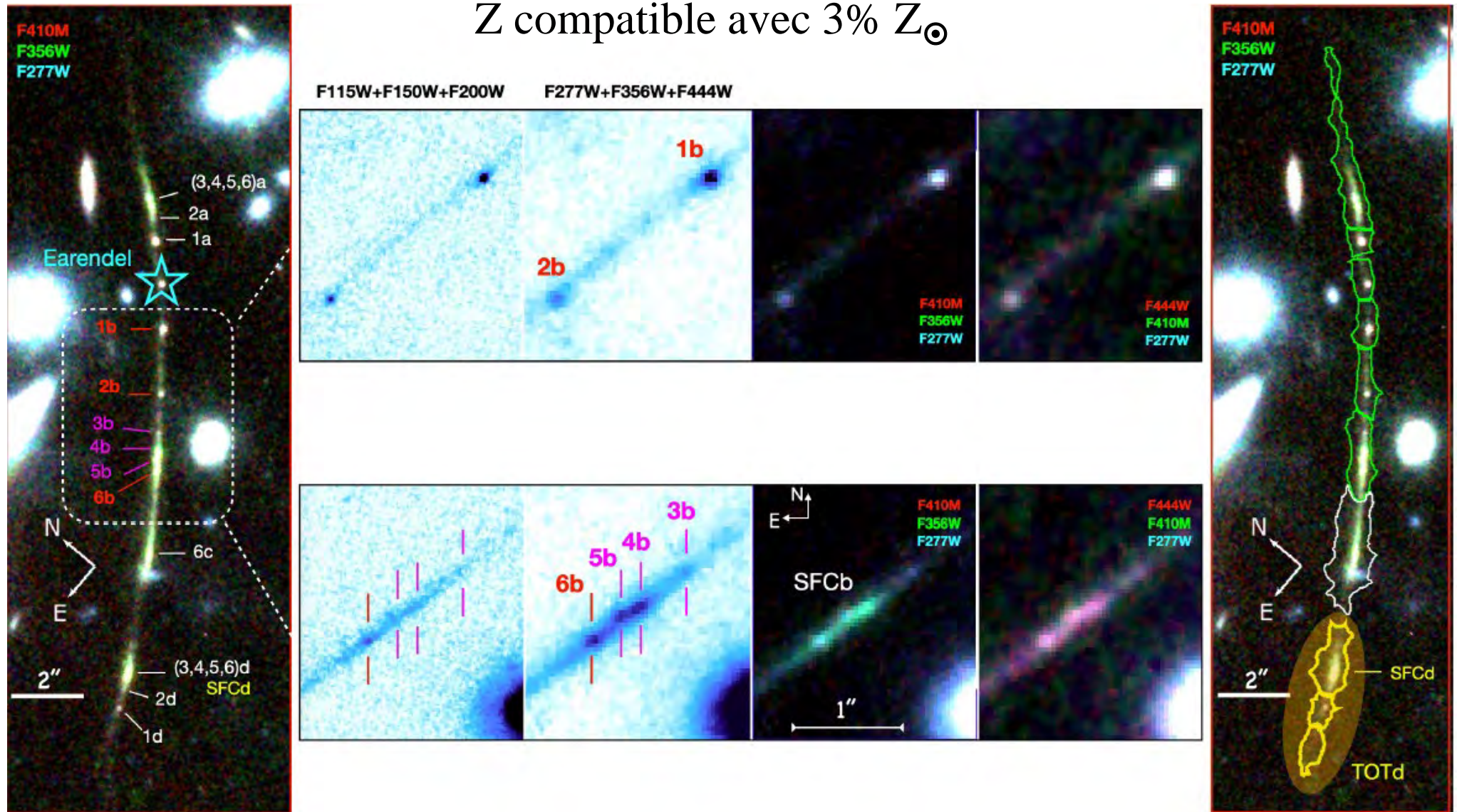
Amas d'étoiles et le Sunrise Arc

PSF 0.04'' - 0.14''
de 1 à 5 μm
 $\mu = 30\text{-}300$

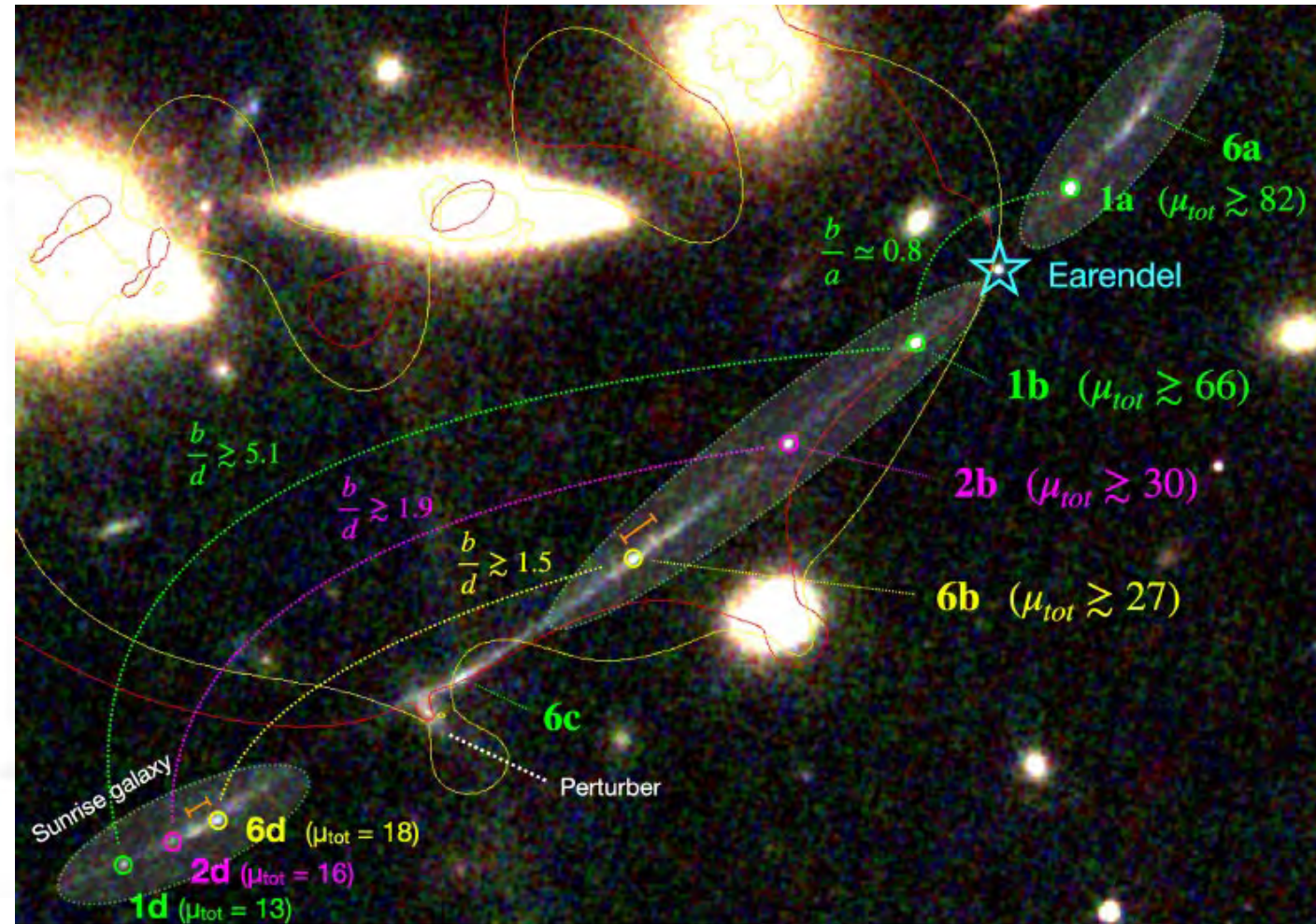
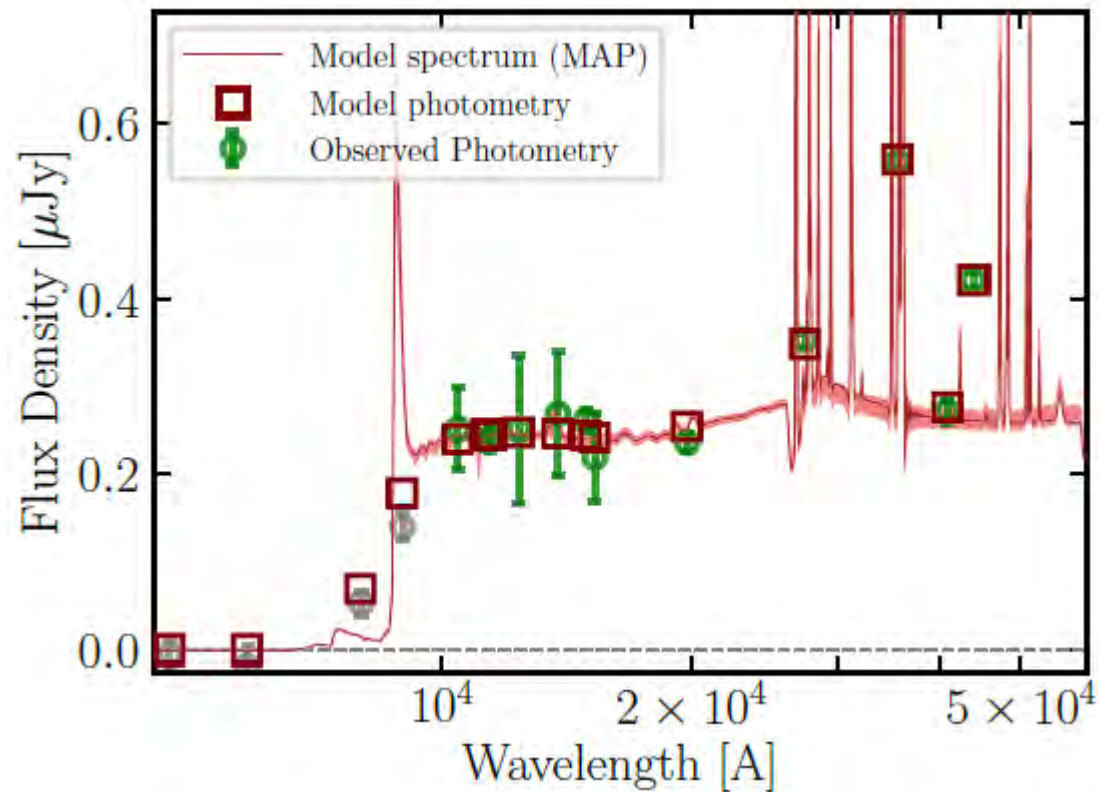
6 amas à $z=6$, de 1 à 20pc $M = 10^{6-7} M_{\odot}$, age 1-30 Myr, $10^{3-5} M_{\odot}/\text{pc}^2$
Evolution le long de l'arc, progéniteurs de GC? **Log $\xi_{\text{ion}} = 25.7$**



Sunrise arc avec le JWST: 3 images de la même galaxie



Sunrise arc, SED HST + JWST



Les amas stellaires pourraient être les progéniteurs des amas globulaires pauvres en métaux
Ils constituent 30% de la SF de la galaxie \rightarrow pouvoir ionisant

a)

