

Spectroscopie visible et Univers lointain

Patrick Boissé

Sorbonne Université

Institut d'Astrophysique de Paris



Plan :

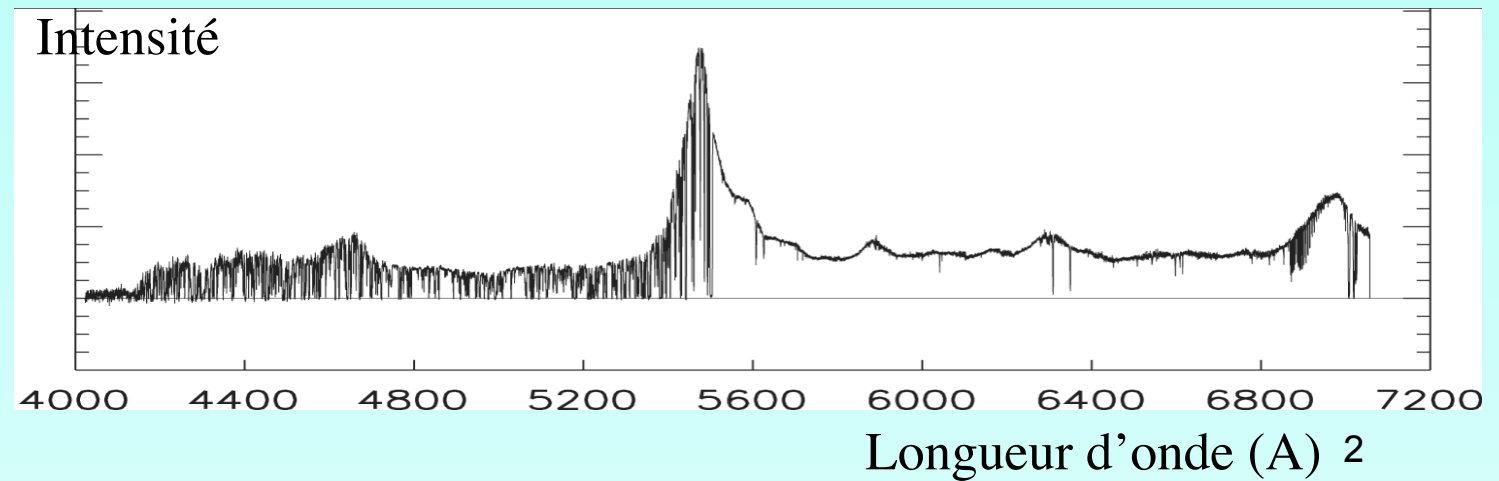
- **Généralités sur la lumière et la spectroscopie**
- **Information portée par les raies d'émission et d'absorption**
- **Identification des raies et uniformité des lois et constantes**
- **Abondances dans le gaz, T(CMB), taille et structure des nuages**
- **Perspectives**

Images / spectres

- Image $I(x,y)$: ce qu'on voit sur le ciel



- Spectre $I(\lambda)$: « qualité » non perceptible par l'œil (couleur)

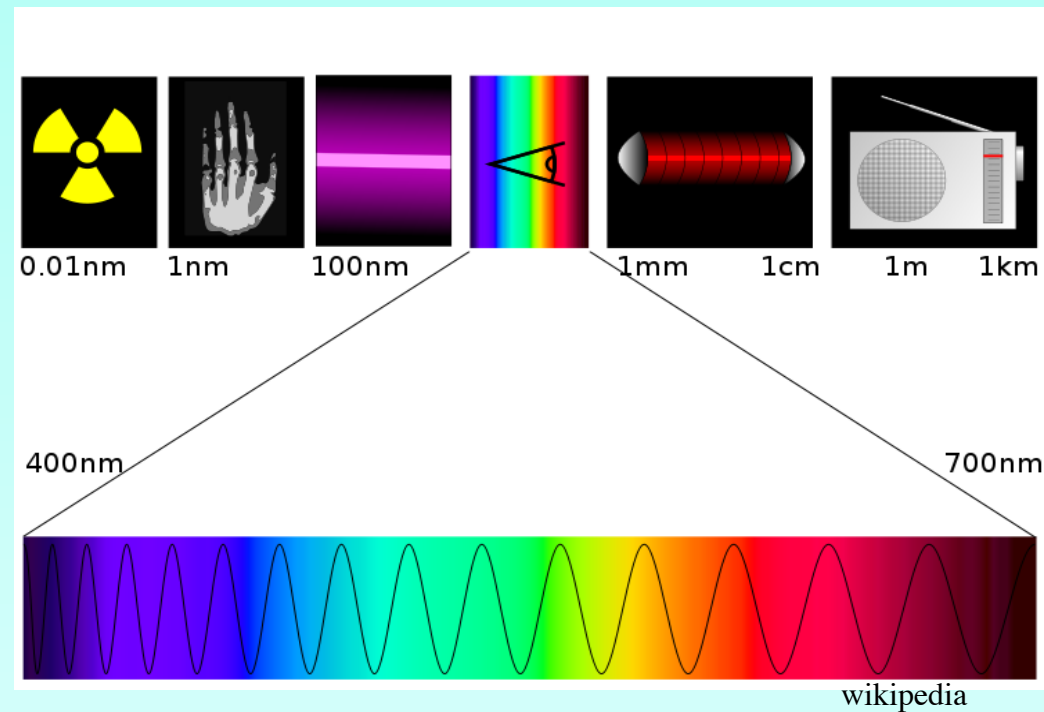
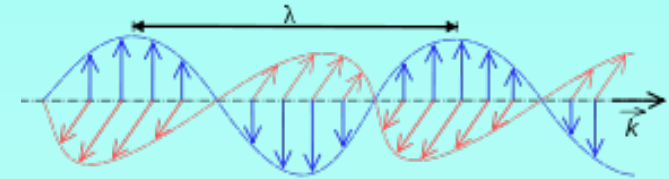


Spectre électromagnétique et astronomie multi-longueurs d'ondes

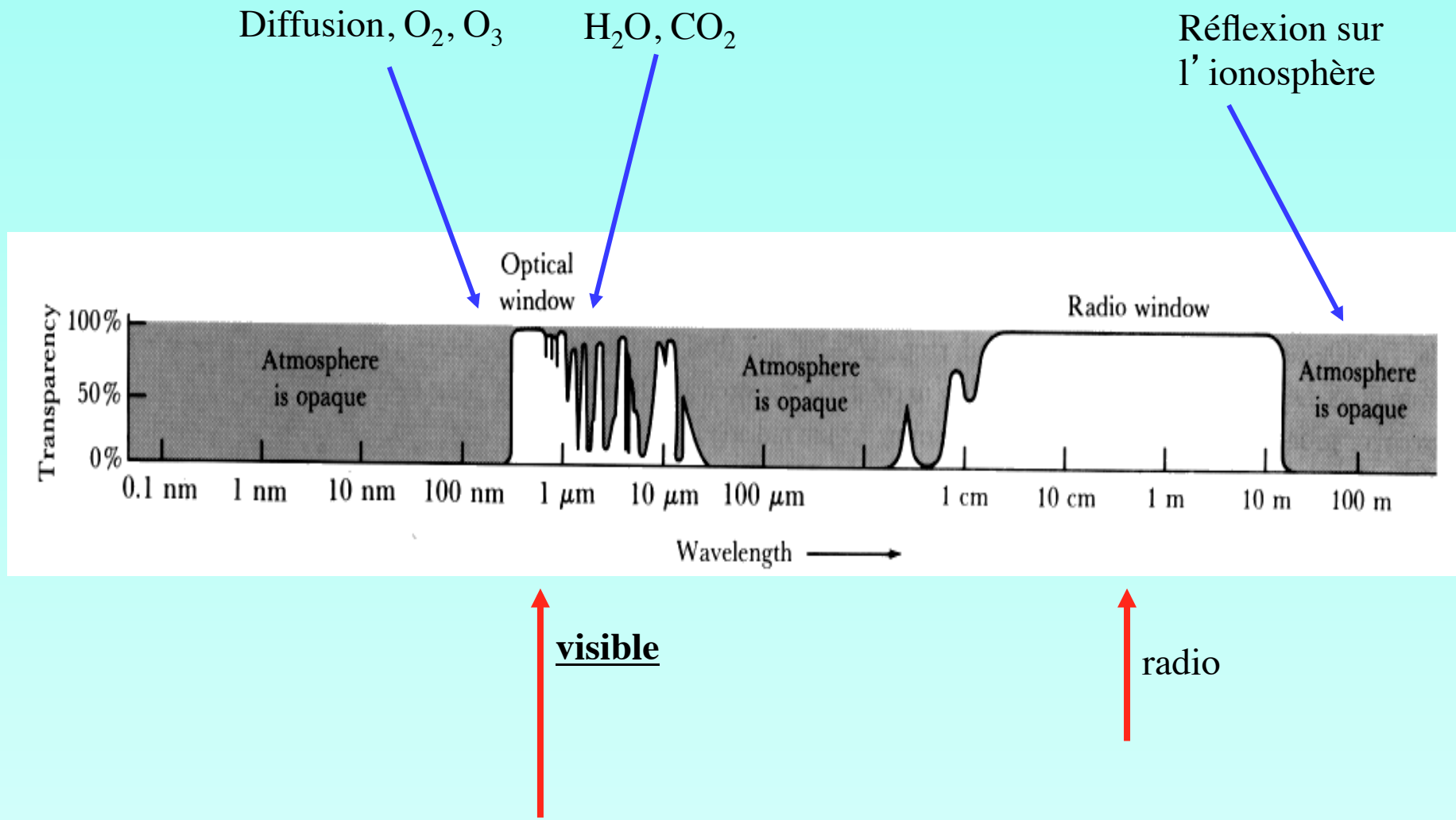
Dualité onde électromagnétique -particule :

