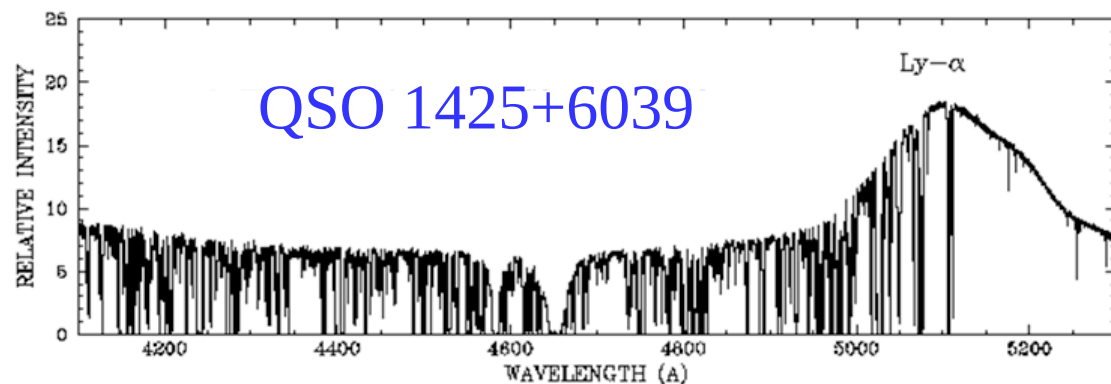




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Absorption devant les quasars



Françoise Combes



Les raies d'absorption: traceur de l'IGM

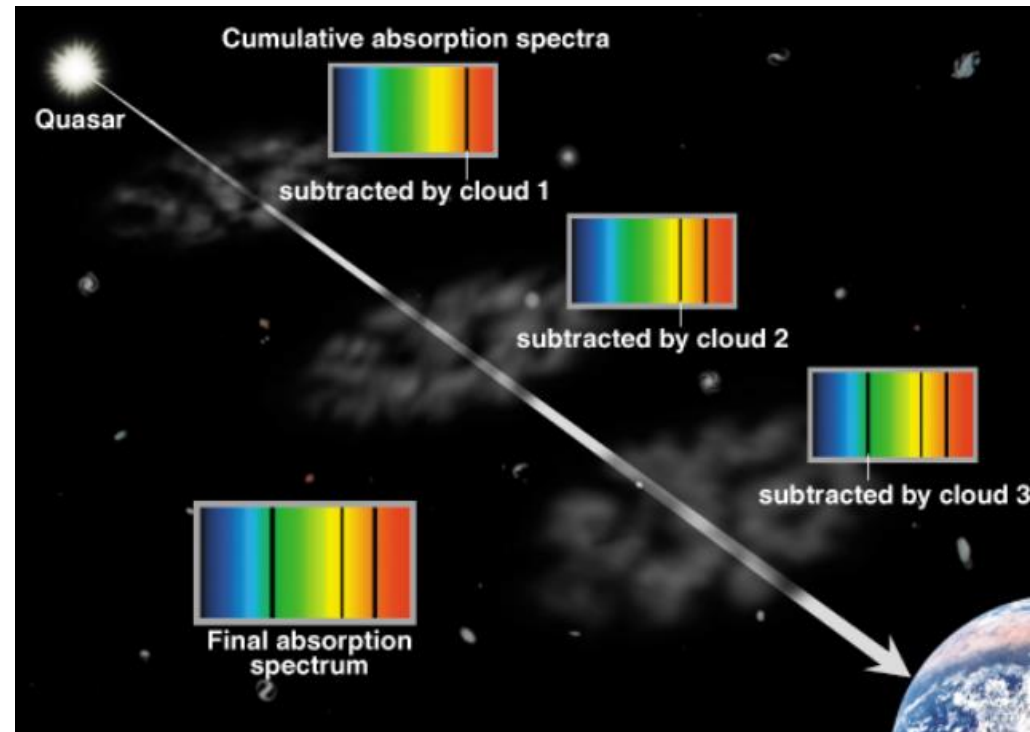
(1) Historique: nature des absorbants

(2) Les divers types: LAF, DLA, BAL, métalliques..

(3) Evolution avec redshift

(4) Absorption à 21cm

➔ Galaxies réionisantes



Pourquoi étudier les absorptions?

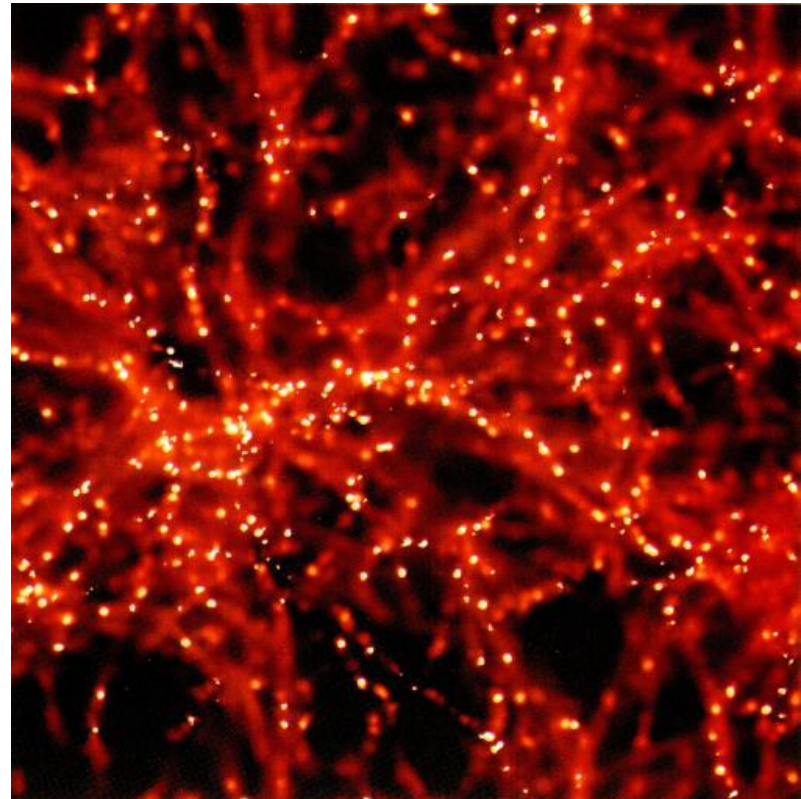
Unique moyen de sonder les filaments cosmiques,
le milieu intergalactique (IGM): T , ρ , N_H , métallicité Z

Contient la plupart des baryons (80%) qui ne sont
pas dans les galaxies, degré de ionisation?

Influence des filaments sur les galaxies?
Dispersion des métaux,
enrichissement de l'IGM

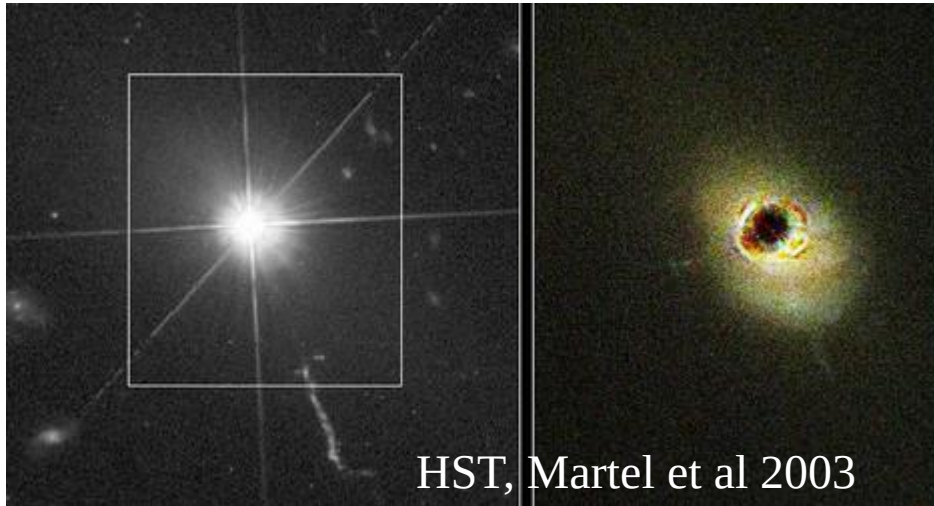
Evolution des filaments en fonction de z
➔ Epoque de la réionisation

Katz et al 1996



Historique du domaine

Découverte des quasars, Maarten Schmidt, 1963



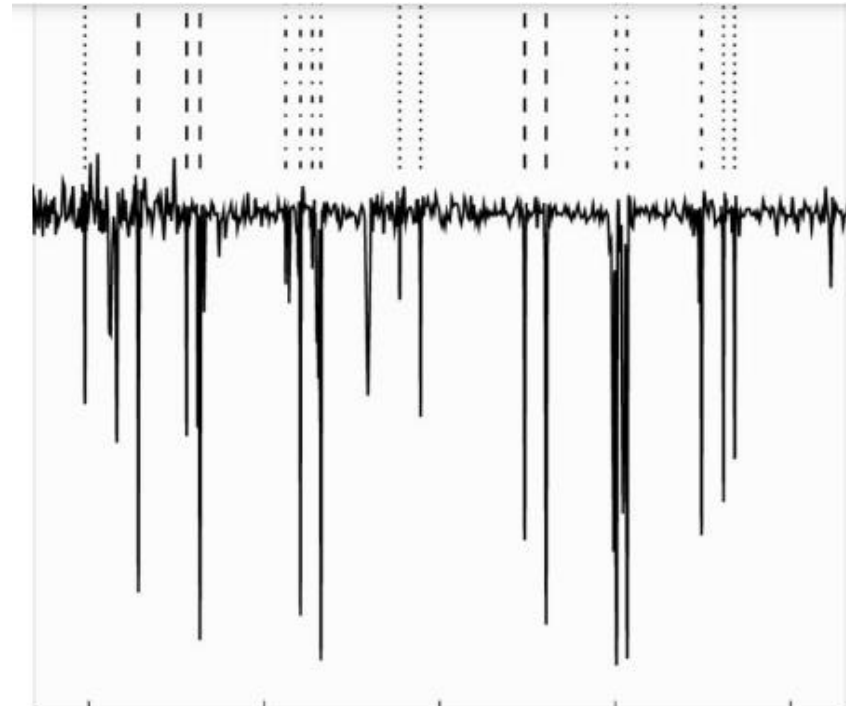
3C273

$z=0.158$

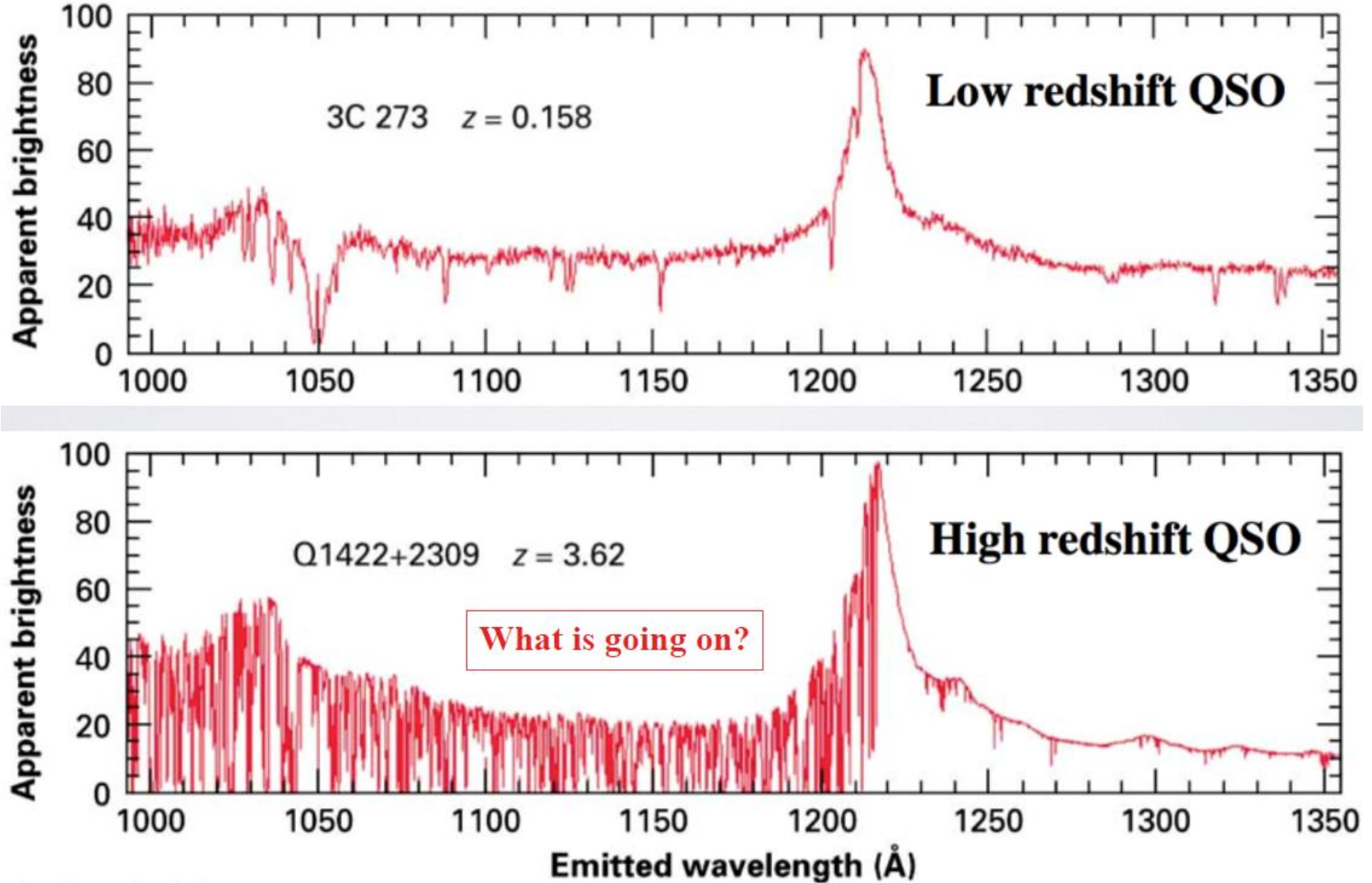
[OIII], $H\beta$,
 $H\gamma$, $H\delta$, $H\epsilon$,
MgII



Raies d'absorption dans le spectre
des quasars, détectées en 1966-7
Grand débat: viennent elles de gaz
autour du QSO? *Perry et al 1978*
Rien ne correspond au $z(\text{abs})$:
nuages invisibles intergalactiques?
Interprétation: **doublets** MgII, CIV,
NV, OVI..



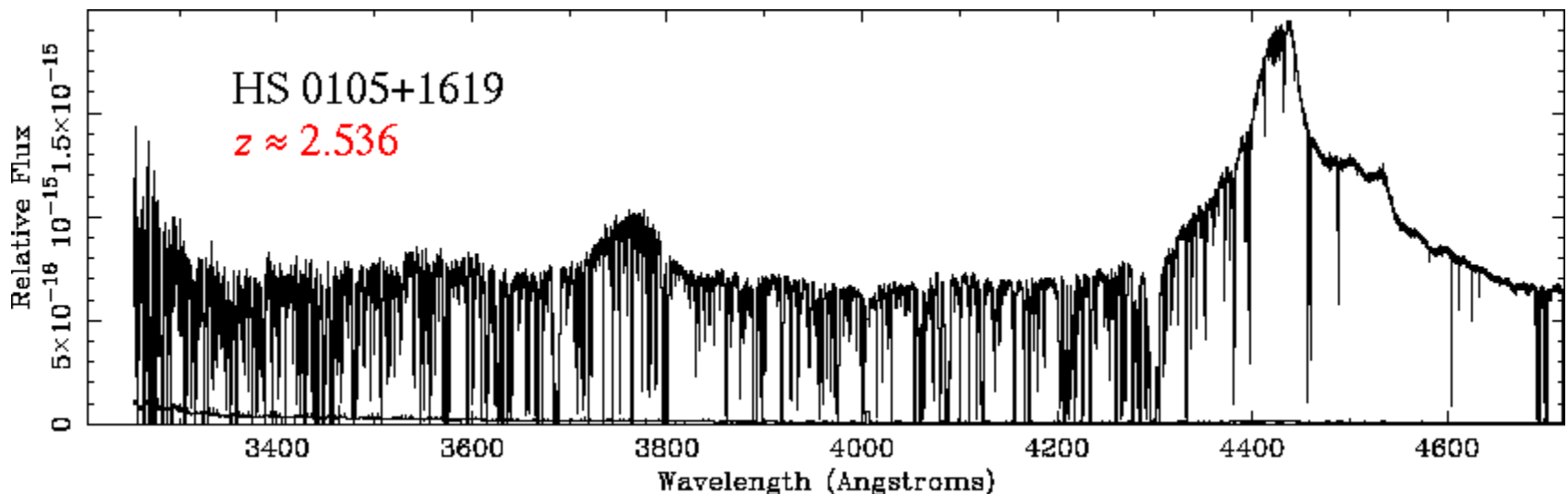
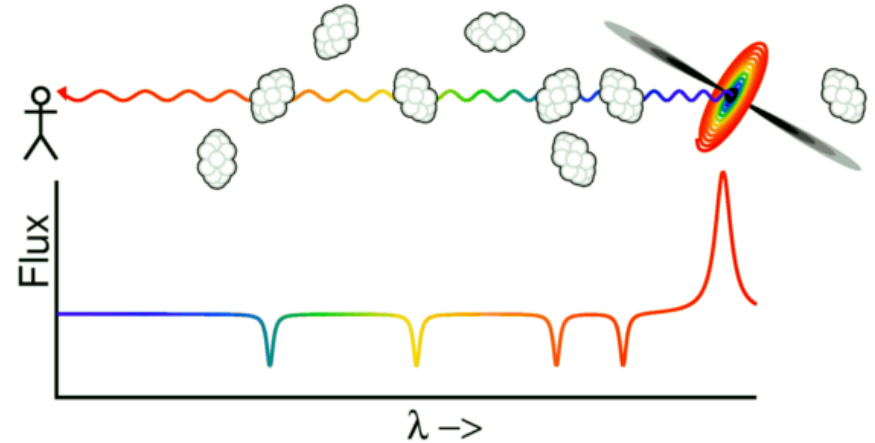
Différences selon le redshift



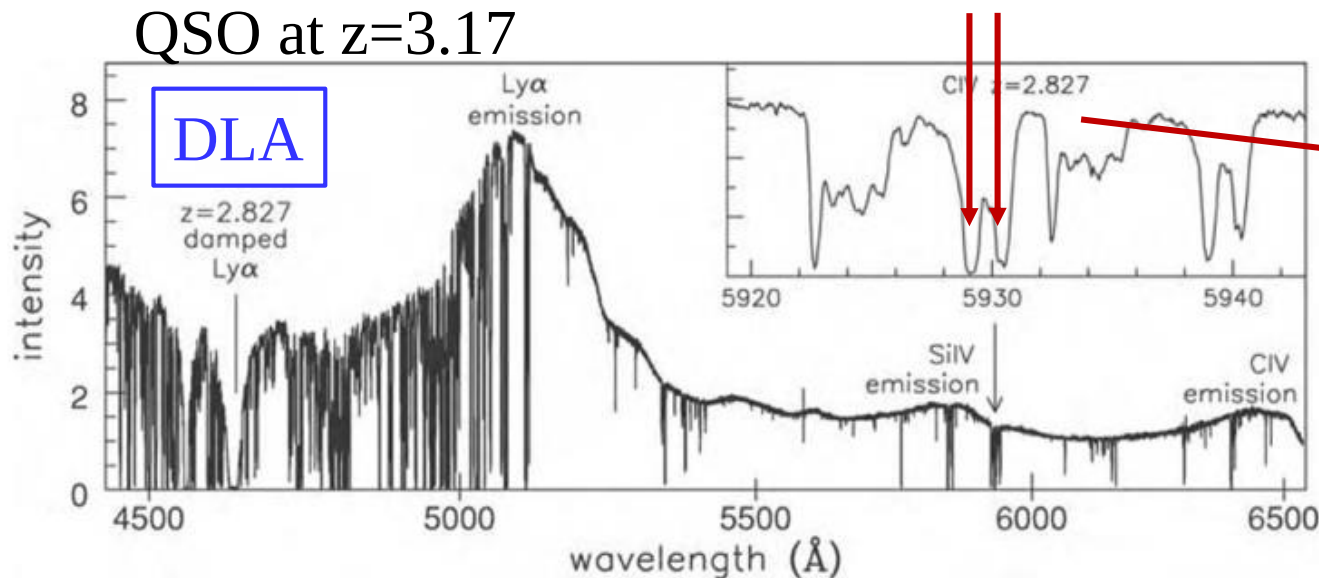
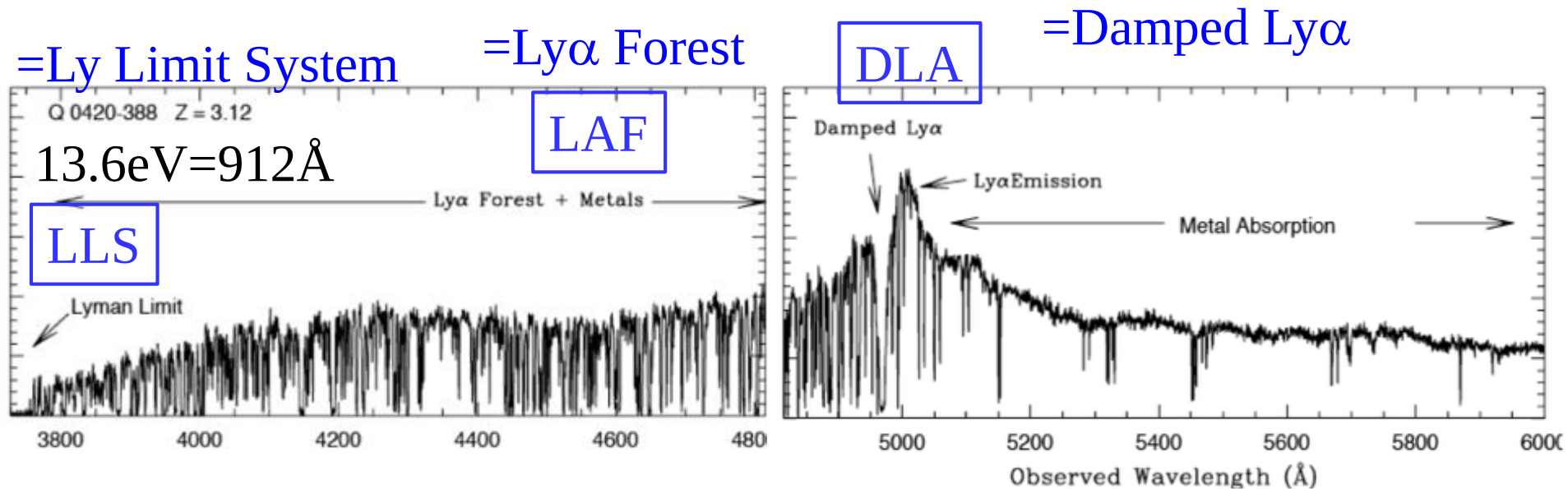
Revue de Weymann et al 1981: semble privilégier nuages sur la ligne de visée, quand $z_{abs} < z_{em}$

La forêt Lyman α

- multitude de raies d'absorption Ly α , du gaz d'hydrogène neutre à une multitude de redshifts $0 < z_{abs} < z_{em}$
- la profondeur de l'absorption dépend **de la densité de colonne**
 N_H (cm^{-2})
- N_H est fonction de la taille et densité ρ (cm^{-3}) du nuage

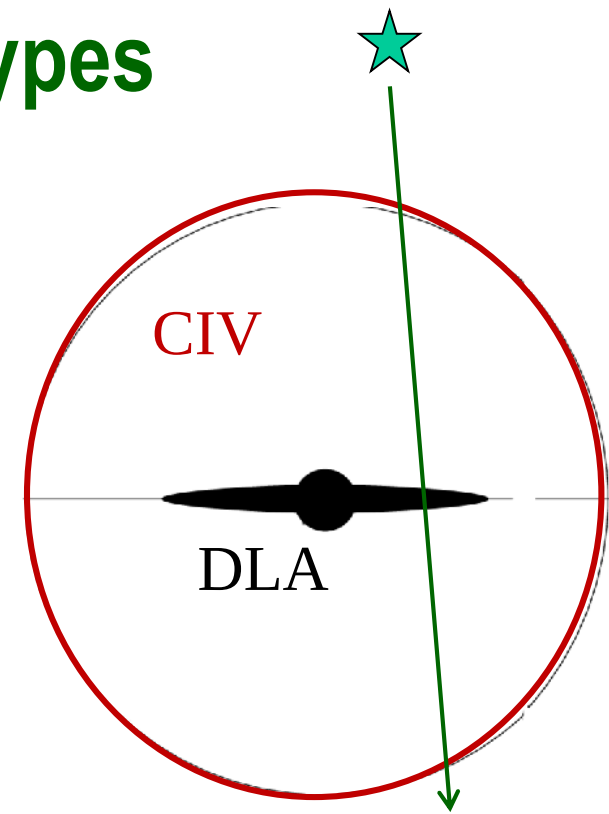
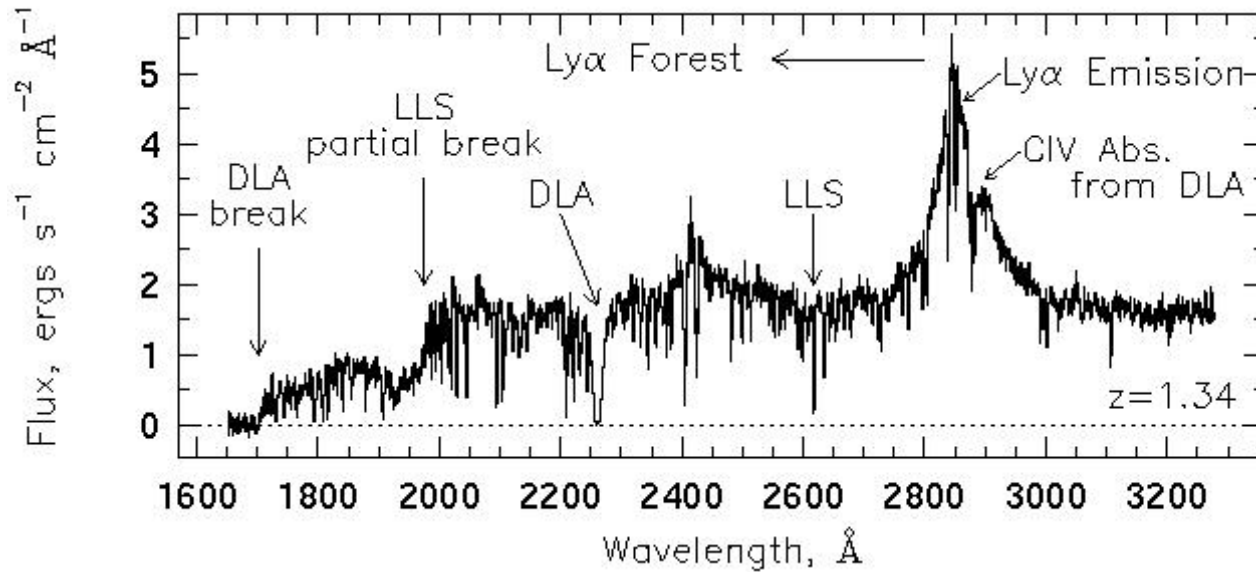


Trois types d'absorbants



Absorption de CIV
Doublet 1548.2 Å
et 1550.8 Å
MgII (2795-2802 Å)
etc...
Très utiles

Correspondances entre les types



La forêt Ly α correspond à des nuages, filaments et feuilles du milieu intergalactique (IGM)

DLA et raies métalliques à des galaxies (ou halos de galaxies)
A chaque DLA $\rightarrow$ une raie métallique