JADES/GOODS-S
JWST/NIRCam

Spectro z=10-13

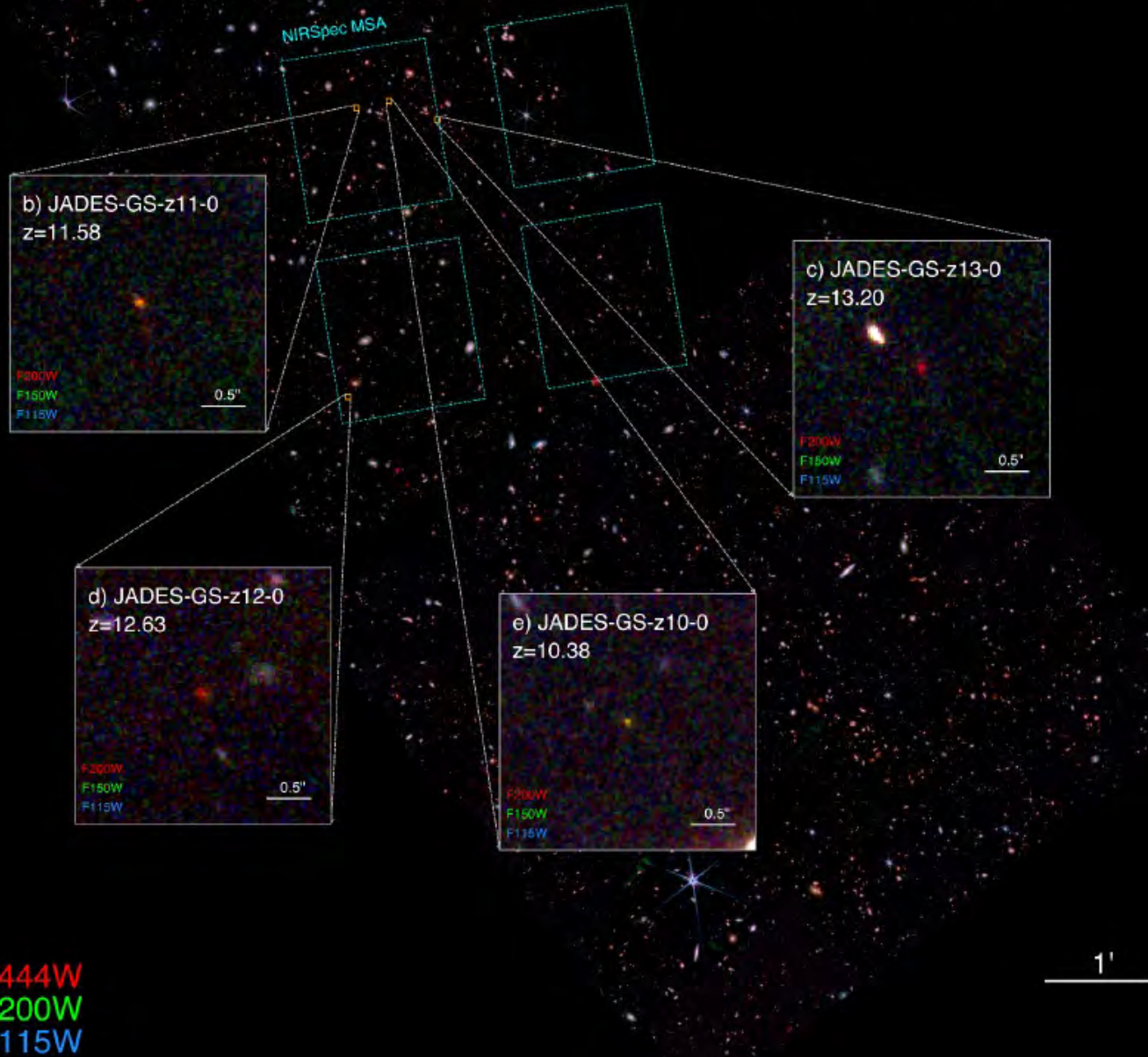
$$\lambda = 0.8 - 5 \mu\text{m}$$

4 galaxies au redshift
confirmé par NIRSpec

→ Renforce l'observation du
grand nombre de galaxies à $z > 10$

Non prévu initialement par Λ CDM

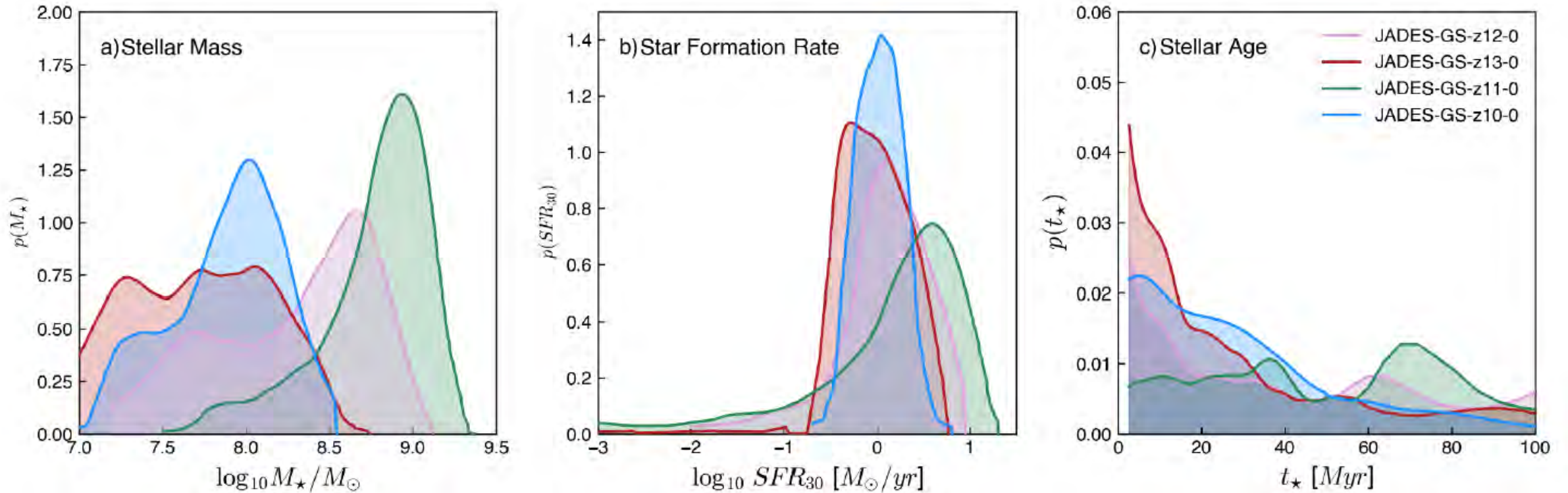
$M_* = 10^8 M_\odot$,
Age $< 100 \text{ Myr}$



Robertson et al 2022

Propriétés physiques

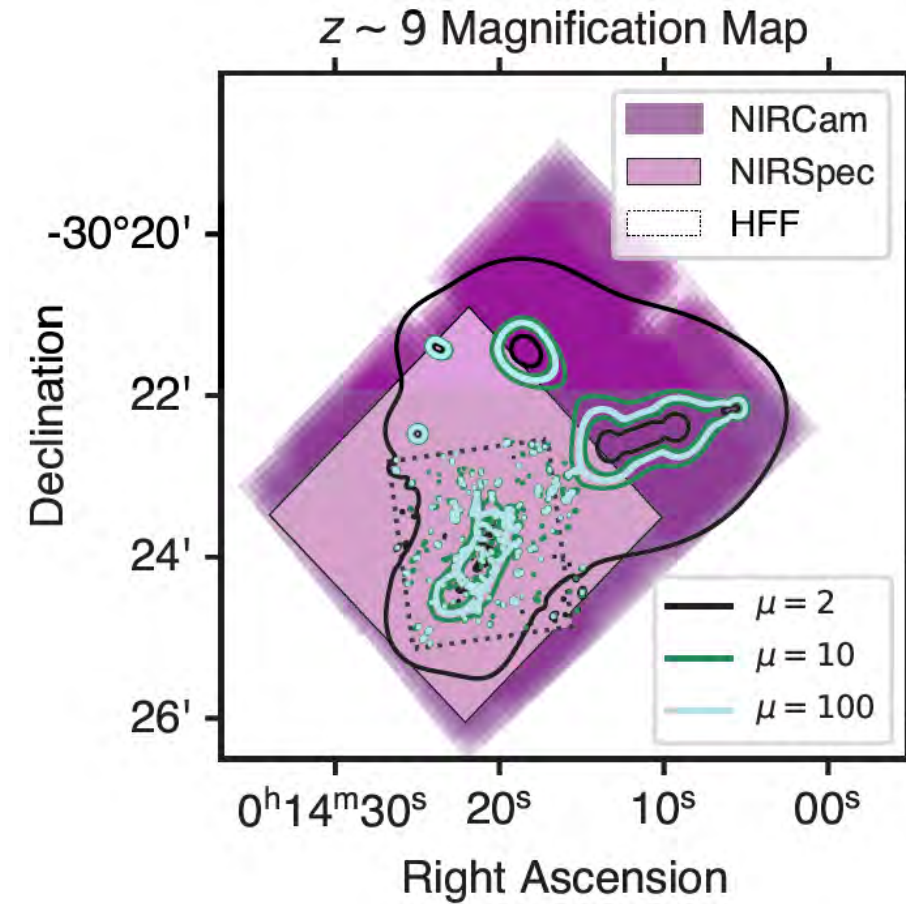
$z=10.38, 11.58, 12.63, 13.20$



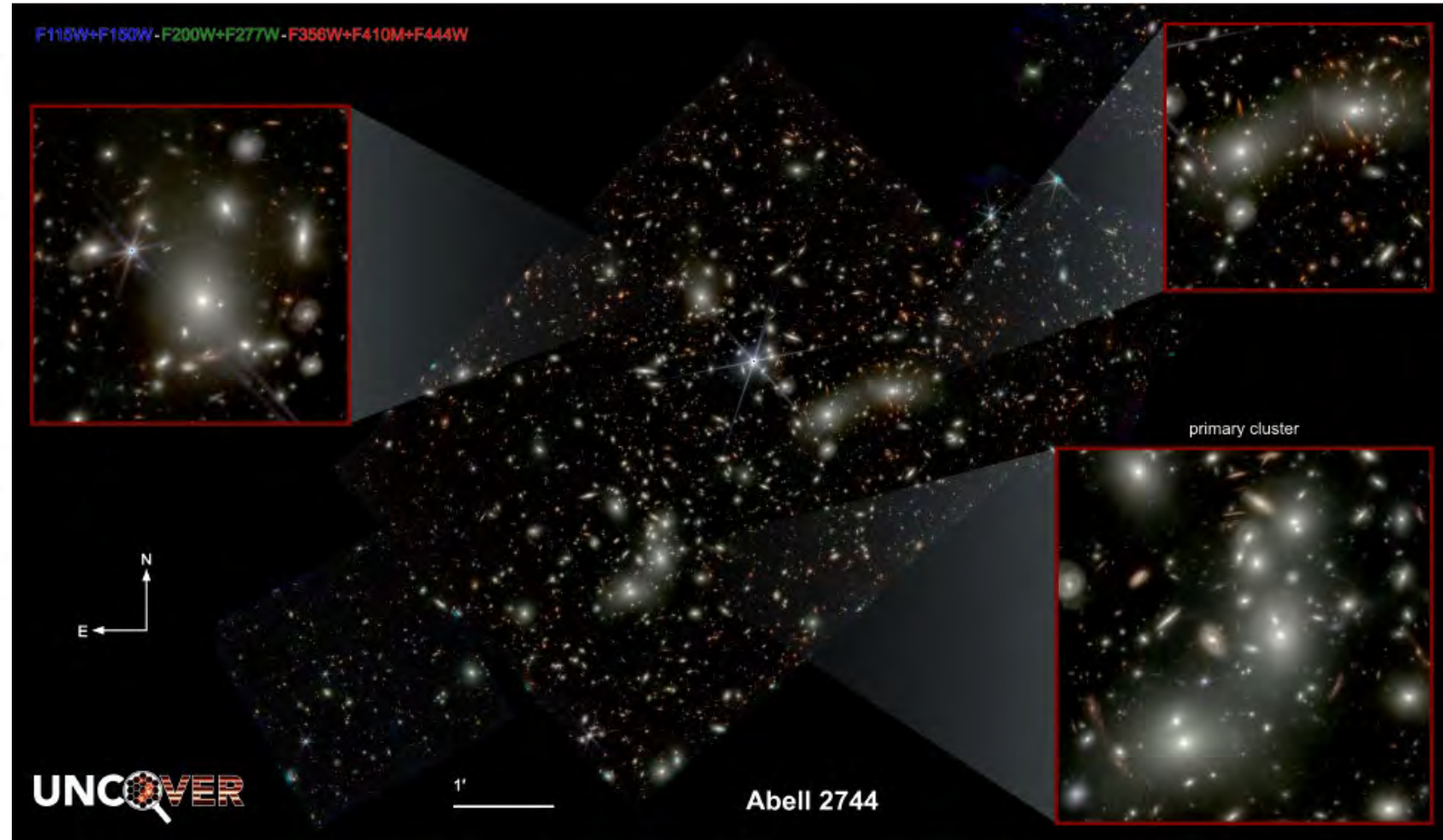
$M_{\star} = \sim 10^8 M_{\odot}$, Fort SFR ($1-2 M_{\odot}/yr$, $10x$ SMC), dans régions compactes
Age $< 100 Myr$ $t_{dyn} = 10-30 Myr$