Le rayonnement est à la fois :

- une onde (T , ν , λ , et c avec $\lambda = c T = c/\nu$)
- des particules, les « photons » ($E = h \nu$)

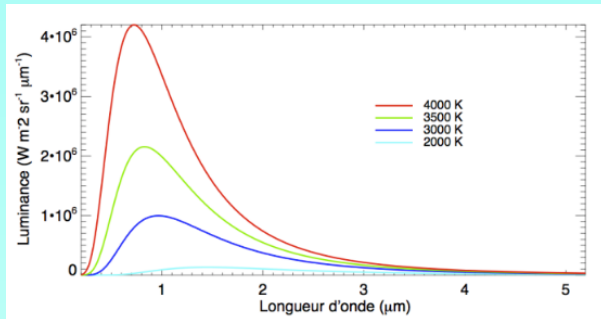


La transparence atmosphérique



Composante « continue » du spectre

- **Forme générale du « continu »** → mécanisme d'émission
- Spectre « thermique » (corps chauds : loi de Planck)



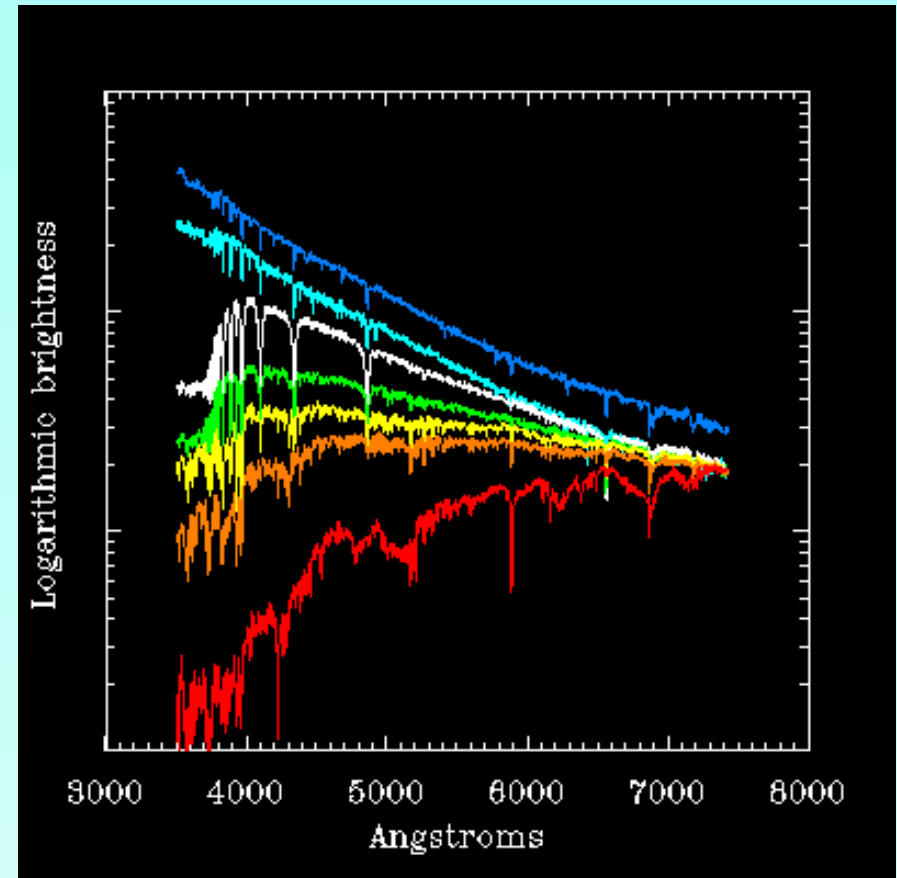
- Spectre « non thermique »

Étoiles

- bleues --> chaudes, massives (jeunes)
- rouges --> froides (vieilles)

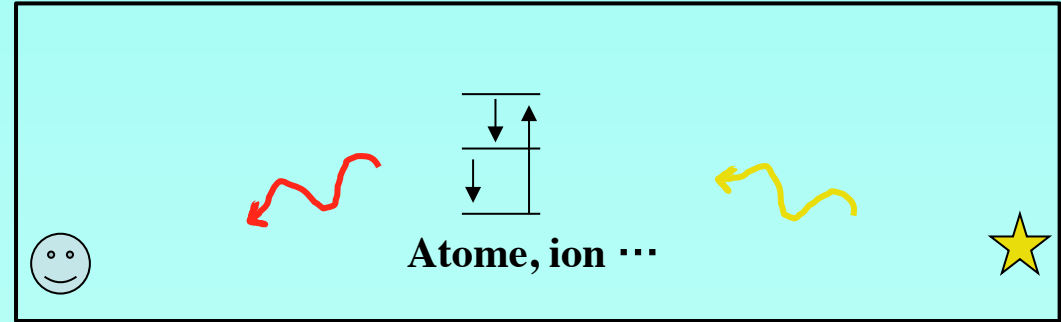
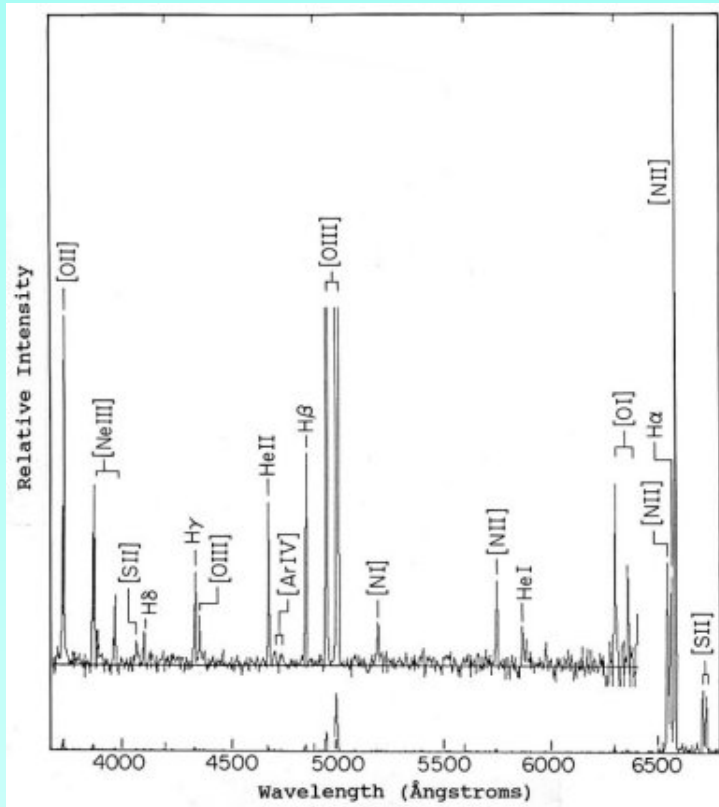
Galaxies

- bleues --> étoiles jeunes
- rouges : pas de formation en cours !



Raies d'émission

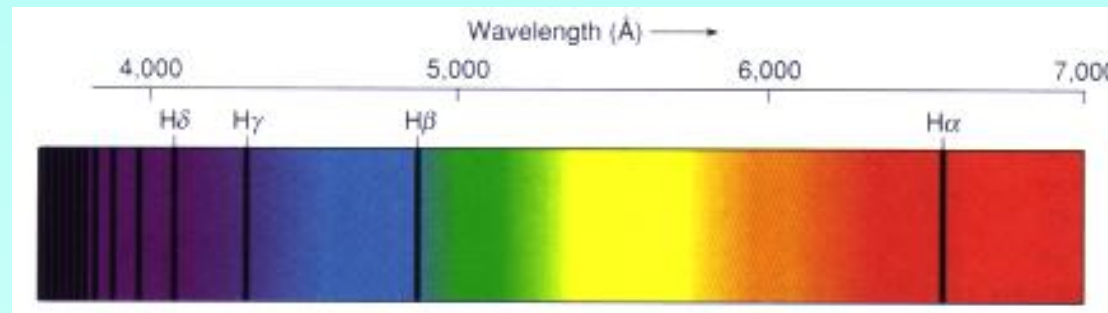
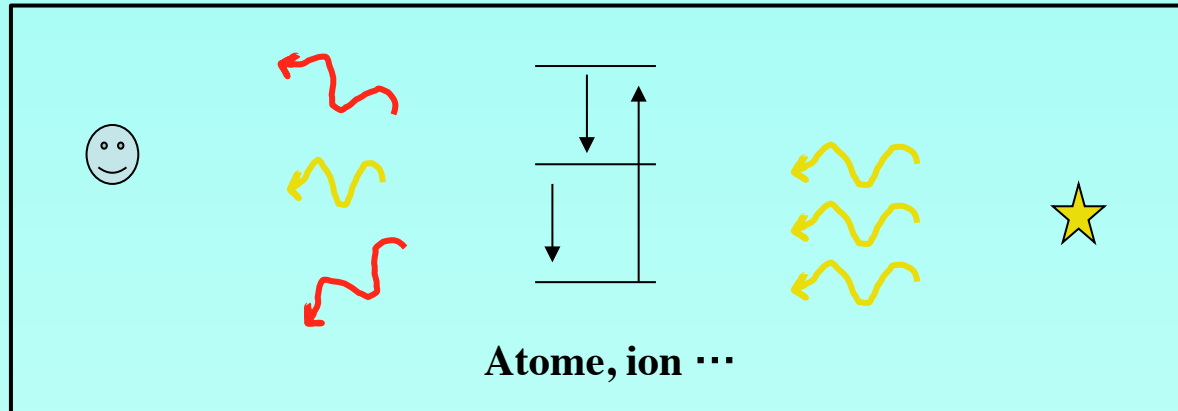
... d'atomes, d'ions ou de molécules « excités »