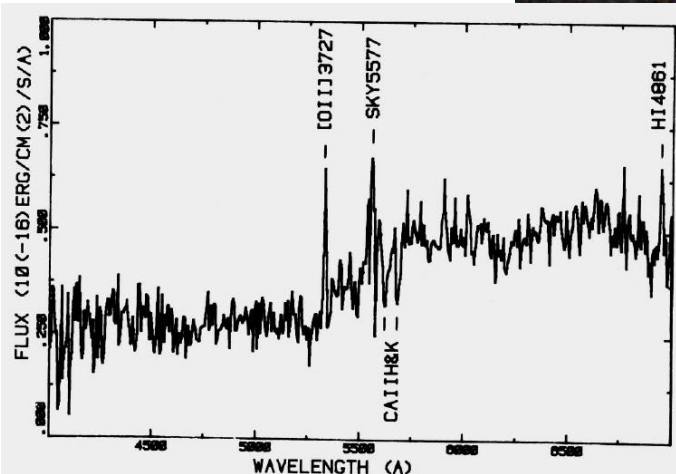
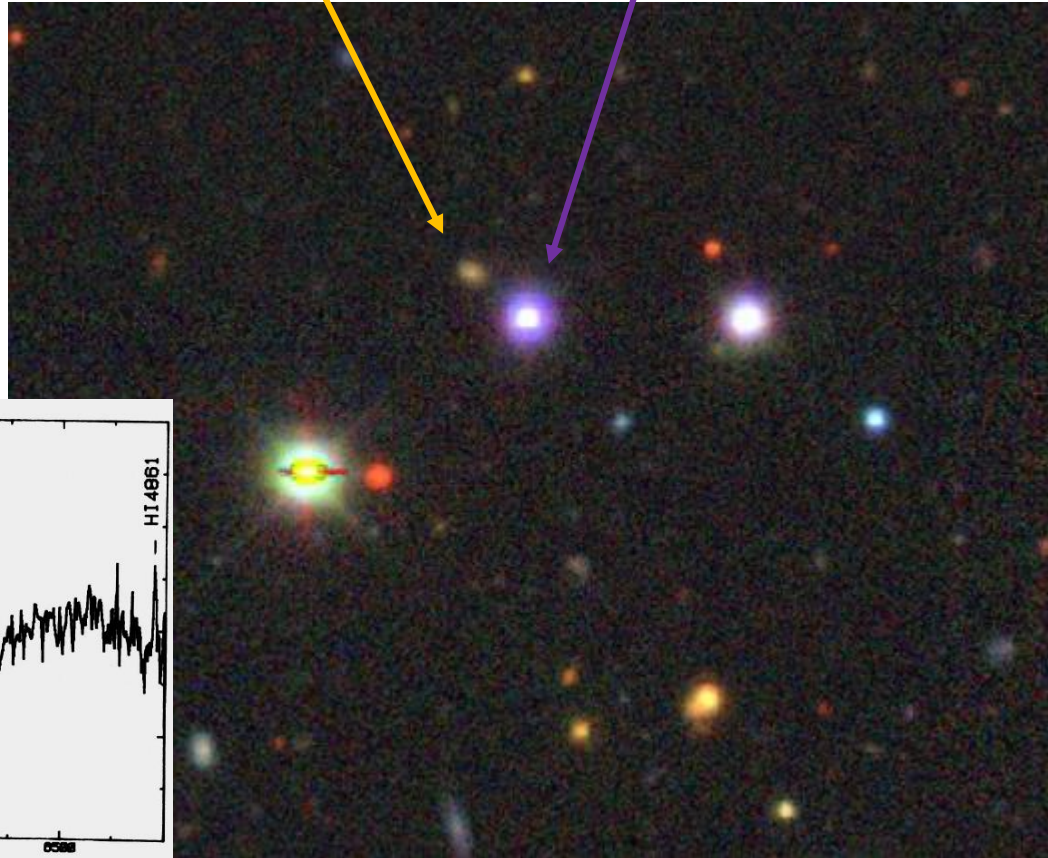
Première association avec une galaxie

MgII $z=0.43$

PKS2128-12

Galaxie
et MgII abs
 $z=0.43$

Quasar
PKS2118
 $z=0.5$



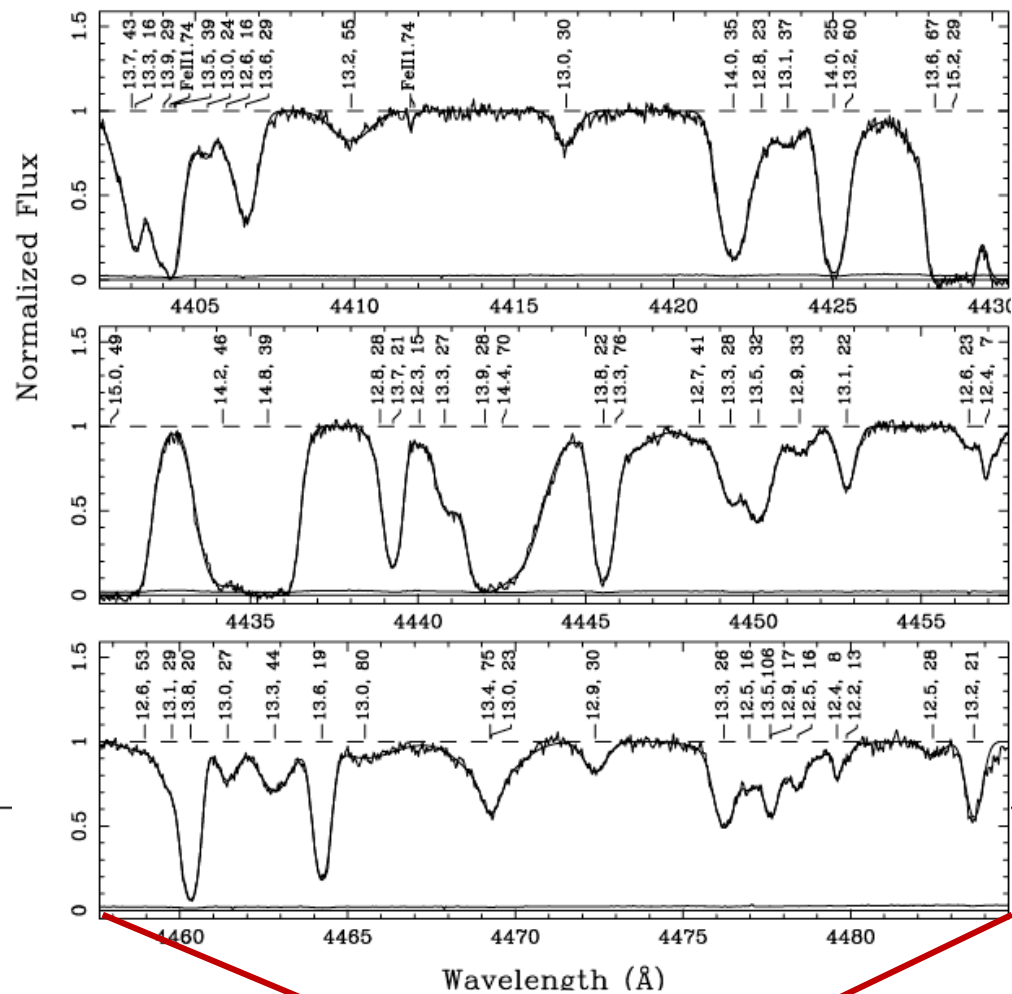
Galaxie située à $8.6'' = 64\text{kpc}$, absorption dans les parties externes d'une galaxie sur la ligne de visée

Bergeron 1986

Grande richesse d'informations

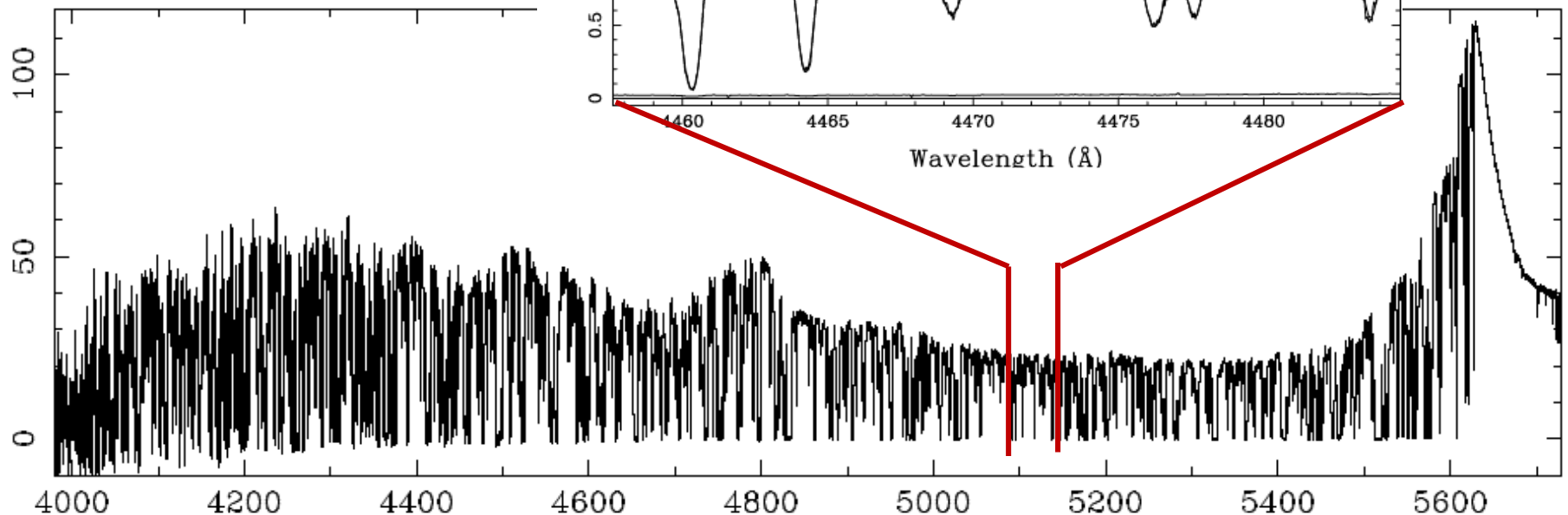
Premières observations
avec $\delta V = 7.9 \text{ km/s}$
Telescope Keck

Kirkman & Tytler 1997



466 Ly α
73 metal

NH, σ



Largeur des raies

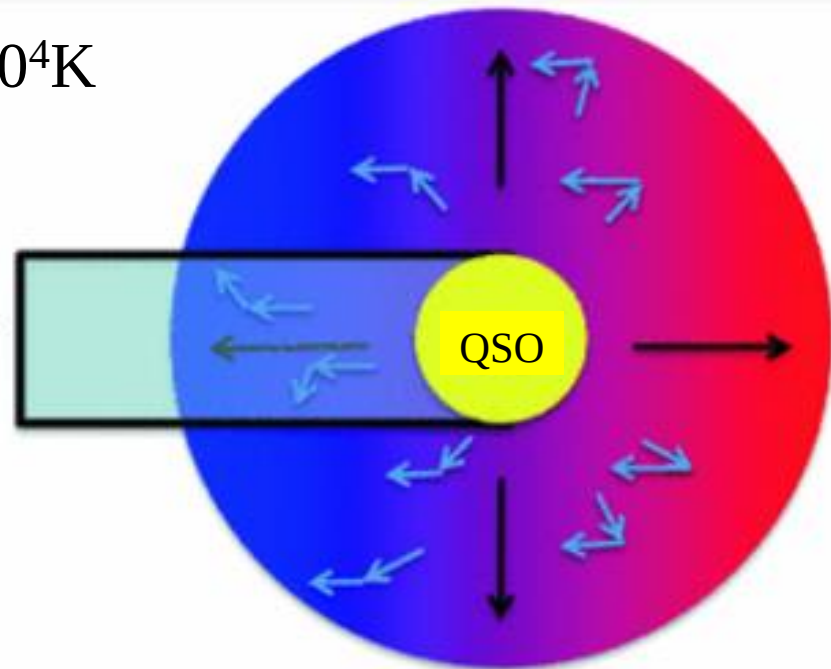
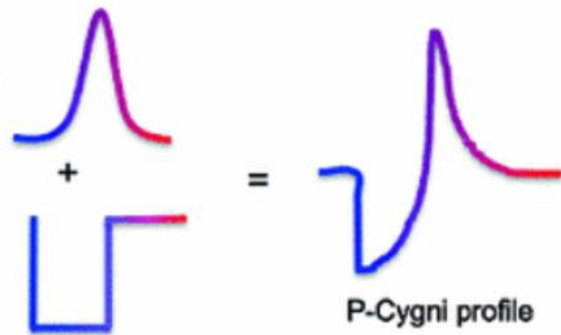
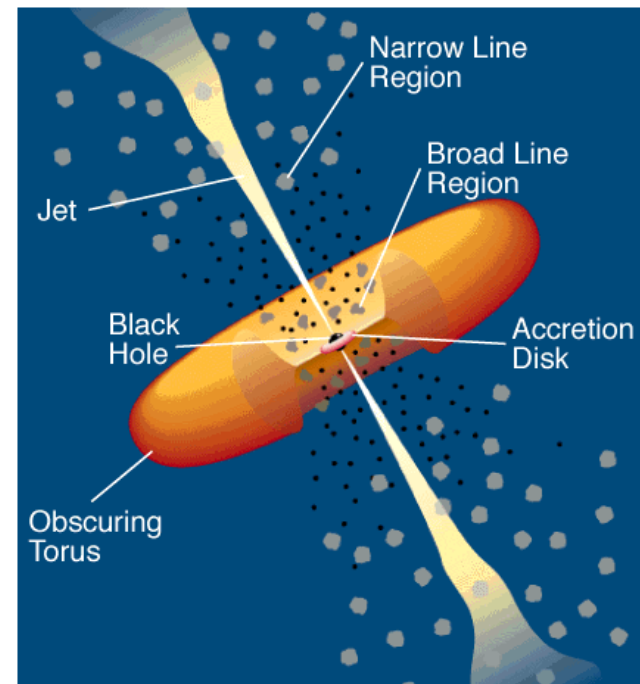
Raies larges autour d'un trou noir (BLR)
10 000 km/s disque d'accrétion

Raies étroites < **1000 km/s** (NLR)

Raies métalliques **10-30 km/s**

Lyman α **30-35 km/s** $\Delta V = (2kT/m_h)^{1/2}$
= 12 km/s pour $10^4 K$
parfois moins

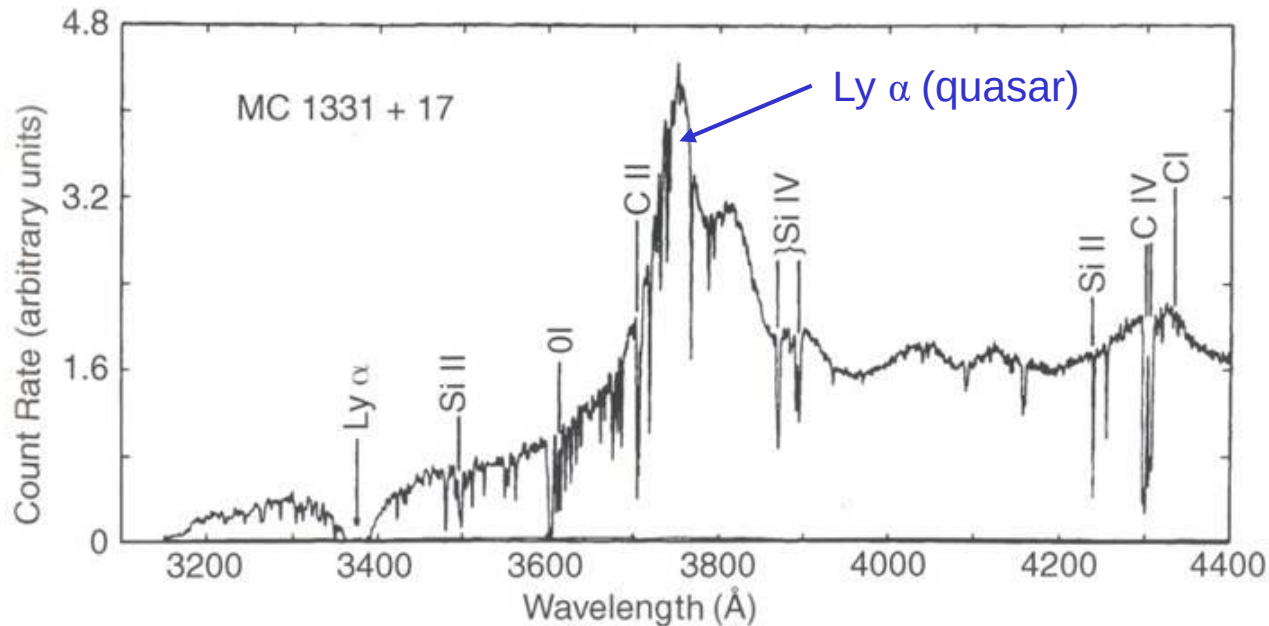
Absorptions larges (BAL)
proviennent des outflows



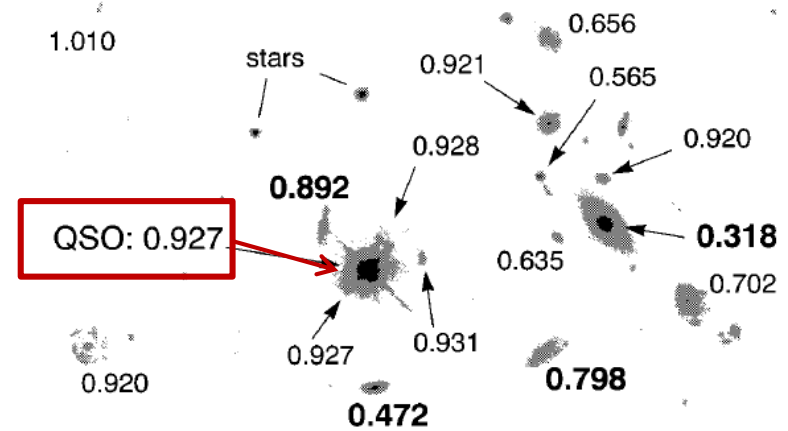
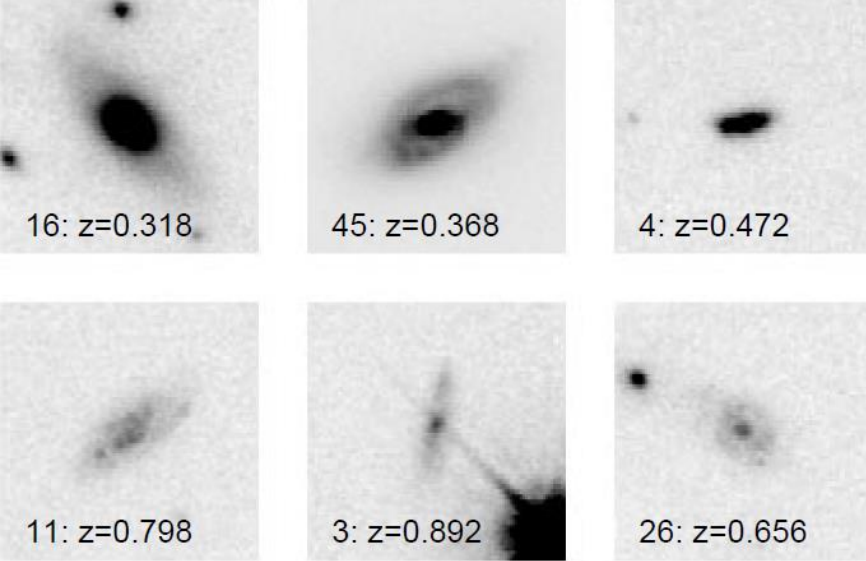
Les systèmes métalliques

Nombreuses raies dans l'aile rouge

- raies étroites (MgII, CIV, SiIV, SiII OI, Cl...) avec $0 < z_{abs} < z_{em}$
 - non associées avec le quasar, mais à la matière sur la ligne de visée (galaxies, halos galactiques...) sauf quand $z_{abs} \approx z_{em}$
- ➔ Enrichissement par le rejet des étoiles (ionisation, Z,..)

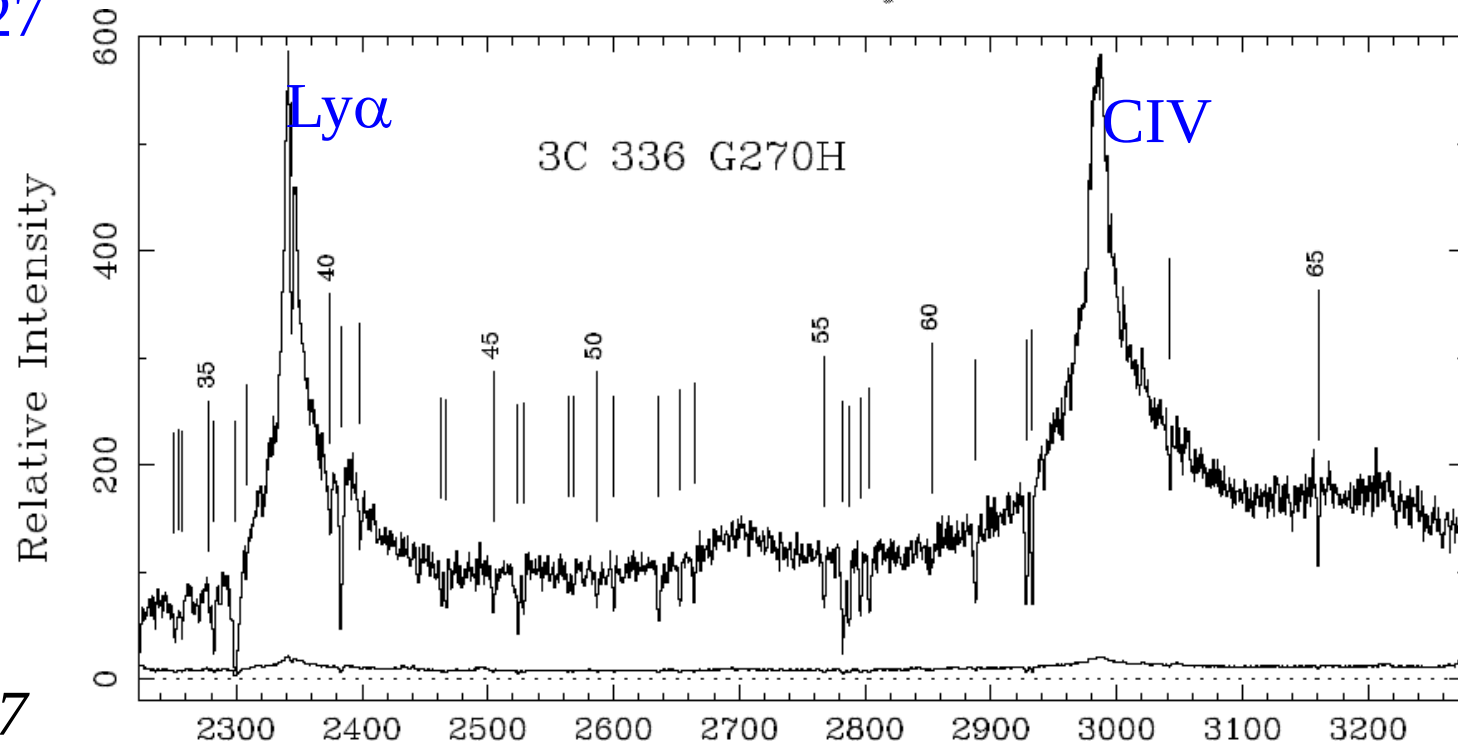


Systemes associés à des galaxies



3C336 $z_{\text{em}}=0.927$
6 systèmes
métalliques
détectés

Jusqu'à 50kpc



Steidel et al 1997

Evolution de la métallicité

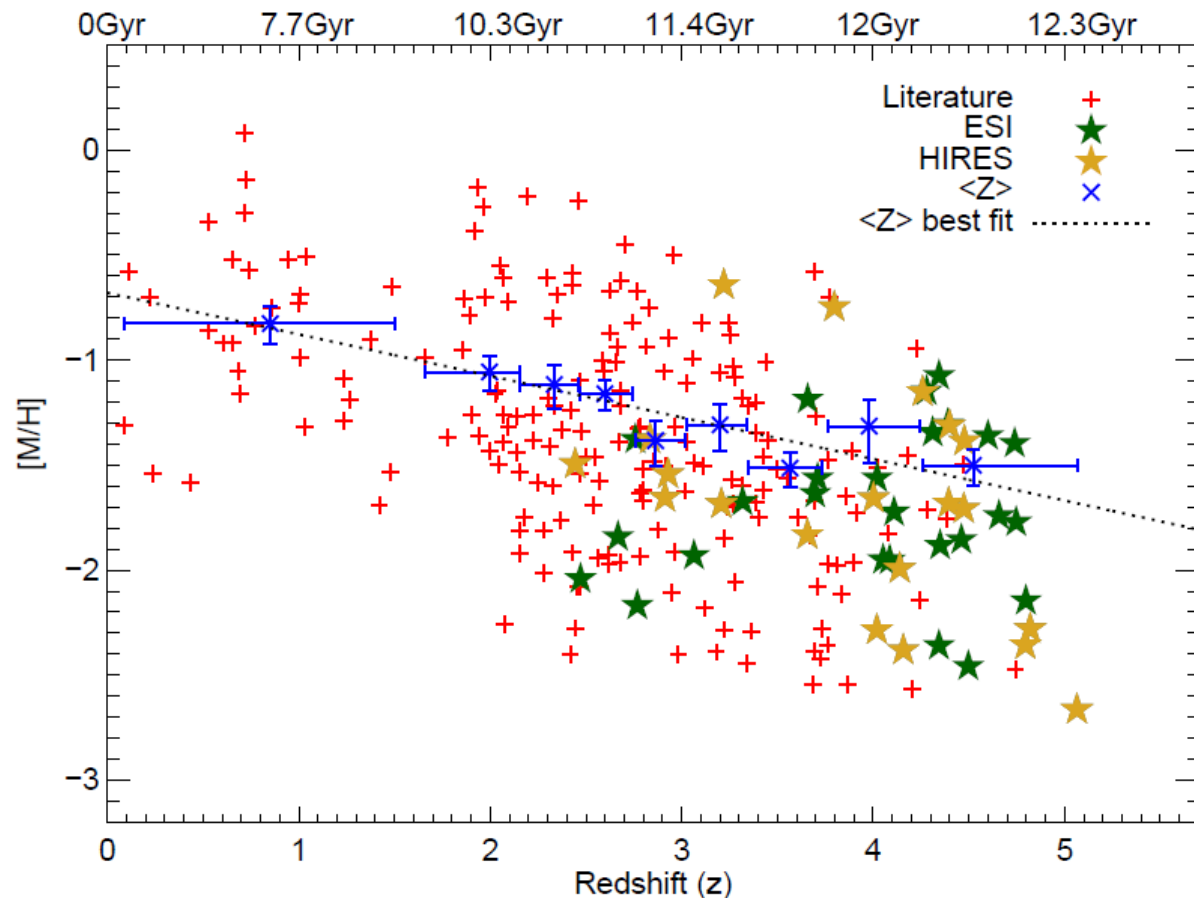
Les DLA correspondent aux galaxies, et ont toujours des systèmes métalliques associés