Galaxies derrière Abell 2744, avec JWST

NIRCam, NIRSpec pour 500gal in 2023
SED 10 filtres, jusqu'à 28 μ m

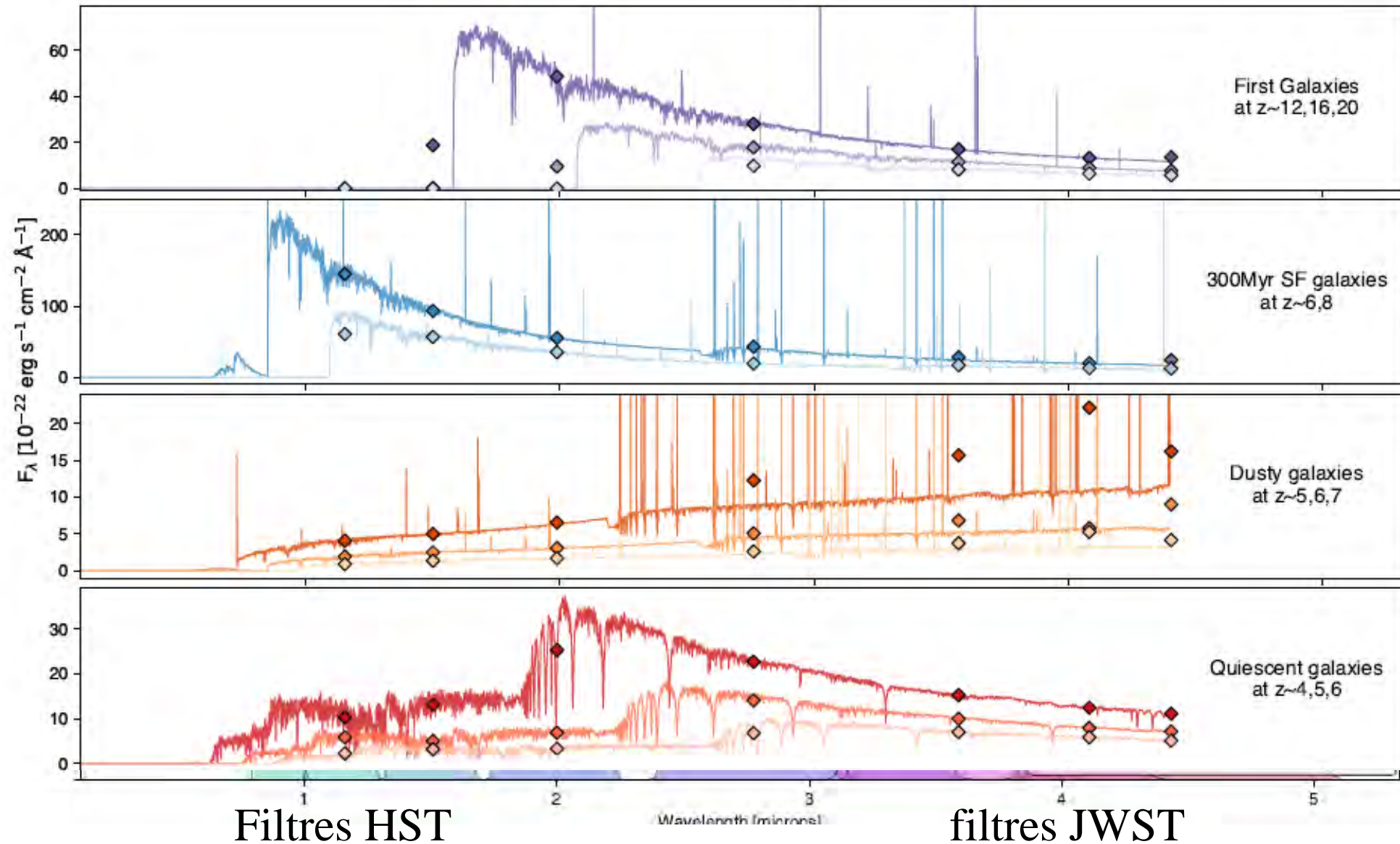


Abell 2744, $z=0.308$

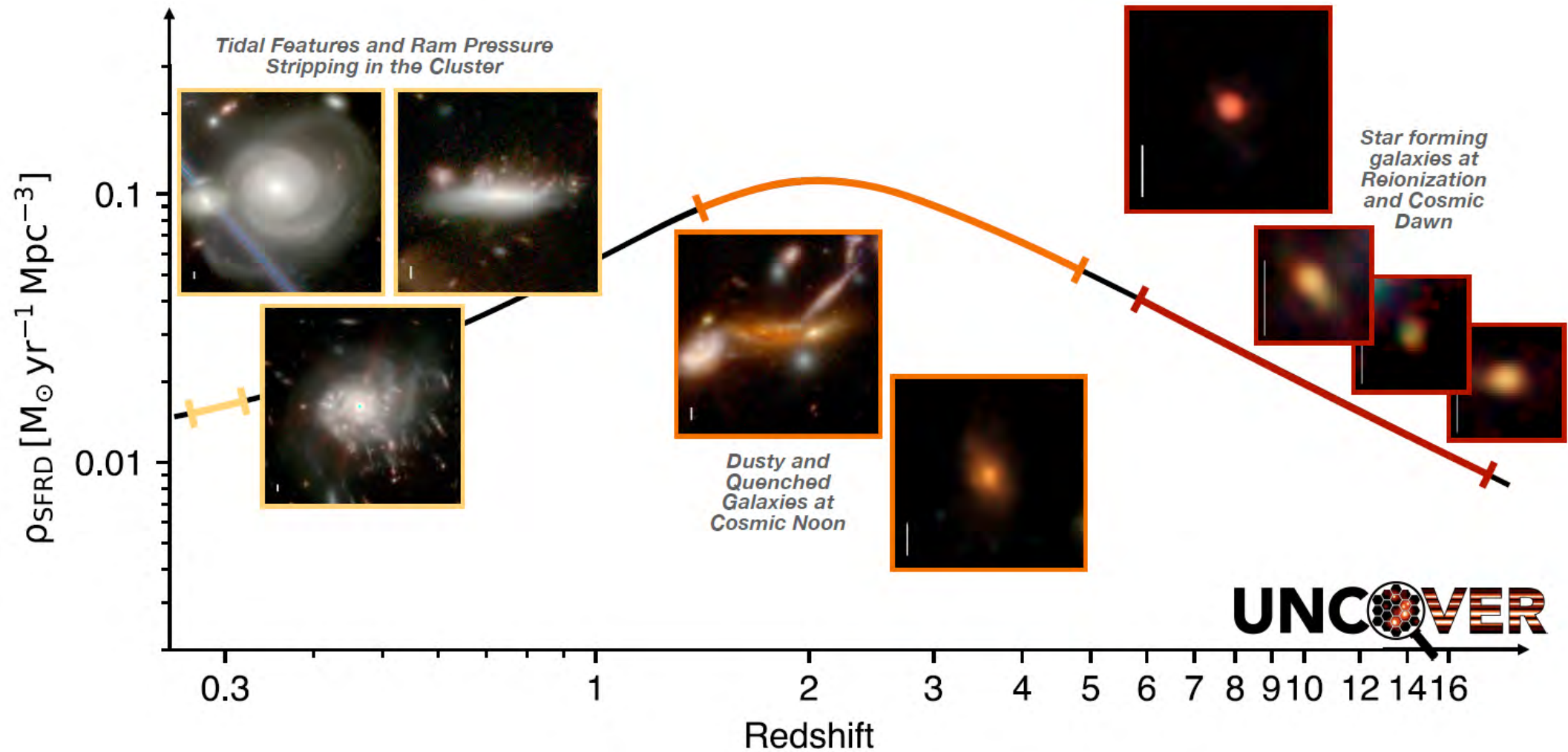


Bezanson et al 2022

Galaxies derrière Abell 2744

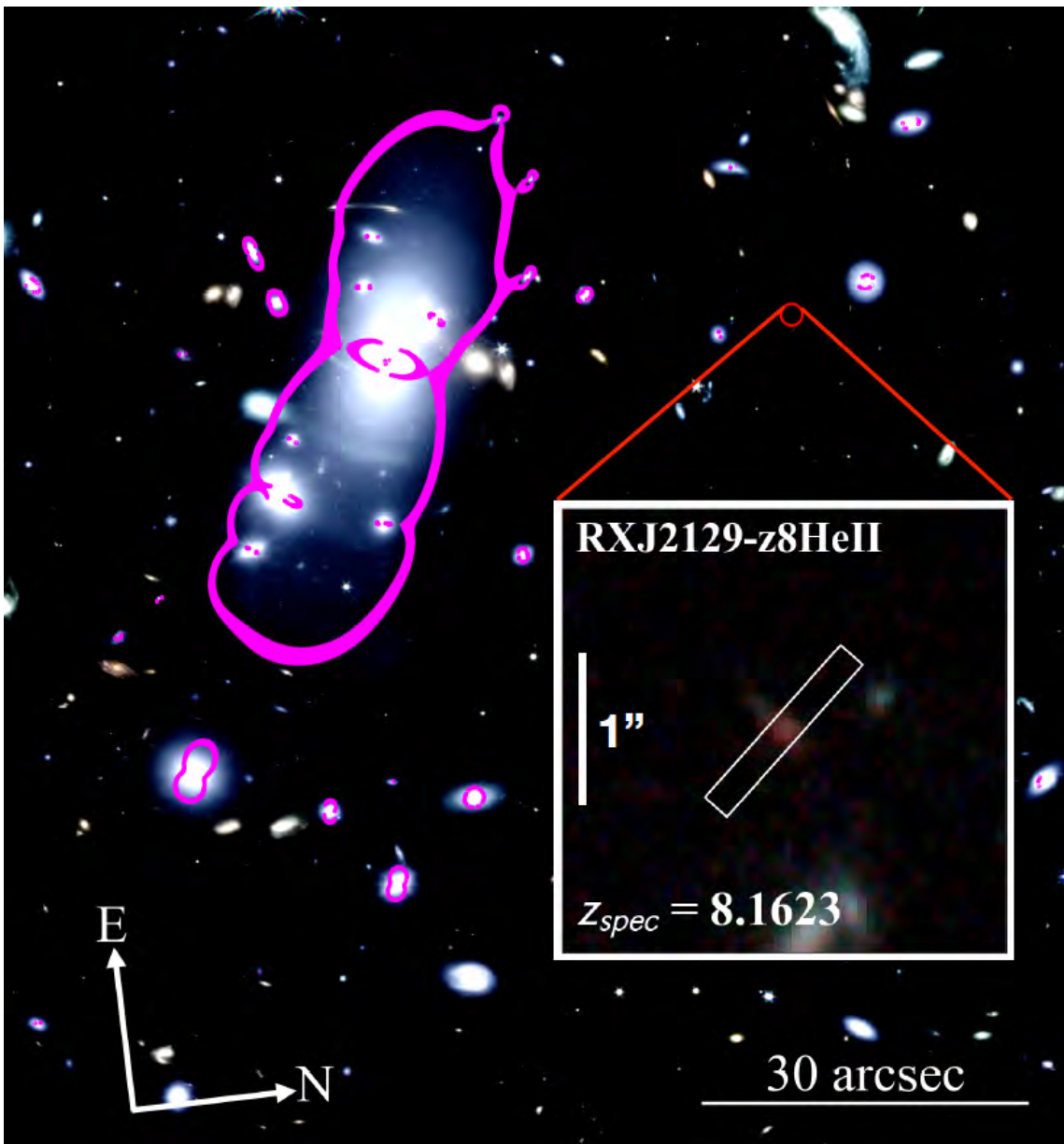


Histoire de la formation d'étoiles



Bezanson et al 2022

RXJ2129 $z=8.16$, avec NIRSpec du JWST



Amas de galaxies RXJ2129 à $z=0.234$

Amplification de 2.26

Spectro du JWST: fente $0.2'' \times 1.4''$

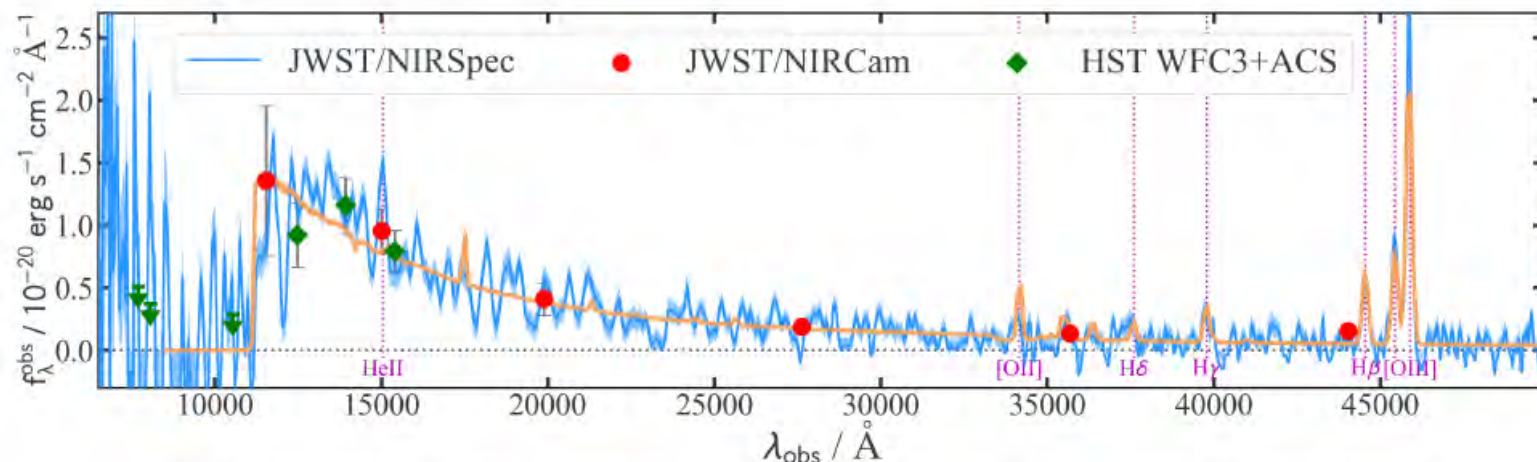
Galaxie très bleue, peu de poussières

Détection de la raie de HeII (hélium ionisé)

Nécessite des étoiles à température extrême

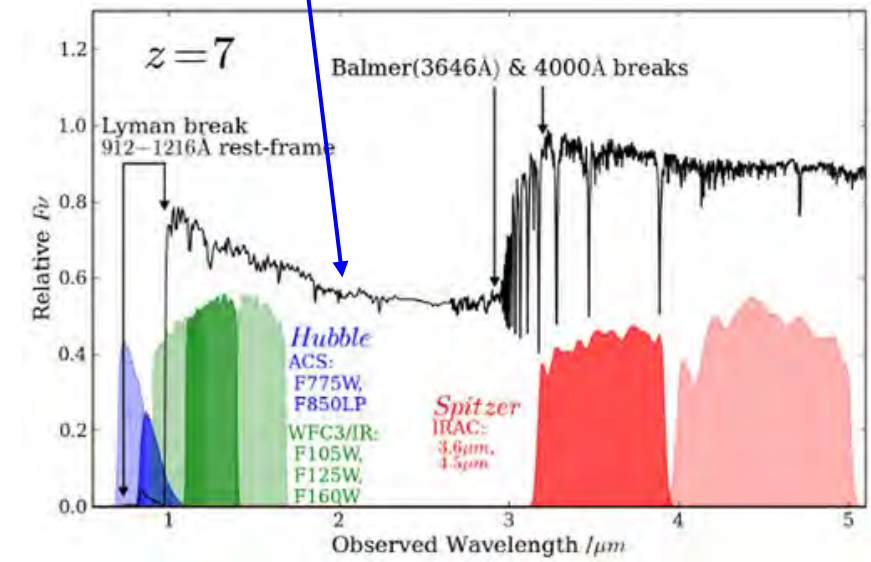
Wang et al 2022

La plus lointaine raie HeII (1640Å)

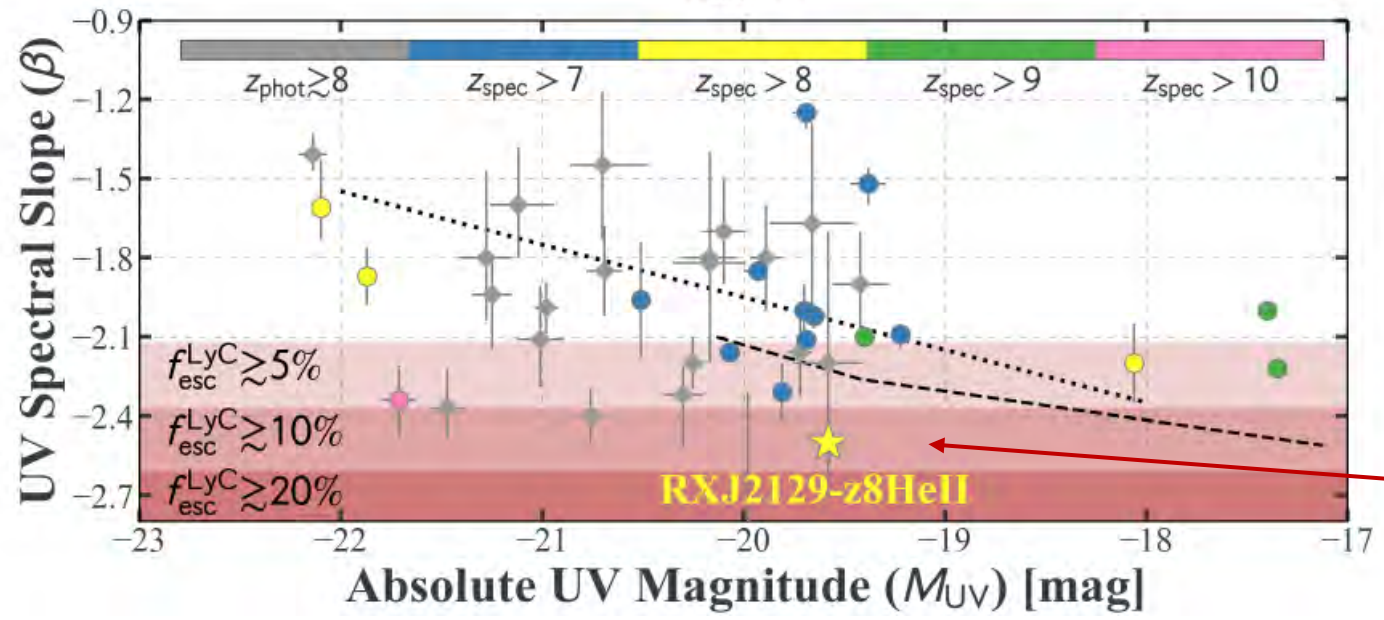


Faible métallicité (O32 index)