- Nébuleuses ionisées de notre Galaxie entourant les étoiles chaudes (jeunes)
- Galaxies avec étoiles jeunes

Raies d'absorption

... d'atomes, ions ou molécules (dans leur niveau fondamental en général)



- Raies d'absorption atmosphériques
- Raies d'absorption stellaires
- Raies d'absorption interstellaires, intergalactiques
- Raies d'absorption de galaxies (stellaires et interstellaires)

Informations portées par les raies / 1

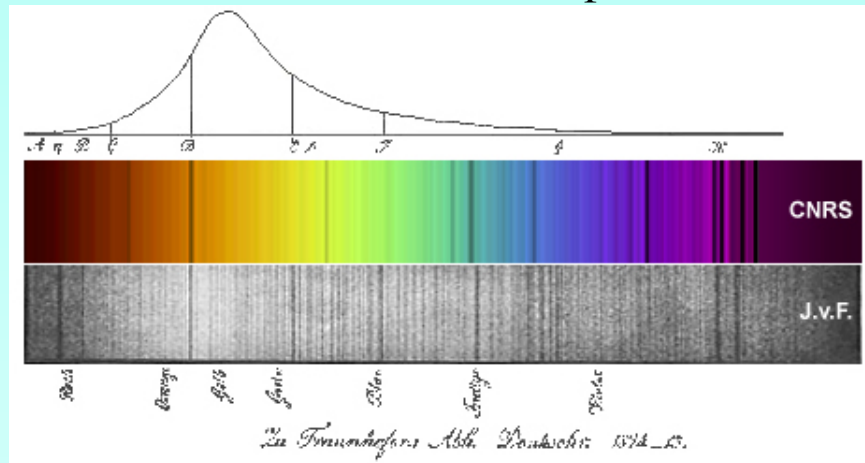
- Position

- composition de la matière (nature : C, Si, Fe ...)
- vitesse de l'astre (décalage Doppler-Fizeau) :

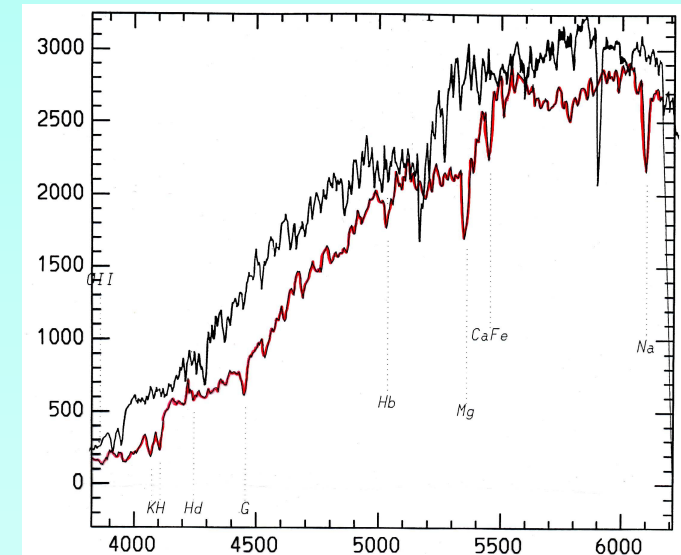
décalage Doppler-Fizeau, faible V_e : $\lambda_{\text{obs}} = (1 + V_e/c) \lambda_0$

grand décalage : $\lambda_{\text{obs}} = (1 + z) \lambda_0$

Spectre solaire



$V(\text{galaxie/M31}) = 10600 \text{ km/s}$



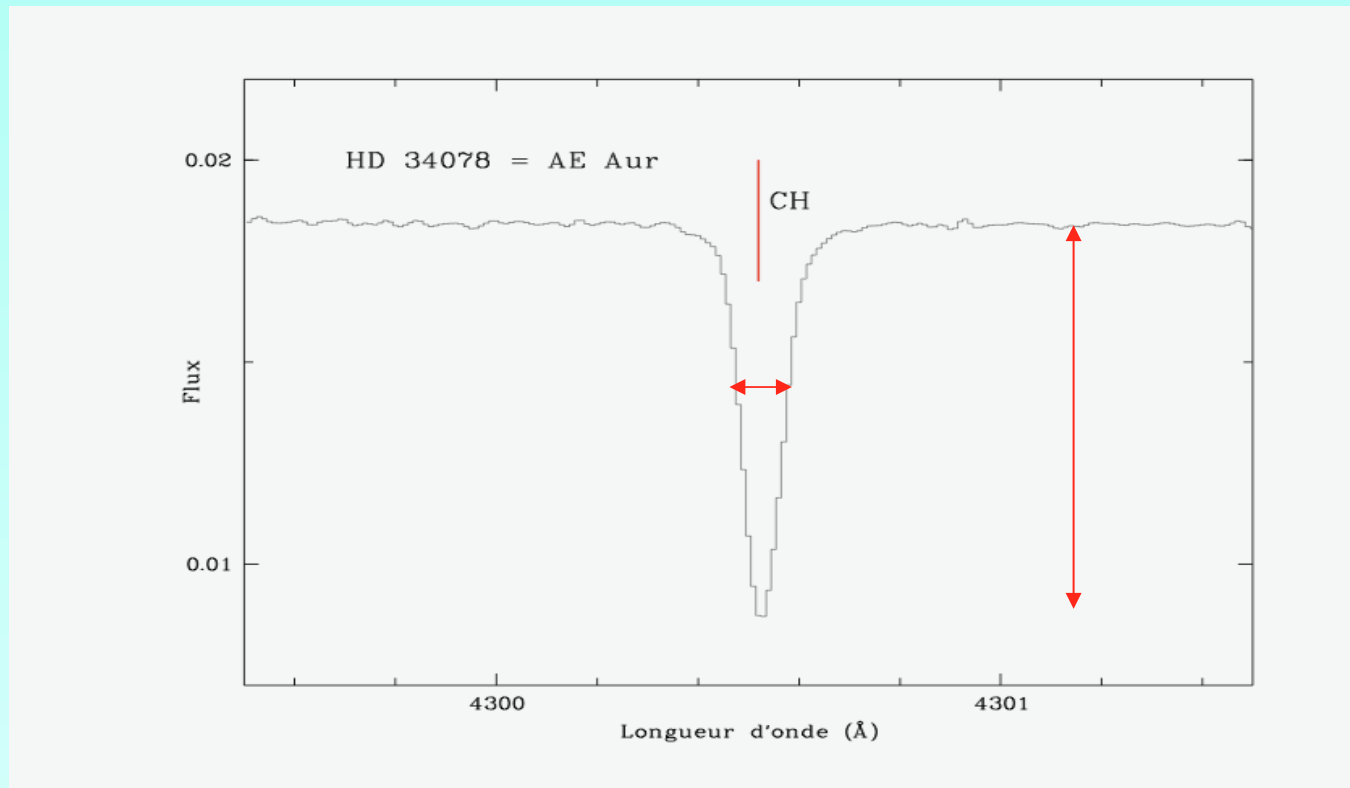
Informations portées par les raies / 2

- largeur

- agitation dans le gaz (micro/macro)
- rotation (étoiles, galaxies)

- Intensité ou profondeur

- mesure précise de la quantité de l'élément
→ $N(\text{CH})$ (si raie non « saturée »)

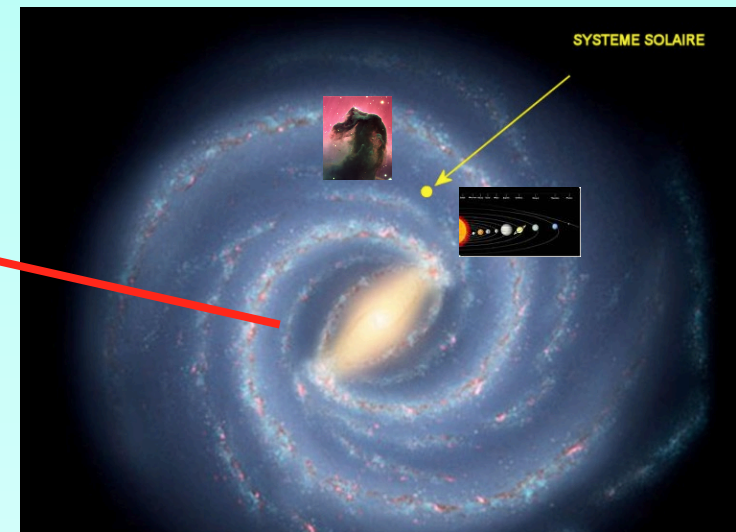


Quelques points de repère dans l'espace et dans le temps

- système solaire : Terre, lune, planètes, soleil (≈ 10 min-lumière)
- voisinage solaire : étoiles, nuages de gaz (quelques 10 - 100 a. l.)
- notre Galaxie, la voie lactée ($\approx 100\ 000$ a. l.)
- galaxies proches (millions d' a. l.)
- galaxies lointaines (milliards d' a. l.)



15 décembre 2018



Spectroscopie et Univers lointain

10

Utilisation des raies / contexte cosmologique

- **Expansion de l'Univers**

→ grands décalages spectraux : identification des raies ?

- toutes les raies d'un astre subissent le même décalage : $\lambda_{\text{obs},i} = (1+z) \lambda_{0,i}$

- pour deux raies 1 et 2 $\lambda_{\text{obs},2} / \lambda_{\text{obs},1} = \lambda_{0,2} / \lambda_{0,1}$ quel que soit z !

rapports de longueurs d'ondes préservés ... si $\lambda_{0,2}$ et $\lambda_{0,1}$ « universels » !