Evolution de M/H
en fonction de z

M/H correspond
aujourd'hui ($z=0$) aux
étoiles du halo
de la Voie lactée

Enrichi en α/Fe

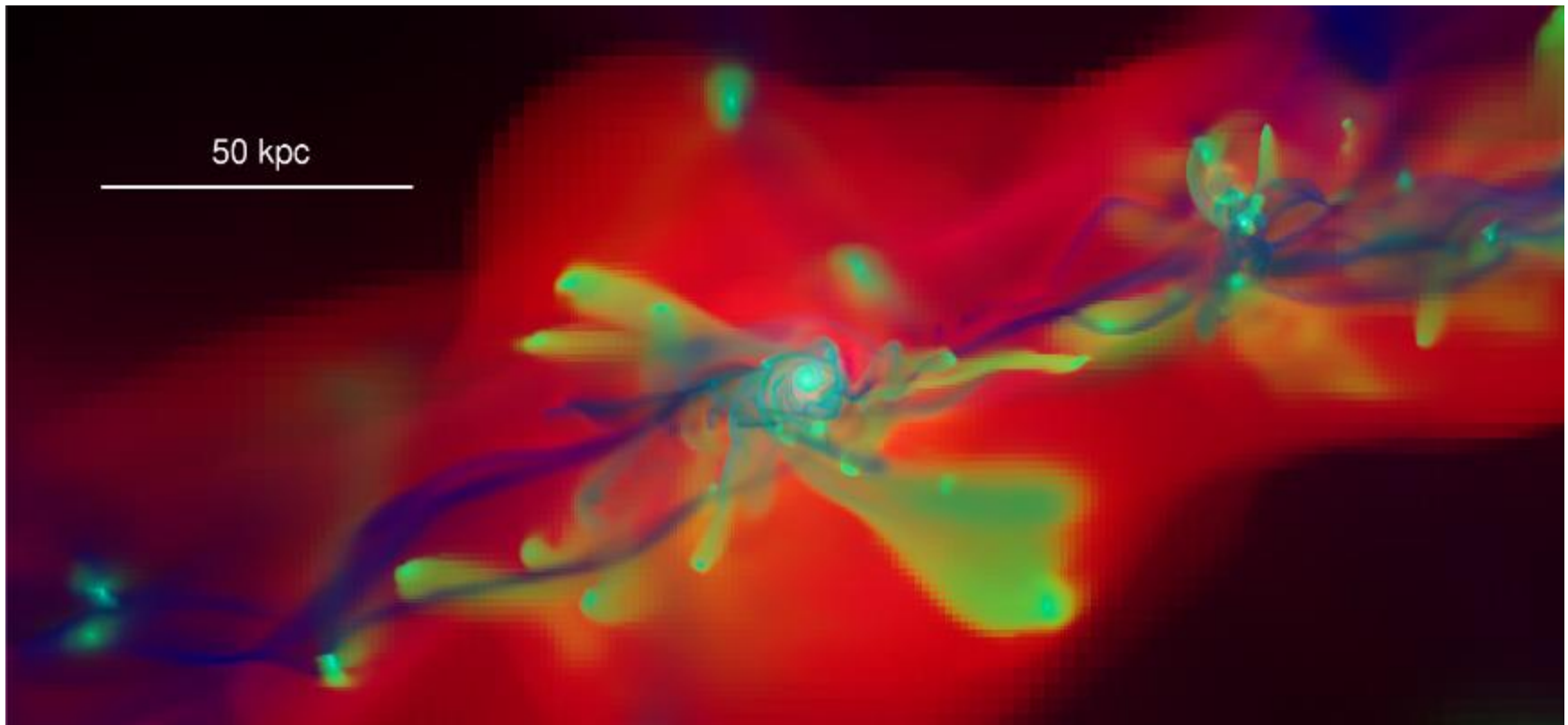
Rafelski et al 2012



Enrichissement de l'IGM

Rouge= température Vert= métallicité Bleu = densité

Accrétion de gaz froid sur les galaxies, puis feedback, enrichissement



Agertz et al 2009

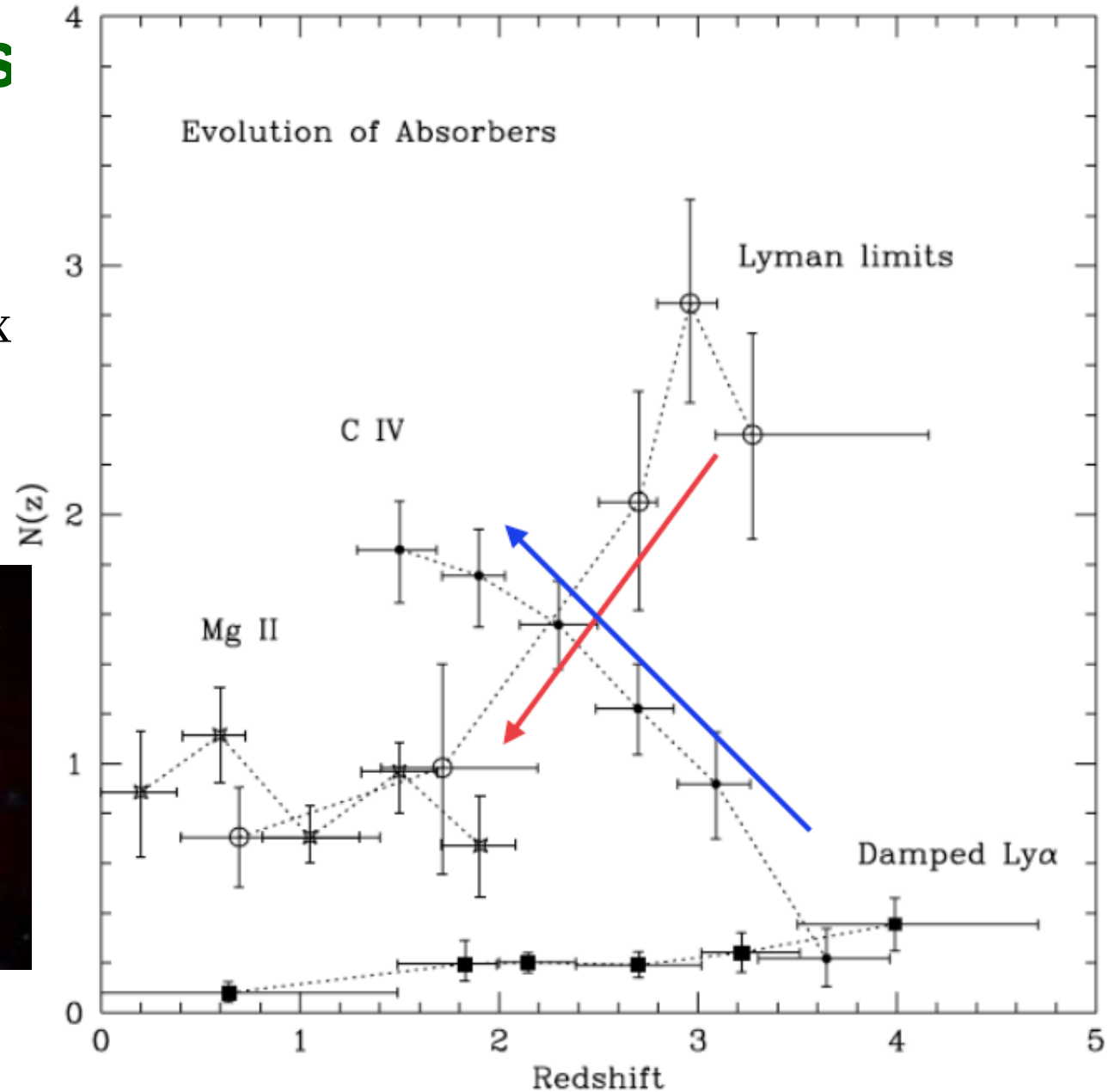
Evolution tous systèmes

Décroissance de HI
Croissance des métaux

M82



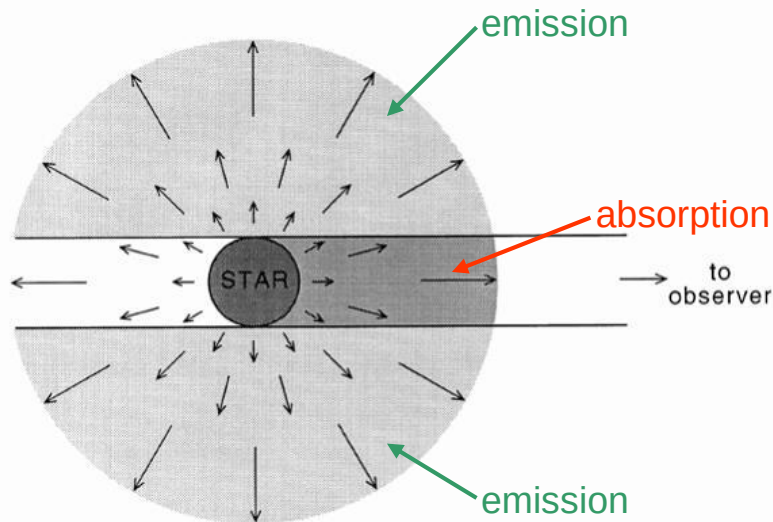
Vent des supernovae



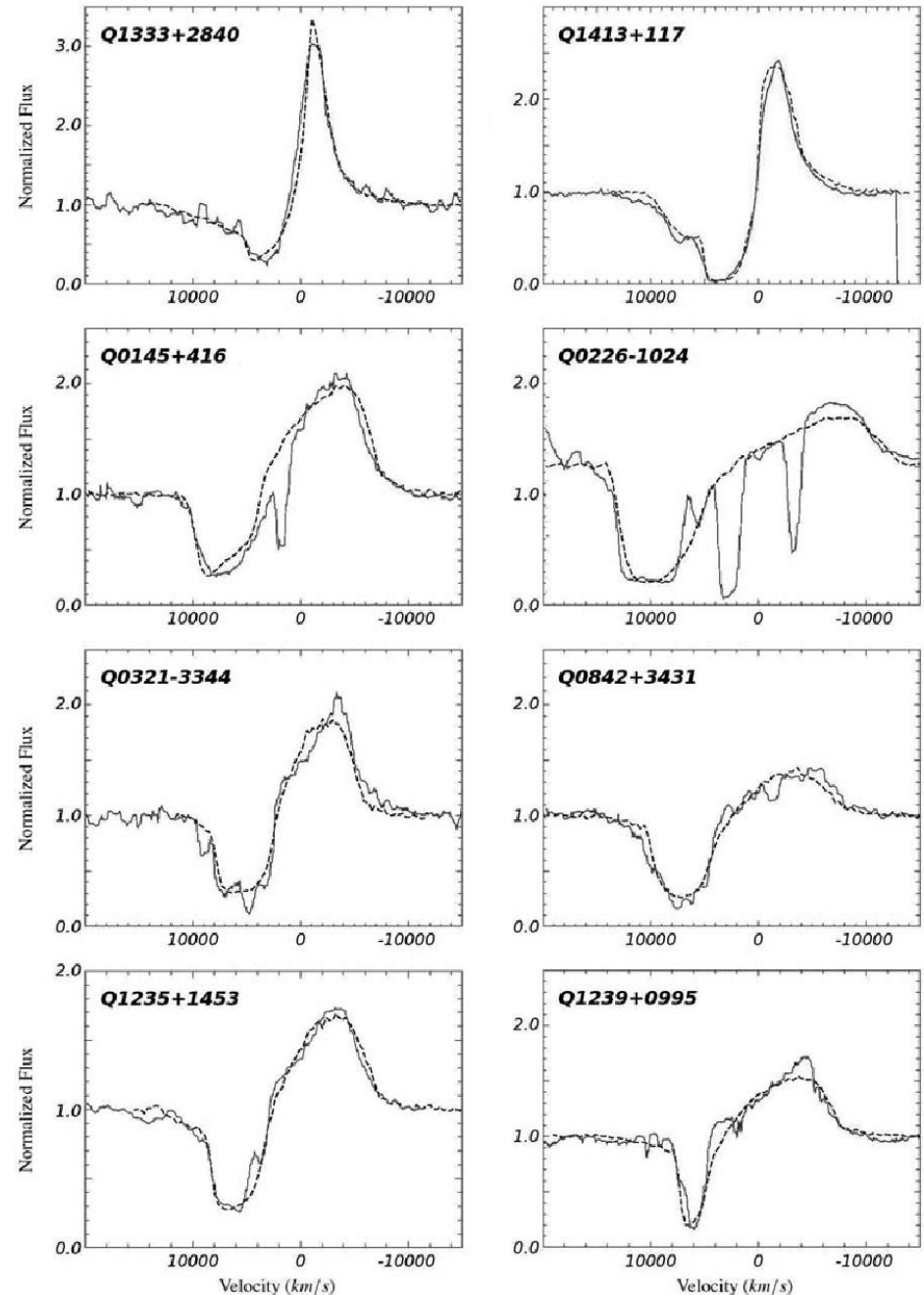
Les BAL

Broad absorption lines

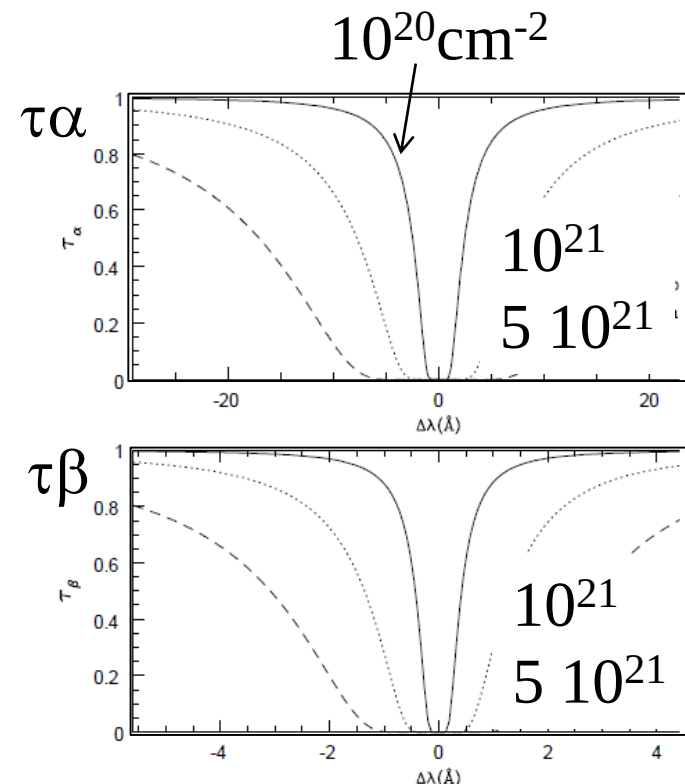
- présentes dans $\sim 15\%$ des QSOs, avec z_{abs} légèrement moins que z_{em}
- Profil de type *P Cygni*, caractéristique de matière éjectée de l'objet central (*outflow*)



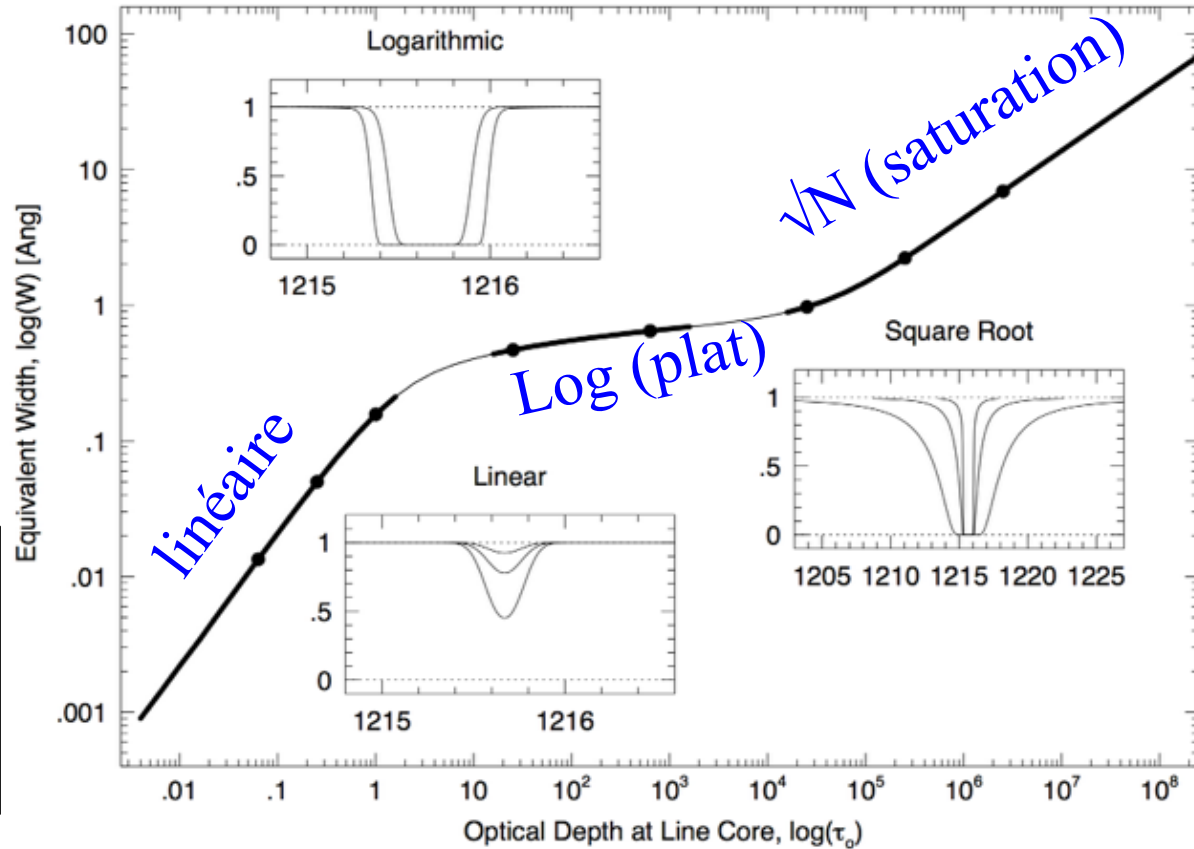
Blue-shifted Absorption



Courbe de croissance



Ly β plus faible



- linear: $\tau_0 < 1 \rightarrow W_\lambda \propto N$
- logarithmic: $10 \lesssim \tau_0 \lesssim 10^3 \rightarrow W_\lambda \propto b \sqrt{\ln(N/b)}$
- square-root: $\tau_0 \gtrsim 10^4 \rightarrow W_\lambda \propto \sqrt{N}$

Largeur
 W_λ

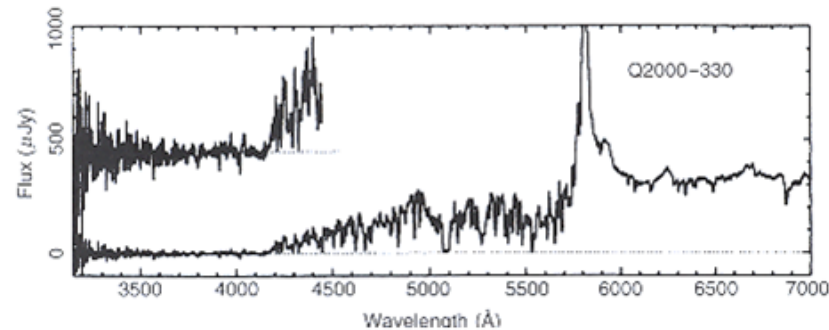
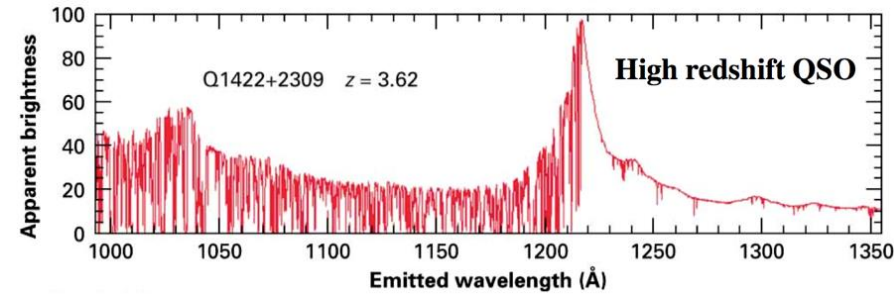
Densité de colonne

- $N_{\text{H}} < 10^{17} \text{ cm}^{-2} \rightarrow$ raies étroites

forêt Ly α $Z=0.01 Z_{\odot}$

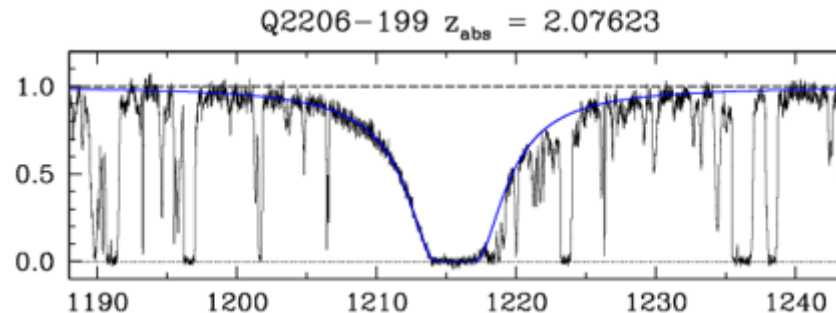
- $N_{\text{H}} > 10^{17} \text{ cm}^{-2} \rightarrow$ systèmes **'Lyman limit' LLS**: photons de $\lambda < \text{Lyman limit (912 \AA)}$ complètement absorbés

comme pour la
cassure Lyman
(LBG)

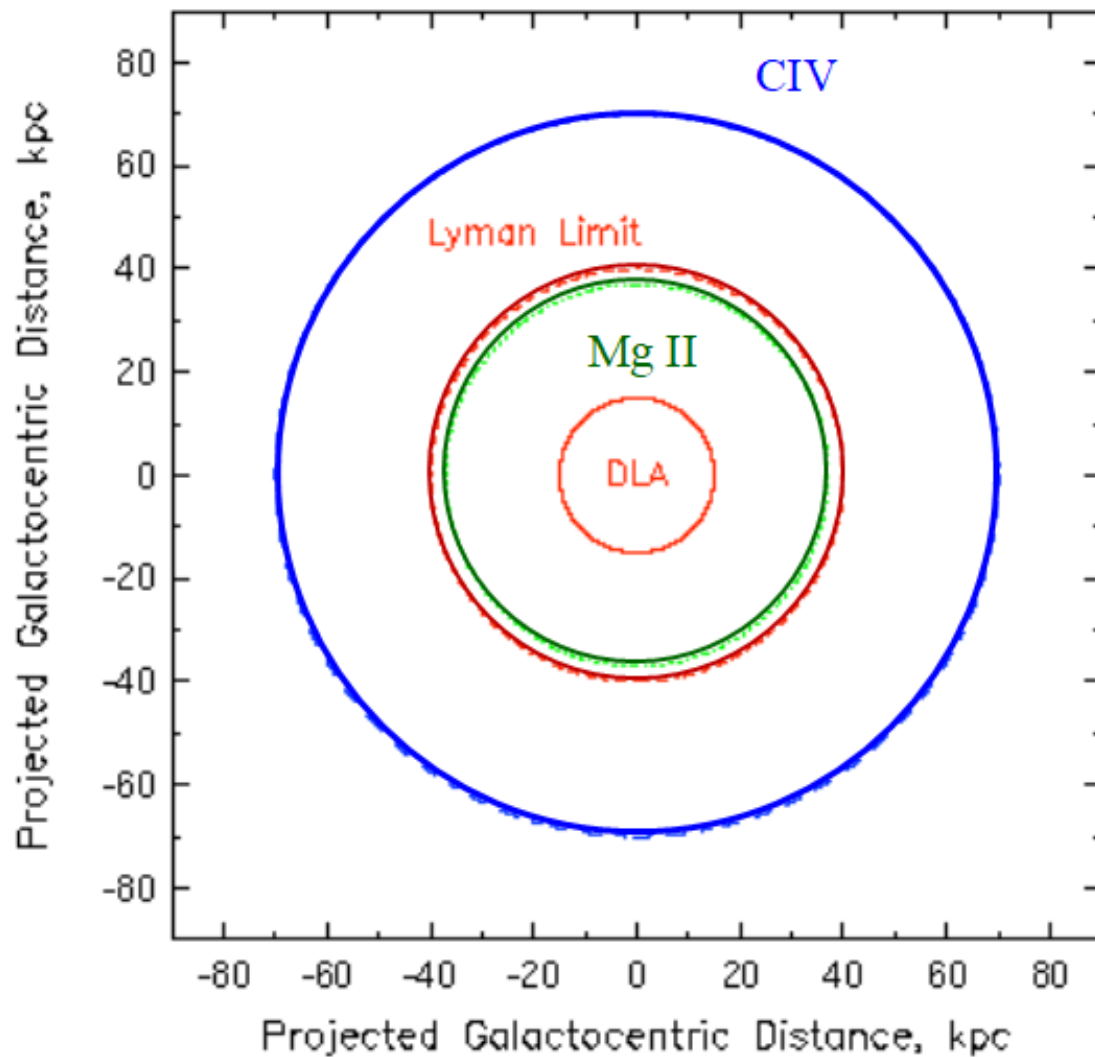


- $N_{\text{H}} > 10^{20} \text{ cm}^{-2} \rightarrow$ **DLA damped Ly α** : les ailes de raie, dues à un élargissement naturel des raies, domine (galaxies et proto-galaxies)