$$F(\lambda) \sim \lambda^\beta \quad \beta = 0 - 2.5$$



Dunlop 2013

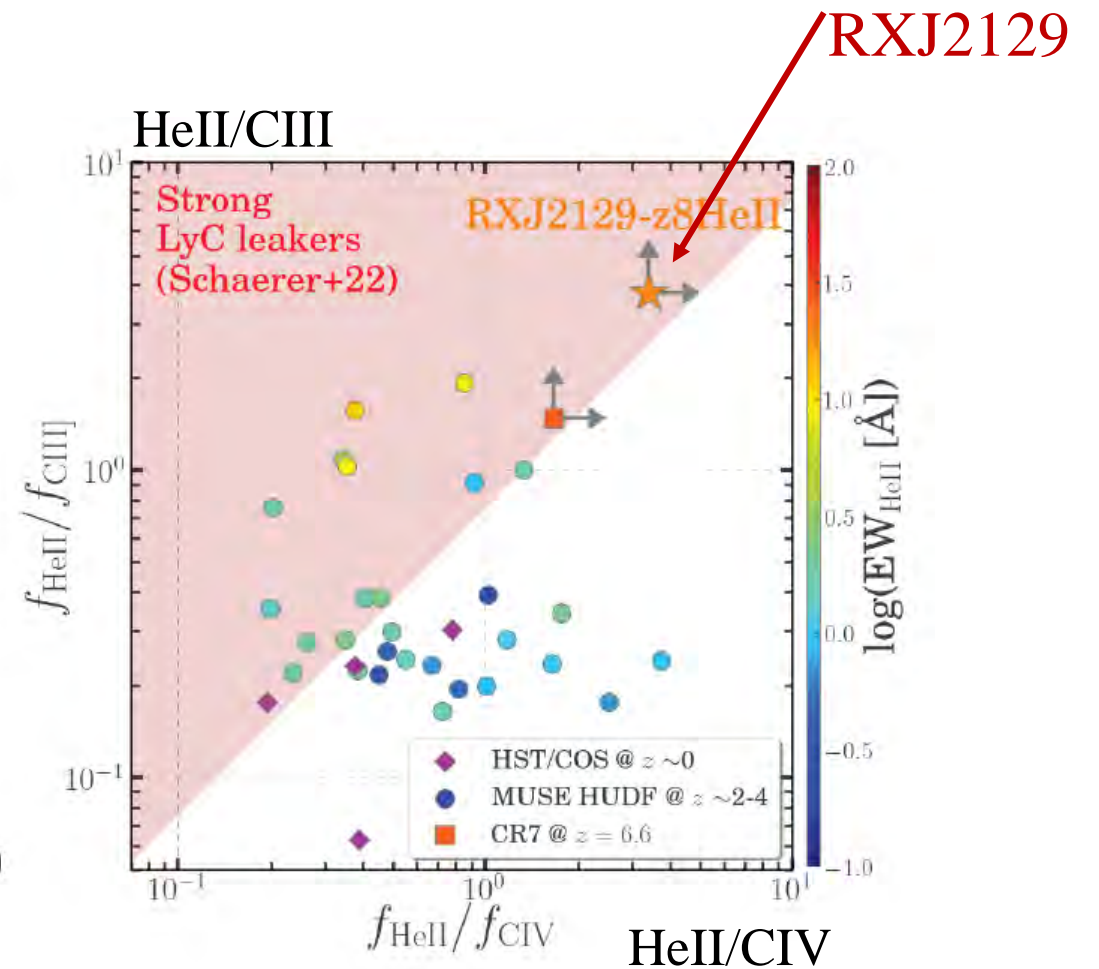
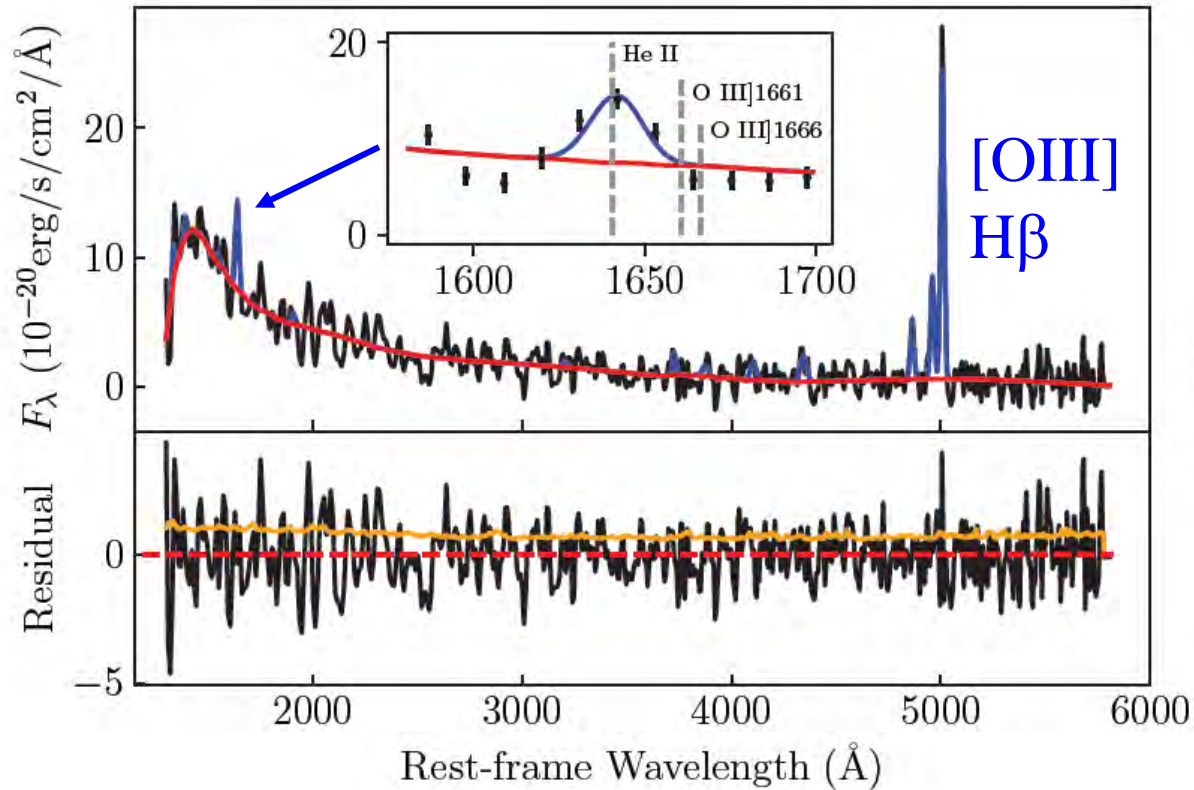


$f_{esc} > 10\%$

Wang et al 2022

Spectre UV très bleu $\beta = -2.5$

Etoiles de Population III

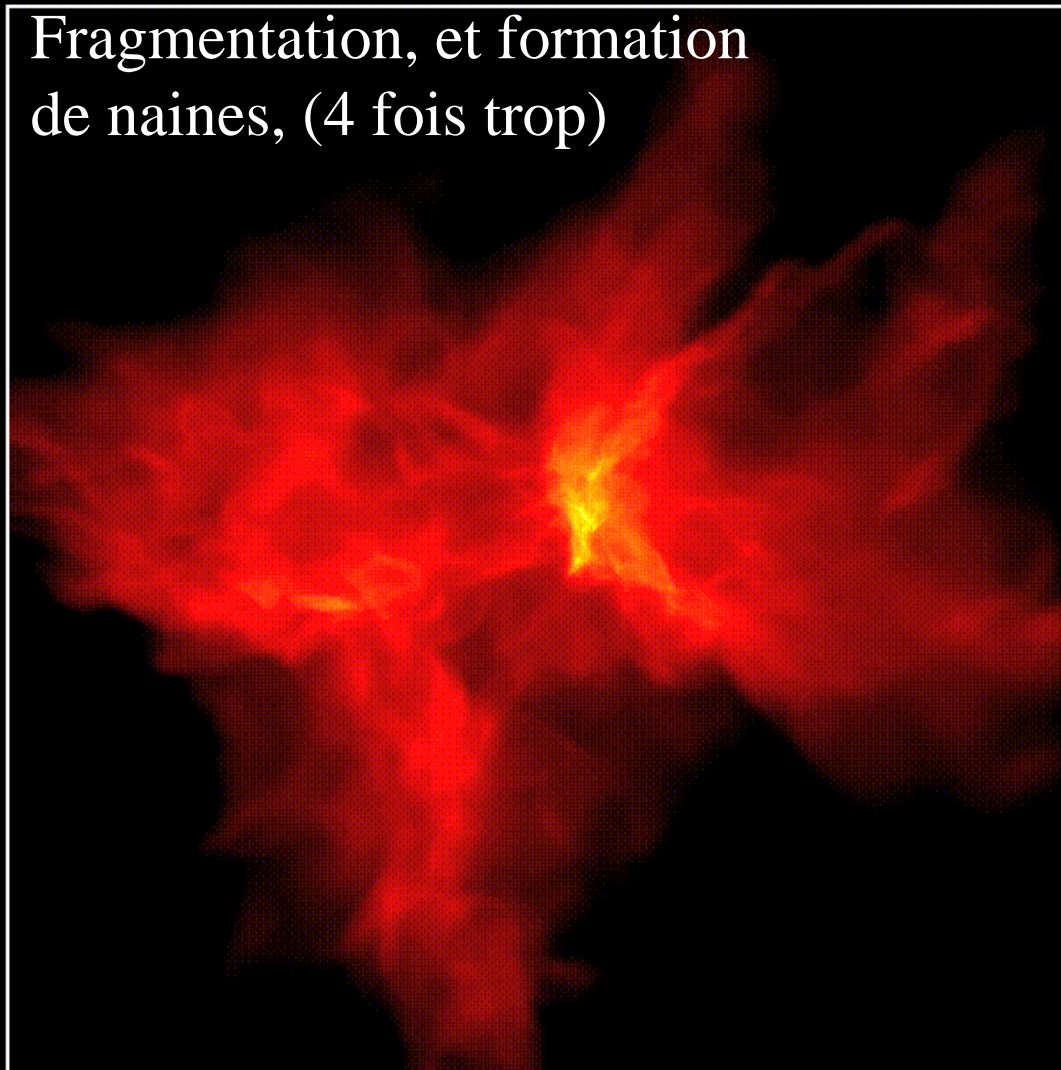


La température du continuum des PopIII est de 100 000K,
 Seules elles peuvent expliquer la raie de HeII (1640 \AA)
 Potentiel d'ionisation 24eV (13.6eV pour H)

Simulation des premiers amas d'étoiles

Dimensions: 82496. AU Without Radiative Feedback Time: 196935. yr

Fragmentation, et formation
de naines, (4 fois trop)

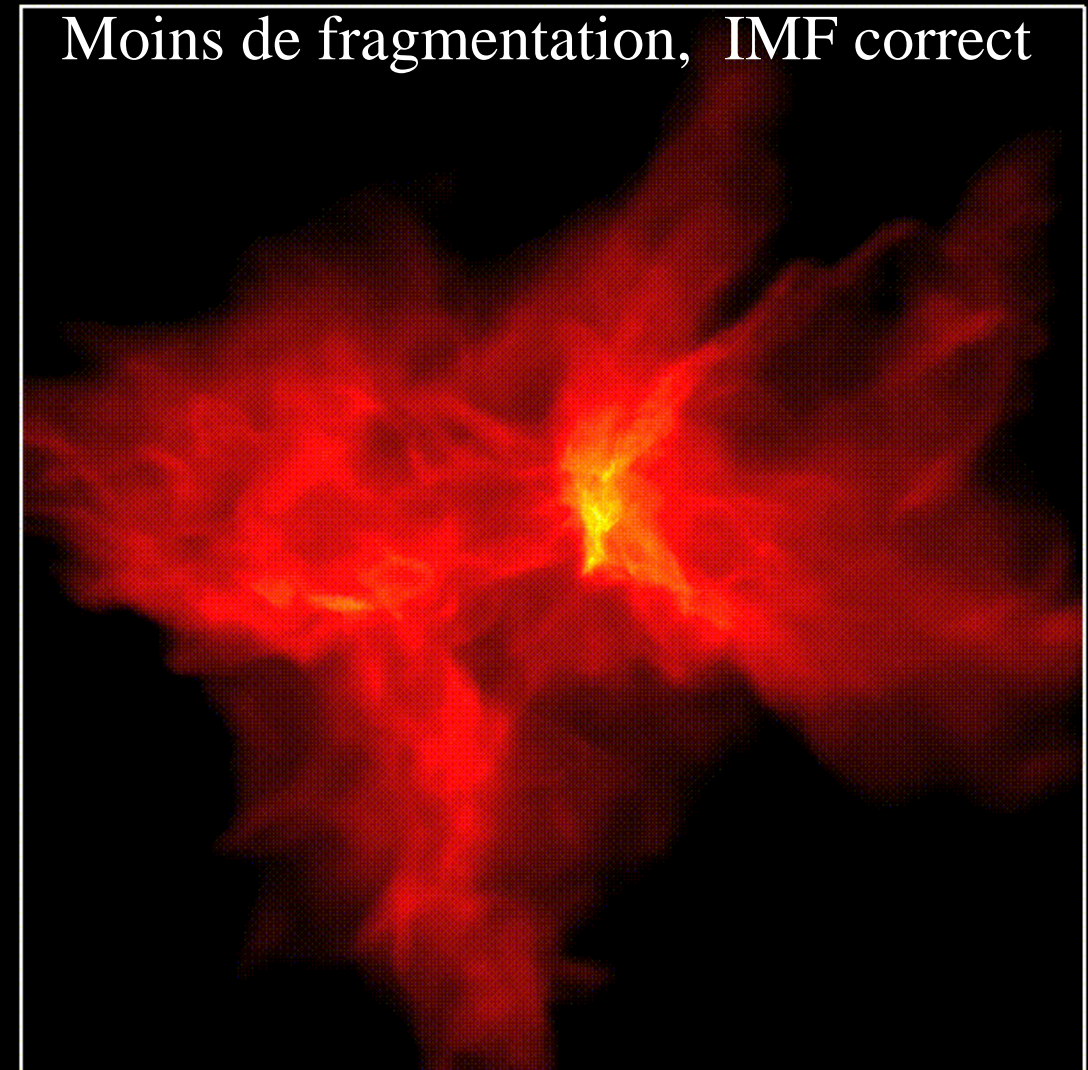


-1.5 -1.0 -0.5 0.0 0.5 1.0

Log Column Density [g/cm²]

