# Les absorbants comme traceurs de réionisation





$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp(-\tau_{\nu})$$

$$\tau(v) = N k \phi(v)$$

N est la densité de colonne (cm<sup>-2</sup>)

 $\Phi$  est le profil de la raie

$$\phi(\nu)_{N} = \frac{\Gamma}{4 \pi^{2} (\nu - \nu_{0})^{2} + (\Gamma/2)^{2}}$$
$$\phi(\nu)_{D} = \frac{1}{\pi \Delta \nu_{D}} \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_{0})^{2}}{\Delta \nu_{D}^{2}}\right]$$

# Quelques rappels : La courbe de croissance



3







4



# Les systèmes Lorenztiens (DLAs)

 Sont ~100% neutres, avec des densités de colonne similaires à celles des disques de galaxies

#### **DLAs**





 $\tau_{_{UV}} \sim 1~~a~~N \sim qq~10^{17}\,cm^{-2}$ 

Les DLAs nous permettent de mesurer la densité cosmologique de gaz neutre indépendemment de leur nature exacte.

$$\Omega_g^{HI} \propto n \, m \propto n \, \sigma \, l \, \rho \qquad \Omega_g^{HI}(X) dX \equiv \frac{\mu m_{\rm H} H_0}{c \rho_{\rm c}} \int_{N_{\rm min}}^{\infty} N({\rm H\, I}) f_{\rm H\, I}(N, X) dX$$





- Lente évolution comparée à celle de formation stellaire
- $\Omega_{_{HI}}(z\sim3) \ll \Omega_{_{\star}}(z=0)$
- → La consommation du gaz neutre par la formation d'étoiles doit être compensée par de l'accrétion de matière provenant du milieu intergalactique.

- Sont ~100% neutres, avec des densités de colonne similaires à celles des disques de galaxies
- Contiennent la majeure partie du gaz neutre à z<5



Noterdaeme et al. (2009)

- Sont ~100% neutres, avec des densités de colonne similaires à celles des disques de galaxies
- Contiennent la majeure partie du gaz neutre à z<5
- Contiennent des métaux





- Sont ~100% neutres, avec des densités de colonne similaires à celles des disques de galaxies
- Contiennent la majeure partie du gaz neutre à z<5
- Contiennent des métaux





- Sont ~100% neutres, avec des densités de colonne similaires à celles des disques de galaxies
- Contiennent la majeure partie du gaz neutre à z<5
- Contiennent des métaux
- Contiennent différentes phases (e.g. gaz chaud, gaz froid, gaz moleculaire)



Balashev & Noterdaeme (2018)

# La fonction de distribution de HI est sensible à la formation de $H_2$ et les effets rétroactifs de la formation d'étoiles.





L'excitation des niveaux rotationnels de molécules ainsi que des niveaux de structure-fine d'atomes dépend principalement des collisions et de l'excitation radiative (directe ou pompage UV).

 $\rightarrow$  Informations sur :

Température ; Pression; Densité ; Flux UV ; Turbulences ; CMB







Noterdaeme et al. (2015a), Balashev et al. (2017,2019)



# Les systèmes Lorenztiens (DLAs)

- Sont ~100% neutres, avec des densités de colonne similaires à celles des disques de galaxies
- Contiennent la majeure partie du gaz neutre à z<5</li>
- Contiennent des métaux
- Contiennent différentes phases (e.g. gaz chaud, gaz froid, gaz moleculaire)
- Présentent des structures à petites (kpc) et très petites (<pc) échelles</li>



- Sont ~100% neutres, avec des densités de colonne similaires à celles des disques de galaxies
- Contiennent la majeure partie du gaz neutre à z<5
- Contiennent des métaux
- Contiennent différentes phases (e.g. gaz chaud, gaz froid, gaz moleculaire)
- Présentent des structures à petites (kpc) et très petites (<pc) échelles</li>

Sont associés à des galaxies



#### Les plus hautes densités de colonne se trouvent au plus proche des galaxies



Ranjan et al. (2019)









 $\sigma_{\alpha} = 4.48 \times 10^{-18} \, cm^2$ 

$$\frac{n_{HI}}{n_{H}} = x_{HI} \approx 10^{-4} \Omega_{m}^{1/2} h (1+z)^{3/2} \tau_{\alpha}$$







• L'épaisseur optique augmente (la transmission diminue) avec le décalage spectral

L'Univers était moins ionisé dans le passé

## La forêt Lyman-alpha à 2<z<5





Le rapport de spectres composites du SDSS à différents décalages spectraux donne la transmission moyenne relative





Evolution graduelle de l'ionisation et température du milieu intergalactique entre z=2 et z=5

# La "forêt" Lyman-alpha à z>5



 $cm^{-2} \text{ Å}^{-1}$ ]

1-1

erg

 $F_{\lambda}$  [10<sup>-16</sup> e



Eilers et al. (2018)

Spectre de quasar à z~6



Becker et al. (2015)



VLT/Xshooter





# Différentes opacités au même décalage spectral

Eilers et al. (2018)



# La dispersion demande plus que des fluctuations de densités

Eilers et al. (2018)



mission of light

quasar spectrur

Des fluctuations dans la fraction neutre d'un facteur >3 sont requises.

Eilers et al. (2018)



#### Hypothèse **T**:

Photoionisation:

Fluctuations de la temperature Les regions complètement absorbées correspondent à des régions de haute-densité, où la réionisation s'est terminée rapidement et le gaz a eu le temps de refroidir.