$Z=0.1 Z_{\odot}$



Schematic of Galaxy Gas Cross Sections



Autour des galaxies
DLA jusqu'à 20kpc

MgII 40kpc

LLS Lyman limit systems

CIV 70kpc

Gaz ionisé éjecté des galaxies

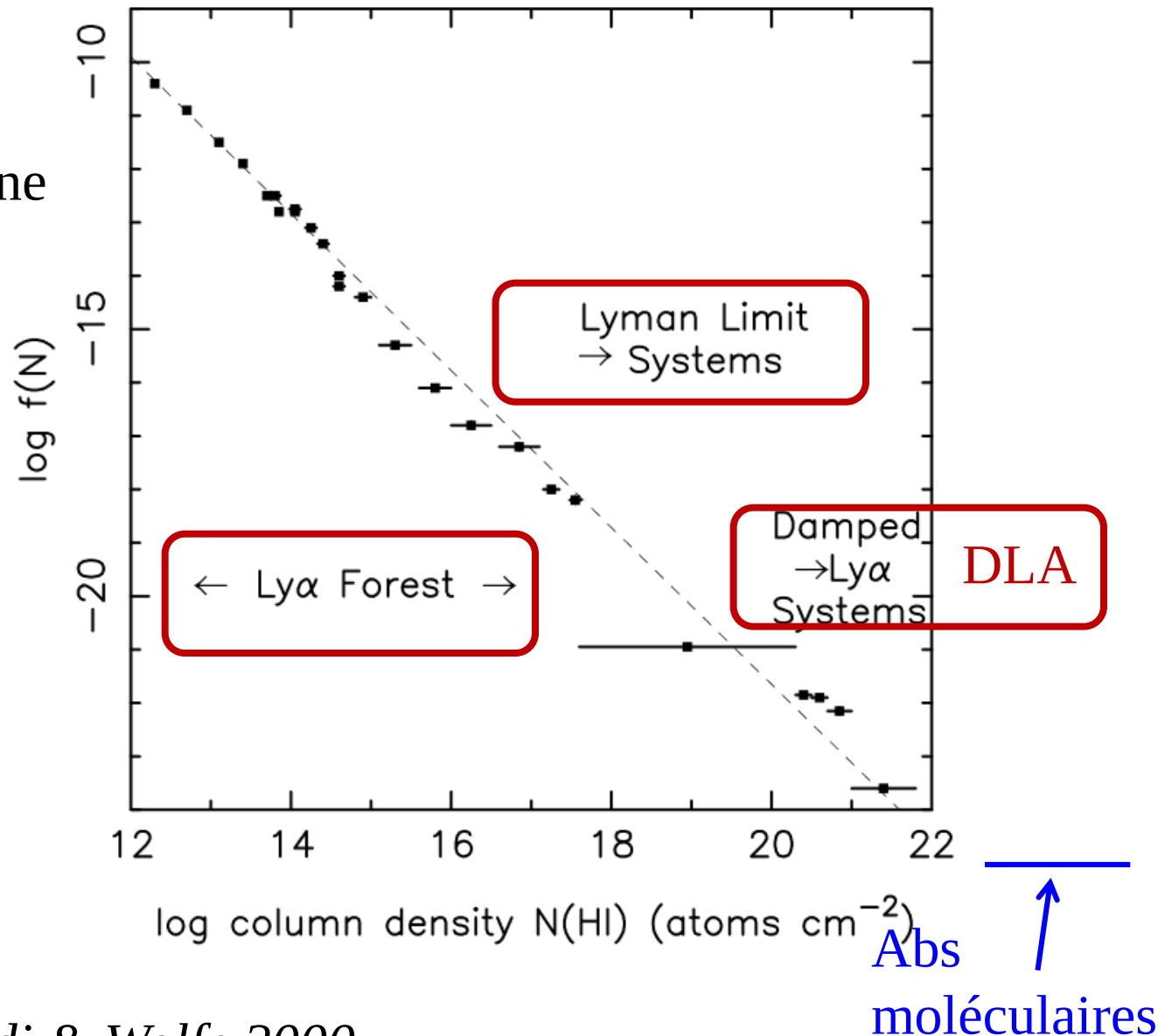
Très ténu

Section efficaces πb^2

Probabilité d'absorption

Nombre d'absorbants vs NH

Les densités de colonne
correspondent
à la nature des
absorbants



Storrie-Lombardi & Wolfe 2000

Nombre d'absorbants vs NH

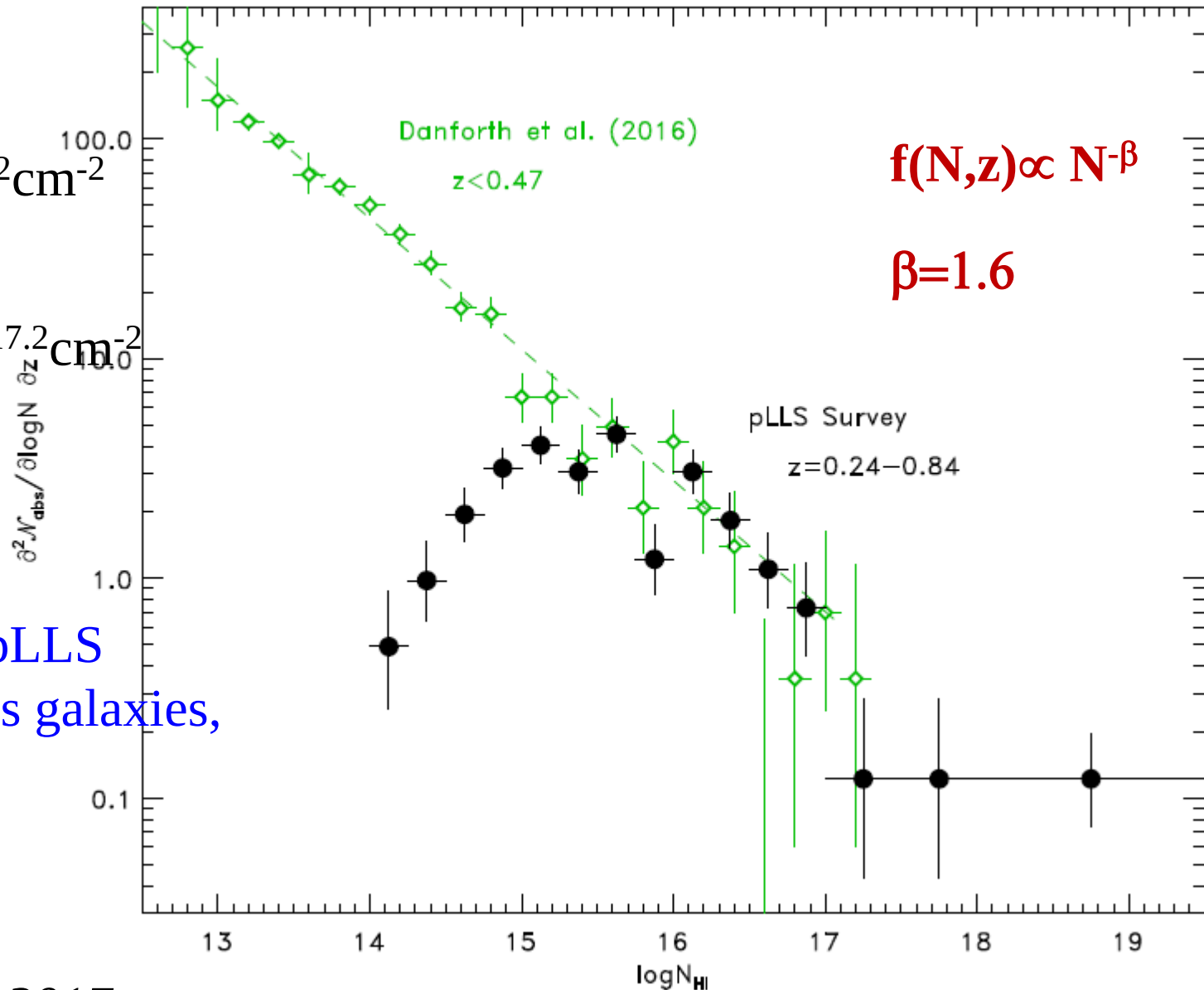
159 AGN

LLS $N_{\text{HI}} > 10^{17.2} \text{cm}^{-2}$

Partial LLS

$10^{16} < N_{\text{HI}} < 10^{17.2} \text{cm}^{-2}$

Fréquence des pLLS
correspond à des galaxies,
avec $R \sim 100 \text{kpc}$

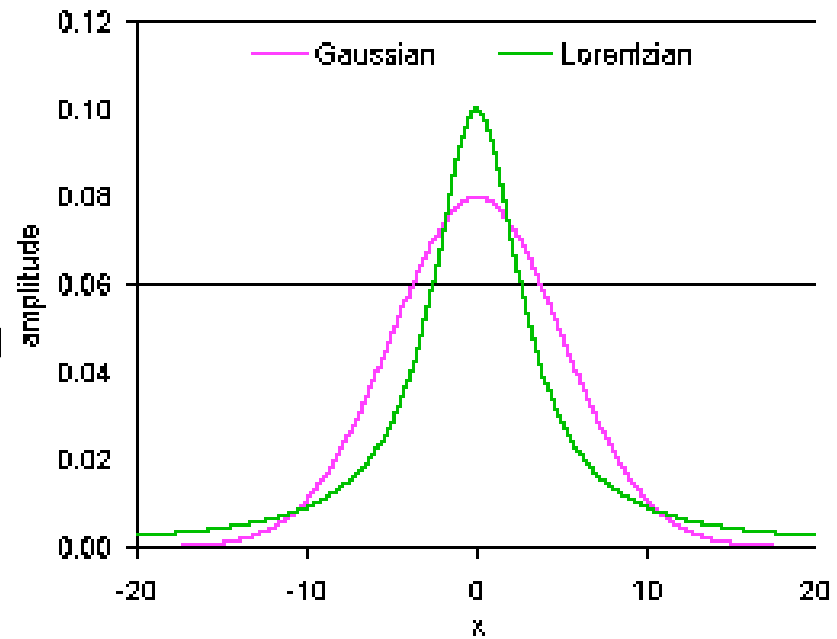


Shull et al 2017

Forme des raies résonantes

- Convolution d'une Gaussienne et d'une Lorentzienne
- Partie centrale approximativement Gaussienne + ailes **Lorentziennes**
➔ raie de résonance
- Très loin dans les ailes, déviation par rapport à une Lorentzienne
- **Profil de Voigt**

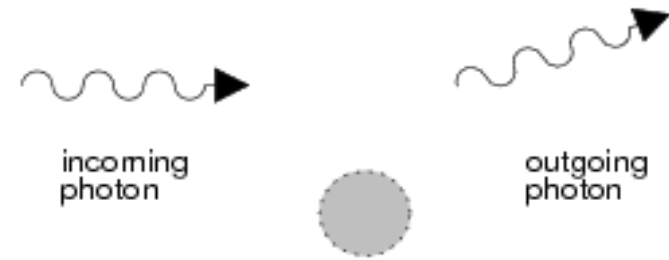
thermique
 $\exp(-1/2mv^2/kT)$



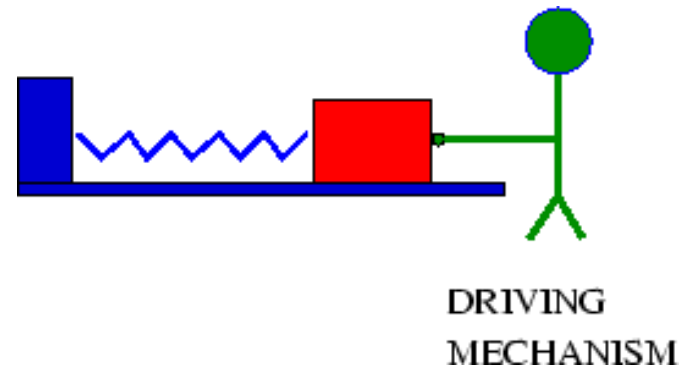
$$V(x; \sigma, \gamma) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x'; \sigma) L(x - x'; \gamma) dx'$$

Diffusion résonnante

- Un atome comme un oscillateur harmonique simple
- La diffusion du rayonnement (photon) par l'atome est analogue à un oscillateur harmonique simple, à excitation externe



Photon Scattering

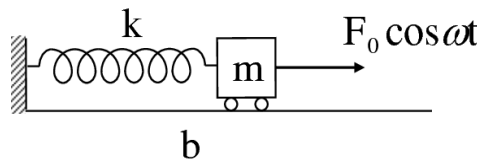


DRIVING MECHANISM

Forced Harmonic Oscillator

$$\gamma = \frac{b}{2m}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

→ Lorentzienne obtenue de façon universelle



$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos \omega t$$

Solution: $x(t) = x^H(t) + \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2 \omega^2}} \cos(\omega t - \varphi)$

DLA Absorption saturée

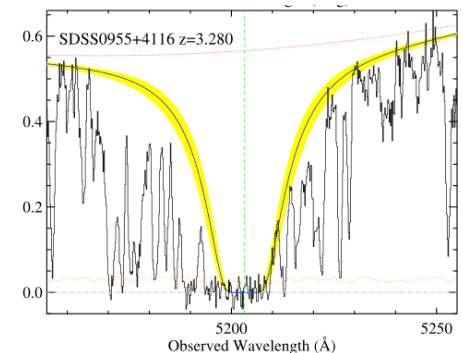
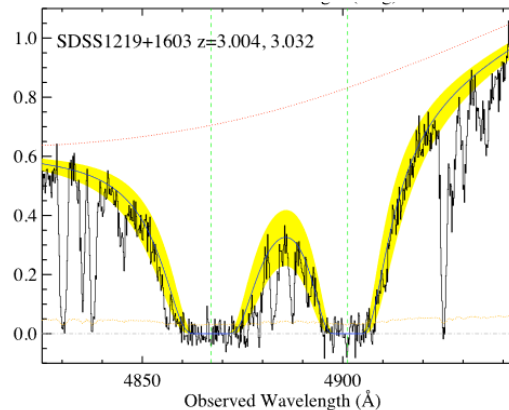
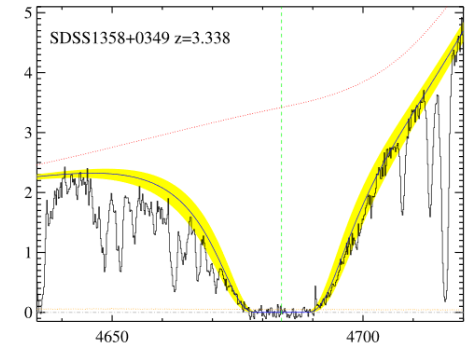
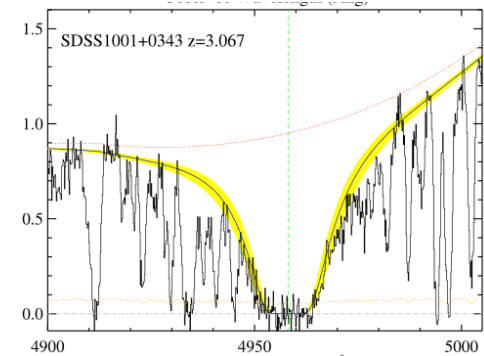
→ Utilisation du profil de Voigt

$$N(\text{HI}) > 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$$

→ Disque de galaxies sur la ligne de visée

Reservoir de gaz pour formation
d'étoiles depuis la réionisation

Sondes pour l'évolution chimique
Contient de la poussière

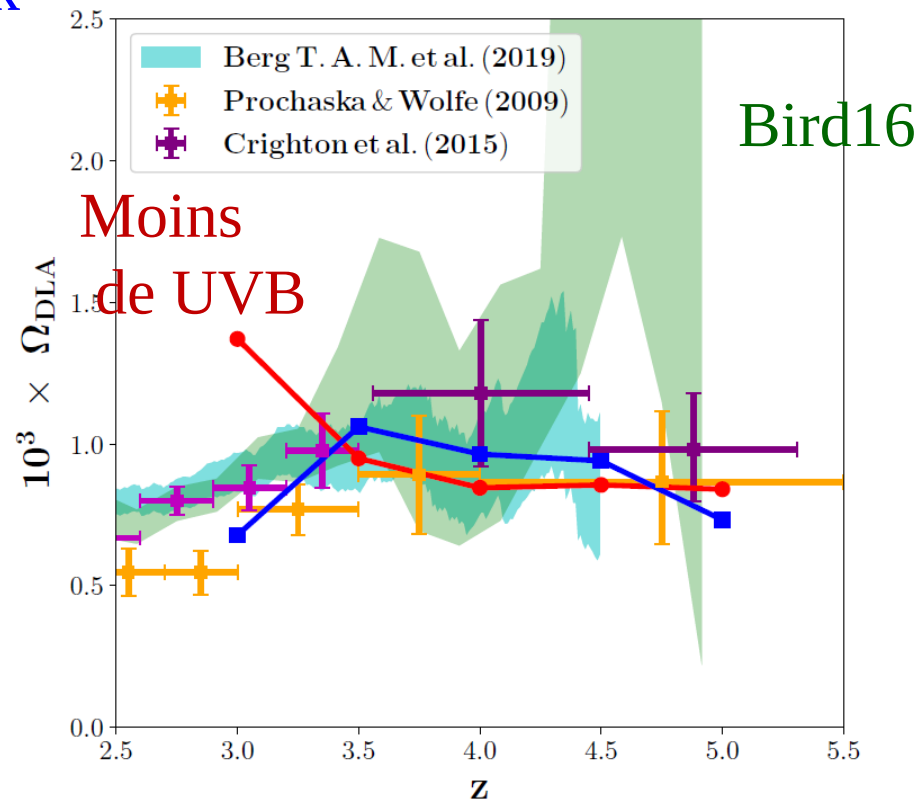
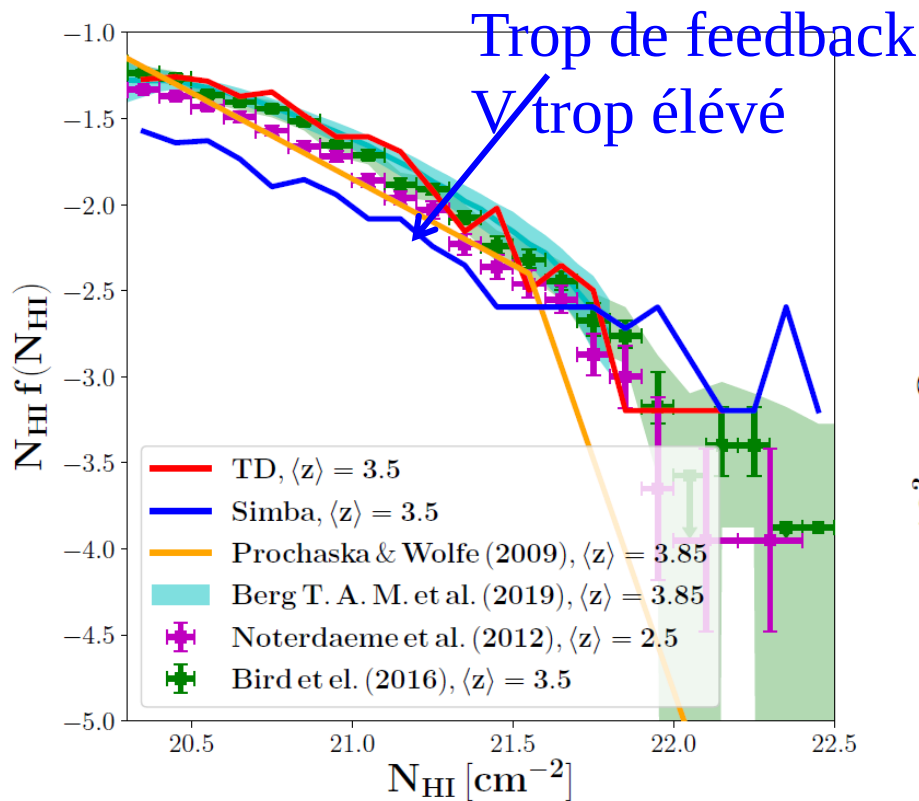
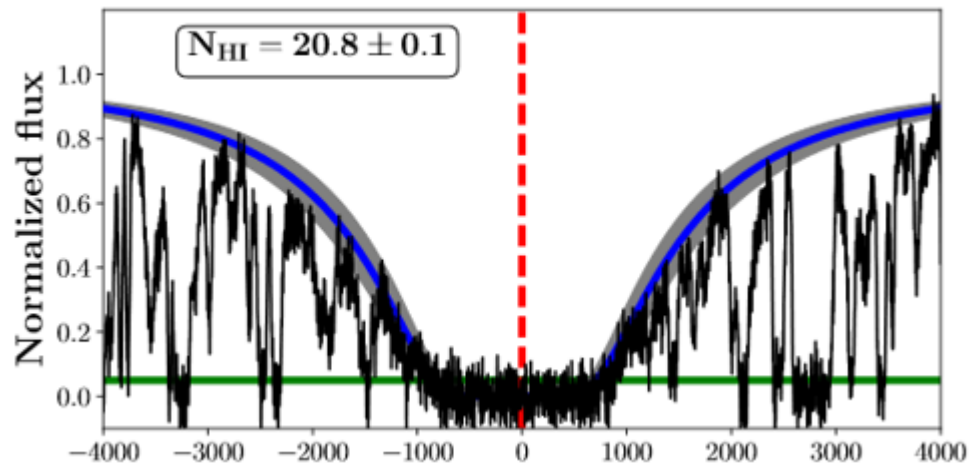


Penprase et al 2010

Simulations de DLA

SIMBA: SF & AGN+feedback

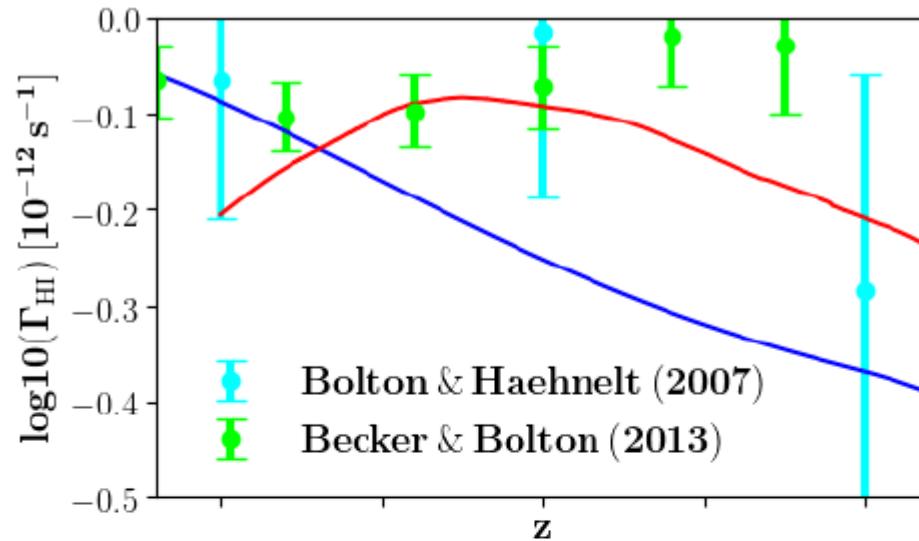
TD: transfert radiatif, calibré sur fond UV, et reproduit la forêt Ly α pour $z > 5$



Hassan et al 2020

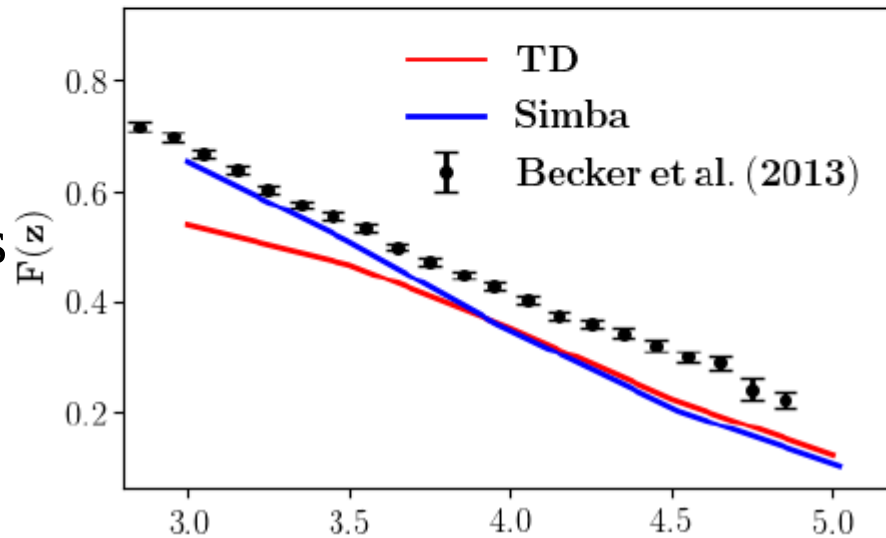
Taux d'ionisation de HI, Γ_{HI}

SIMBA, UVB=
Haardt & Madau
2012
Homogène
(pas de RT)



TD, flux
calculé par TR
et fesc, etc..

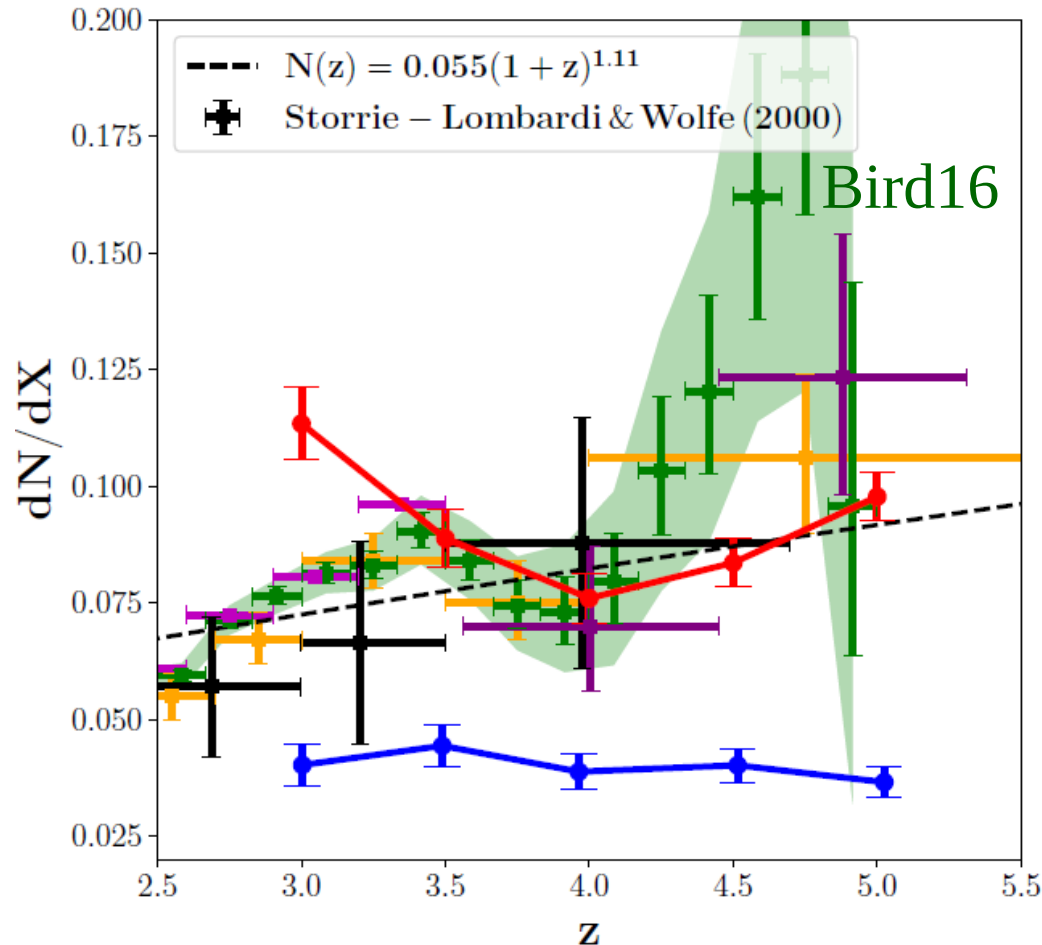
$F(z)$
Flux transmis dans
la forêt $\text{Ly}\alpha$



Evolution temporelle

Le nombre d'étoiles formées, et $\Omega(\text{HI})(z)$ reproduit par SIMBA et TD

— Prochaska & Wolfe (2009)



Pourtant SIMBA a 2 fois moins de systèmes DLA

Taux de formation d'étoiles et feedback sont cruciaux

Les obs de DLA pourraient trancher?