- **l'Univers a une histoire**

grand décalage spectral → grande distance (x milliards années lumière)

→ époque reculée (x milliards années)

→ **Uniformité des lois dans l'espace et dans le temps ?**

- forte variation des lois ou constantes exclue (→ identification impossible)

- à quel degré de précision les lois sont-elles uniformes ?

Universalité spatio-temporelle des lois de la physique

- Identification possible des raies décalées
==> **mêmes atomes partout et à toute époque !**
--> **les lois et constantes n'ont pas (ou très peu ...) changé sur x Gyr.**

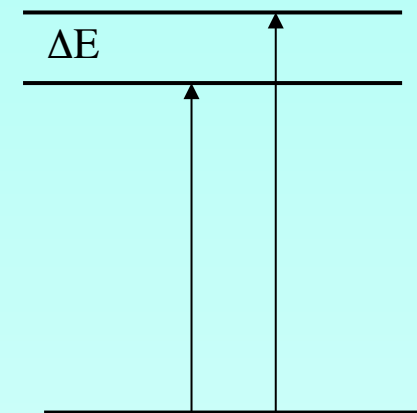
- Tests très précis possibles sur :

- **variation de $\alpha = e^2/hc$** : multiplets de Si^{3+} , Fe^+ , Mg^+
(sensibilité à $\Delta\alpha$ estimée par la théorie)

$$\Delta\alpha/\alpha \leq \approx 10^{-6} \text{ entre } z \approx 0 \text{ et } z \approx 2-3$$

- **variation de $\mu = m_p/m_e$ (≈ 1836)** : raies de H_2 et de HD

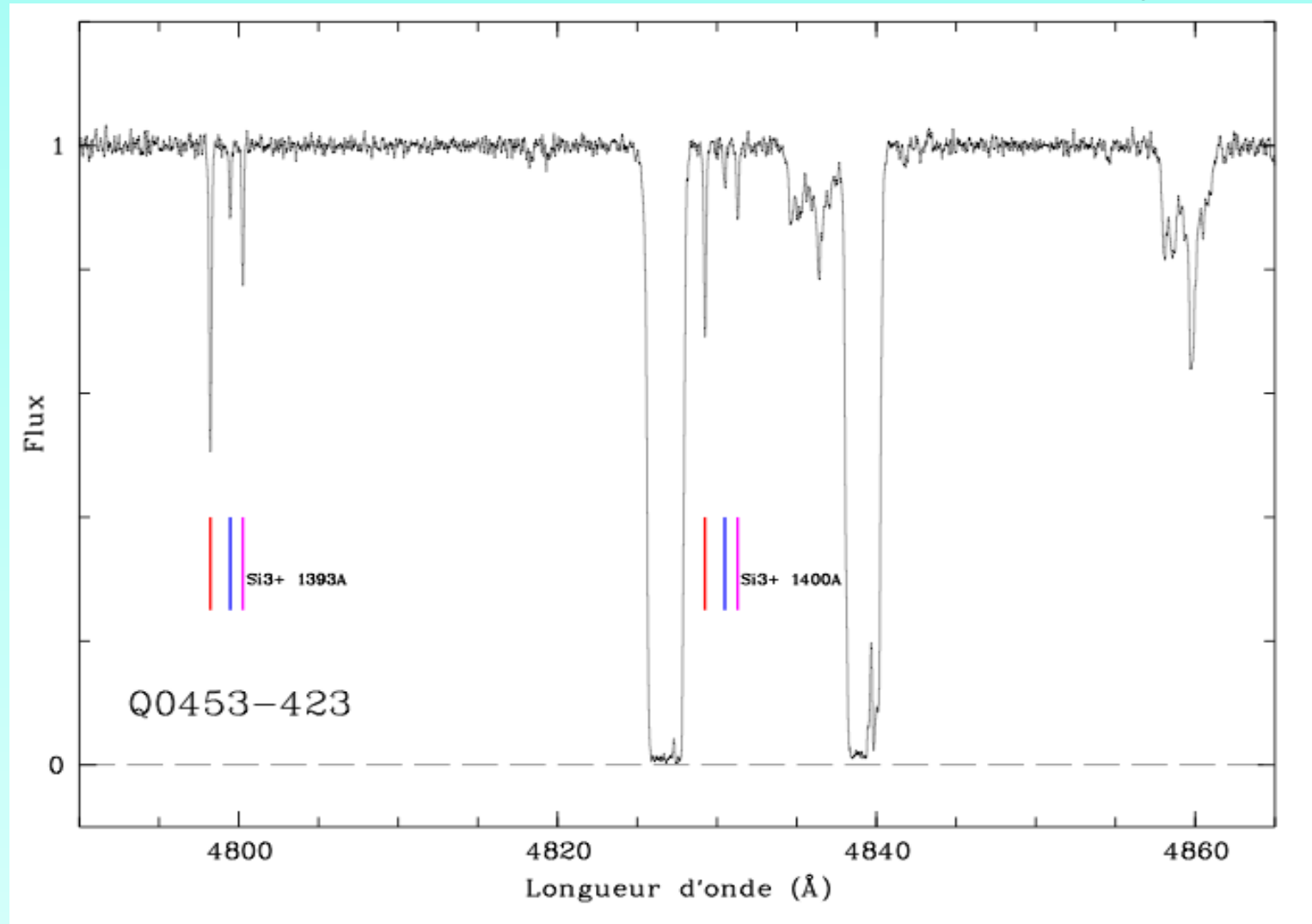
$$\Delta\mu/\mu < 10^{-6}$$



Variation avec le temps des rapports de raies : exemple

Doublets de Si^{3+} à $z_{\text{abs}} \approx 2,45$ vers Q0453-423

Bergeron et al.



Abondance des éléments dans les galaxies lointaines

Raie Lyman α de H
 $z = 2,31$

Etude de :

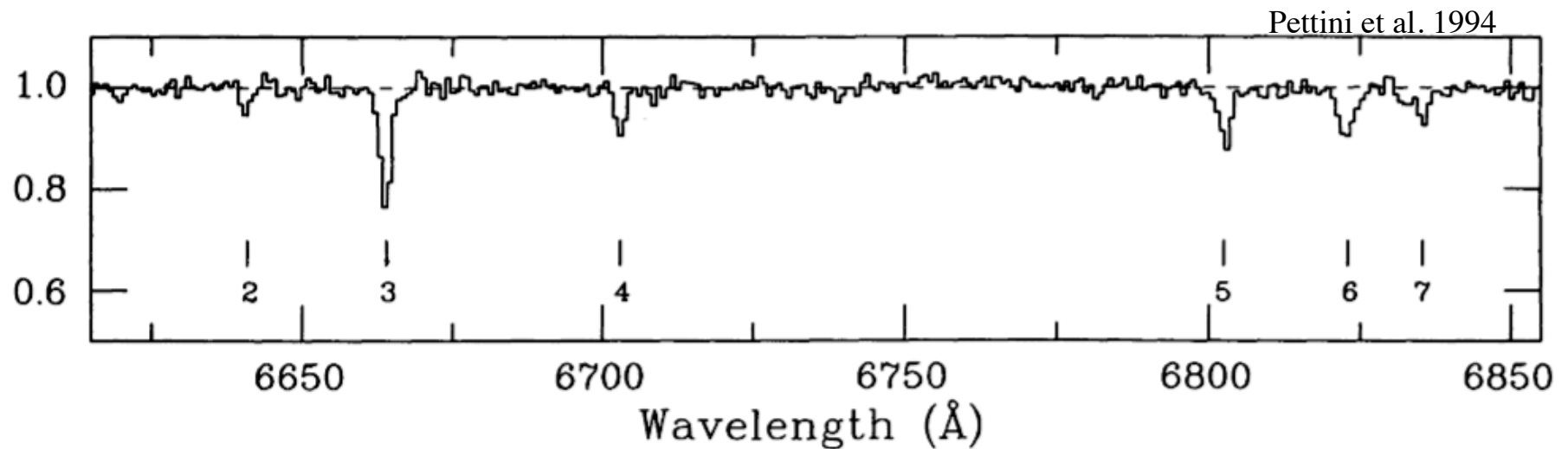
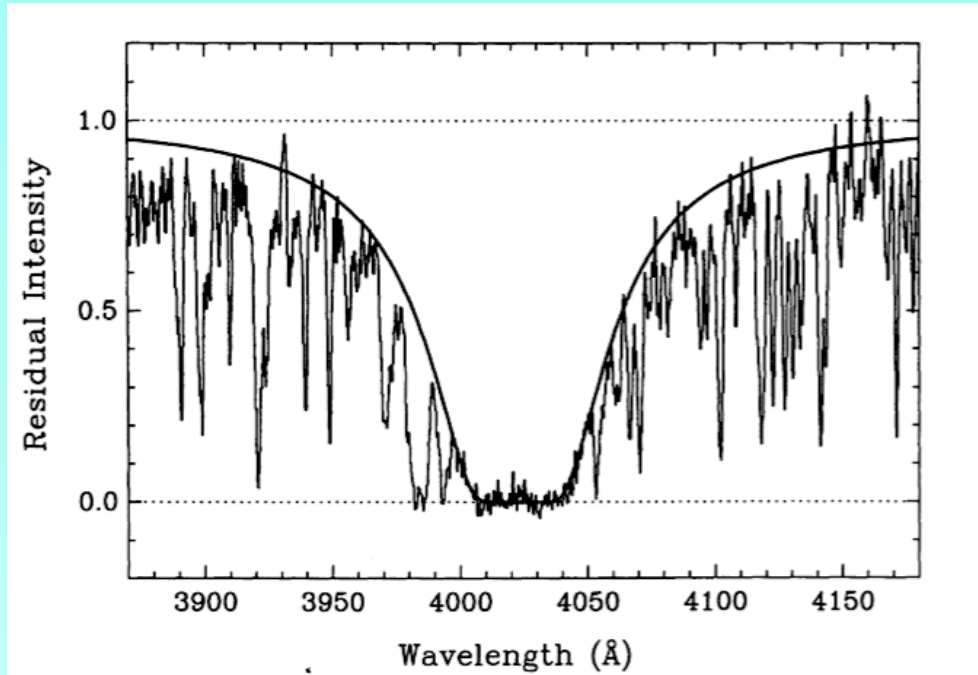
- l'enrichissement en métaux