Dimensions: 82496. AU With Radiative Feedback Time: 196935. yr

Moins de fragmentation, IMF correct



-1.5 -1.0 -0.5 0.0 0.5 1.0

Log Column Density [g/cm²]

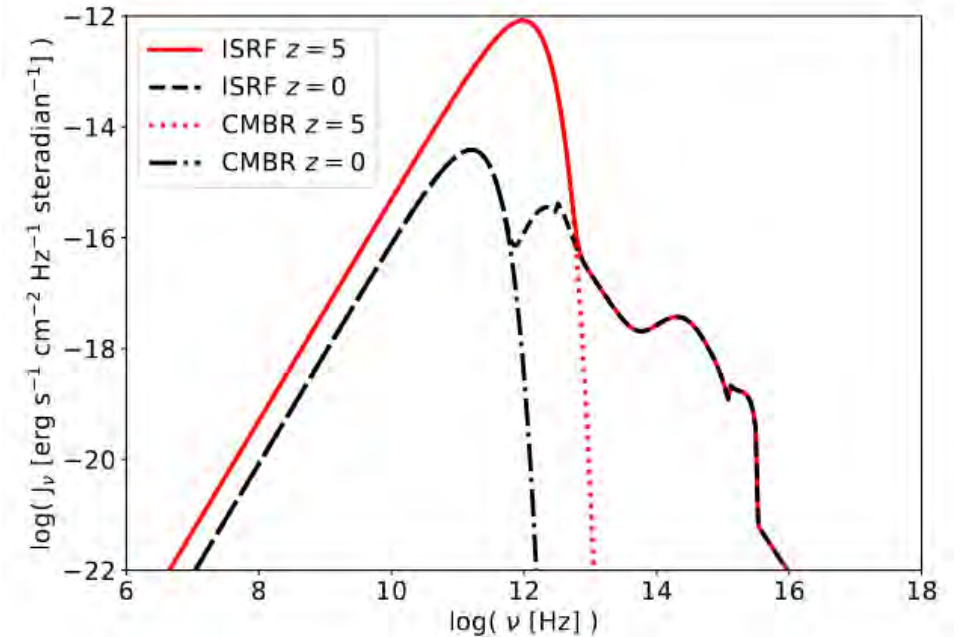
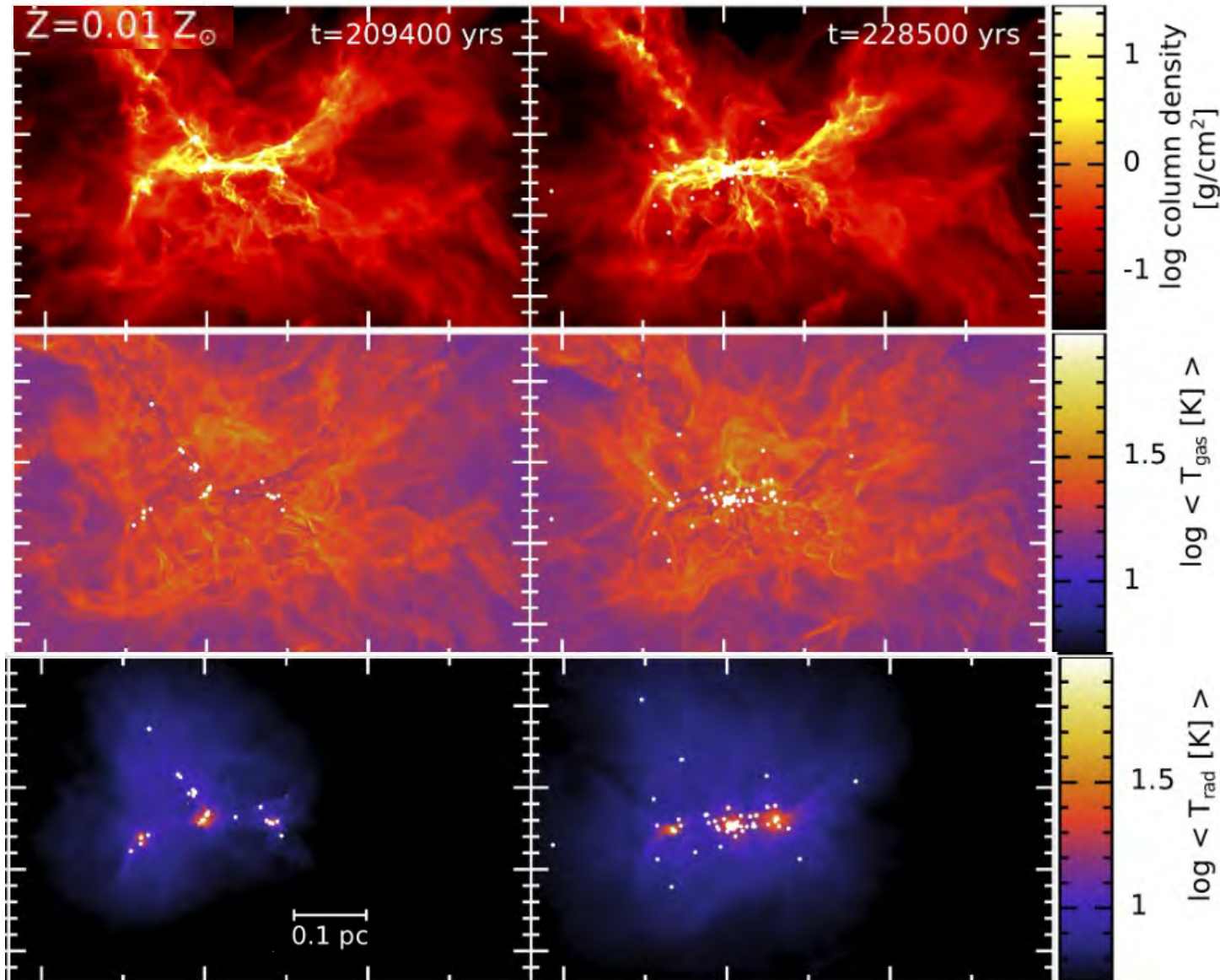
Bate
2009

Effets de la métallicité

Modèles radiatifs, avec $T_{\text{CMB}}(z)$
 $z=5, Z=0.01 Z_{\odot}$

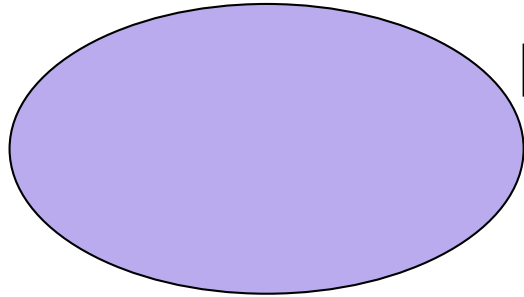
Le gaz ne peut pas refroidir autant qu'à $z=0$, car $T_{\text{CMB}}=18\text{K}$

L'IMF est enrichie d'étoiles massives au détriment des petites masses et naines brunes (surtout pour Z haut)

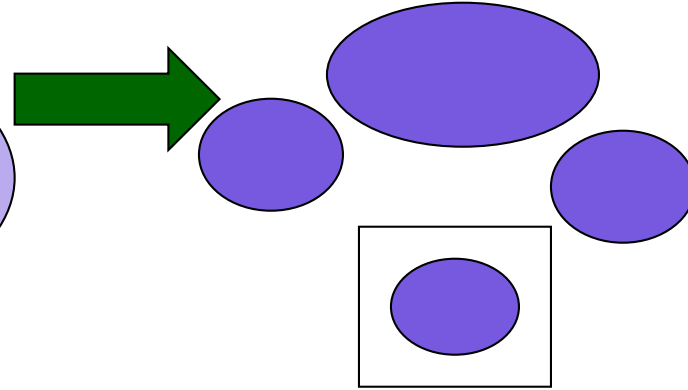


Formation de la première étoile (PopIII.1)

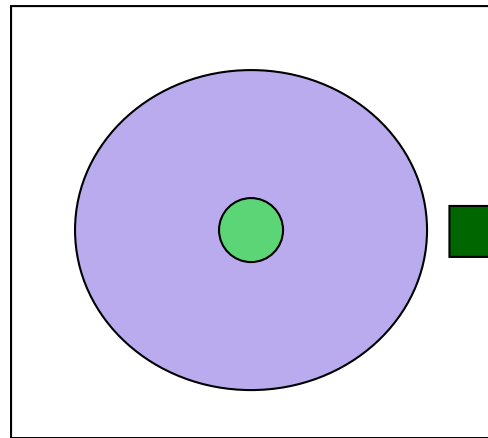
1. Effondrement du premier nuage



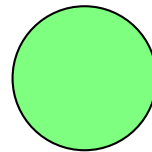
2- Fragmentation en plusieurs nuages



3-Formation proto-étoile



4. Accrète du gaz, et rejoint la séquence principale



Taux d'accrétion élevé

$$dM/dt = c_s^3/G \sim T^{3/2}$$

$$= 10^{-2} M_{\odot}/\text{yr}$$

pas de métaux ($T \sim 300\text{K}$)

→ temps de formation court

($10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$ à $z=0$)

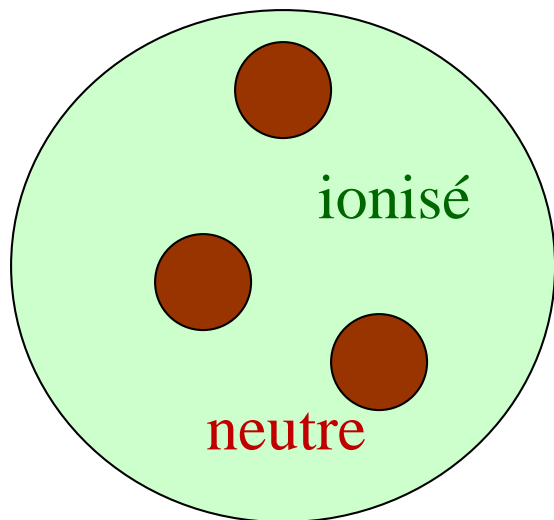
Faible opacité pas de poussière

→ faible pression de radiation
(moins de feedback)

$$M_* = 100-1000 M_{\odot}$$

Etoiles de 2ème génération (PopIII.2)

Très rapidement



Après la mort de la 1ère étoile,
d'autres étoiles se forment dans la
région HII fossile

*(Oh & Haiman 2004,
Nagakura et al 2005)*

Condition initiale différente

- Ionisation par les 1ères étoiles
- fluctuation de densité par les SN, ou régions HII

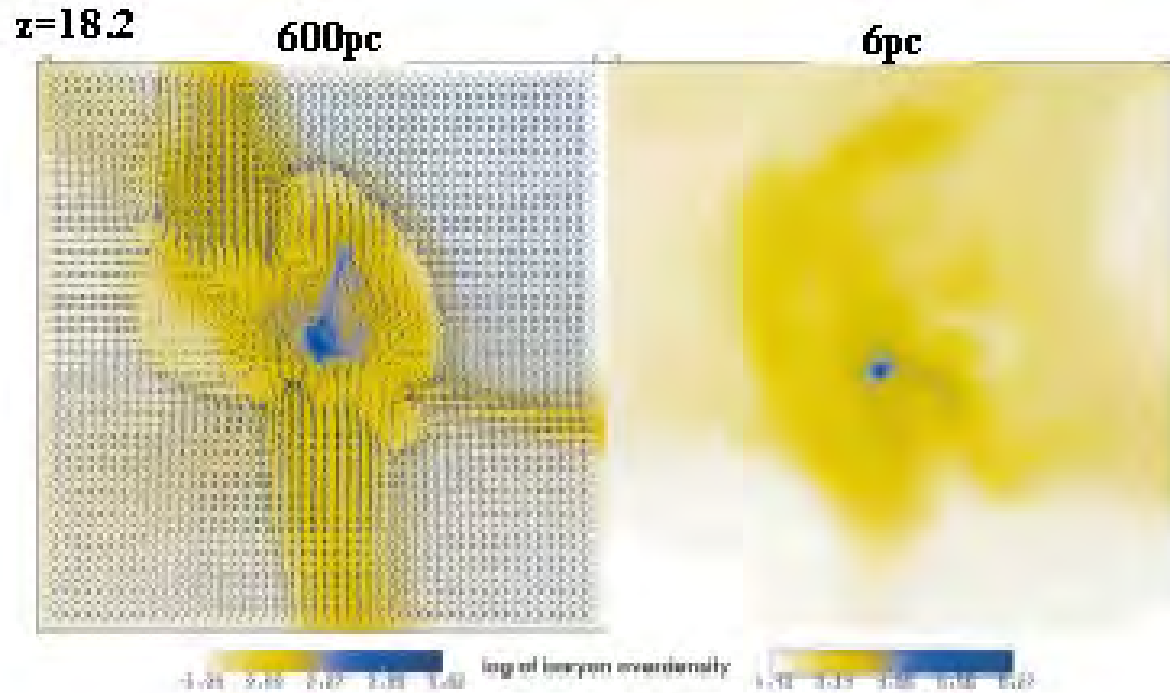
Environment Different

- Radiation externe (UV, Rayons Cosmiques)