+Effets de résolution

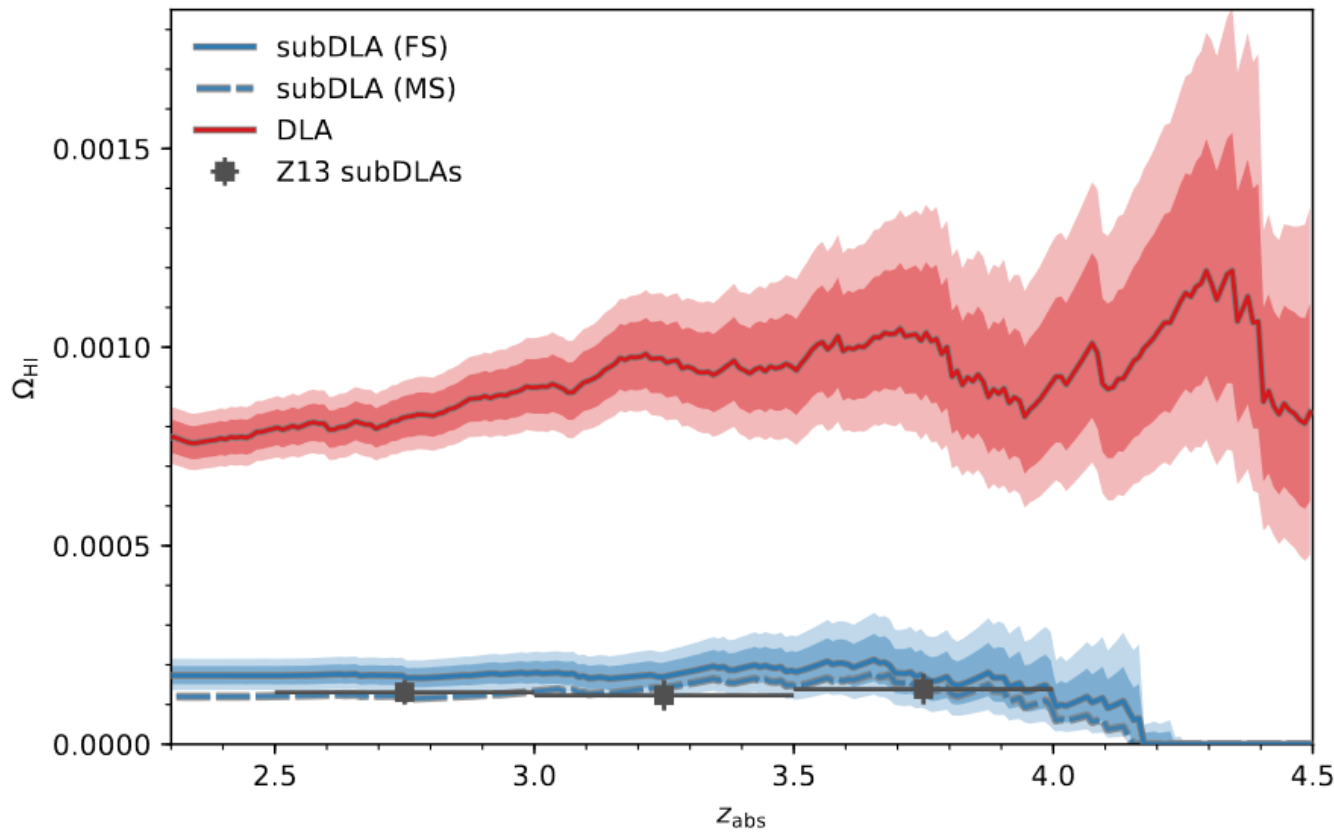
— TD, $\langle z \rangle = 3.5$

— Simba, $\langle z \rangle = 3.5$

Autre contribution à Ω_{HI}

Les sub-DLA $10^{19} \text{ cm}^{-2} < N(\text{HI}) < 10^{20.3} \text{ cm}^{-2}$

Rarement recensés $z > 1.5$



100 QSO

155 sub-DLA

Contribution de
10-20% à Ω_{HI}

$2 < z < 5$

Recensement en fonction de z

$$dN/dz \propto (1+z)^\gamma$$

Exposant $\gamma \sim 2$

$z > 3$, la forêt domine

Aujourd'hui, $z=0$

Galaxies : 6%* + 1% gaz

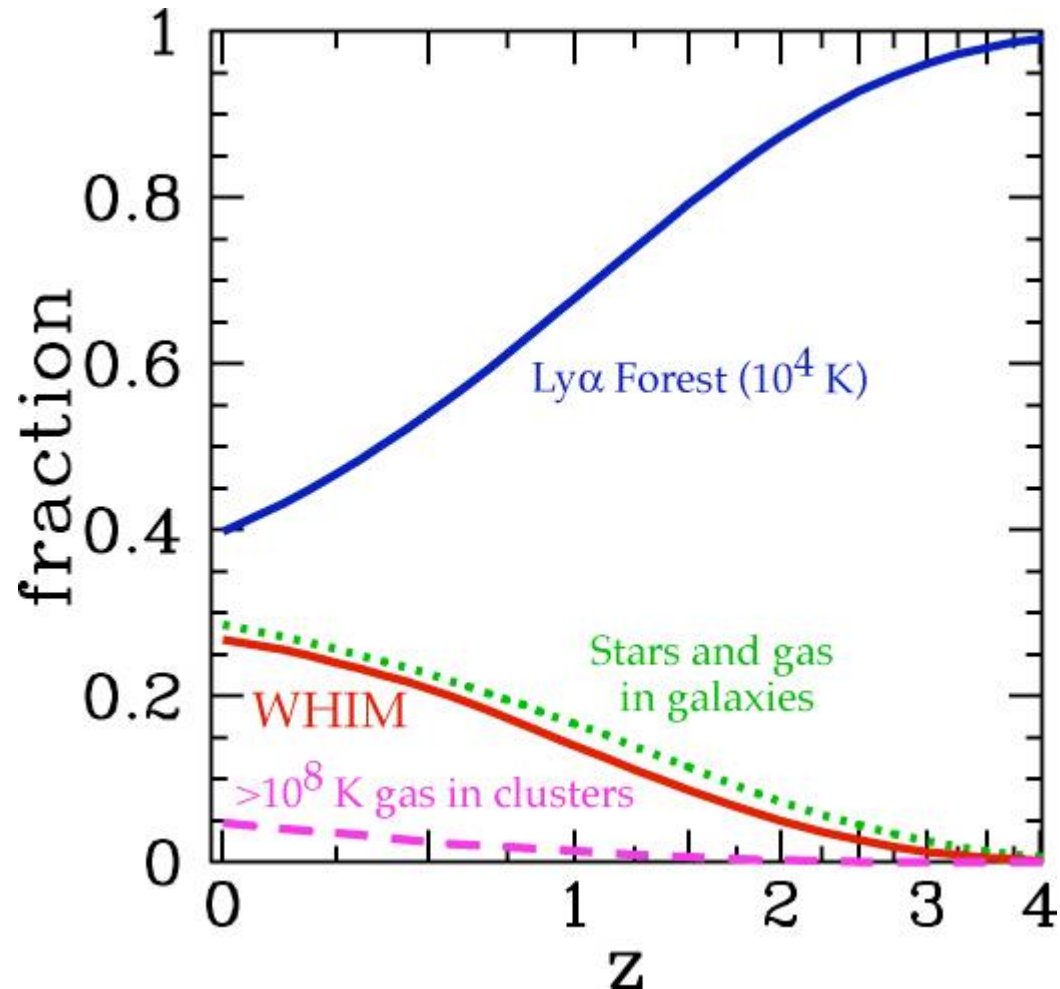
Amas 3-5%?

Ly α 30%

→ ~50% inconnu

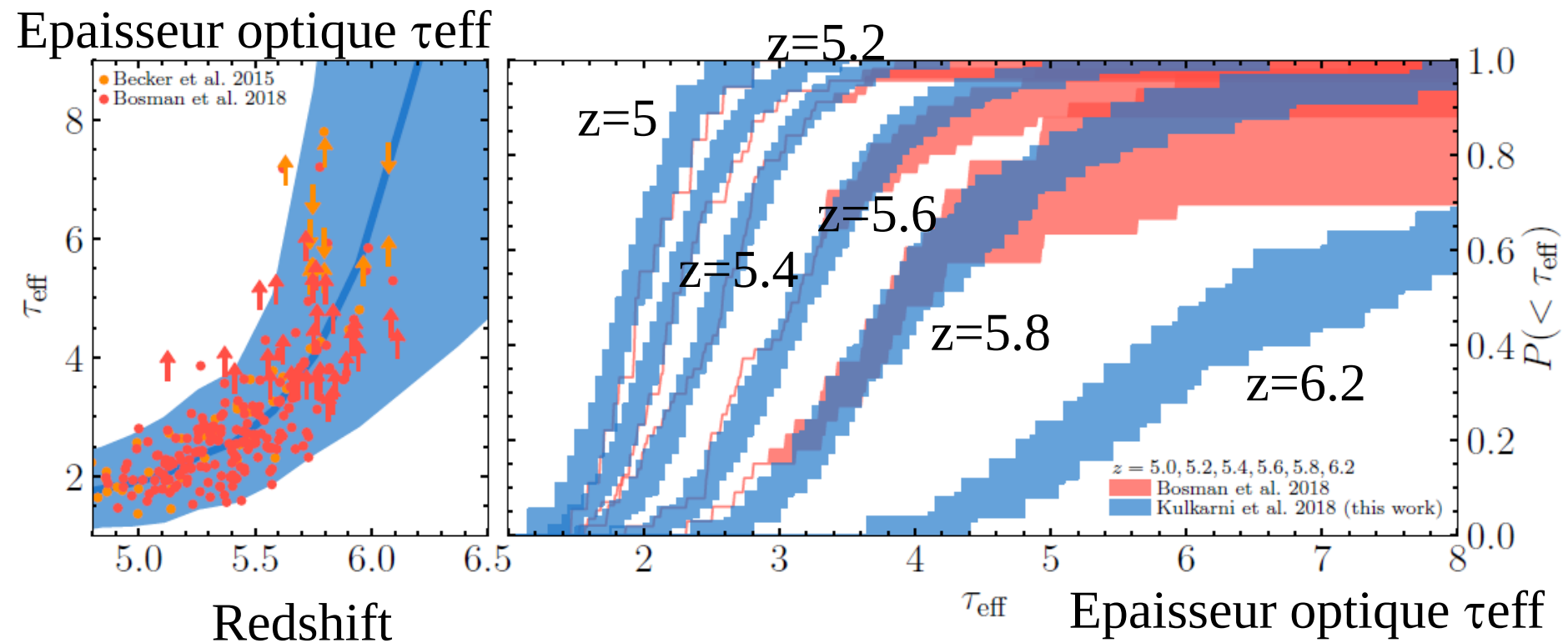
Prédictions des simulations
30-40% des baryons dans le
WHIM 10^5 - 10^7 K

Davé et al 2001



Absorptions Ly α durant la réionisation

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

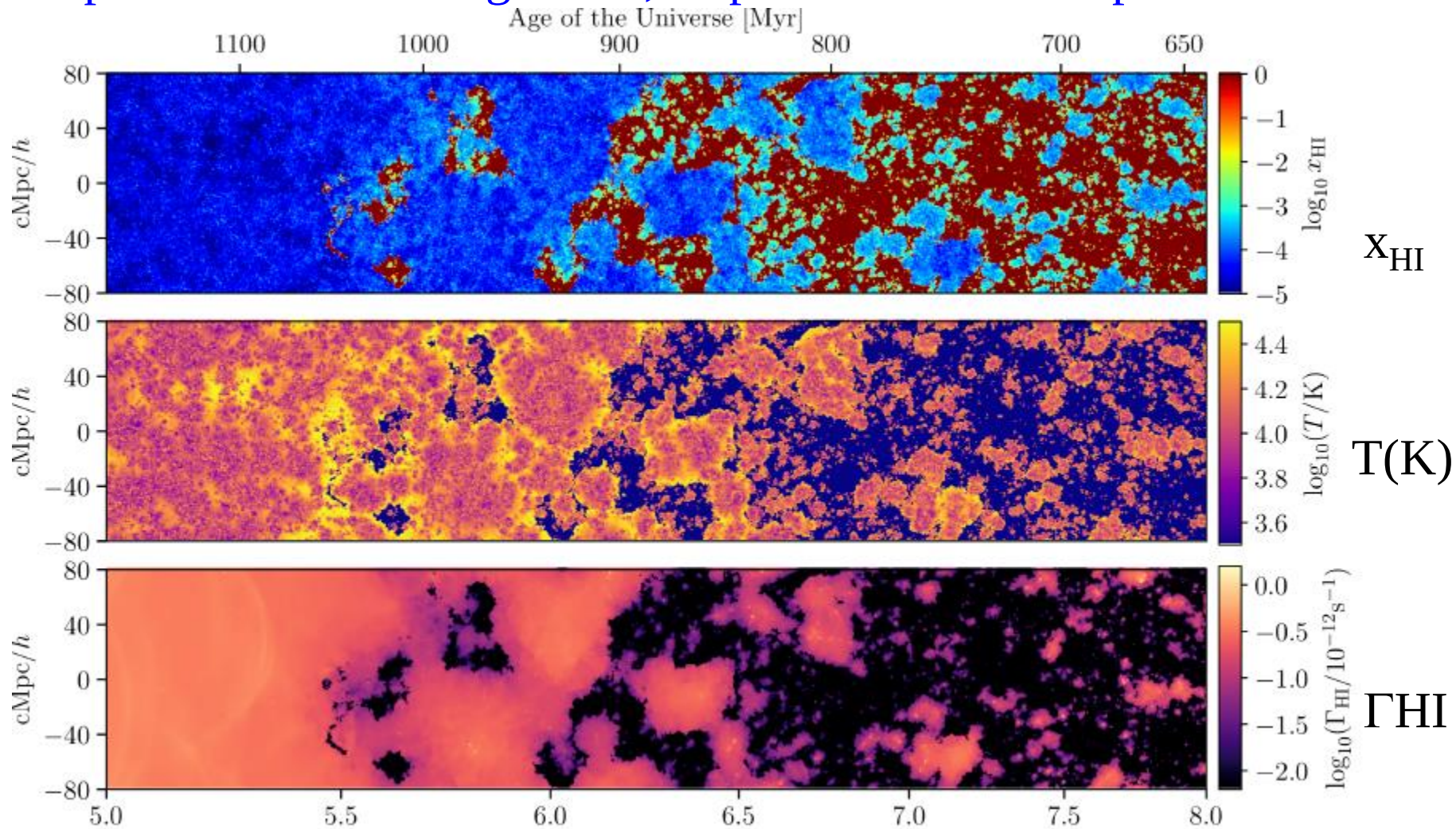


Bleu=modelle Rouge=data

Kulkarni et al 2019

Simulations de la réionisation

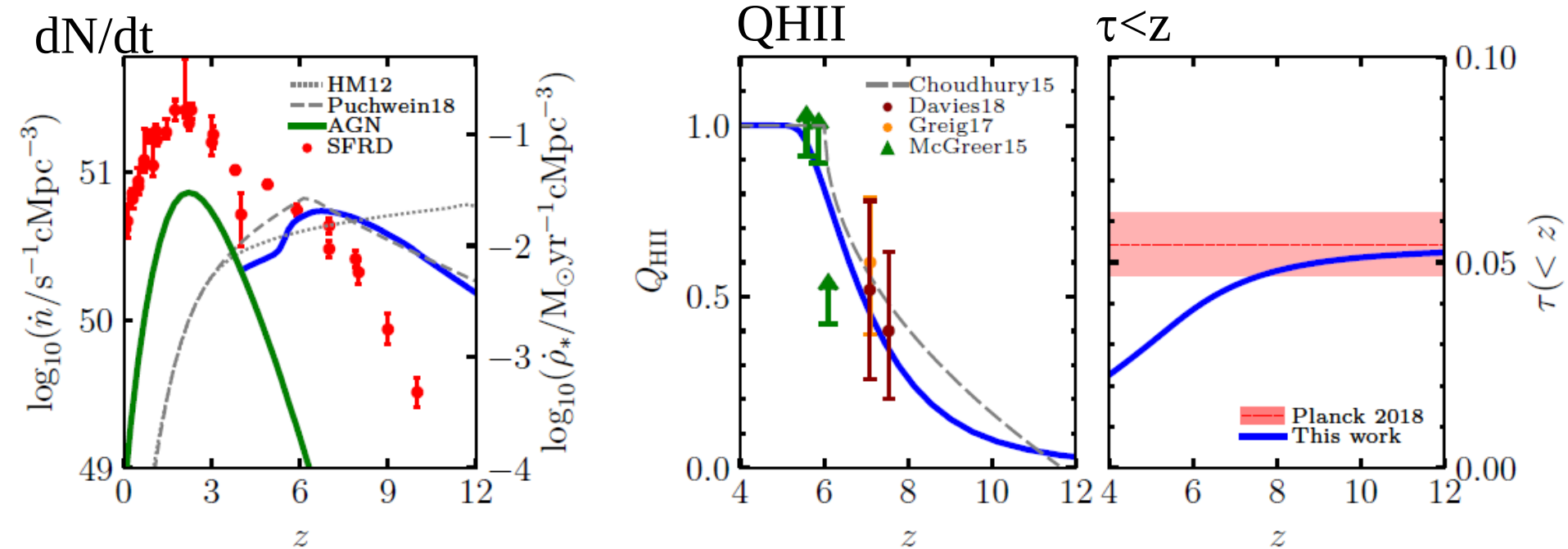
Réionisation à moitié à $z=7.5$ et terminée à $z=5.3$, avec des poches de HI assez grandes, responsables de la dispersion de τ_{eff}



Kulkarni et al 2019

SFR ajusté sur les observations

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)

Kulkarni et al 2019

Tracer le milieu intergalactique: IGM

Propriétés de la forêt Ly α statistiquement compatible sur toutes les lignes de visée (indépendamment de z_{em})

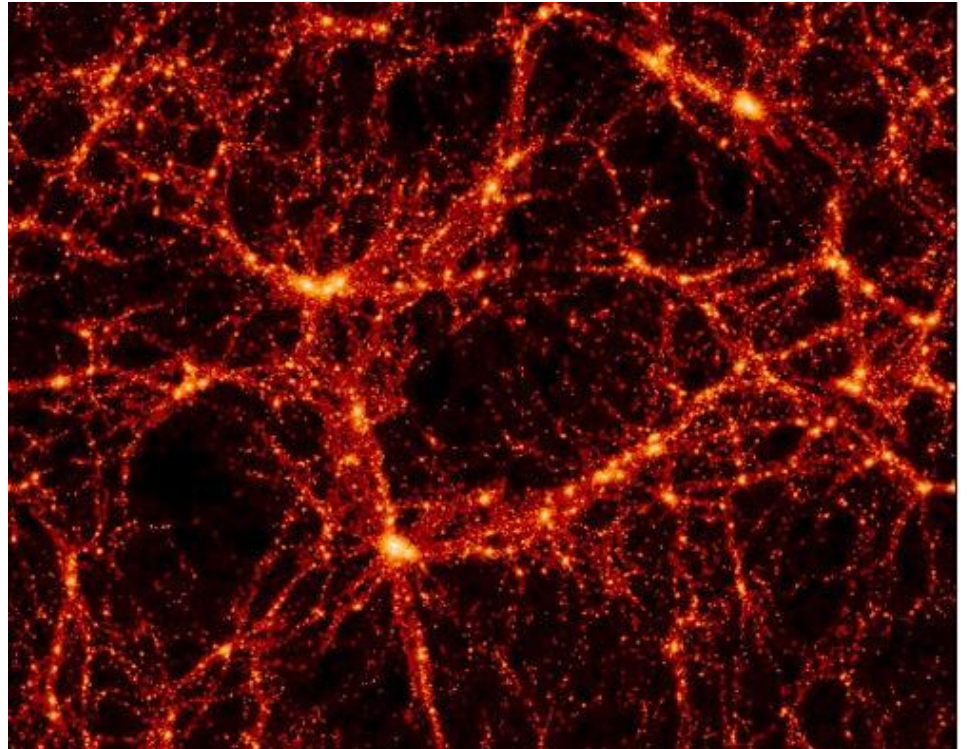
Distribution de matière non uniforme (régions vides et fragments de densités variées)

→ permet d'estimer la distribution des nuages de gaz protogalactiques et les protoamas de galaxies

→ contraintes sur l'évolution des grandes structures

Cohérence sur qqMpc

(absorbants des QSO proches)



Cohérence spatiale des absorbants Ly α

3 lignes de visée vers 3 quasars, distants de 3' à $z=0.96 \rightarrow 1.5$ Mpc

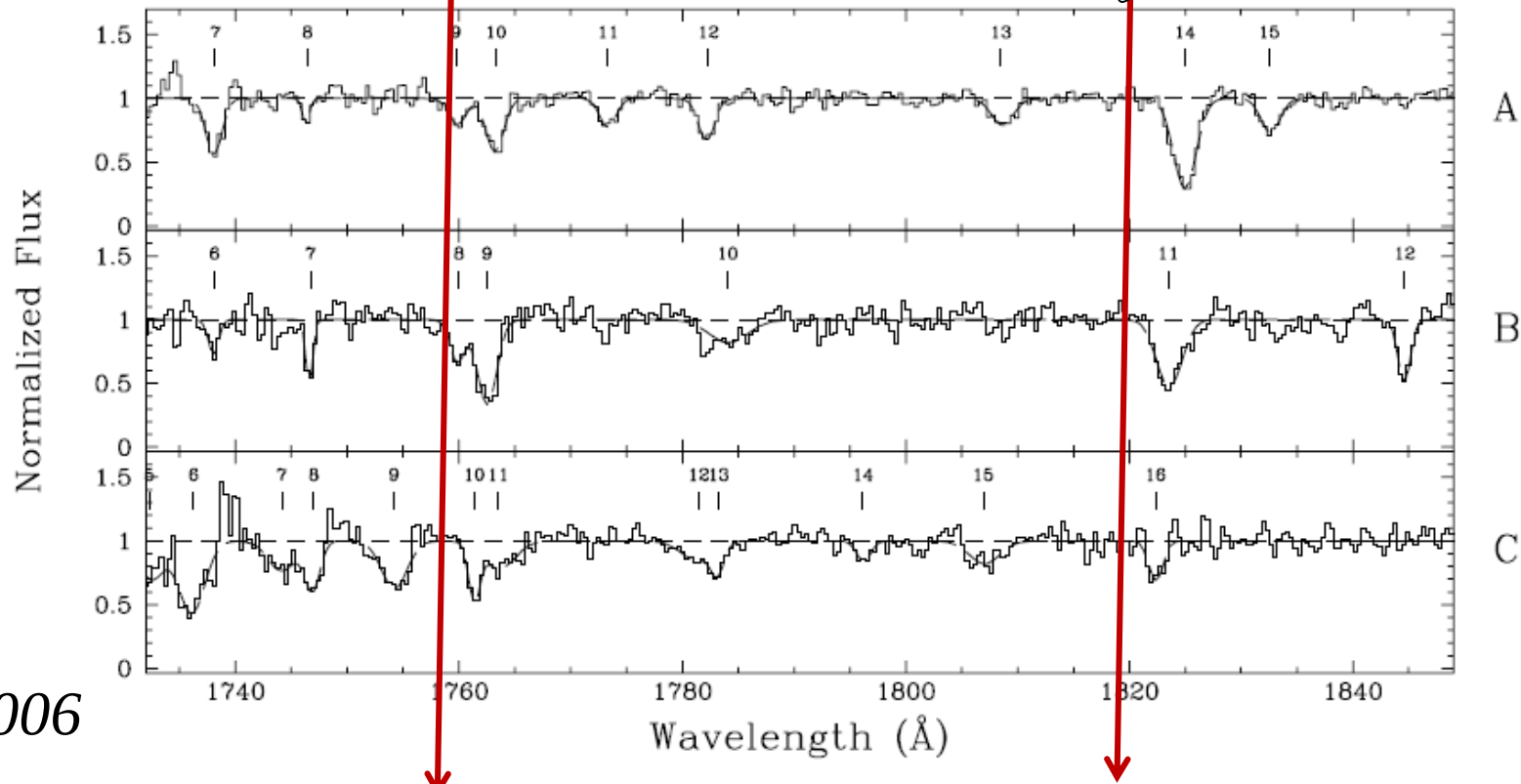
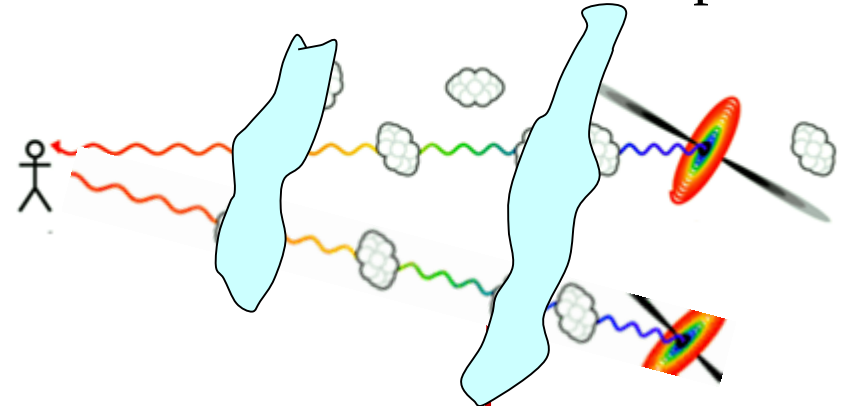
Plusieurs structures $0.4 < z < 0.9$

Les nuages sont

des feuilles, des murs

Surtout les Ly α intenses

Riches en métaux



Sondage de l'IGM

Milieu diffus $T=T_0(\rho/\langle\rho\rangle)^\alpha$

$\alpha=0.6$

$\tau \propto n\text{HI} \propto \rho^2 T^{-0.7}/\Gamma$

Γ taux d'ionisation UVB

$\tau=\tau_0(\rho/\langle\rho\rangle)^\beta$

$\beta=1.6-2$

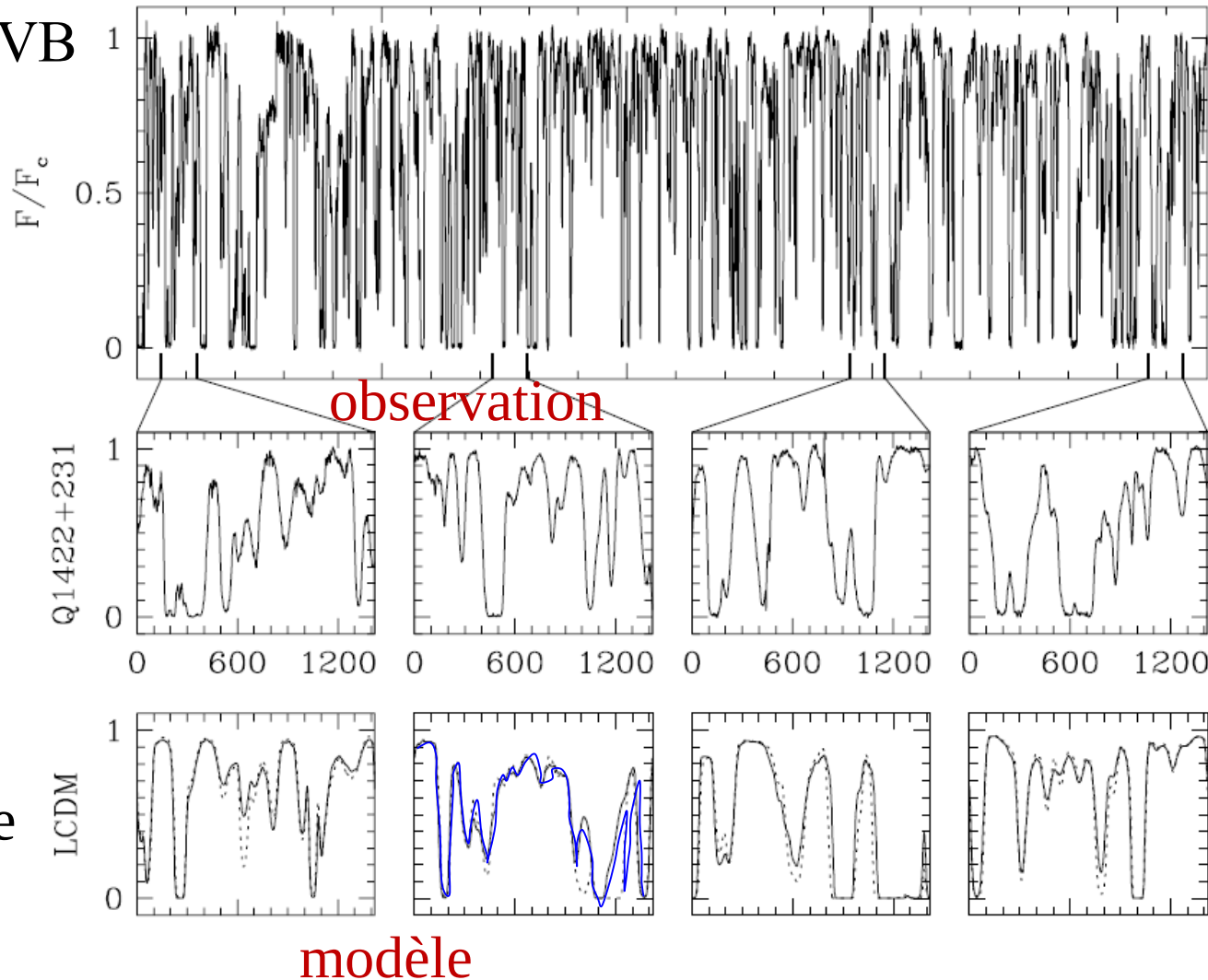
Le flux $\propto \exp(-\tau)$
est un traceur des
grandes structures