Fe/H, Zn/H, Cr/H

- la présence de poussières

abondance relative de Cr et Zn

Raies de Fe⁺, Zn⁺, Cr⁺ :



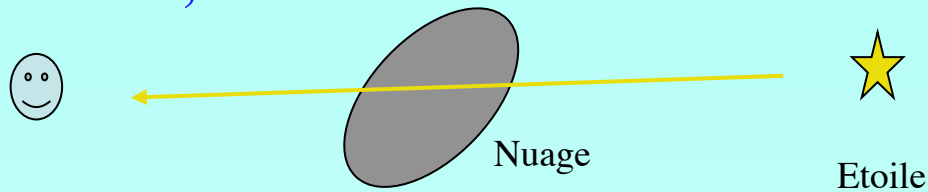
Température du rayonnement cosmologique à $z \approx 0$

Thermomètre = CN, H₂, C₂ ...

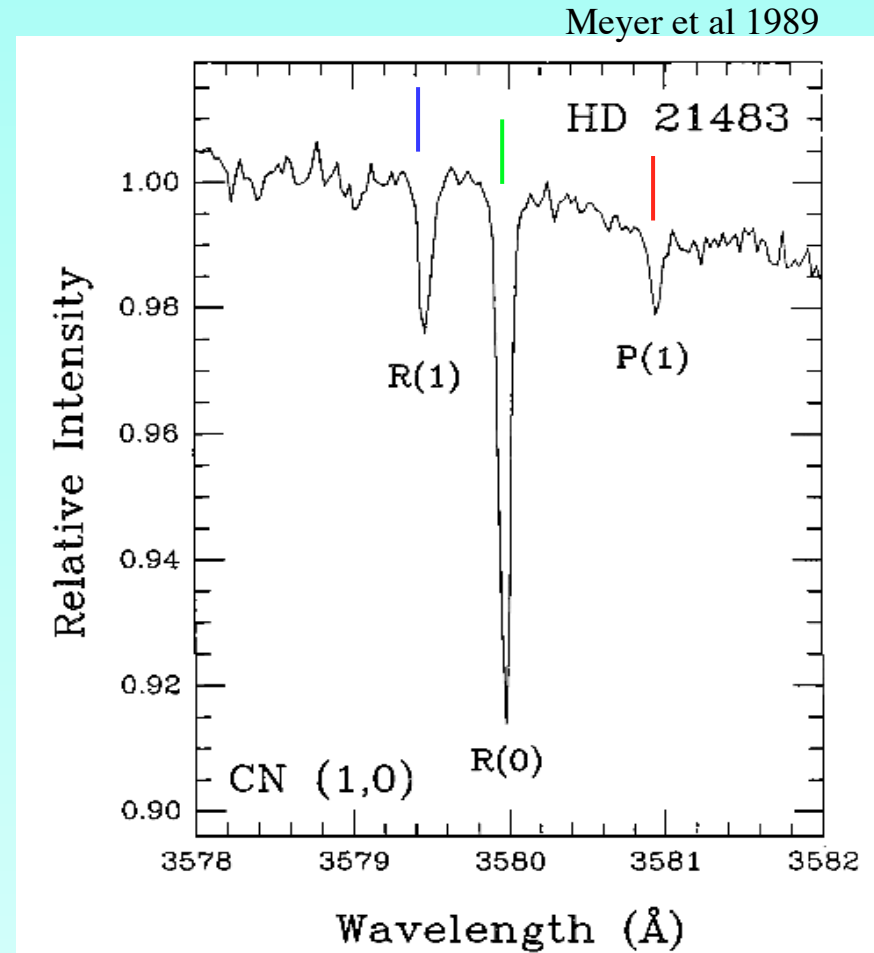
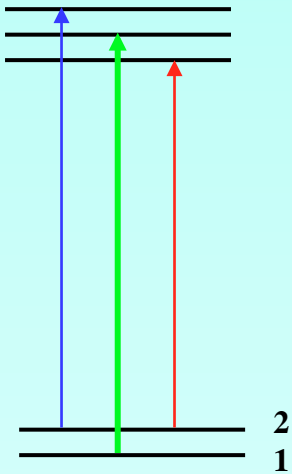
Faible densité: excitation (n_2/n_1)

dominée par l'interaction avec le rayonnement (> collisions)

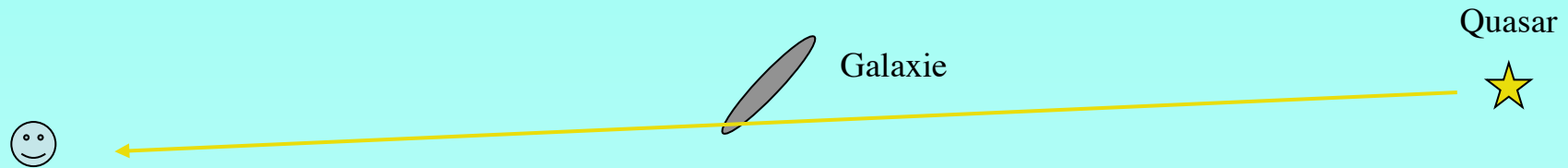
T = 2,73 K



$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT_{\text{ex}}}\right)$$



Température du rayonnement cosmologique à $z > 0$



Thermomètre = molécules CO, atomes: C ...

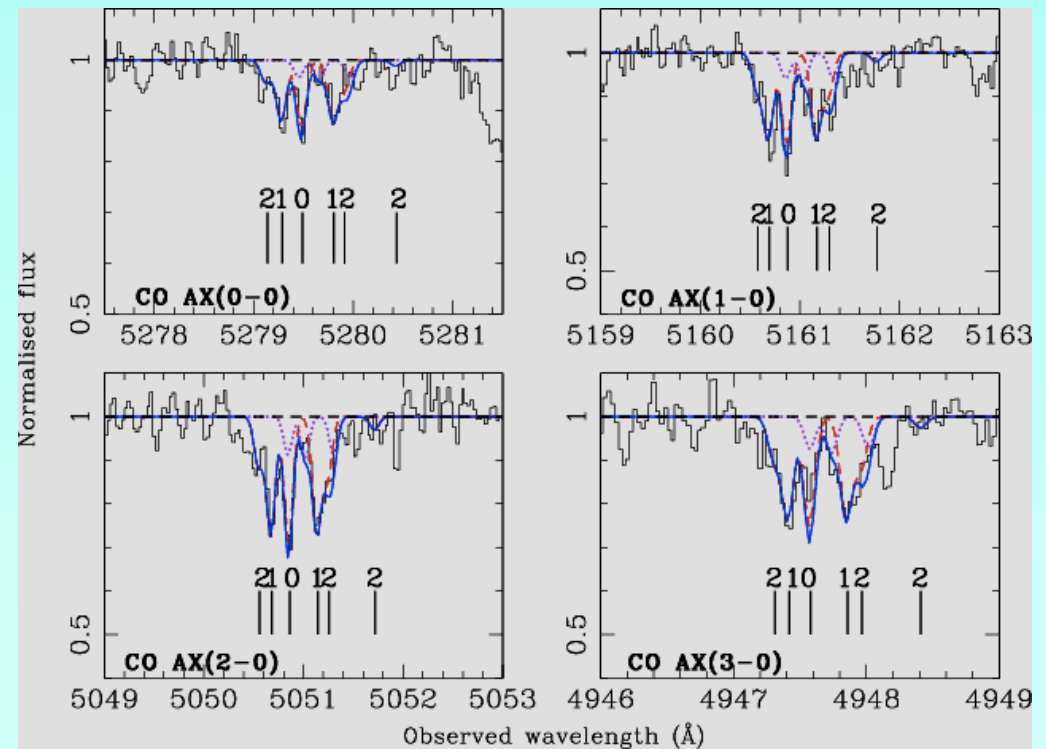
Détection de CO

en absorption à grand z (2.42)