Eilers et al. (2018)



## Hypothèse UV:

Fluctuations du fond UV dû aux galaxies.

Photoionisation:

Les régions complètement absorbées correspondent à des régions avec peu de sources ionisantes.



Davies et al. (2017)



Fluctuations du fond UV Les galaxies évitent les régions de grande opacité. Fluctuations de la température Les galaxies tracent les régions de grande opacité.

# Fluctuations du fond UV ou fluctuations de température ?



Idée: rechercher les galaxies dans le champ



### Fluctuations du fond UV ou fluctuations de température ?



Idée: rechercher les galaxies dans le champ



Becker et al. (2018)

# La méthode "dark pixels"



#### Idée: étudier la fraction des pixels de transmission nulle.

#### ~3 Mpc

Un "pixel" avec F=0 peut être dû à

- une poche de gaz completement neutre (DLA)
- ce qui reste de HI ( $x_{HI}$ >10<sup>-4</sup>) dans le milieu intergalactique ionisé.

Avantages: simplicité, ne dépend pas de modèles, n'a pas besoin du continu.

# La méthode "dark pixels"



McGreer, Mesinger & D'Odorico (2015)



Greig & Mesinger (2017)



Greig & Mesinger (2017)

Analyse des "dark gaps"



# Ailes lorentziennes du milieu intergalactique



• Absorption lorentzienne loin de la longueur d'onde centrale

# Ailes lorentziennes du milieu intergalactique à $z\sim7$





# Ailes lorentziennes du milieu intergalactique à $z\sim7$



nature

**Deuxième détection d'absorption lorentzienne du milieu intergalactique** à z=7.54 vers ULAS J1342+0928

Bañados et al. (2018)

#### **CHALLENGE:** Le continu intrinsèque n'est pas connu



Ďurovčíková et al. (2020)

Différentes méthodes de reconstruction



*PSO J183+05*, *z*= 6.4

Peut être modélisé avec une aile lorentzienne du milieu intergalactique...



*PSO J183+05*, *z*= 6.4

Peut être modélisé avec une aile lorentzienne du milieu intergalactique...

ou un DLA...



Bañados et al. (2019)

*PSO J183+05*, *z*= 6.4





Bañados et al. (2019)

















 $R_{NZ} \propto [L_{\gamma} t_{O} / F_{HI}]^{1/3} (1+z)^{-1}$ 

Similaire à la sphère de Strömgren autour des étoiles O et B, mais s'étendant durant toute la vie du quasar.

## Les quasars comme acteurs de la réionisation





$$R_{_{NZ}} \propto [L_y t_Q / F_{_{HI}}]^{1/3} (1+z)^{-1}$$

Similaire à la sphère de Strömgren autour des étoiles O et B, mais s'étendant durant toute la vie du quasar



Evolution de la taille de la sphère de Strömgren au cours du temps ?

- La densité cosmologique de carbone ionisé diminue lorsque z augmente
- Abondance ou ionisation ?



- Les rapports d'abondance semblent relativement constants
- Les espèces ionisées varient plus que les espèces neutres
- Flux UV moins important à grand-z



#### Les quasars à z>6 sont très rares

- < 1 Gpc<sup>-3</sup> à z=6 <1 par 100 deg<sup>2</sup>
- Relevés multi-couleurs sur une très grande portion du ciel
- Pan-STARRS : 4 milliards de sources
- Relevés à venir: EUCLID, WFIRST, LSST...



# Perspectives



Fan et al. Astro2020

# Perspectives



# Emission rémanente de sursauts gamma



# Perspectives



# Résumé

De par leur luminosité exceptionnelle, les quasars sont un outil formidable pour sonder le gaz en absorption sur toute la ligne de visée, que ce soit dans, autour, ou (très) loin des galaxies.

- z~2-3 On approche 10<sup>6</sup> quasars confirmés spectroscopiquement. Grande statistique des absorbants à toutes les densité de colonne, jusqu'au coeur des galaxies.
- **z**<5 Le milieu intergalactique est très ionisé ( $x_{HI} < 10^{-4}$ ) et évolue de manière "continue" avec le temps.
- **z~6** Fin de la réionisation.
  - $\langle x_{HI} \rangle \leq 0.1$  (méthode dark pixels).
  - Observations d'absorption complètes (Gunn-Peterson) mais forte variabilité d'une ligne de visée à une autre → inhomogénéité du fond UV
  - Diverses statistiques (longueur des absorptions GP, forme et fréquence des pics de transmission) en principe prometteuses mais problèmes de robustesse.
- **z~6-7** Les quasars comme acteurs de la réionisation: observe-t-on les sphères de Strömgren grandir ?
- z~7 DEUX détections d'absorption lorentziennes du milieu intergalactique x<sub>HI</sub> ~ 50% à z=7.5.
  Grands défis: identification des quasars, observations et modélisation du continu intrinsèque.

Il est crucial de détecter plus de quasars à z>7, mais cela leur laisse moins de temps pour acquérir plus de masse et devenir plus lumineux: Nécéssité de relevés très étendus et profonds + très grands télescopes pour suivi. Les sursauts gammas sont également prometteurs: luminosité très élevée durant un "bref" instant, mais avec un spectre plus simple et localisés dans des galaxies plus typiques que les quasars.