Surtout réunies par

la gravité

Pression, température
peu importantes

FGPA=Fluctuations Gunn-Peterson Approx



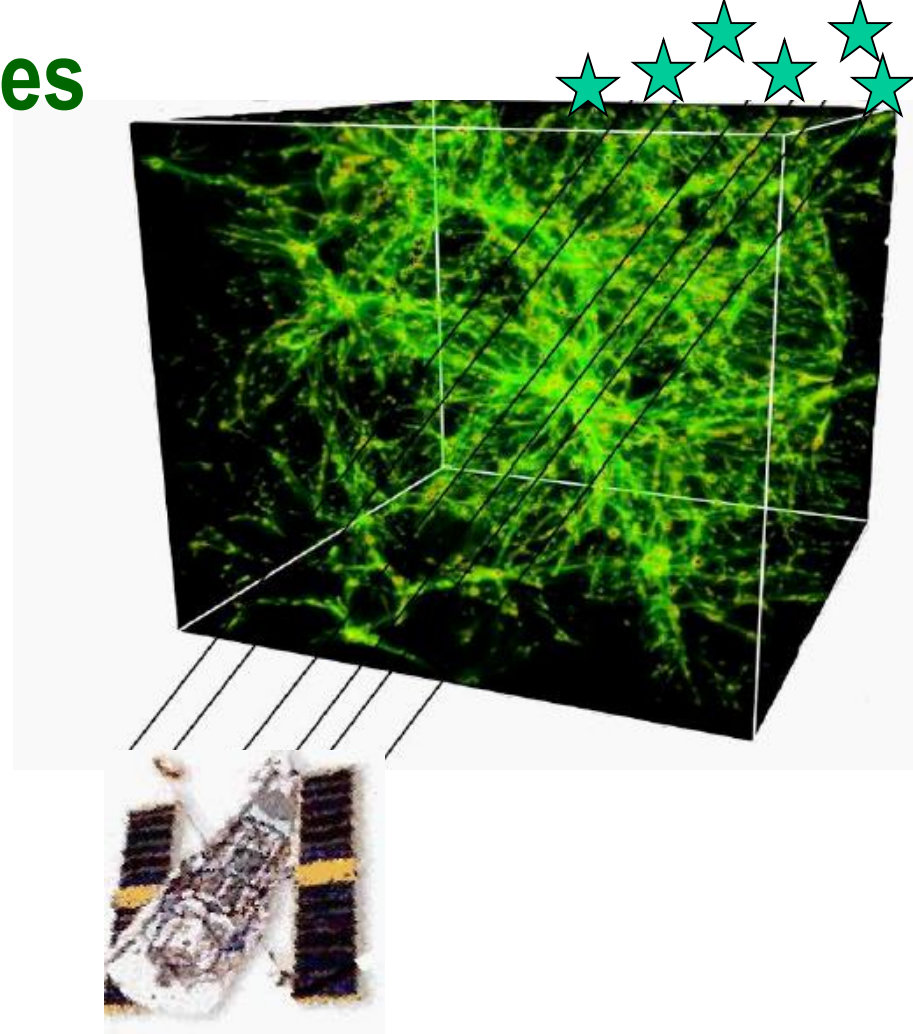
Weinberg et al 2003

Forêt et grandes structures

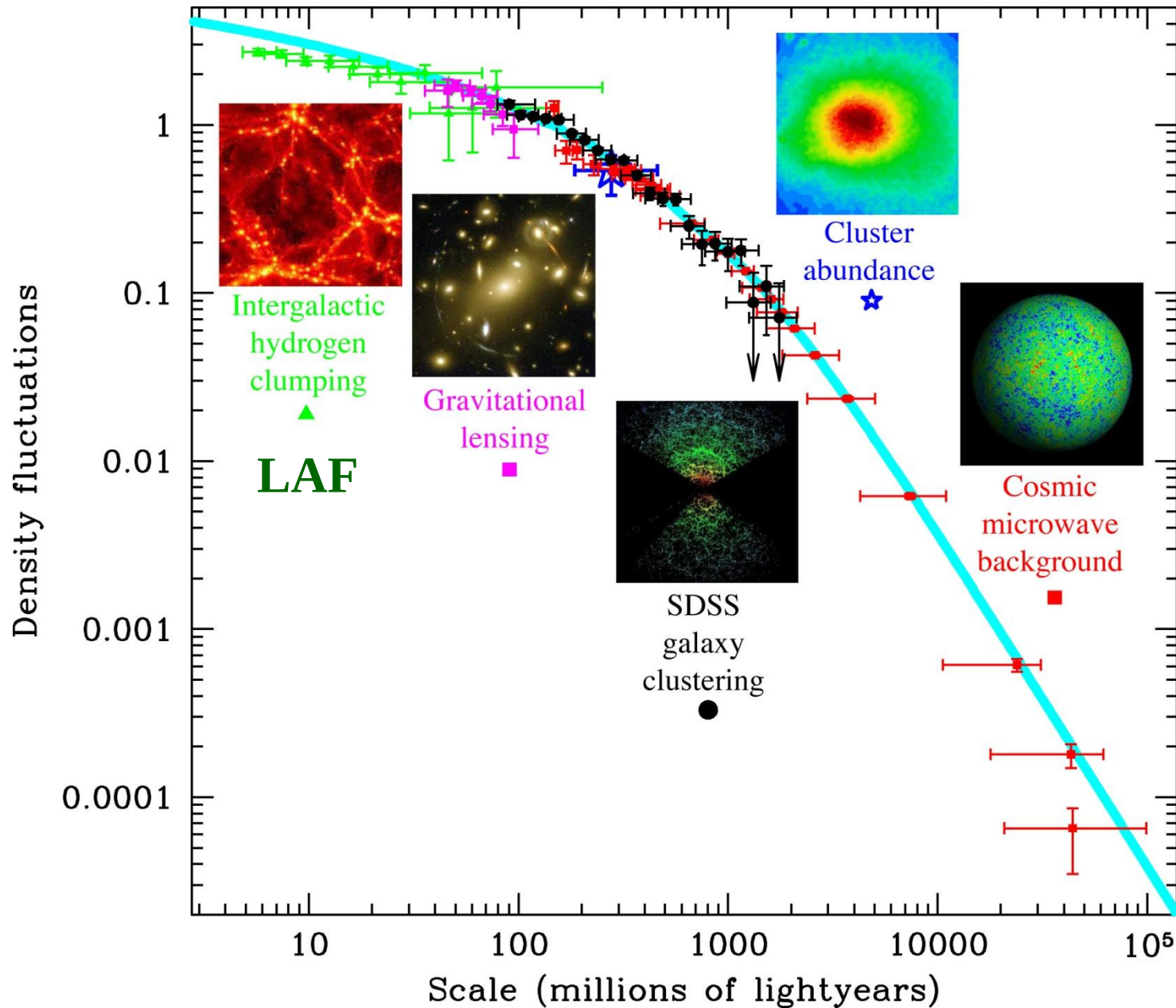
IGM contient la plupart des baryons

- 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



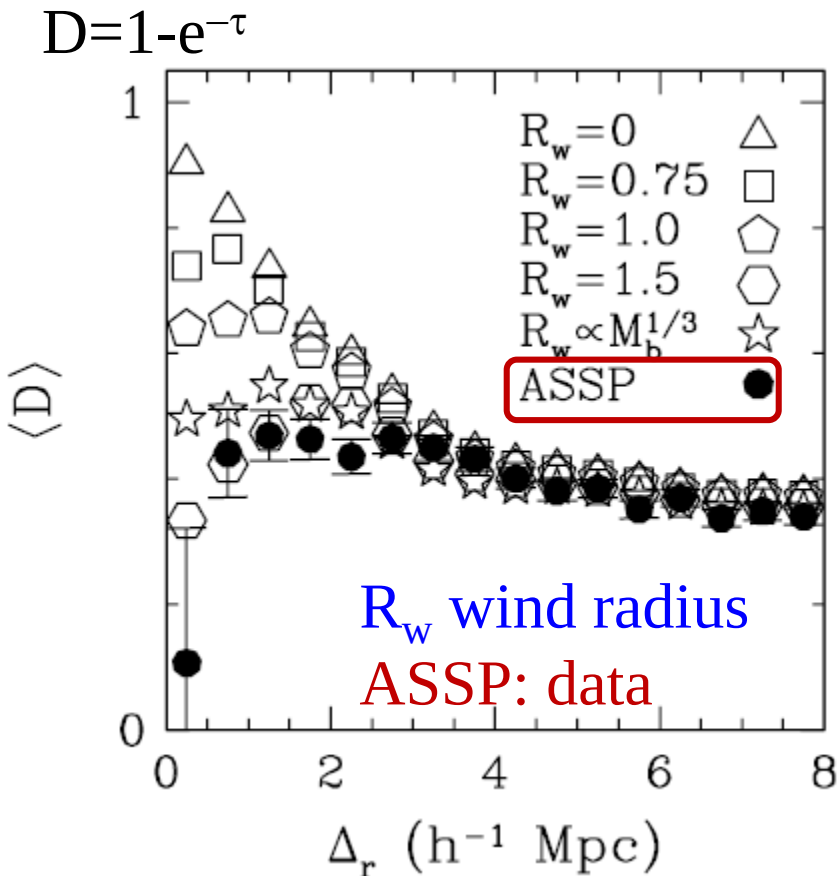
Fluctuations de densité, IGM et galaxies



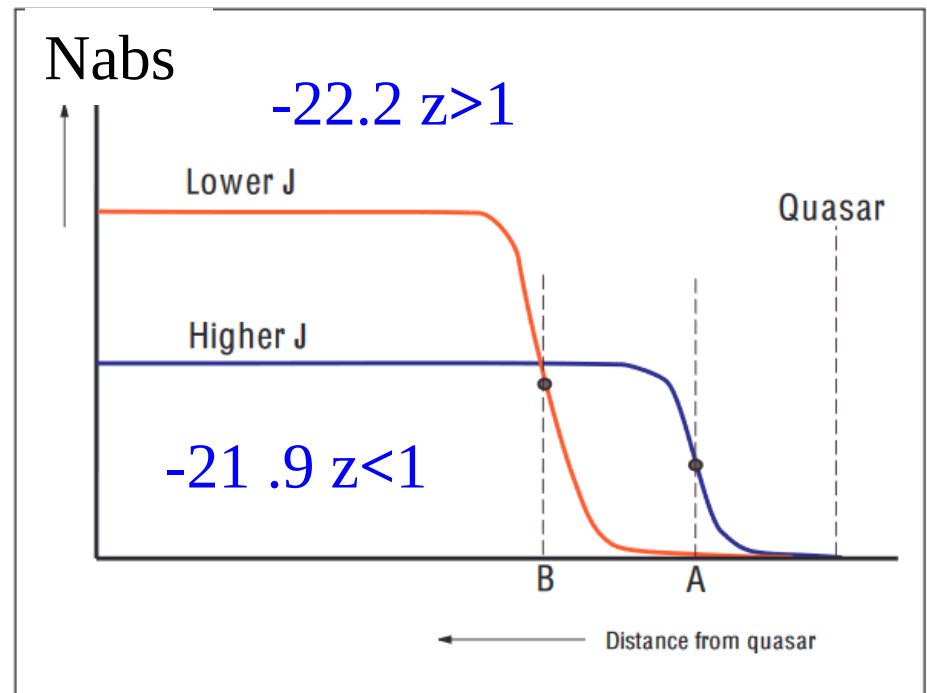
*Tegmark
et al 2004*

Effet de proximité

Les simulations prédisent une accumulation de la forêt Ly α dans les sur-densités (groupes, amas), mais c'est là que se concentrent les QSO et le flux ionisant → bulle ionisée sur ~ 10 Mpc



Weinberg et al 2003



Permet de mesurer J, le flux UV du fond cosmique

Bajtlik et al 1988

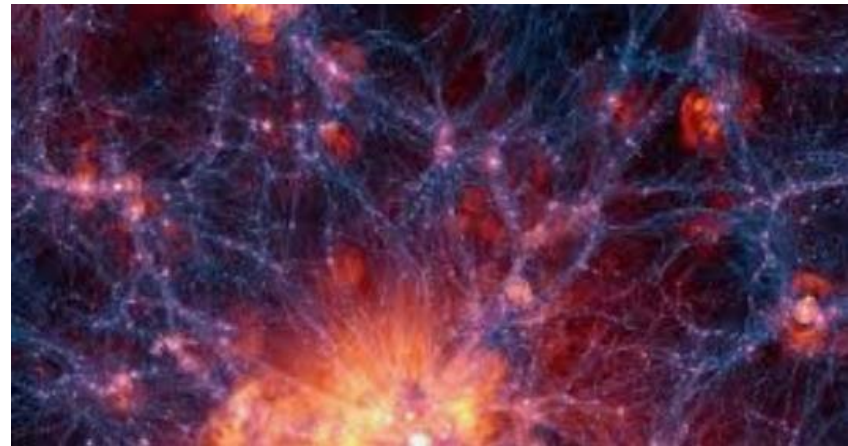
Absorption remplacée par Ly α émission?

Vents et ionisation des QSO n'expliquent pas tout l'effet de proximité

Est-ce que l'émission Ly α des galaxies LAE pourrait compenser l'absorption? Elles sont re-groupées autour des quasars ~ 60 Mpc

Il existe bien des **halos Ly α** ,
autour de certaines galaxies

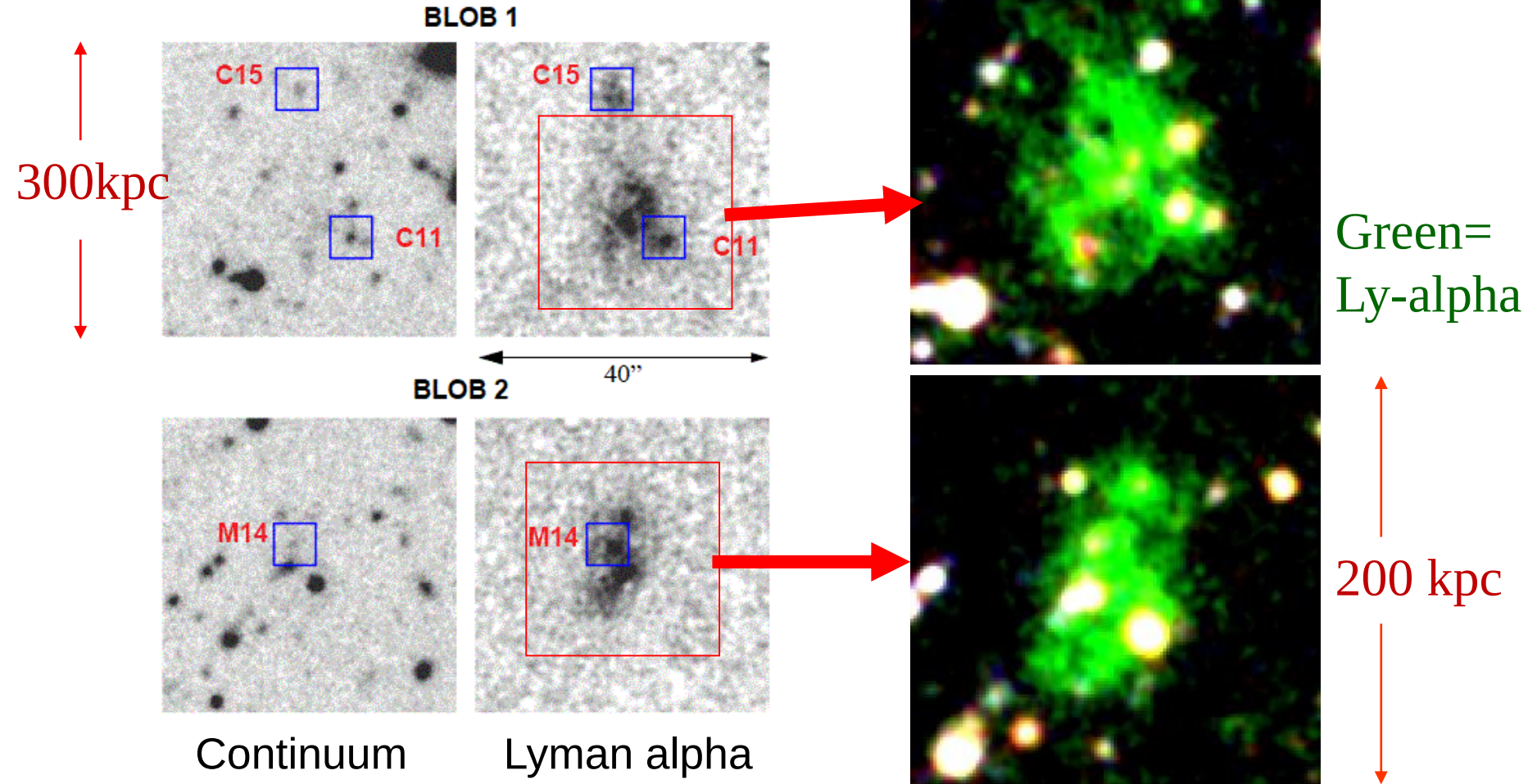
Toutefois ces halos n'occupent que de
très faibles volumes/surfaces
200kpc pour les plus étendus



Les nuages de la forêt Ly α s'étendent sur des Mpc
Manquent 1-2 ordres de grandeur!

LAB: Lyman alpha blobs

Grandes étendues d'émission
autour de galaxies: vent de surpenovae



Steidel et al. (2000) Matsuda et al 2004

Les sursauts gamma (GRB)

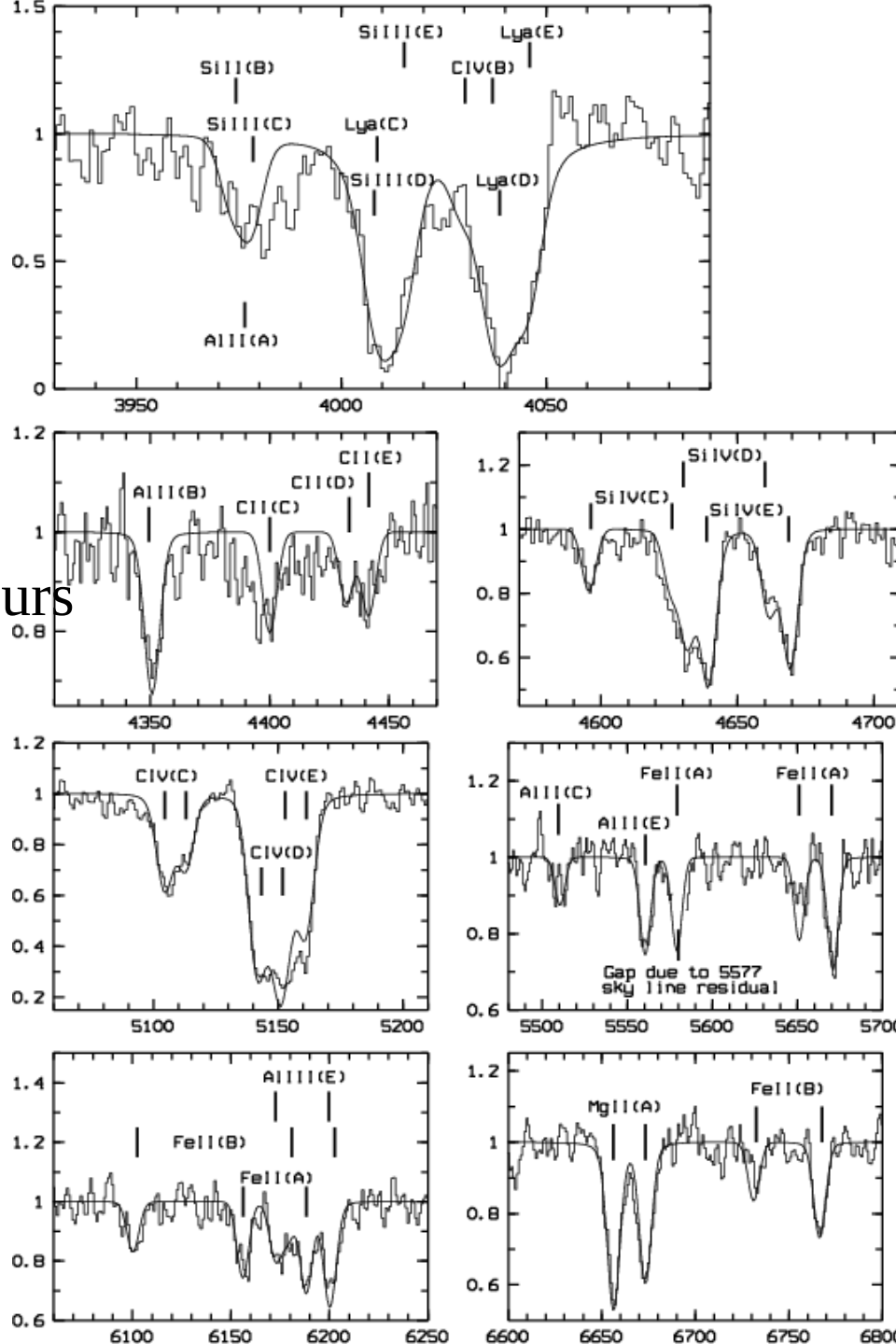
Les GRB sont des émission brèves mais très intenses

Il reste une émission pendant qq jours

Ici 5 systèmes abs détectés à $z=$
1.3806, 1.6039, 2.2983, 2.3230,
 $z(\text{GRB})= 2.3292$

Un est un DLA (galaxie LBG)

Intégration d'1h, 10h après le sursaut, *Moller et al 2002*



Avantage des GRB pour les absorptions

Durée de milli sec à minutes

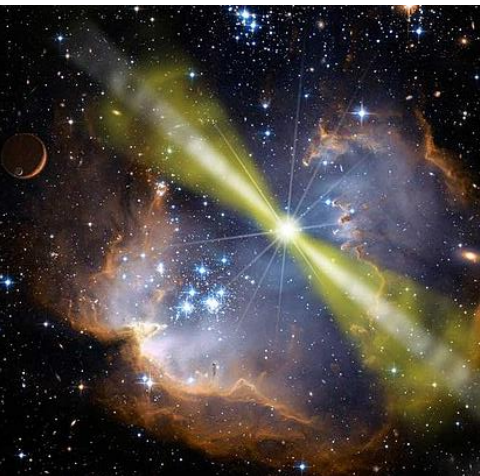
Plus de 100x énergie de supernovae

Il reste une émission « Afterglow » pendant plusieurs jours et à d'autres fréquences (optique, radio..)

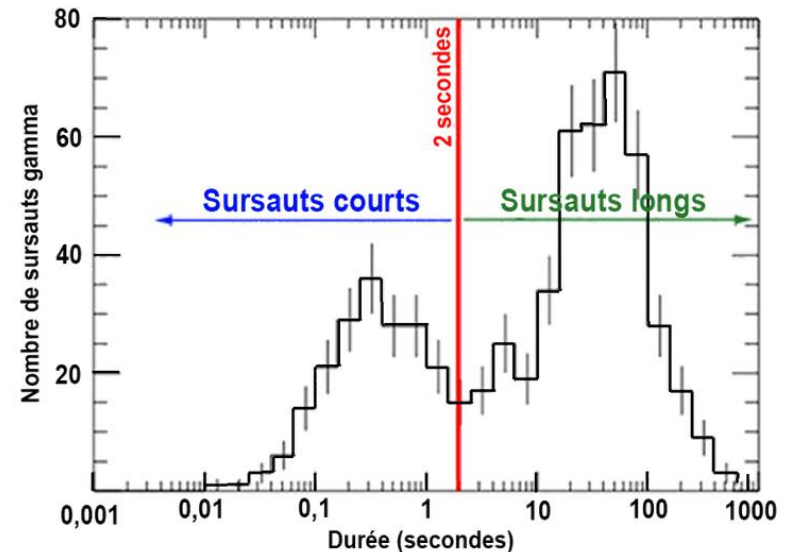
Sursauts longs, liés à la mort d'étoiles massives

➔ Etoiles à neutrons, trou noirs

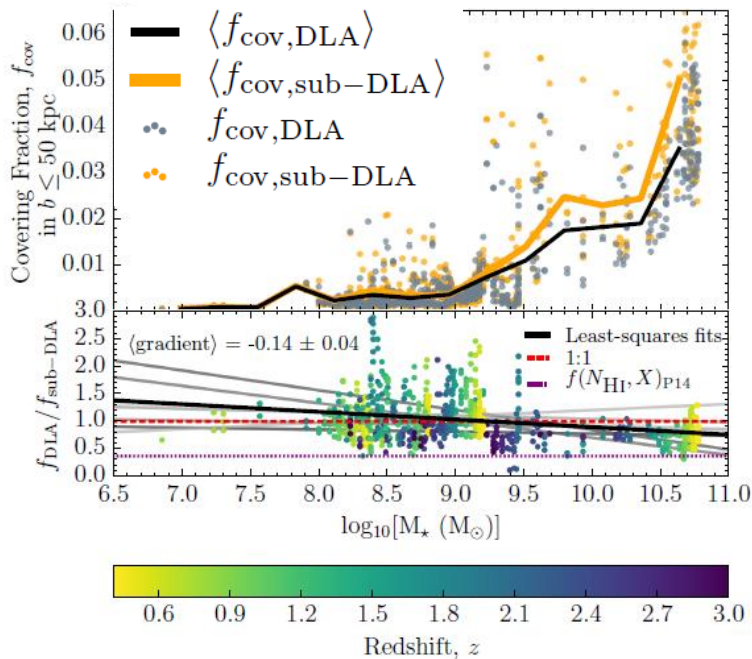
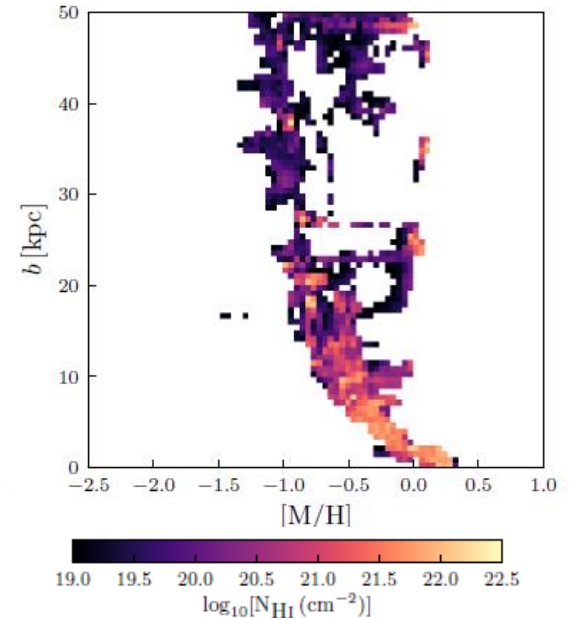
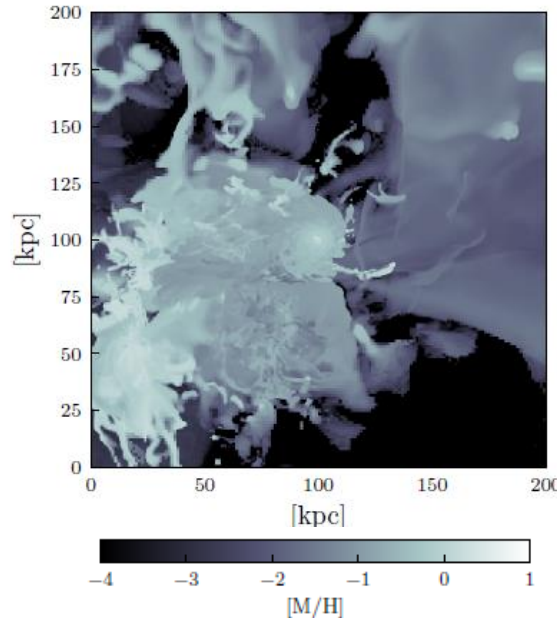
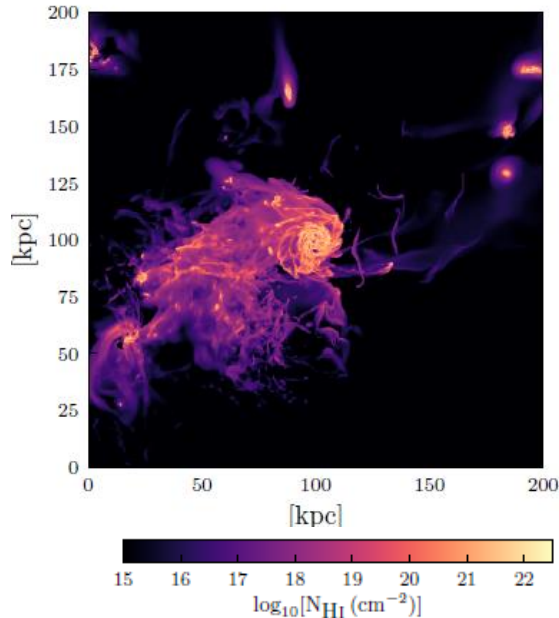
Sursauts courts: binaires dont la fusion donne un trou noir