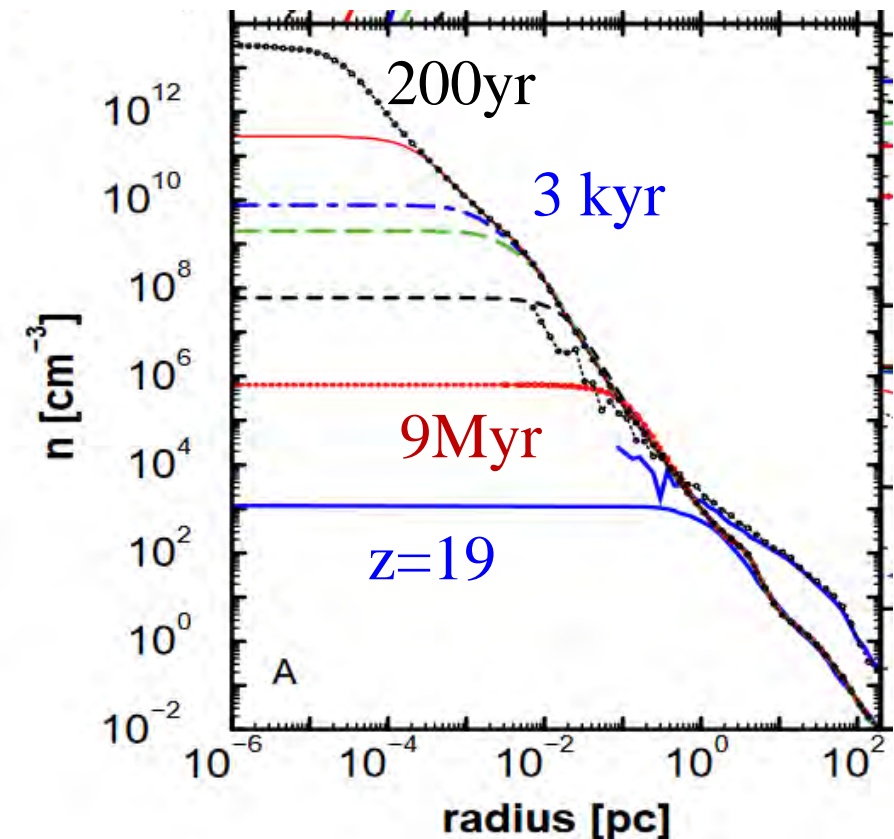
Composition Différente

- Métaux, Poussière
- **Un faible Z ($\sim 10^{-5}Z_{\odot}$) suffit à induire la transition vers la formation d'étoiles moins massives (+ de feedback)**

Simulations 3D: formation des premières étoiles



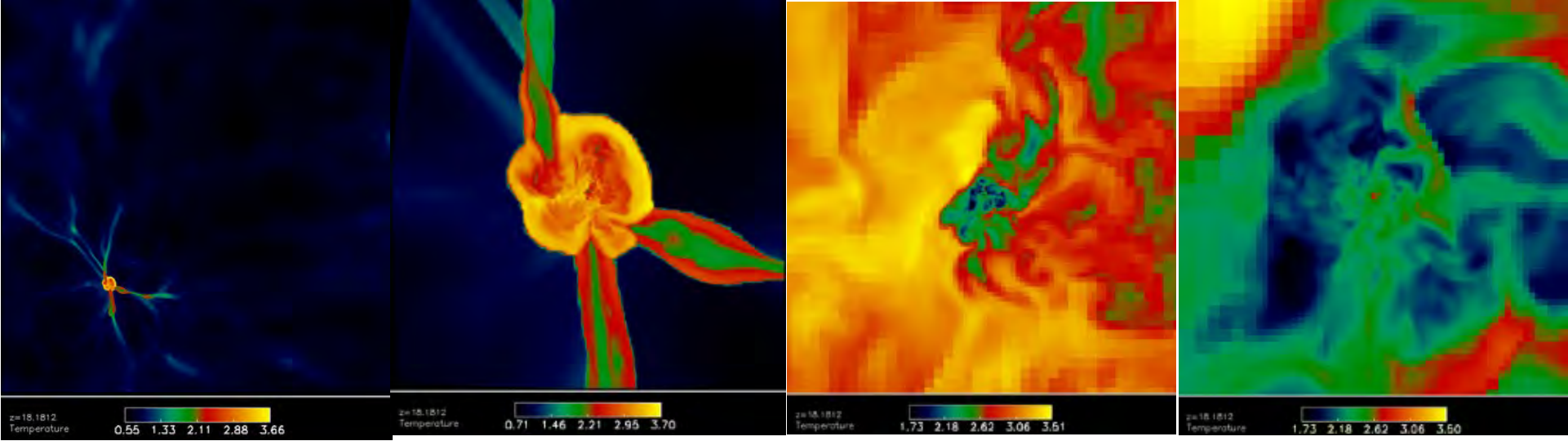
- Les simulations 3D ont atteint $n > 10^{12} \text{cm}^{-3}$
- Transfert radiatif requis pour atteindre $n \sim 10^{22} \text{cm}^{-3}$ dans les proto-étoiles
- Refroidit grâce à H_2



Abel et al 2002

Contrairement aux prédictions analytiques, le gaz ne fragmente pas
→ Formation d'une seule étoile

Nuage de H₂

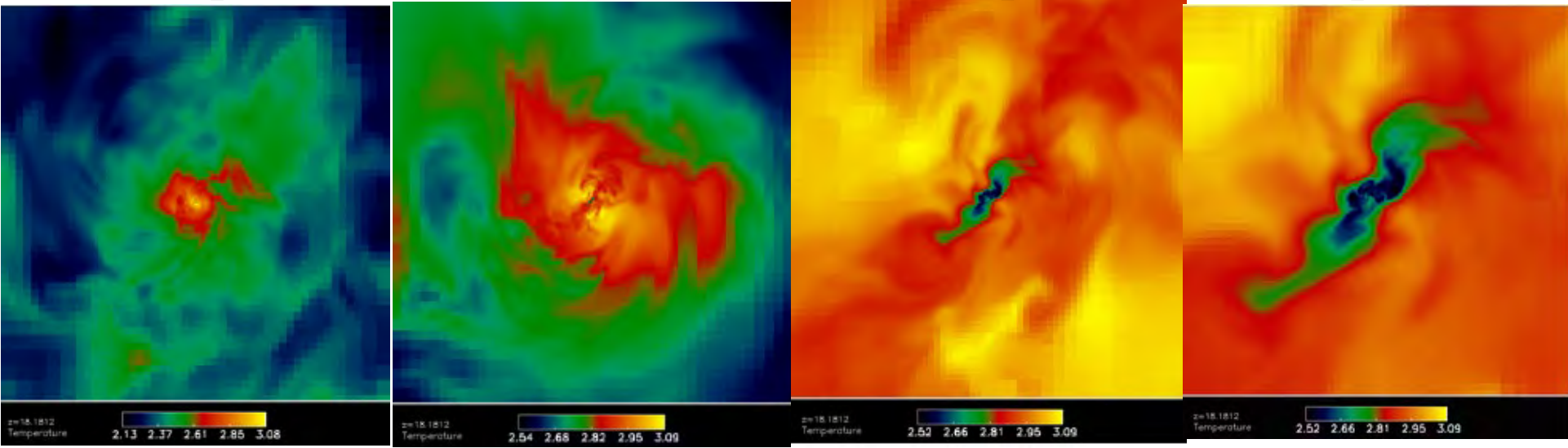


6kpc

600pc

60pc

6pc



0.6pc

0.06pc

6mpc

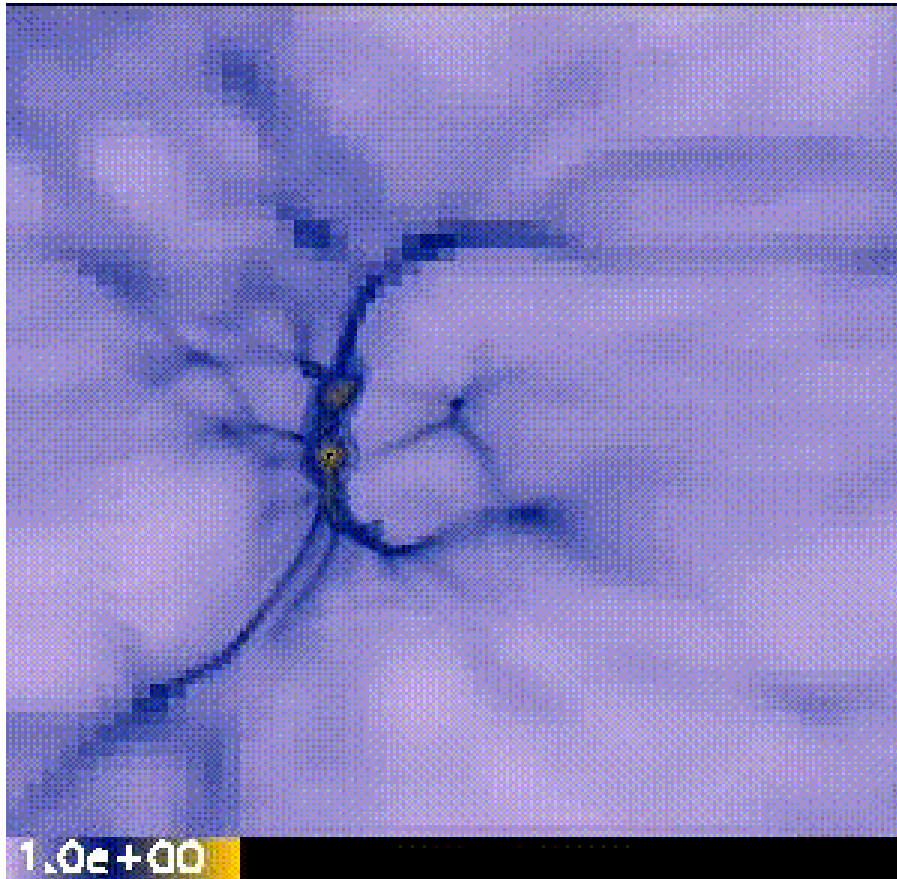
0.6mpc

120AU

Couleur = logT entre 3 et 3000K

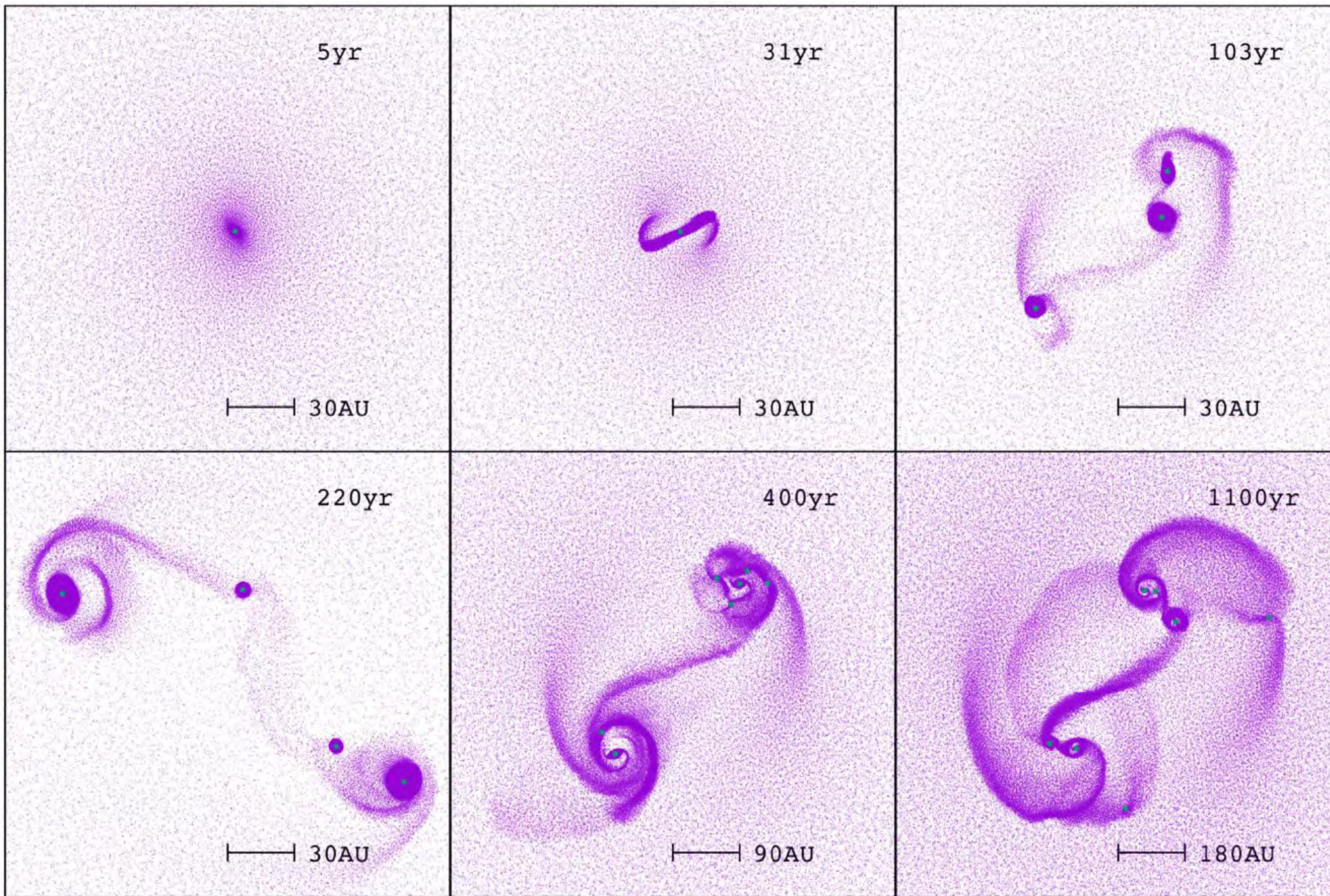
Formation de la première étoile

De 6kpc à $z=20$ jusqu'à 100 AU à $z=18$



Zooms successifs
Grande dynamique $>10^{10}$

Densité ajustée pour
pouvoir voir les 17 ordres
de grandeur d'évolution



Effondrement
 Nuage $10^3 M_{\odot}$
 Fragmentation
 10-100 fragments
 $N_{\text{frag}} \propto t^{0.3}$