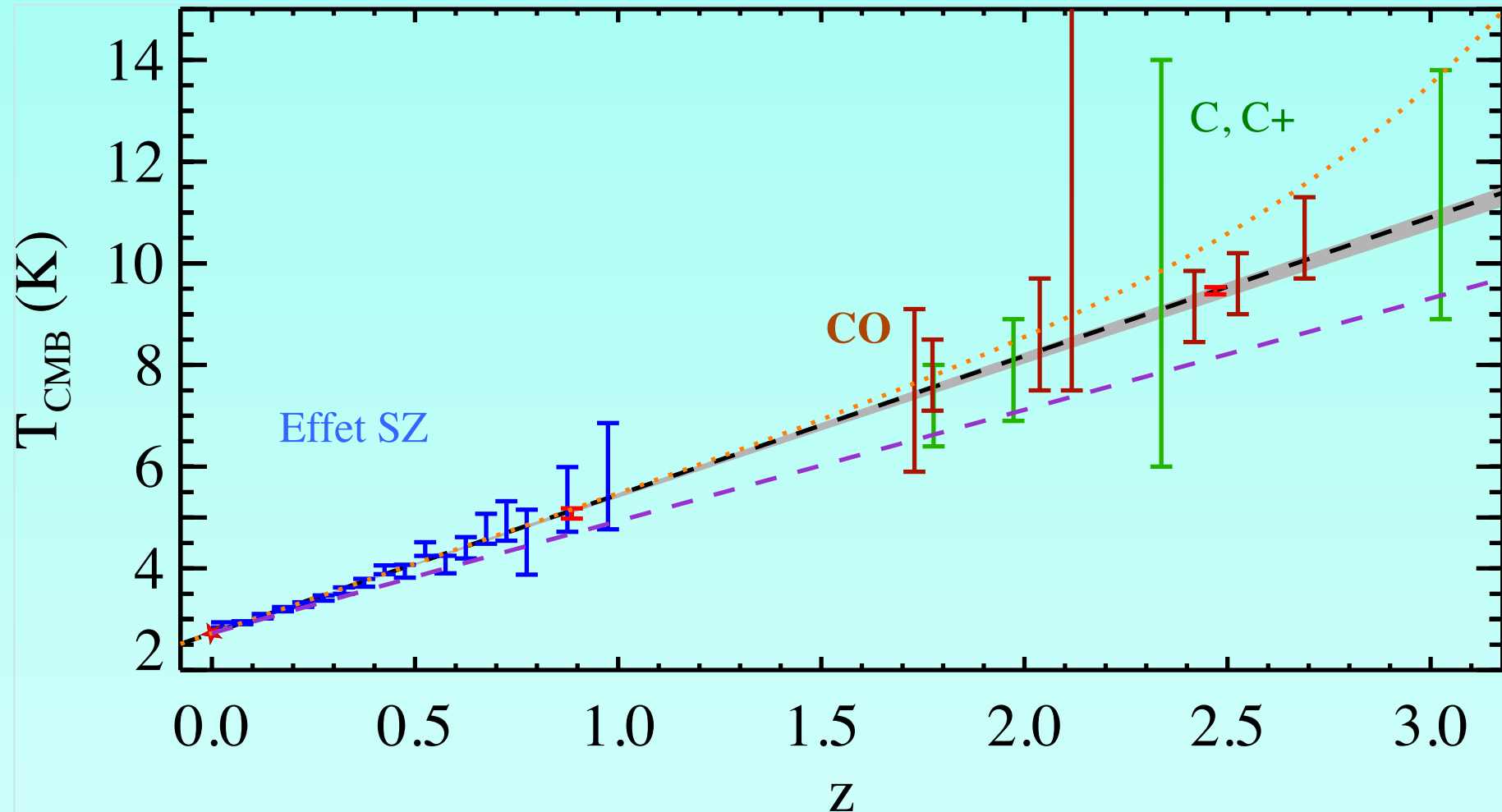
T (rayonnement) = $9,1 \pm 0,7$ K

prédiction $T = 2.73 \cdot (1+z) = 9,31$ K

Srianand et al.

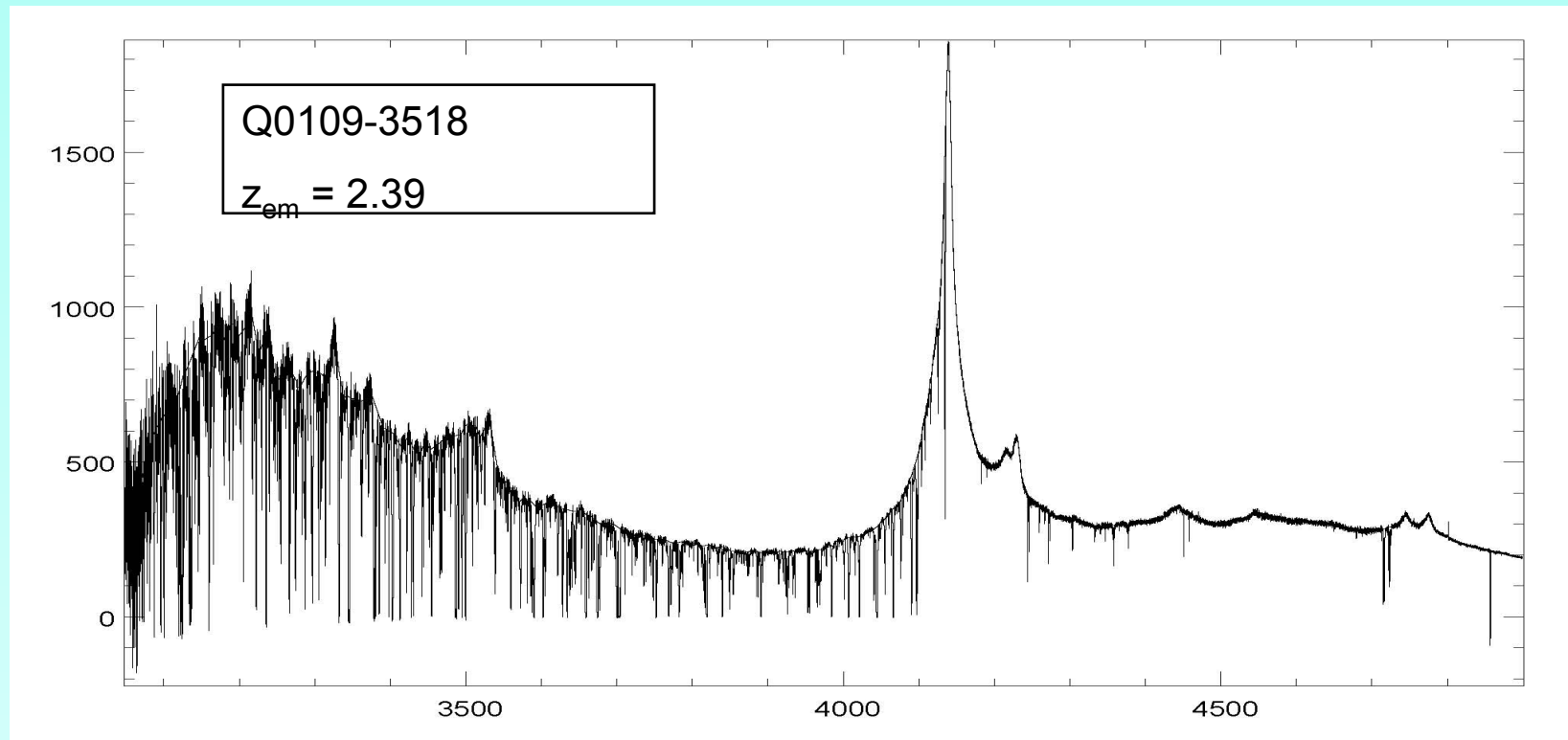
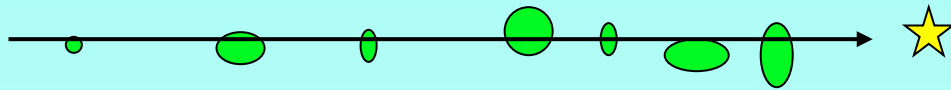


Bilan des contraintes actuelles pour $T(z)$



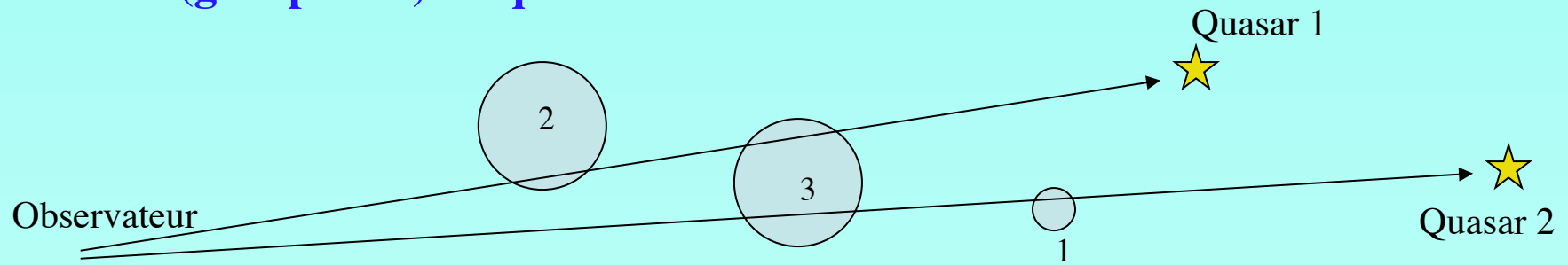
Nuages intergalactiques

Très nombreux ! Masse de gaz contenue ? \rightarrow dimensions ?