GRB z=8.2
plus loin que le QSO
z=7.5



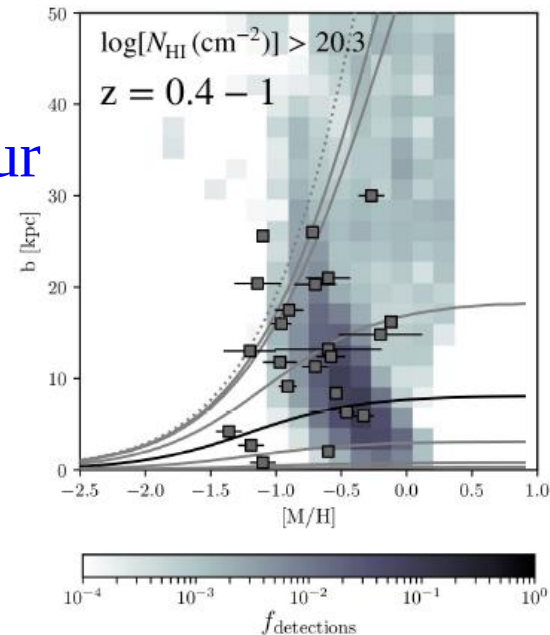
Simulations des absorbants



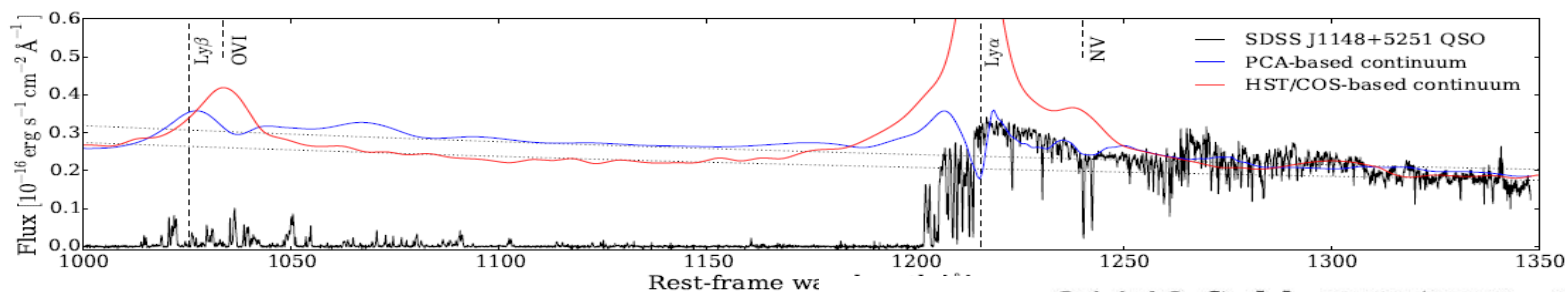
Simulations trouvent
DLA dans les galaxies
(60%) mais aussi autour
(halos, outflows) 40%
+naines

$M_{\star}$

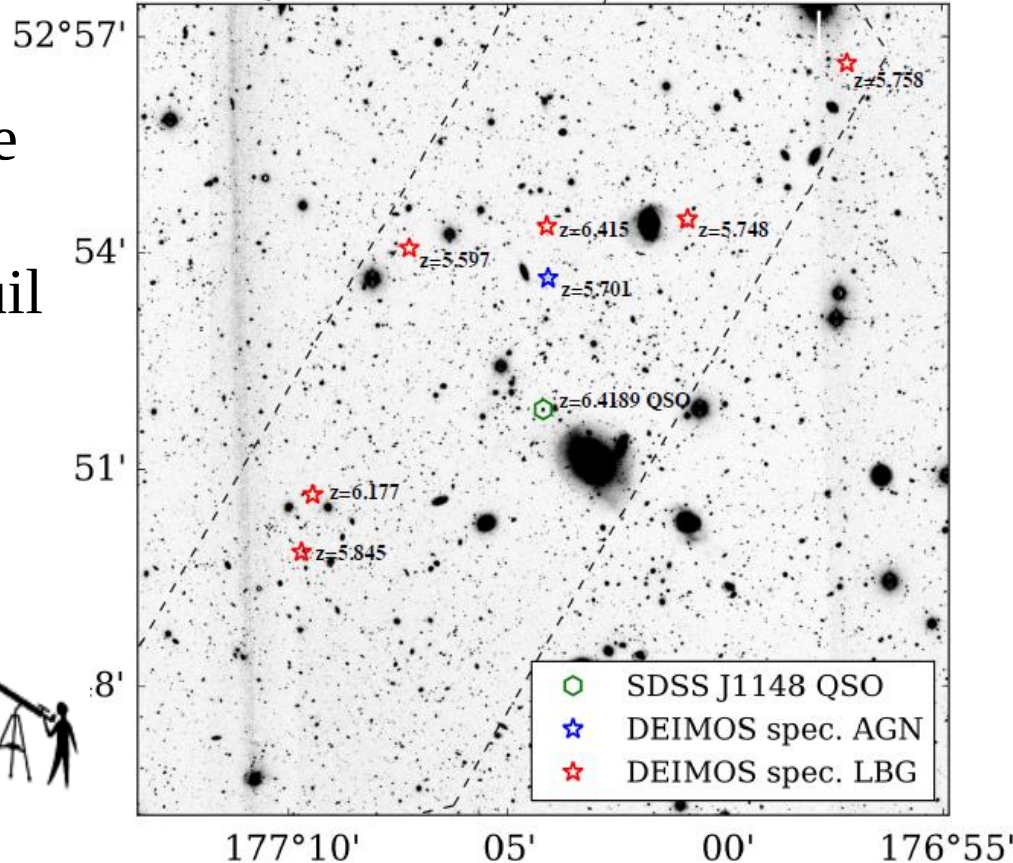
Rhodin et al 2019



QSO+LAF pour tester les petites galaxies

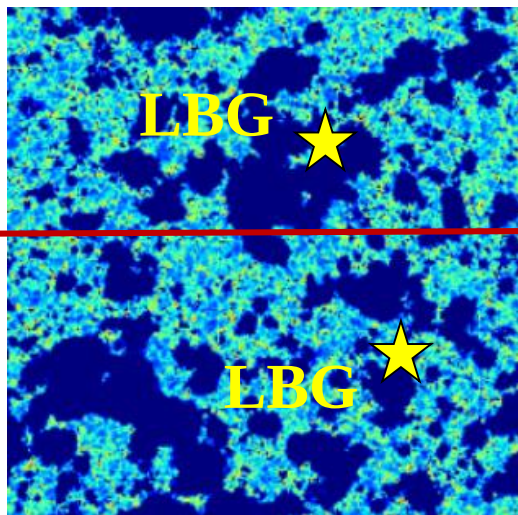


Q1148 field, LBT/LBC z -band



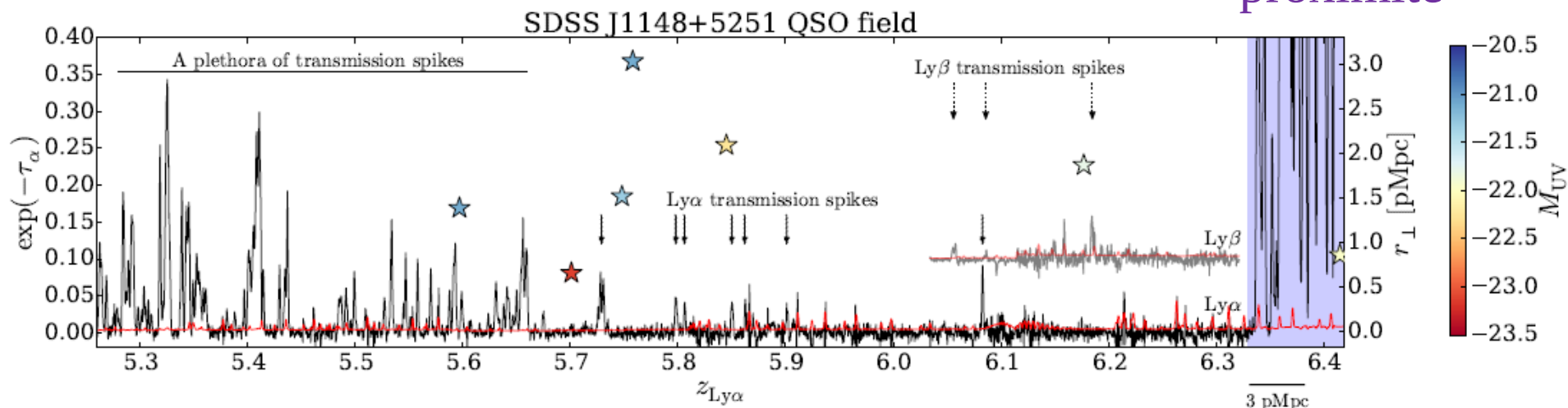
Kakiichi et al 2018

Durant la réionisation, les QSO $z > 6$ et leur spectre de forêt/prairie Ly α peuvent servir à étudier les galaxies faibles en-dessous du seuil de détection, autour des LBG



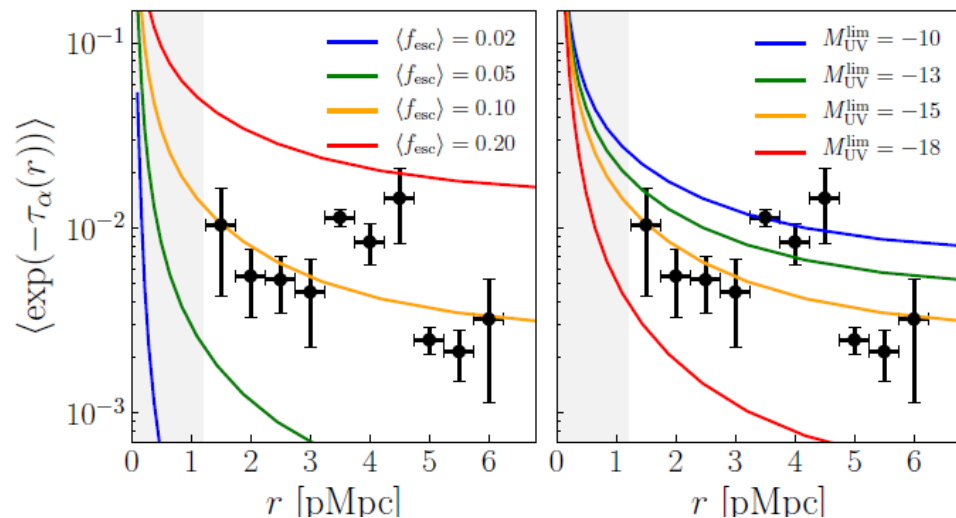
Corrélation LBG- Ly α

Zone de
proximité



Corrélation entre les galaxies LBG
et la transmission Ly α

$$\langle \exp(-\tau_\alpha(r)) \rangle = \frac{\sum_{i < \text{pair}(r)} w_i F_{\alpha,i}}{\sum w_i}$$



Poids $w_i = 1/\sigma$ $F_{\alpha,i} = e^{-\tau(r_i)}$ à la distance r_i

$$r = \sqrt{r_\perp^2 + r_\parallel^2}$$

$L > L_{\text{min}}$

Kakiichi et al 2018

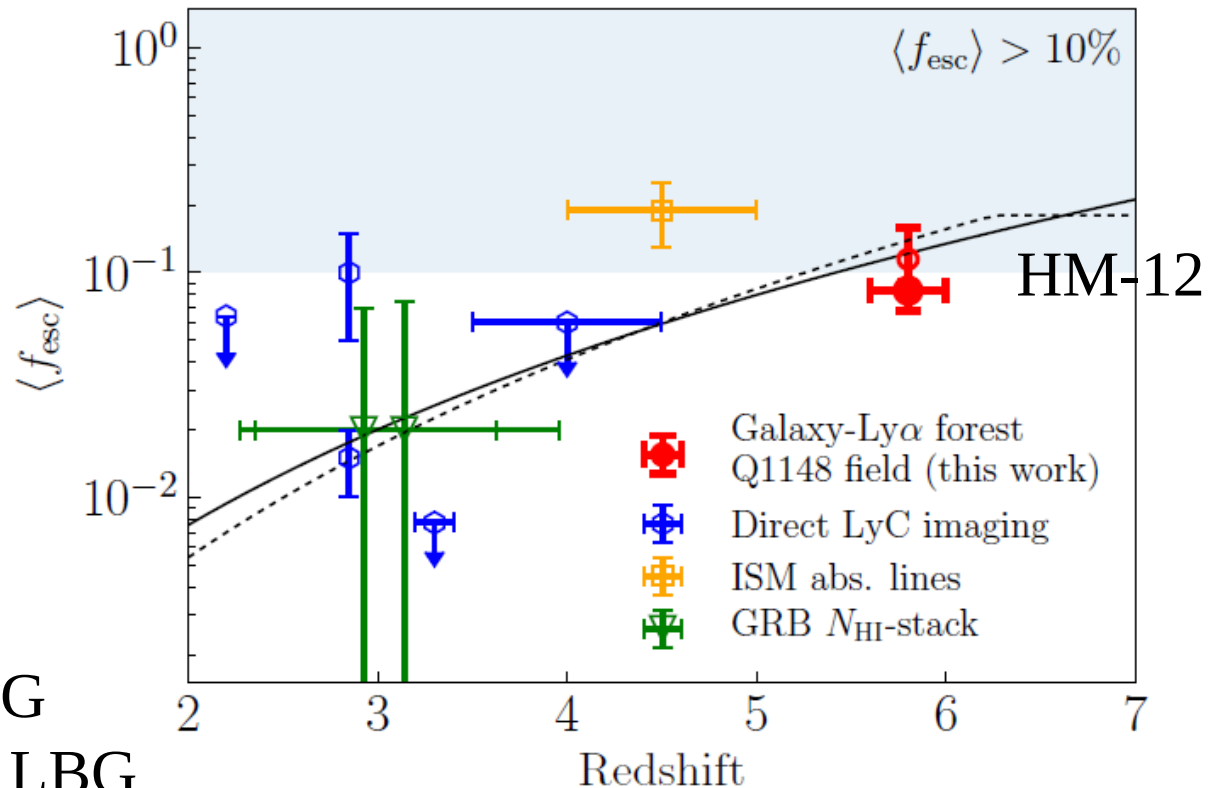
Estimation f_{esc} (LyC)

Les LBG ne sont pas responsables de l'ionisation et de la transmission
 Mais les galaxies faibles
 groupées autour d'elles

$$dN_{\text{ion}}/dt = f_{\text{esc}} \xi_{\text{ion}} L_{\text{UV}}$$

ξ_{ion} est le rapport entre
 photons ionisants et UV
 de 1500Å

« HI proximity effect »:
 Les régions autour des LBG
 sont plus opaques, car les LBG
 habitent les filaments, régions plus denses



$$z=6: f_{\text{esc}} = 8\%$$

Environnement des LBG

$T = f/f_{\text{cont}}$ Transmission du flux continuum du quasar

Transmission moyenne dépend de la réionisation

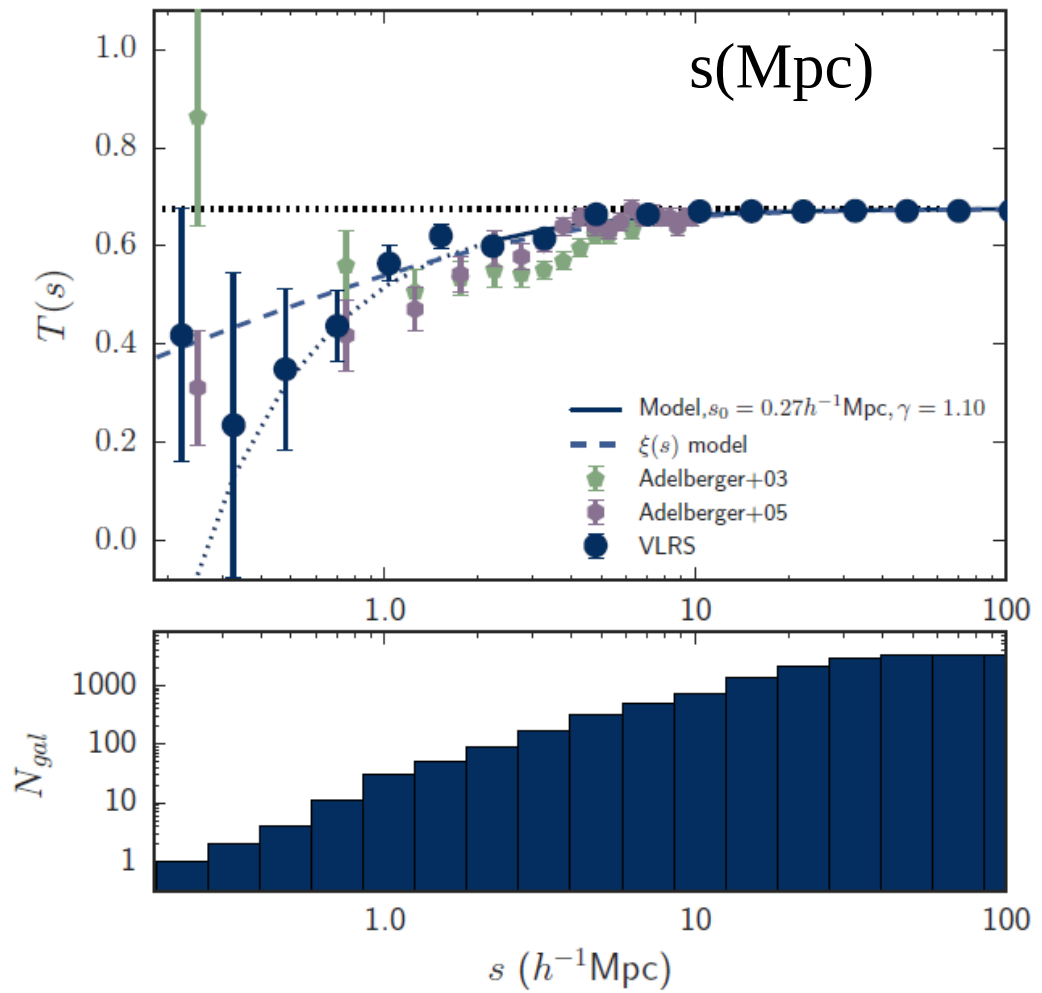
$$\langle T \rangle(z) = 0.676 - 0.220 (z-3) \quad (=0 \text{ pour } z=6.07)$$

$$\delta F = T/\langle T \rangle - 1$$

29 QSO $z > 3$

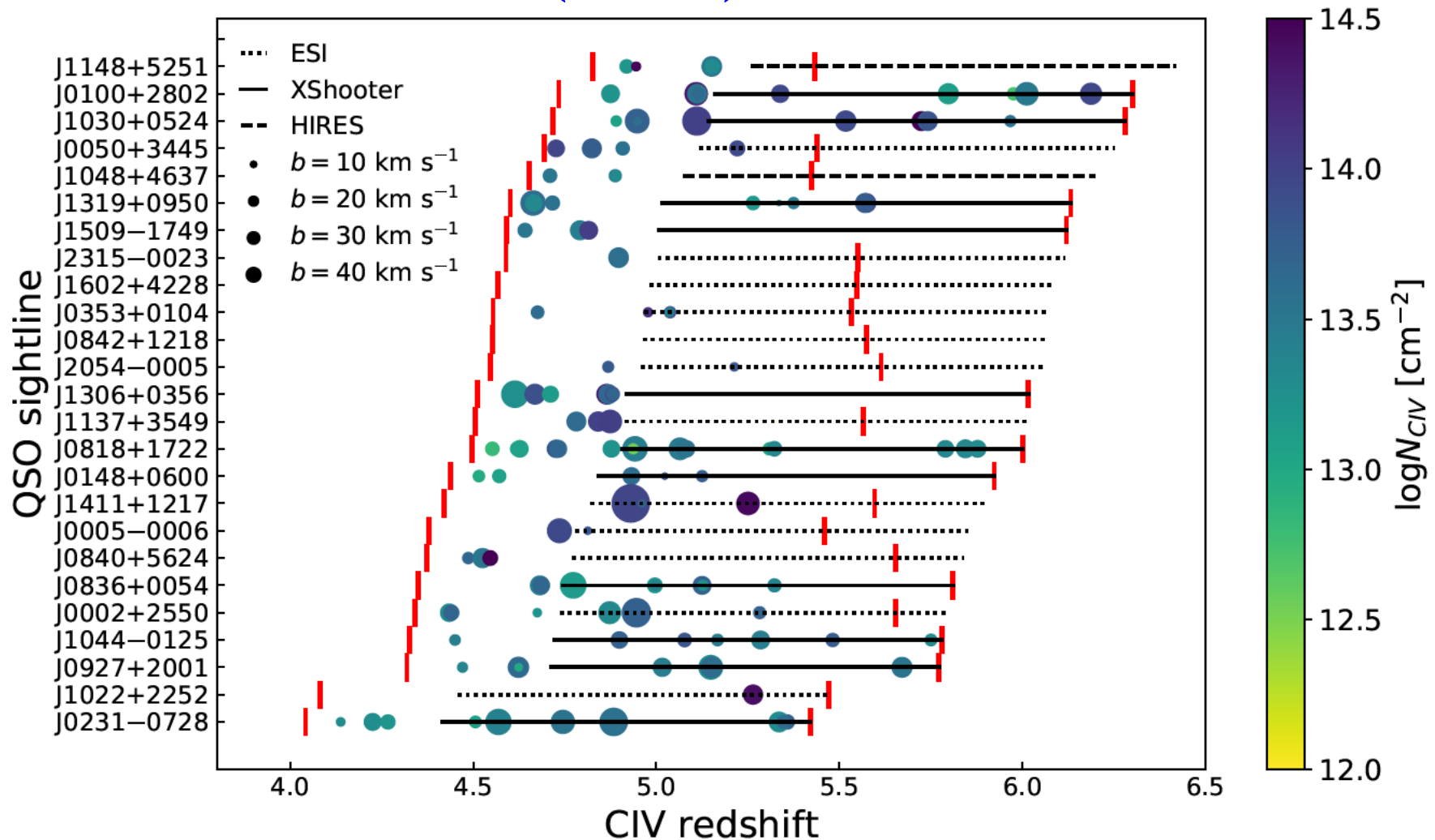
1700 LBG $2 < z < 3.5$

Observation de la
Proximité de HI
Autour des LBG



Autour des absorbants CIV

25 QSO, une centaine de CIV, selon b , largeur Doppler (taille)
et densité de colonne (couleur)

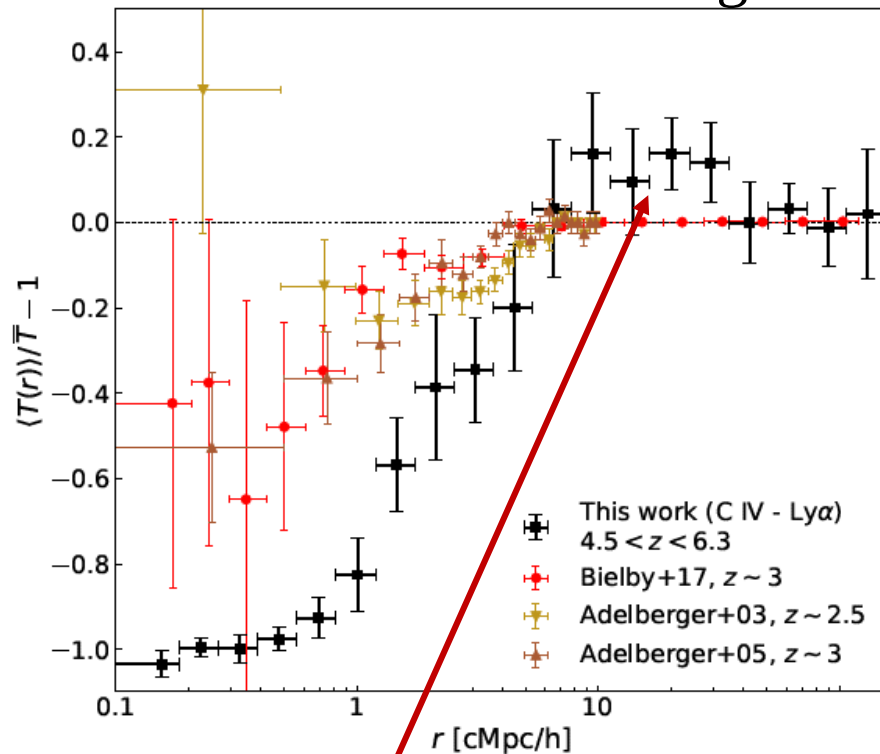


Meyer et al 2019

CIV Traceur des galaxies faibles, réionisantes

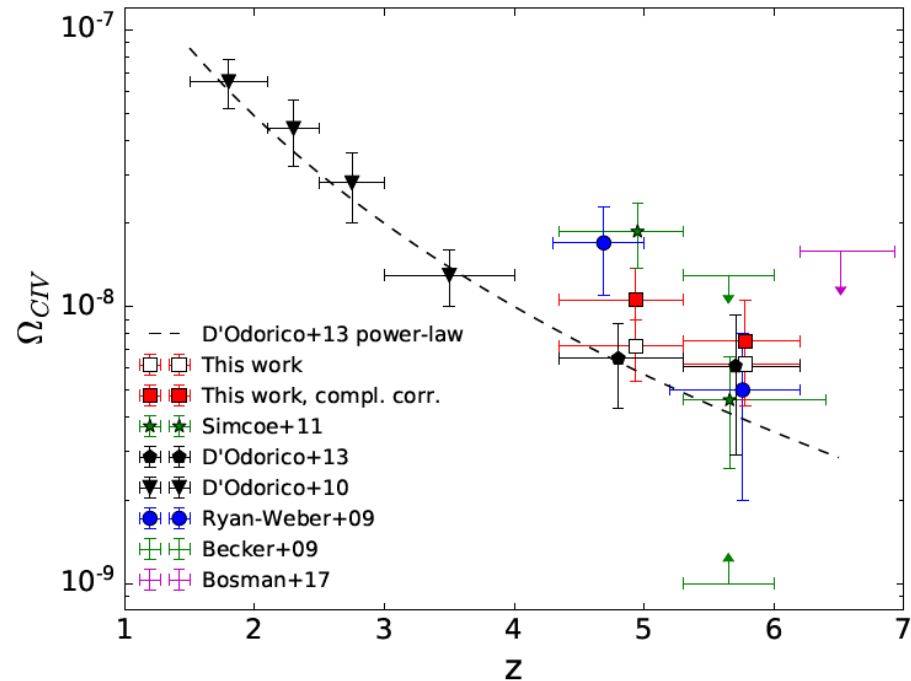
Mise en évidence d'un excès à gde distance

Transmission autour des galaxies CIV



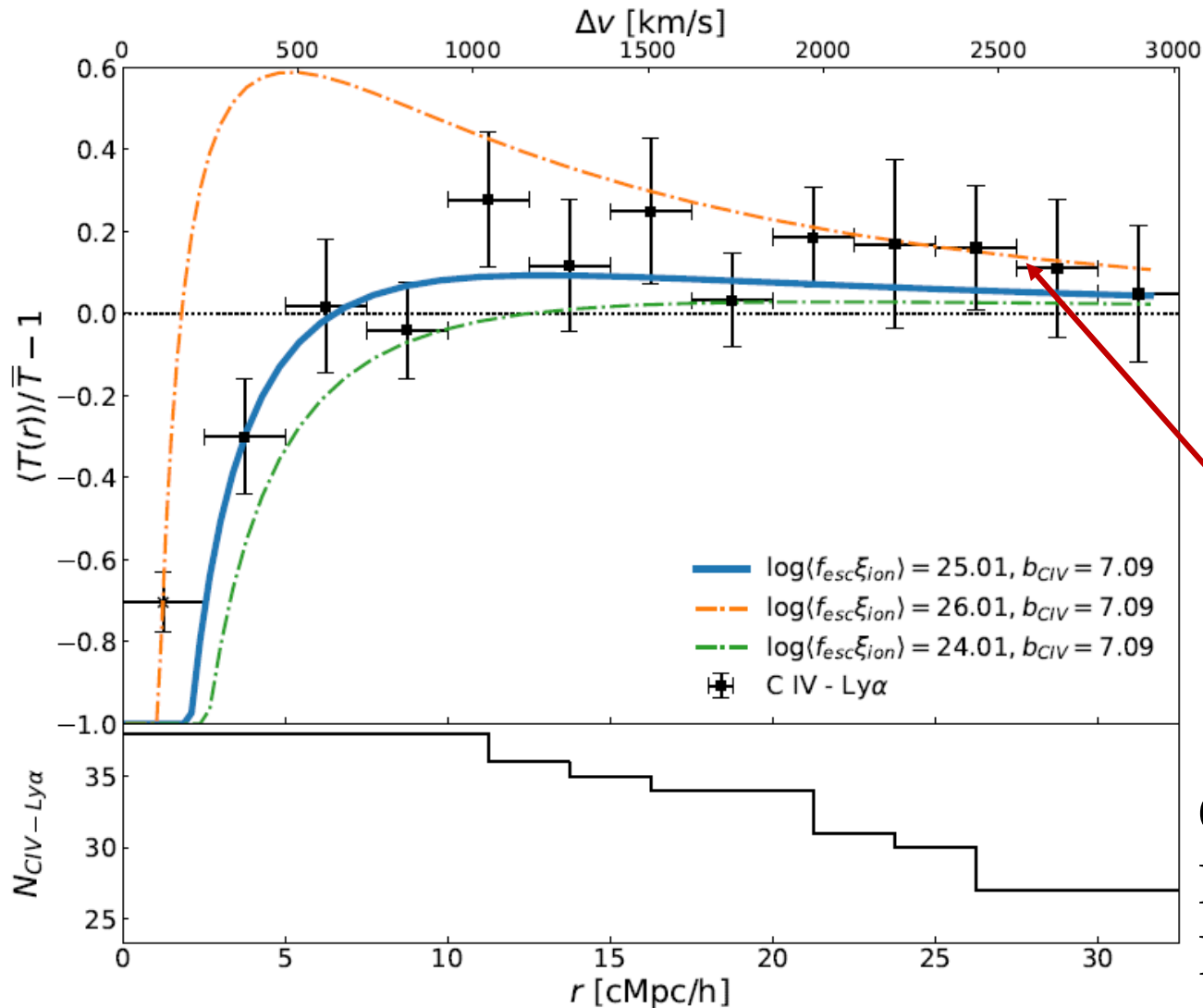
Excès à grande distance
(échelle log)