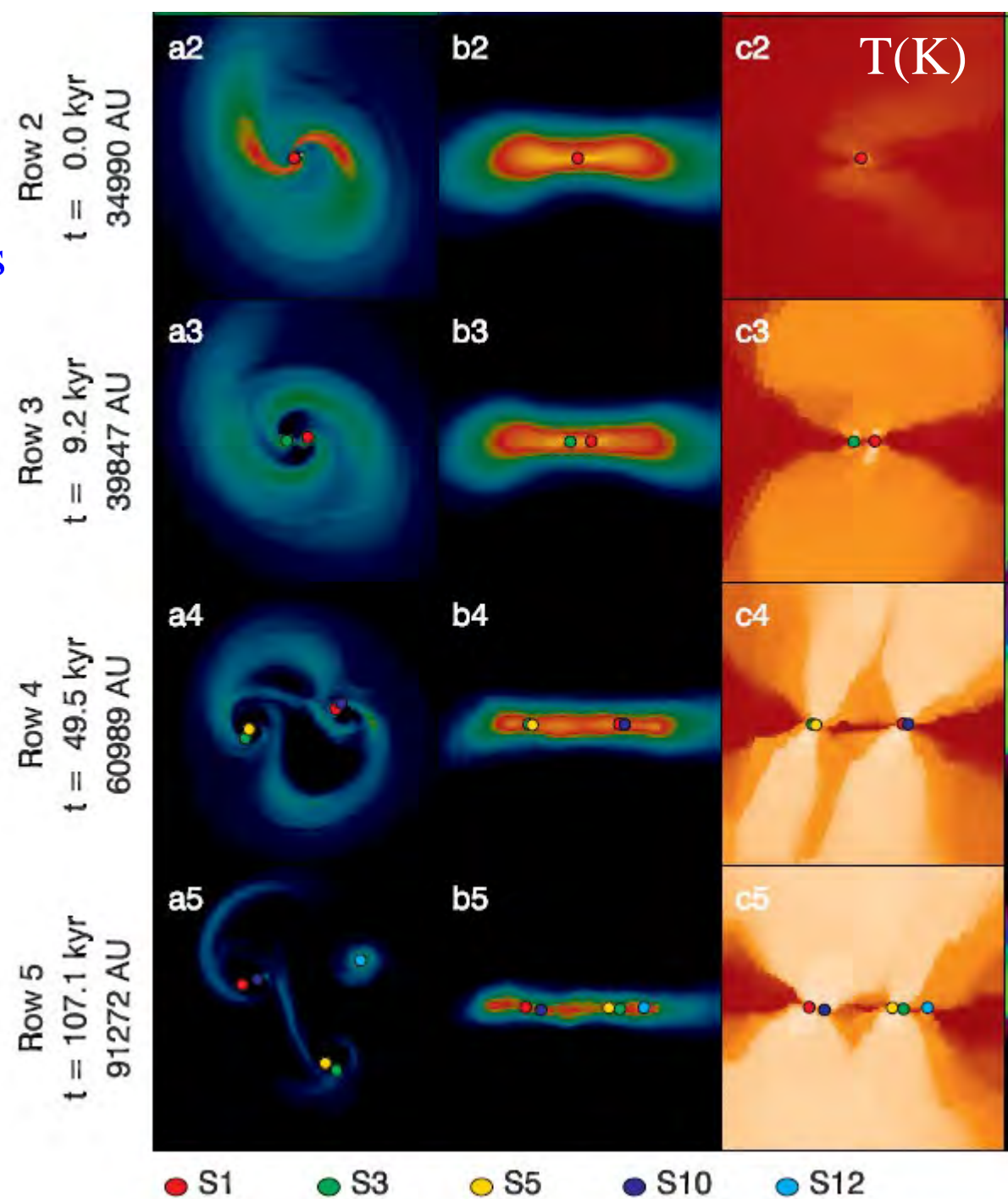
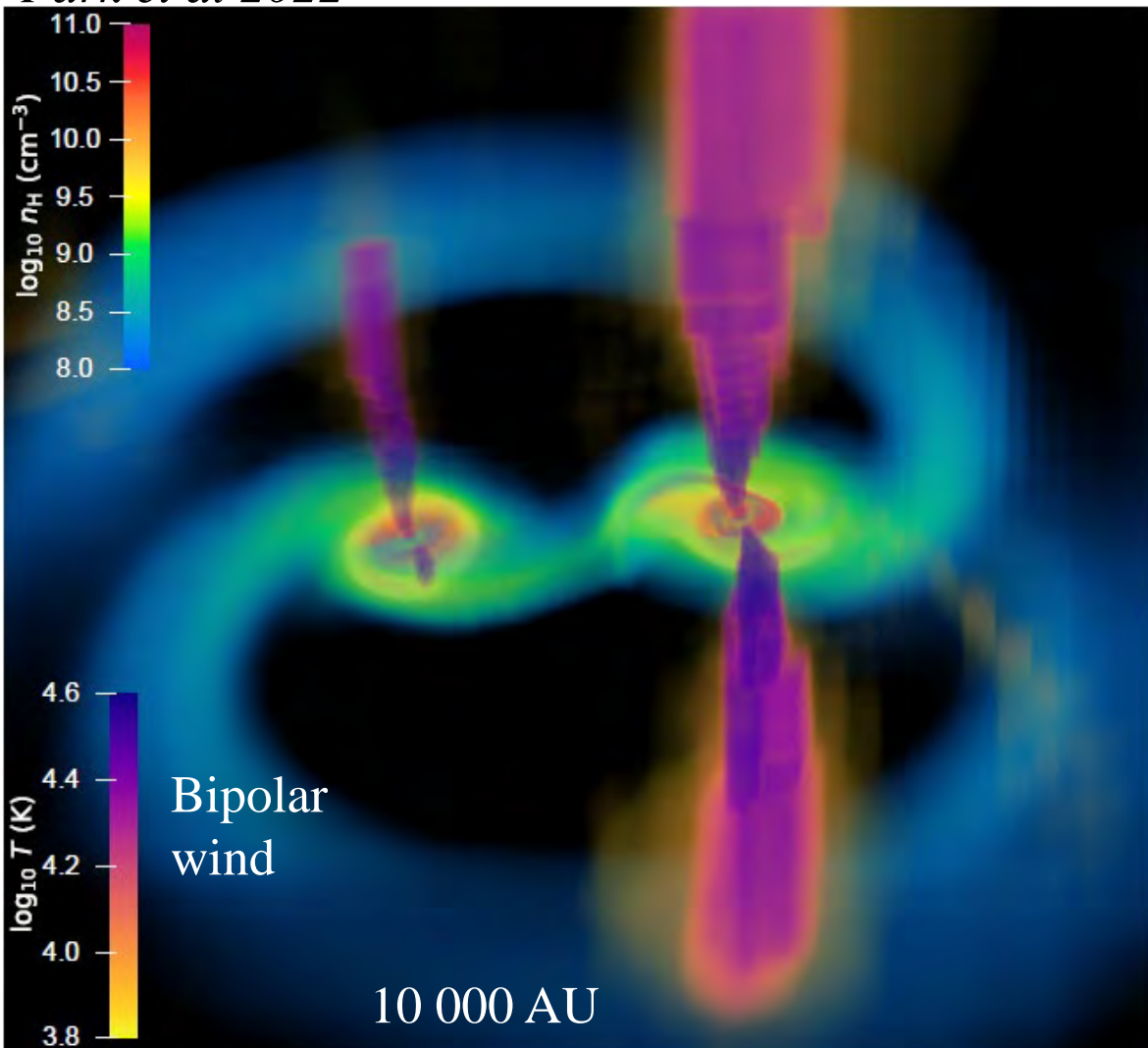
Feedback radiatif
 Fusion des
 Fragments
 → 1100yr

→ PopIII naissent
 multiples

PopIII + fond de rayonnement X

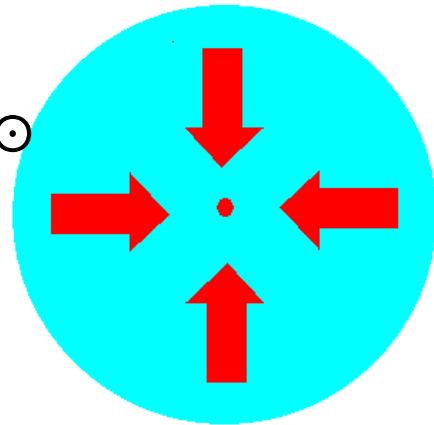
Grande multiplicité
hiérarchique dans les mini-halos

Park et al 2022



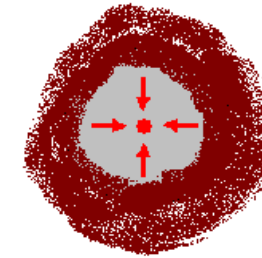
Comparaison formation étoiles Pop III et Pop I

$T=10^5\text{K}$
 $L = 10^6 L_{\odot}$



Pop III coeur
 $M_{\text{core}} : 10^{-3}M_{\odot}$
 $M_{\text{frag}} : >10^3M_{\odot}$
 $dM/dt : 10^{-2}M_{\odot}$
Pas de poussière

Accrétion continue
Etoiles très massives
(100-1000 M_{\odot})



$T= 5 \cdot 10^3\text{K}$
 $L = 1 L_{\odot}$

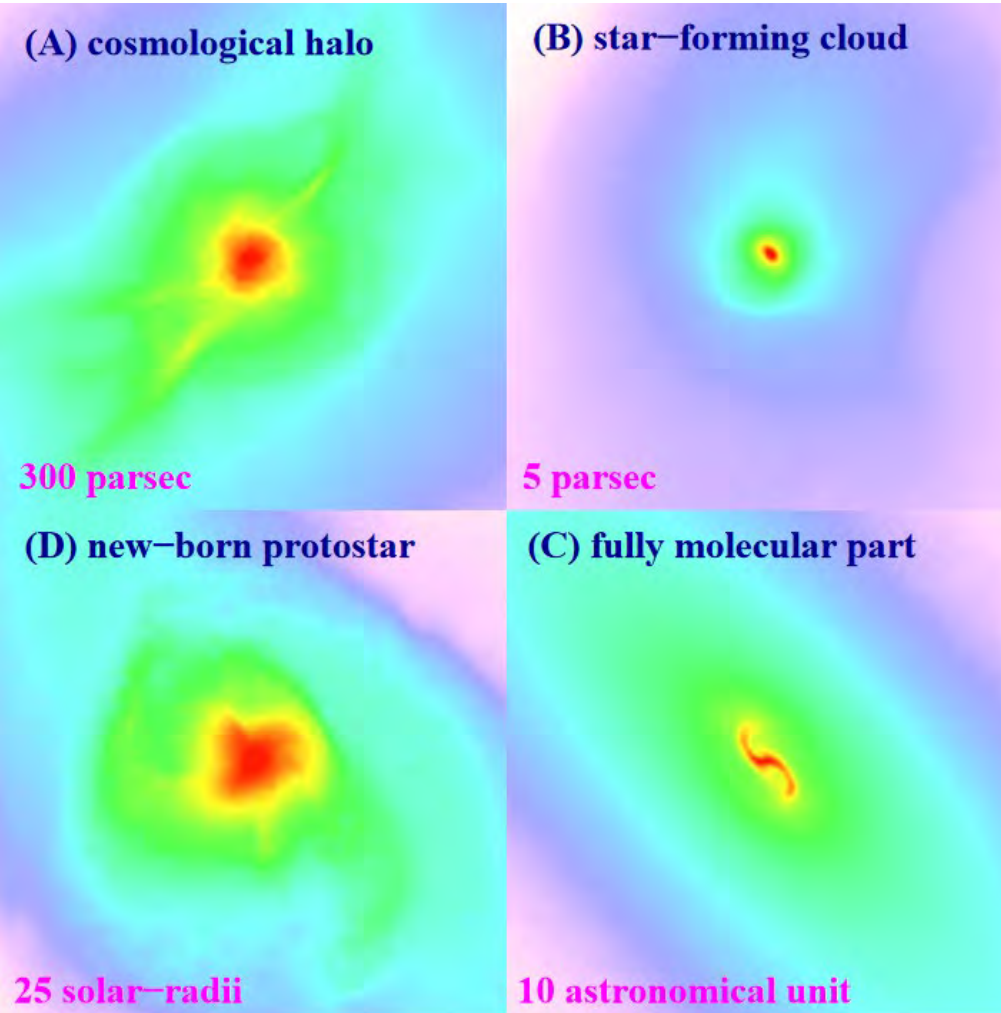
Pop I coeur
 $M_{\text{core}} : 10^{-3}M_{\odot}$
 $M_{\text{frag}} : >0.1M_{\odot}$
 $dM/dt : 10^{-5}M_{\odot}$
Avec grains de poussière

Les étoiles massives (>10 M_{\odot})
se forment difficilement

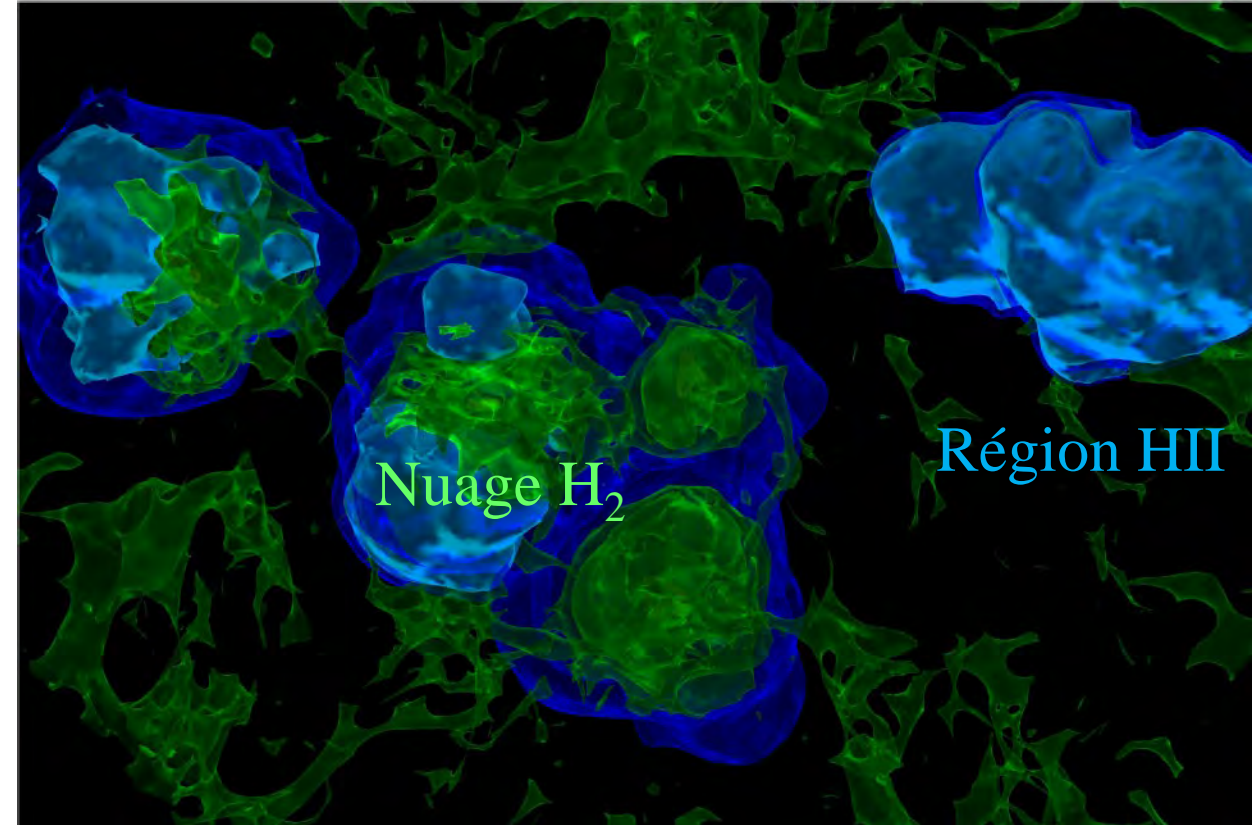
Comment le gaz se refroidit?