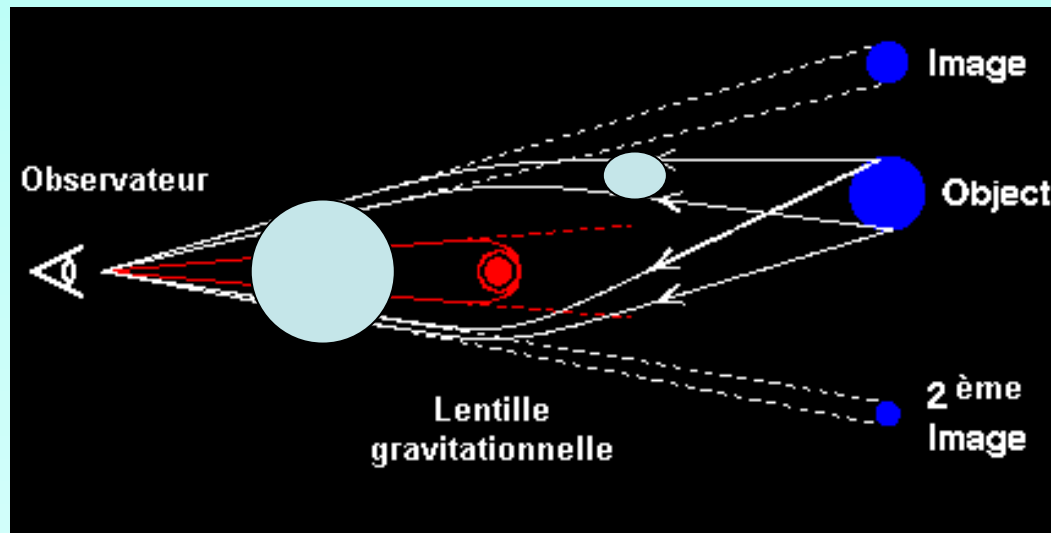
Taille, forme et structure des nuages intergalactiques

- Paires (groupes ...) de quasars



Taille supérieure à 10 fois la taille des galaxies

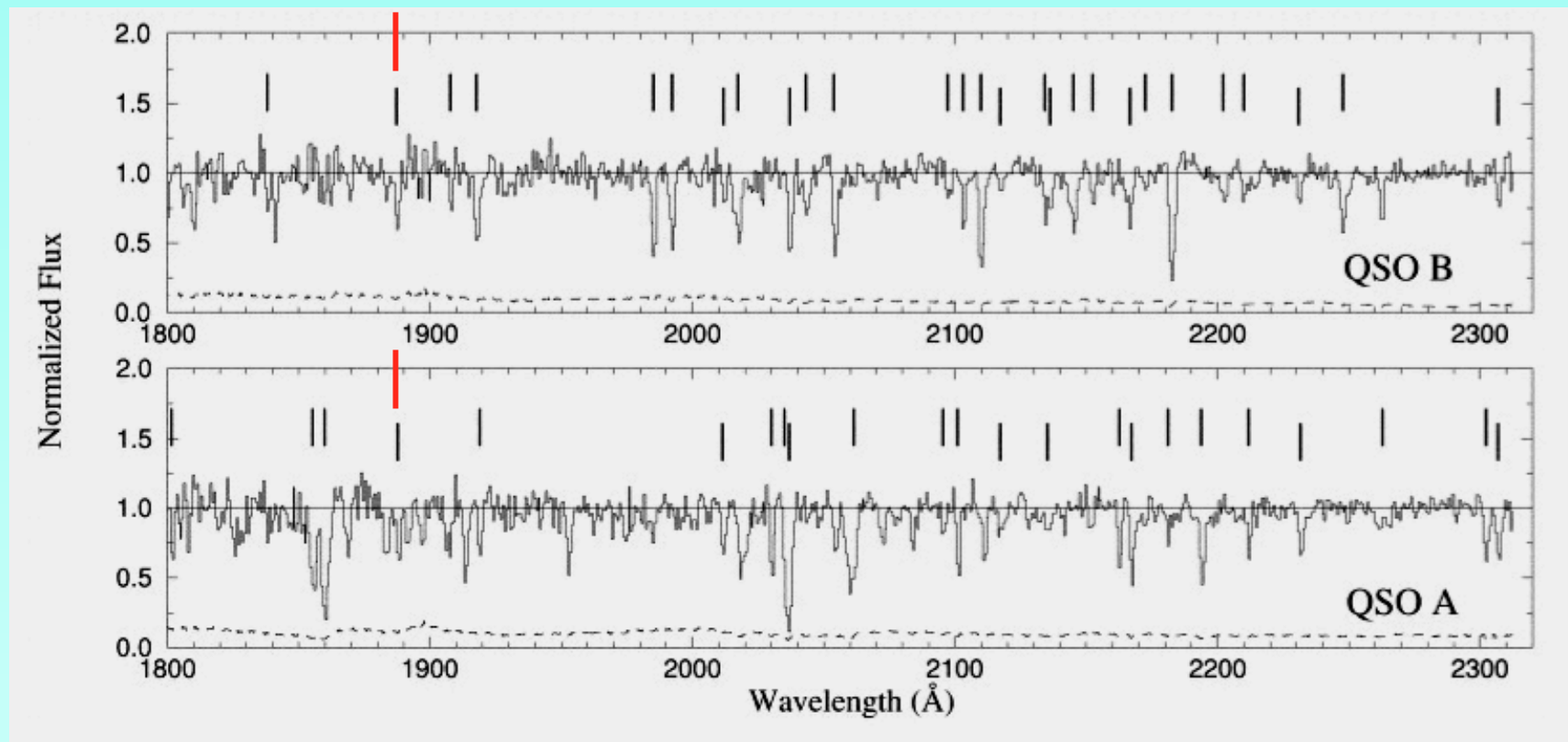
- Mirages gravitationnels



Quasar jumeau



Observations de paires de quasars



Statistiques sur les « coïncidences » et « anticoincidences »

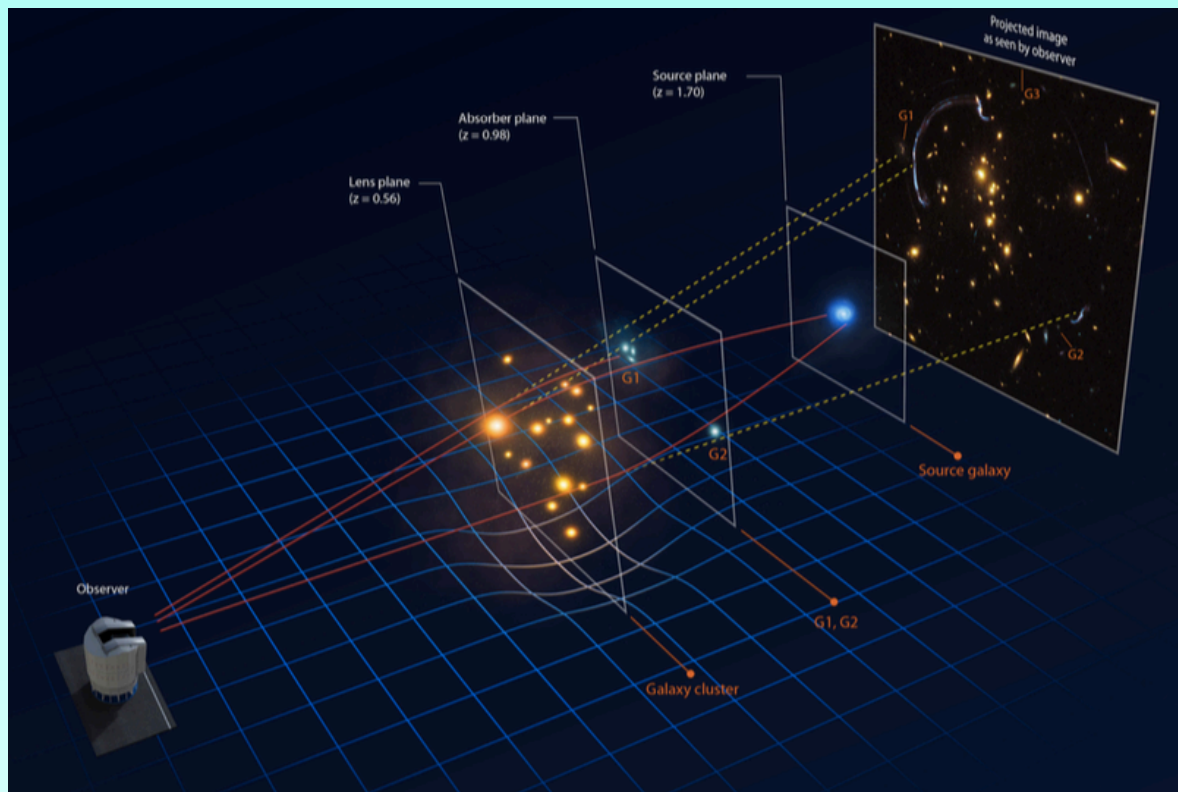
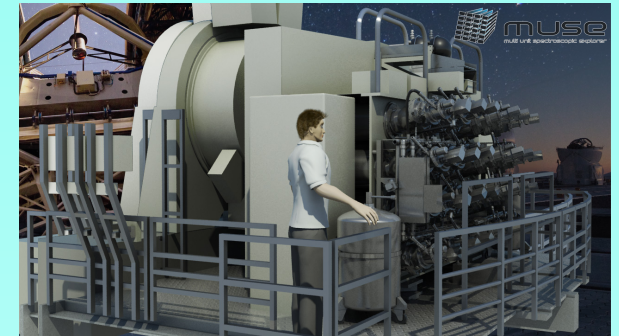
--> contraintes sur la taille et la forme des nuages à divers z

Difficulté: trouver des paires assez brillantes avec une séparation adéquate

Spectroscopie intégrale de champ

Spectroscopie d'un ou deux quasars : information limitée !