Evolution des galaxies CIV



Meyer et al 2019

Transmission de l'IGM



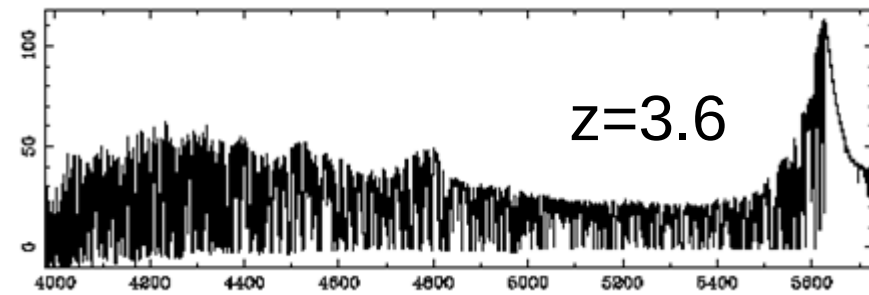
Comparaison
avec les
modèles

$$f_{esc} \xi_{ion} = 10^{26}$$

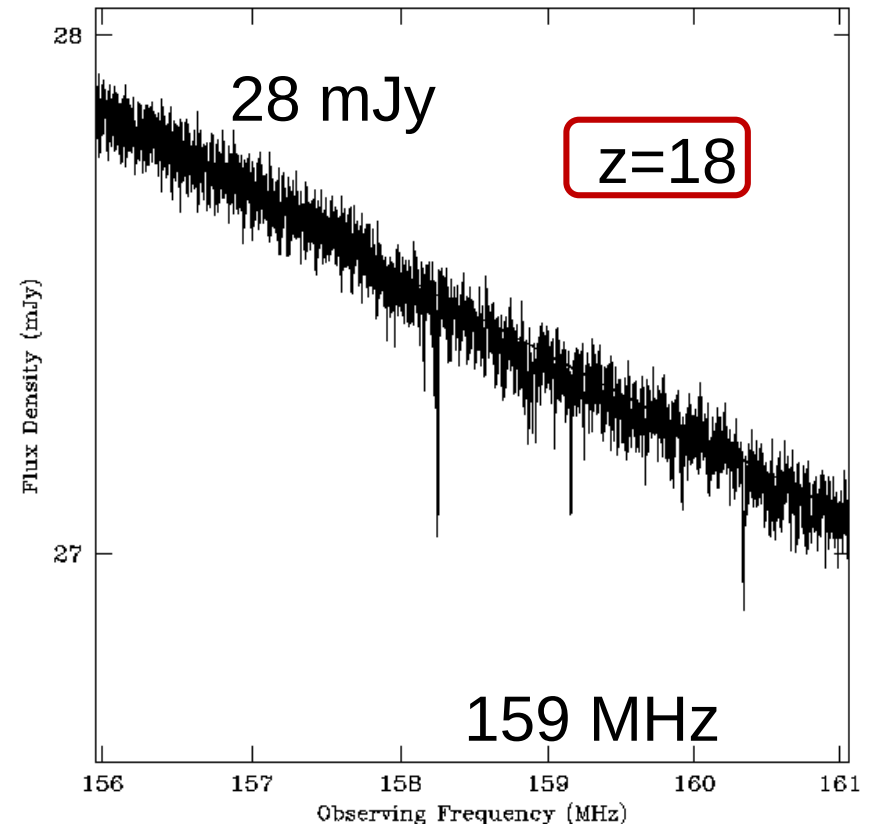
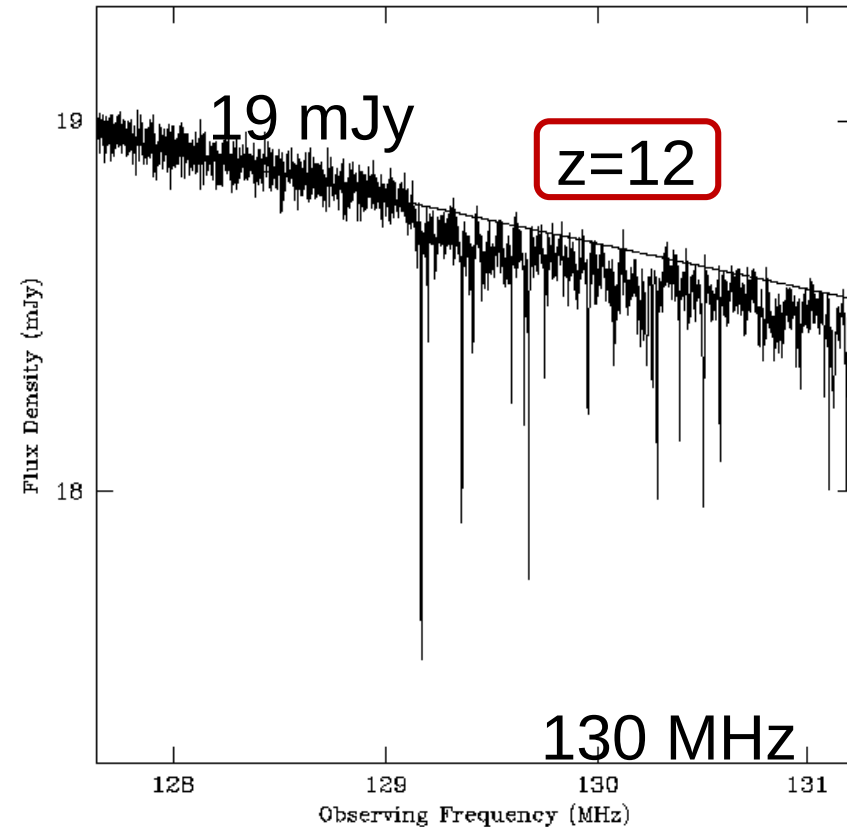
Galaxies autour CIV
Différentes de LAE
Plus de $f_{esc} \xi_{ion}$

Échelle linéaire

Forêt de raies en absorption 21cm



Analogie avec la forêt Ly α



Carilli 2004

Prédictions d'un forêt 21cm

Fraction d'HI atomique

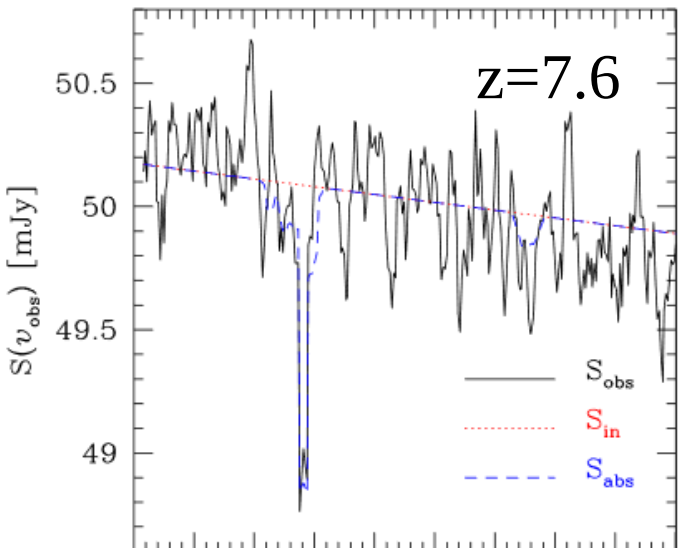
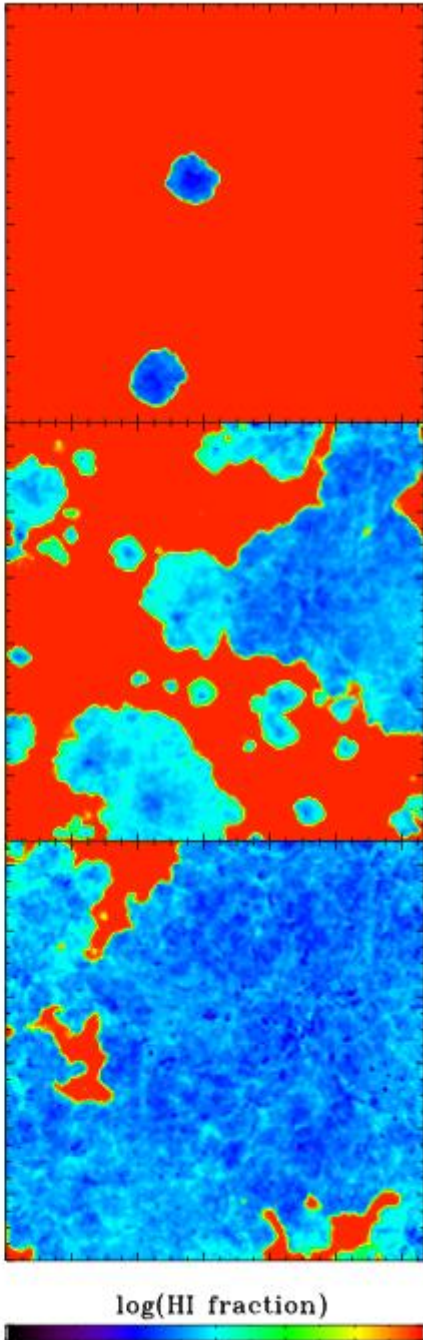
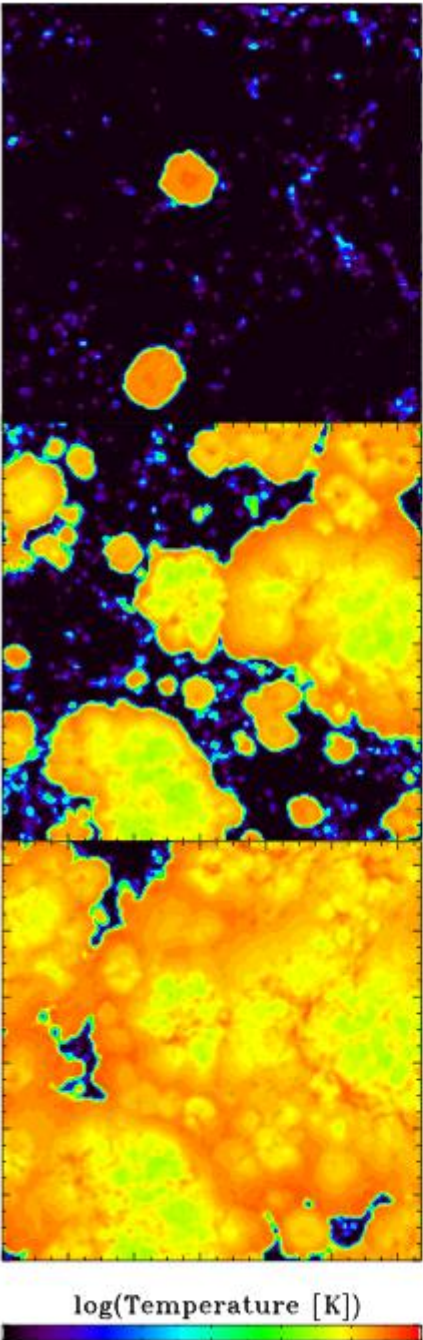
Simulation N-corps
 Hydro Gadget 3
 Transfert Radiatif Crash
 Boîte de 35 Mpc, 2x 512³

L'absence d'absorption
 indiquerait le chauffage
 du gaz par les rayons-X

z=14

z=9

z=7

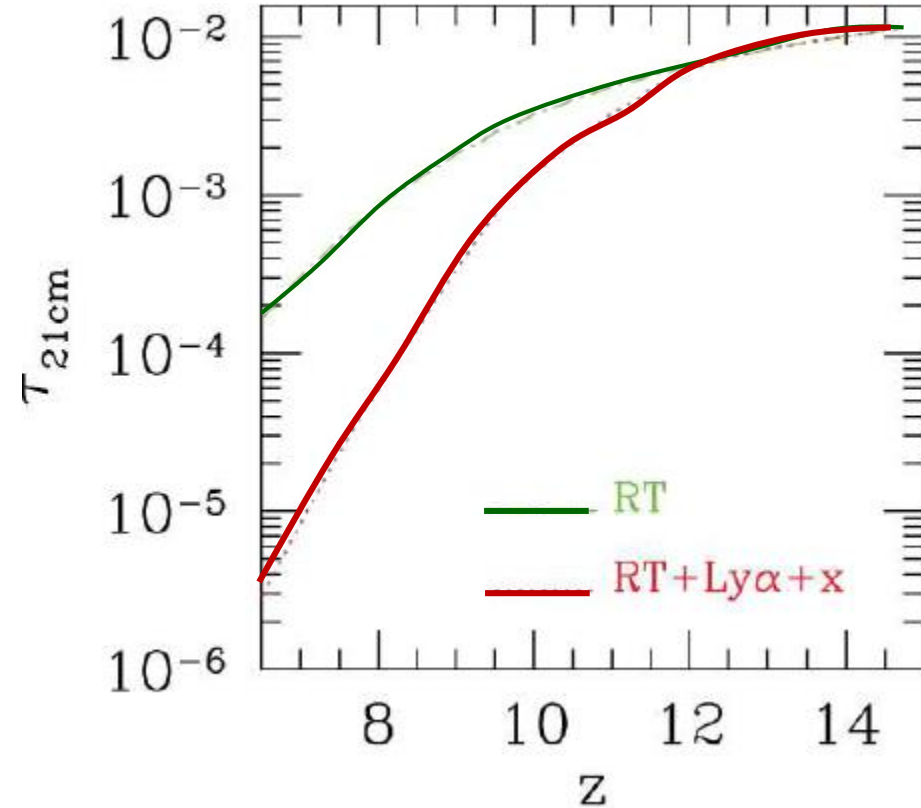
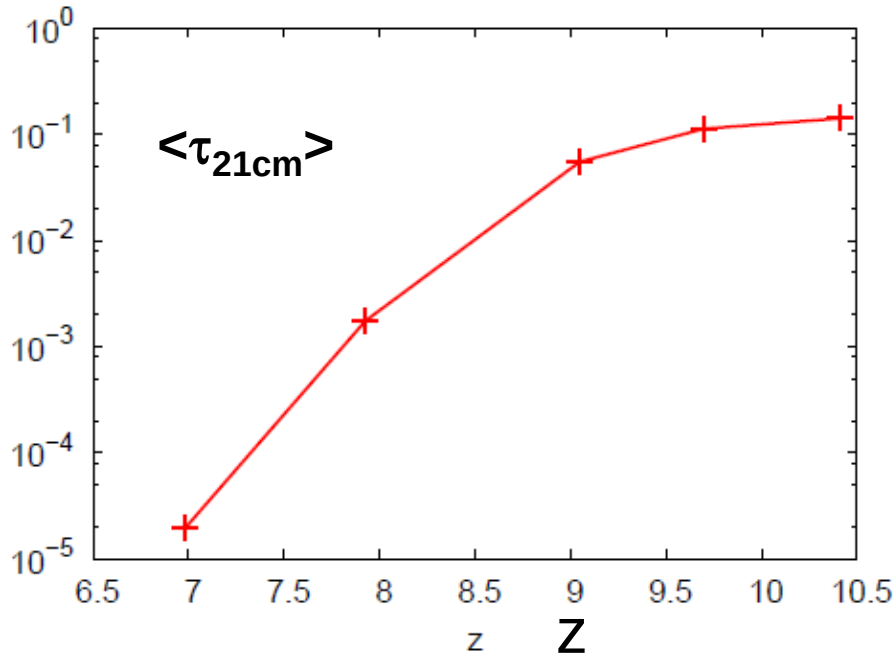


S_{in} = 50mJy

Ciardi et al 201,



Evolution de $\tau_{21\text{cm}}$



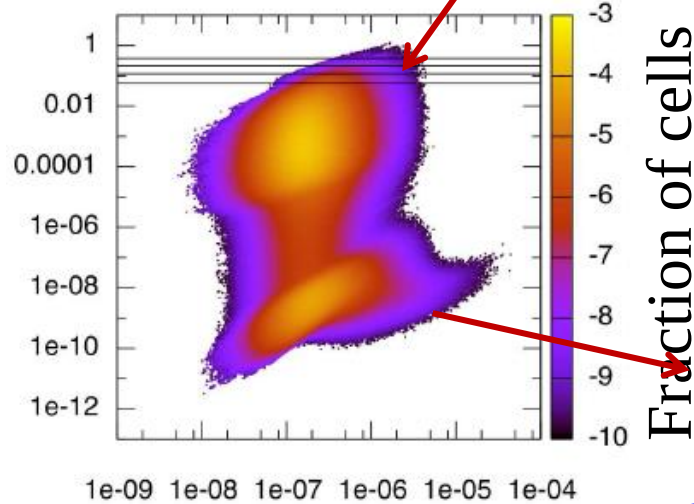
$\tau_{21\text{cm}}$ plus haute qu'auparavant
Transfert UV, X
Plus de resolution, $\rightarrow$ shielding

Couplage $T_s = T_k$ (courbe verte)
 $T_s = \max(T_k, \text{avec Ly}\alpha + X)$ rouge

Densité-épaisseur optique

$\langle \tau_{21\text{cm}} \rangle$ $z=7.9$

Dense, froid

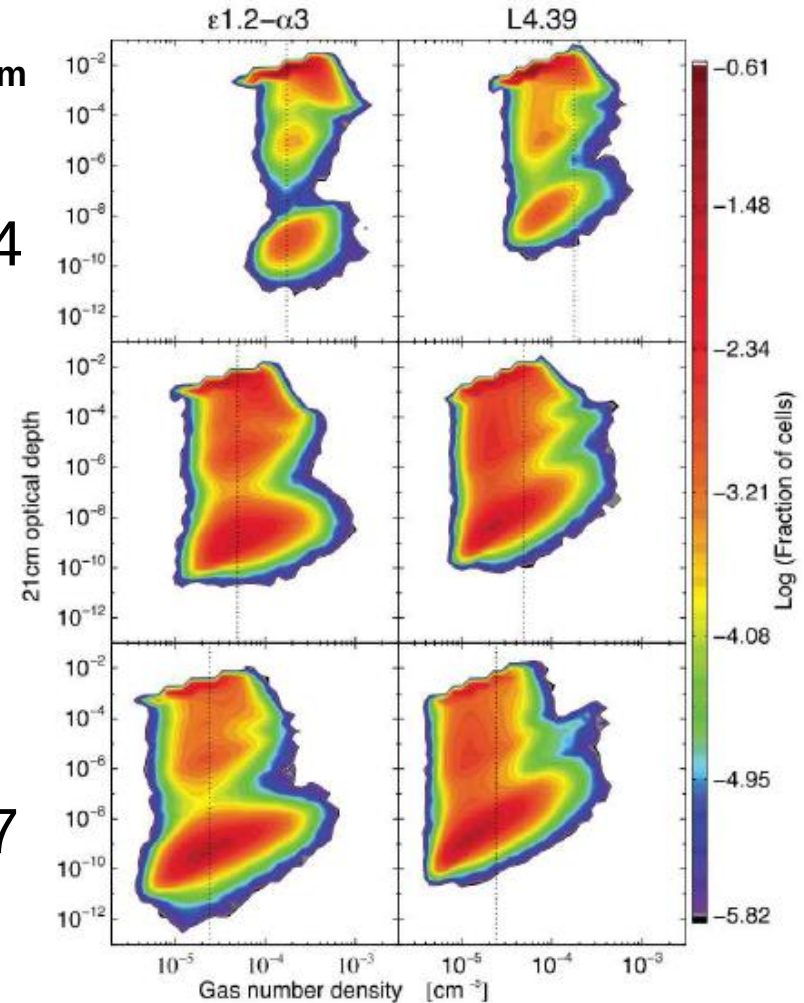


Ionisé,
chaud

$\tau_{21\text{cm}}$

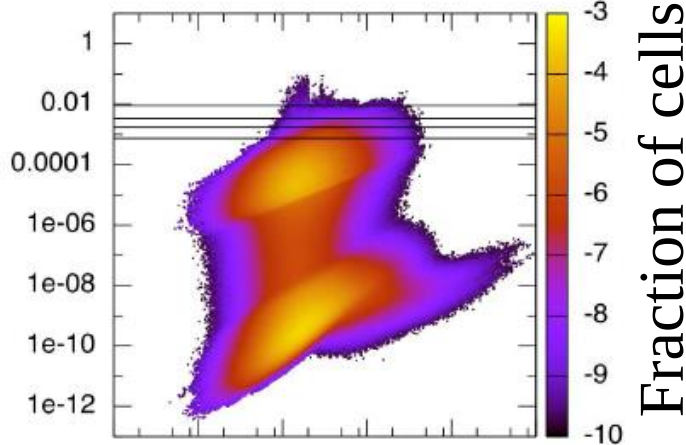
$z=14$

$z=9$



Comobile n (cm^{-3})

$\langle \tau_{21\text{cm}} \rangle$ $z=7$



$z=7$

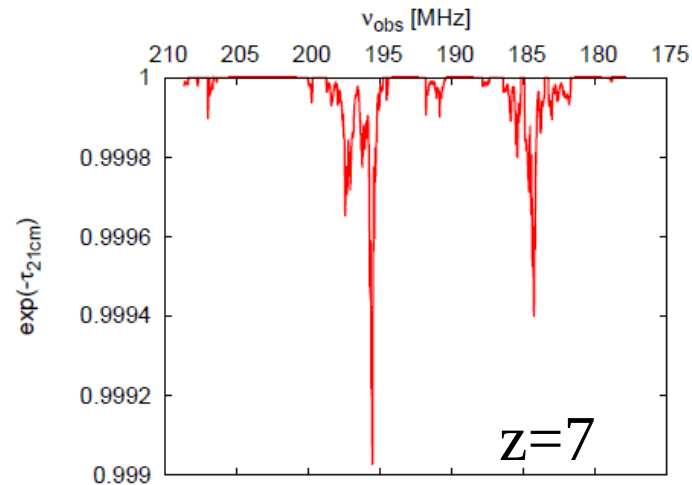
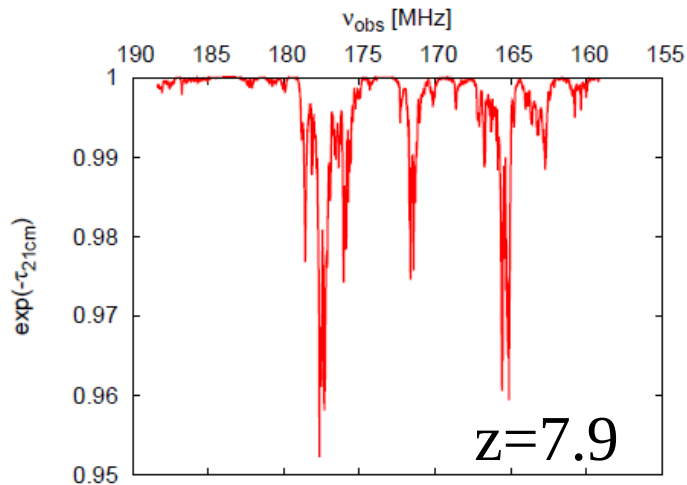
Comobile n (cm^{-3})

Comobile n (cm^{-3})

Semelin et al 2015

Ciardi et al 2013

Spectres attendus

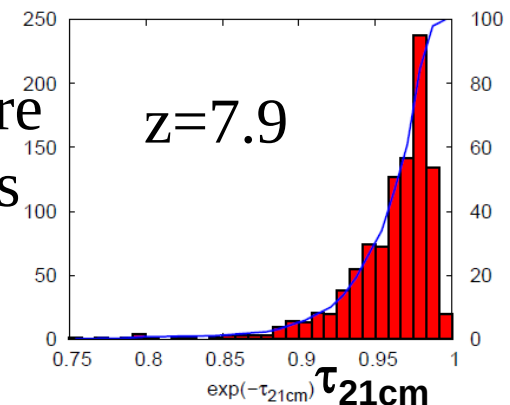


Assez de QSO??

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

→ Pas détectable à $z=7$
Mais à $z=7.9$ dans 10% des cas

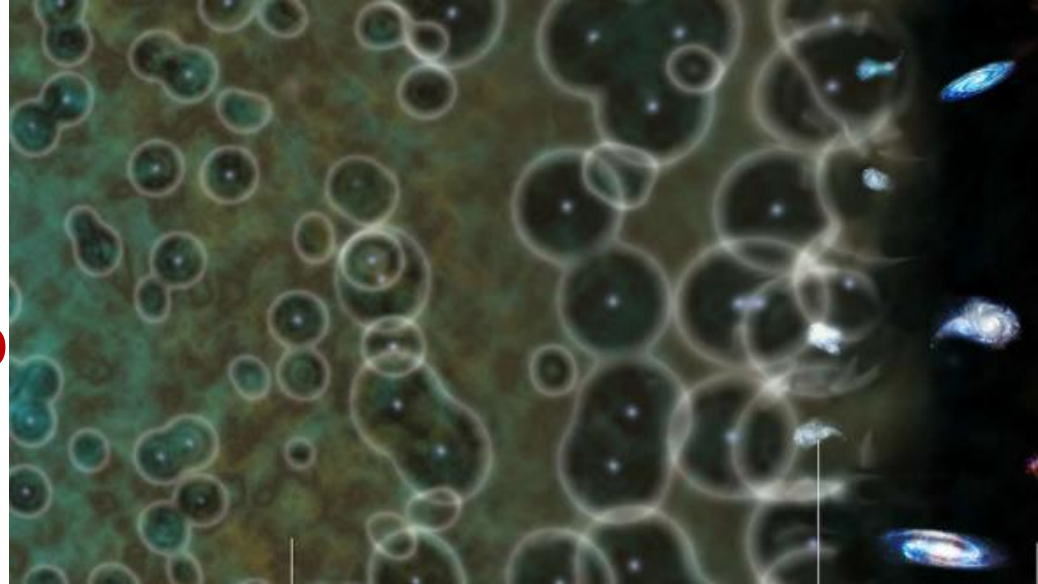
Nombre
des abs



%

Résumé

Les absorptions devant les QSO et les GRB sont des outils pour sonder le milieu IGM



Les divers composants

- ➔ Multitude de nuages $NH < 10^{17} \text{cm}^{-2}$ Forêt Ly α
 - ➔ Plus rares les LLS, au voisinage des galaxies
 - ➔ Encore plus rares les DLA, disques (externes) de galaxies
 - ➔ Raies métalliques, très ionisées: outflows
- ➔ Permet de sonder l'ensemble des petites galaxies qui réionisent l'Univers**