H₂ se forme réaction 3 corps

Refroidit jusqu'à 100K, puis HD



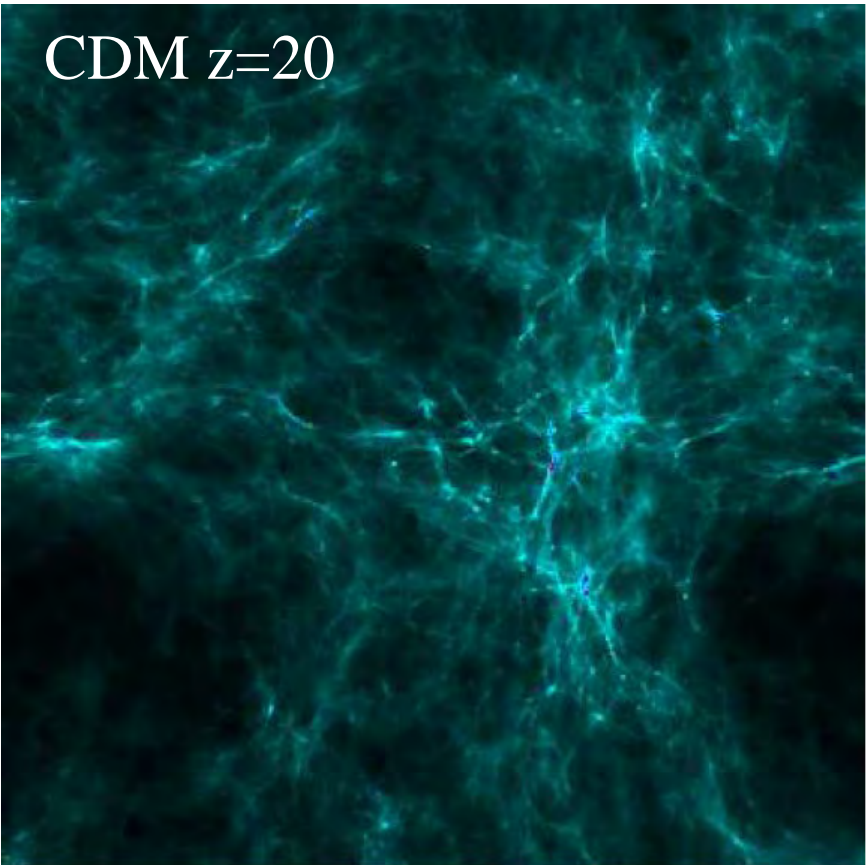
Bromm et al 2009



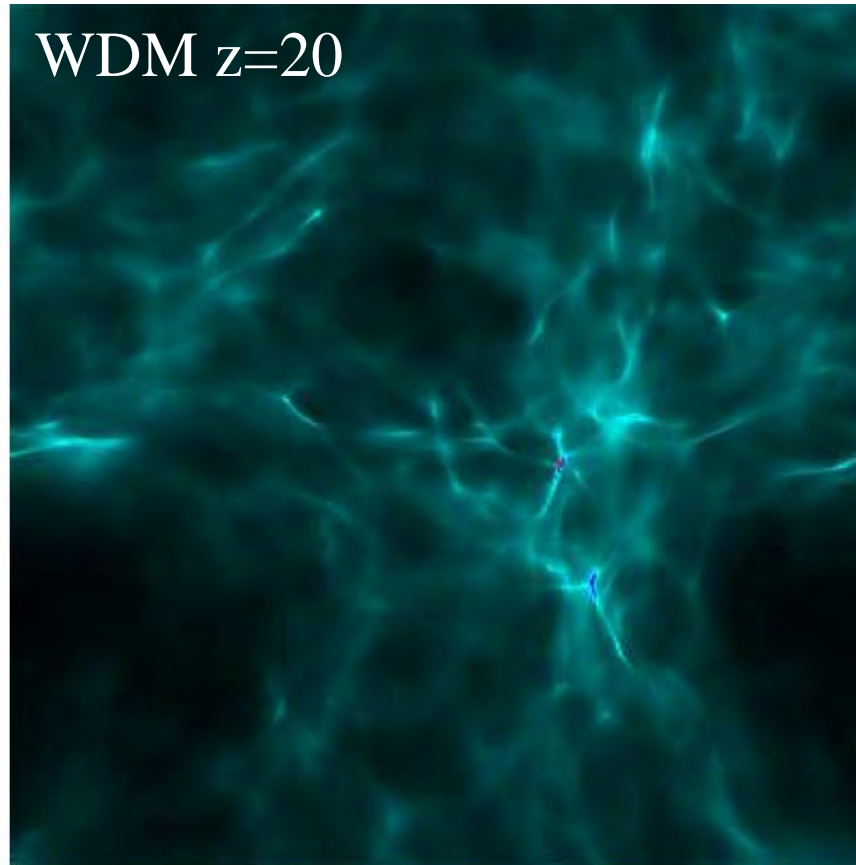
Les régions ionisées catalysent la formation de molécules H₂ HD permet de refroidir jusqu'à T_{CMB} ~50K → formation de PopIII.2

Les régions HII sont optiquement épaisses aux rayons Lyman-Werner qui pourraient dissocier les molécules H₂

CDM $z=20$



WDM $z=20$



Influence du modèle cosmologique

WDM: les petites structures ne se forment pas,
Masse min $10^6 M_{\odot}$

Premières étoiles **plus tard**

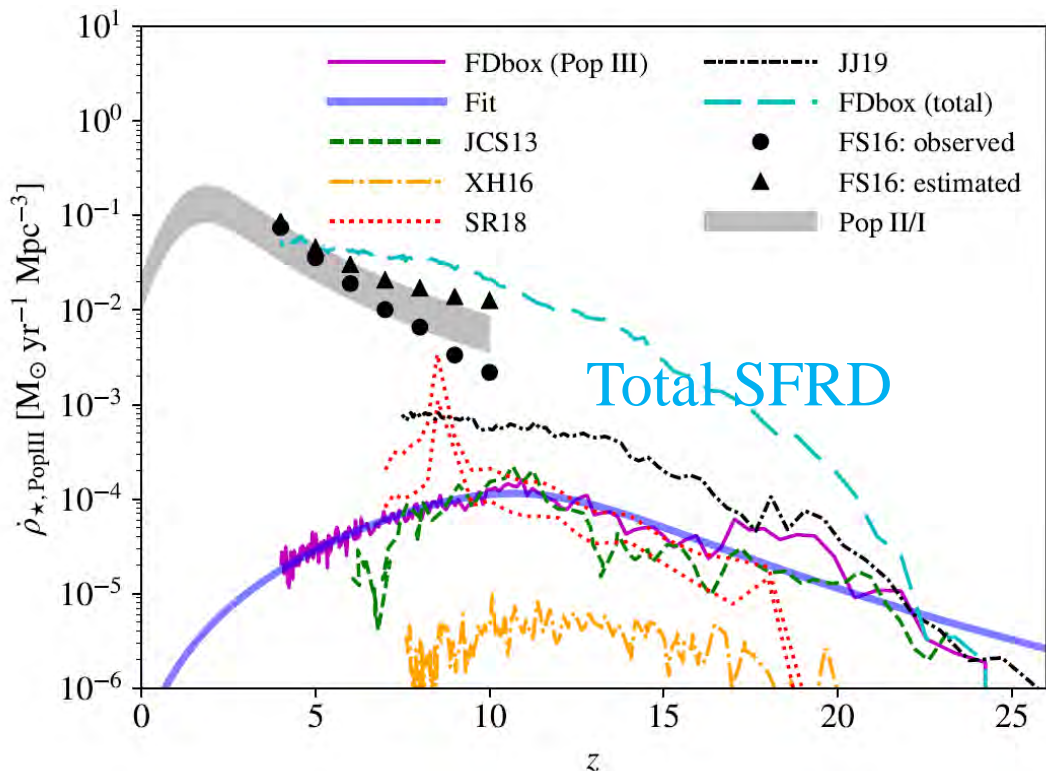
CDM: les premières étoiles PopIII se forment dans des **Minihalos**, $M= 10^5 M_{\odot}$, qui ne sont pas des galaxies

La masse maximum des PopIII est **100-200 M_{\odot}** , limitée par les Phénomènes de feedback: ionisation, chocs

Fin des PopIII ?

Ces étoiles ne se forment plus après $z=5$, si la métallicité est bien distribuée par les supernovae -- **Mais le mélange des métaux est très mal connu**

Il se pourrait que quelques PopIII se forment encore aujourd'hui
Selon le feedback (rayonnement Lyman-Werner de la molécule H_2 , ionisation)
ce sont les galaxies massives qui forment le plus de PopIII (90%)



Ce sont des poches de faible Z dans les galaxies massives, qui contribuent le plus de PopIII

90% du volume cosmique, rempli de gaz pauvre en métaux

Avec feedback
Différents auteurs

Fonction de masse (IMF) de la génération PopII ?

Ces étoiles se forment-elles avec toute une distribution de masses?

Existe-t-il de petites masses, qui subsisteraient aujourd'hui dans la Voie lactée

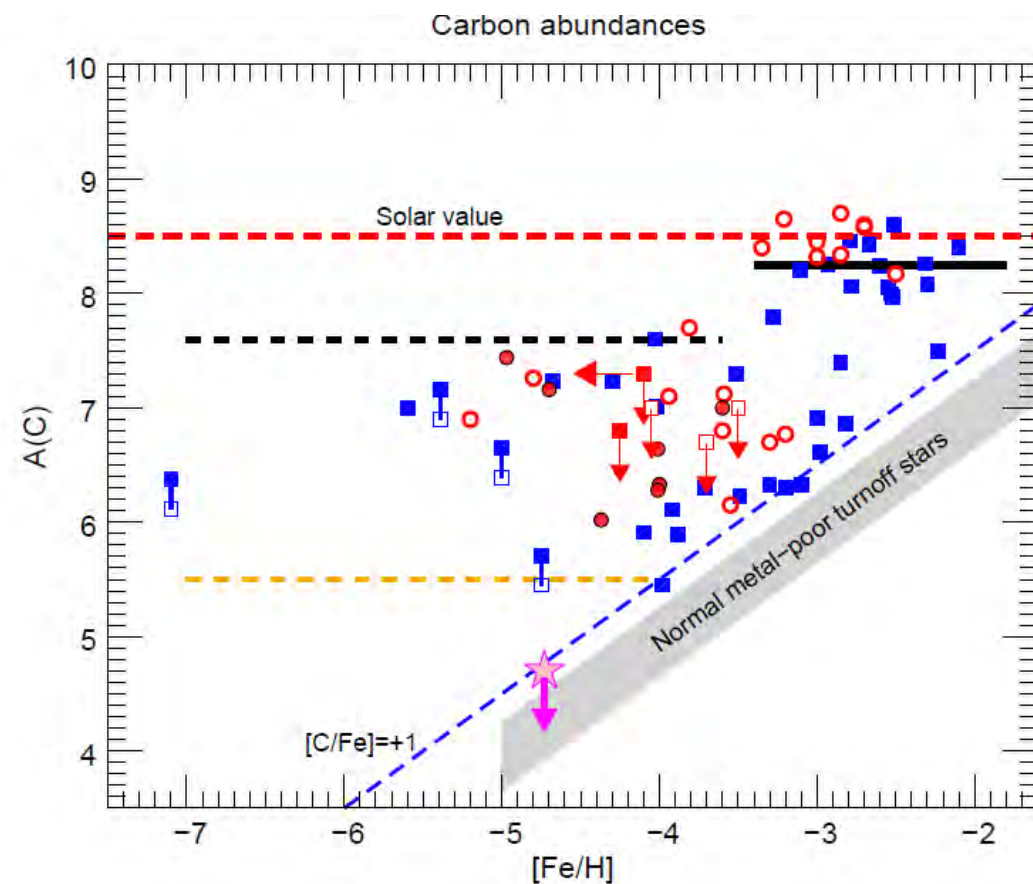
EMP (extremely metal poor) $10^{-4} < Z/Z_{\odot} < 10^{-3}$

UMP (ultra metal poor) $10^{-5} < Z/Z_{\odot} < 10^{-4}$

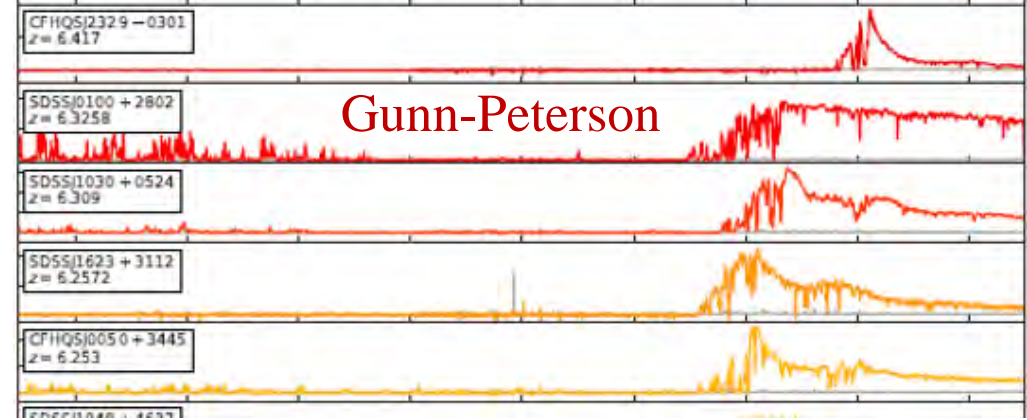
HMP (hyper metal poor) $10^{-6} < Z/Z_{\odot} < 10^{-5}$

→ Apparemment, il existait bien des petites masses, mais elles sont très rares

Curieusement, certaines étoiles UMP montrent une faible abondance $[\alpha/\text{Fe}]$



Résumé



→ Signatures de la réionisation sur le milieu intergalactique
Raies d'absorption devant les quasars

→ Taux de formation d'étoiles, réionisantes avec JWST
Fraction d'échappement $f_{\text{esc}} \sim 10\%$
Avec plus de binaires X de haute masse

→ Etoiles massives exceptionnelles ($100-200 M_{\odot}$) PopIII
IMF à grand z ? étoiles UMP

06355, $z = 7.664$