→ étude d'un arc gravitationnel avec MUSE (Lopez et al 2018)

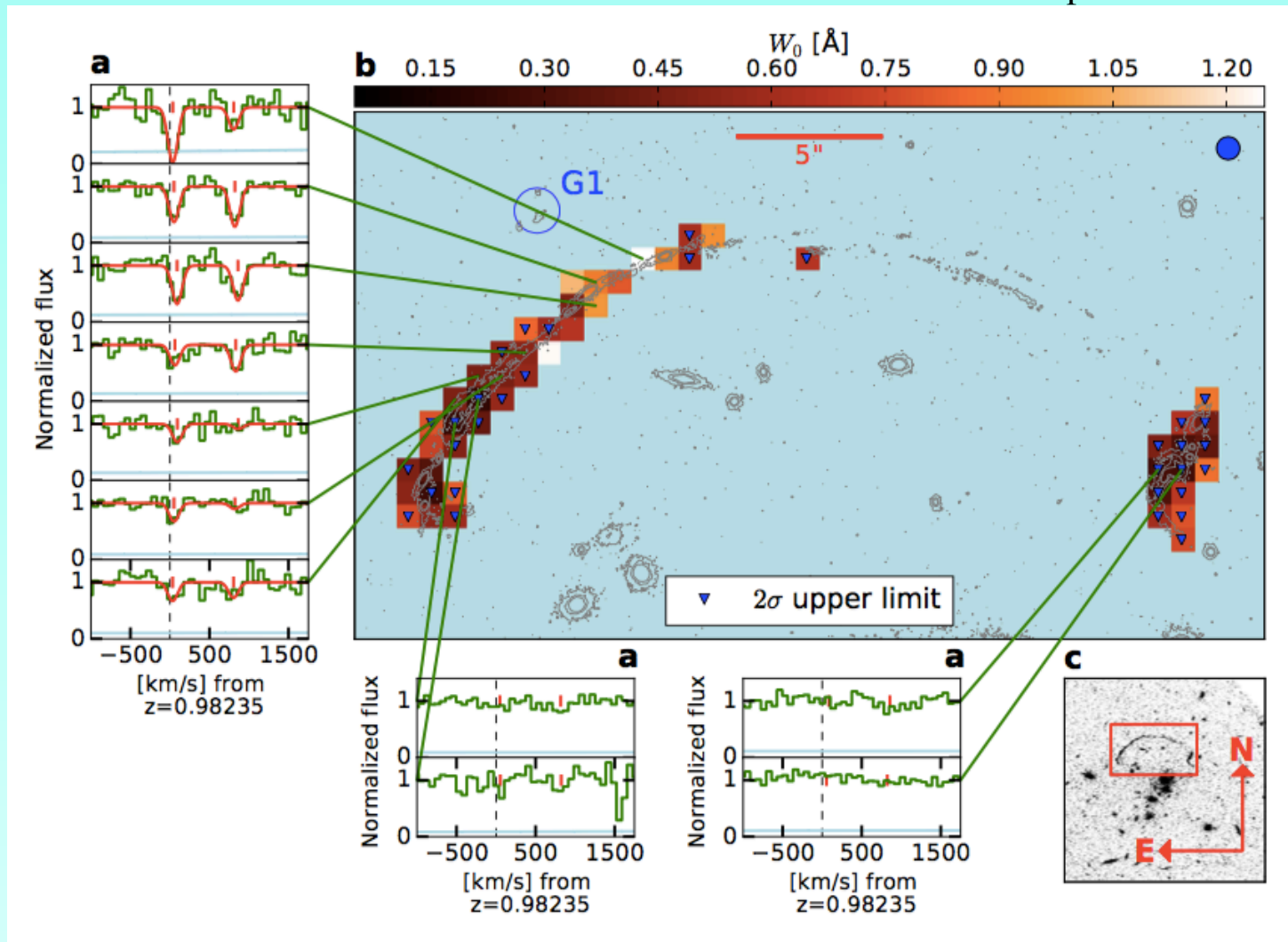


Etude très détaillée
d'une galaxie à $z = 0,98$
- répartition spatiale
- mouvements
- structure fragmentée

Spectroscopie intégrale de champ

Etude spectroscopique d'un arc gravitationnel

Lopez et al 2018



Données atomiques et univers lointain

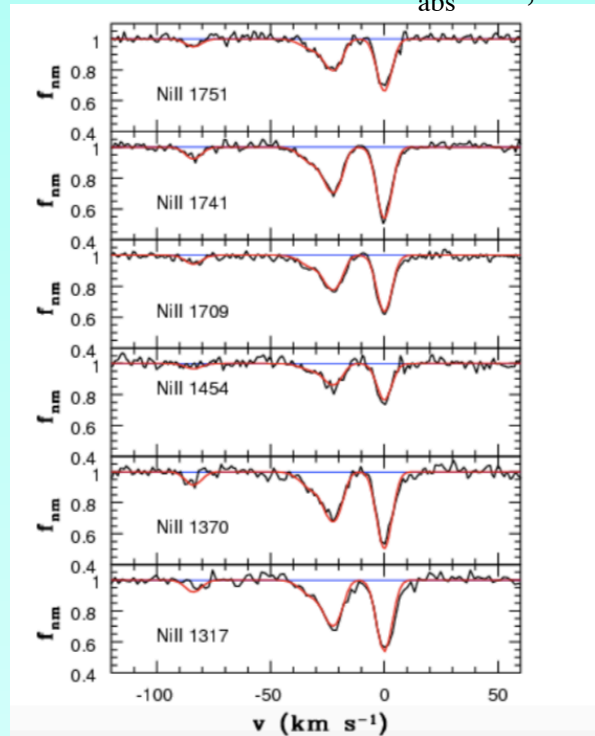
Etude des raies UV du nickel (Ni⁺)

Nombreuses raies UV encore mal connues au laboratoire

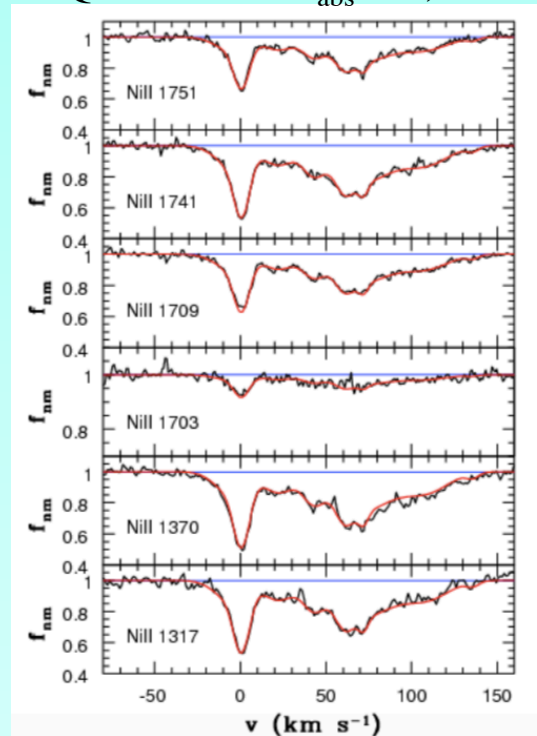
(probabilité d'absorption ou « force d'oscillateur » f ; $\rightarrow N(\text{Ni}^+)$)

Stratégie : mesurer la force relative des absorptions par du gaz lointain

HE 0027-1836 $z_{\text{abs}} = 2,40$



Q 2206-1958 $z_{\text{abs}} = 1,92$



- Précision améliorée pour 10 raies
- Première estimation pour 3 raies

Perspectives

Mise en service récente d'ESPRESSO

- résolution spectrale $R=140\ 000$
- grande stabilité

Etude d'objets plus lointains

→ visible et IR

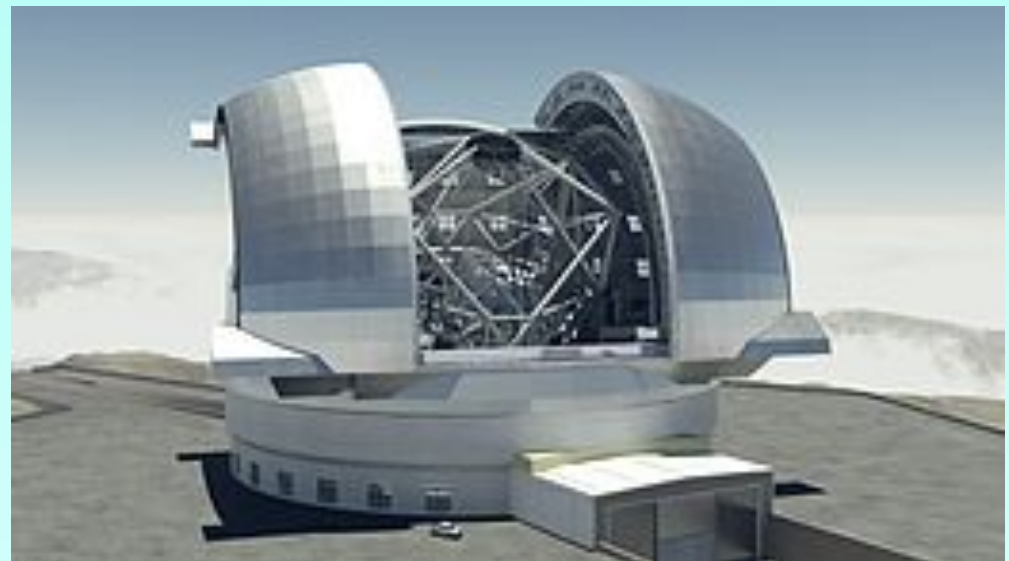
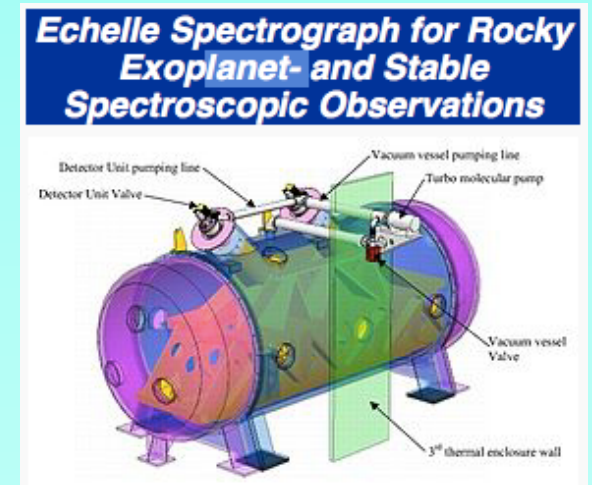
Etude détaillée de sources très faibles

→ Optique adaptative

→ Spectro Intégrale de champ

Projet ELT

mise en service prévue en 2024



Merci

pour votre attention !