

Nature de l'Univers et spectroscopie

Patrick Boissé

Sorbonne Université

Institut d'Astrophysique de Paris



Plan :

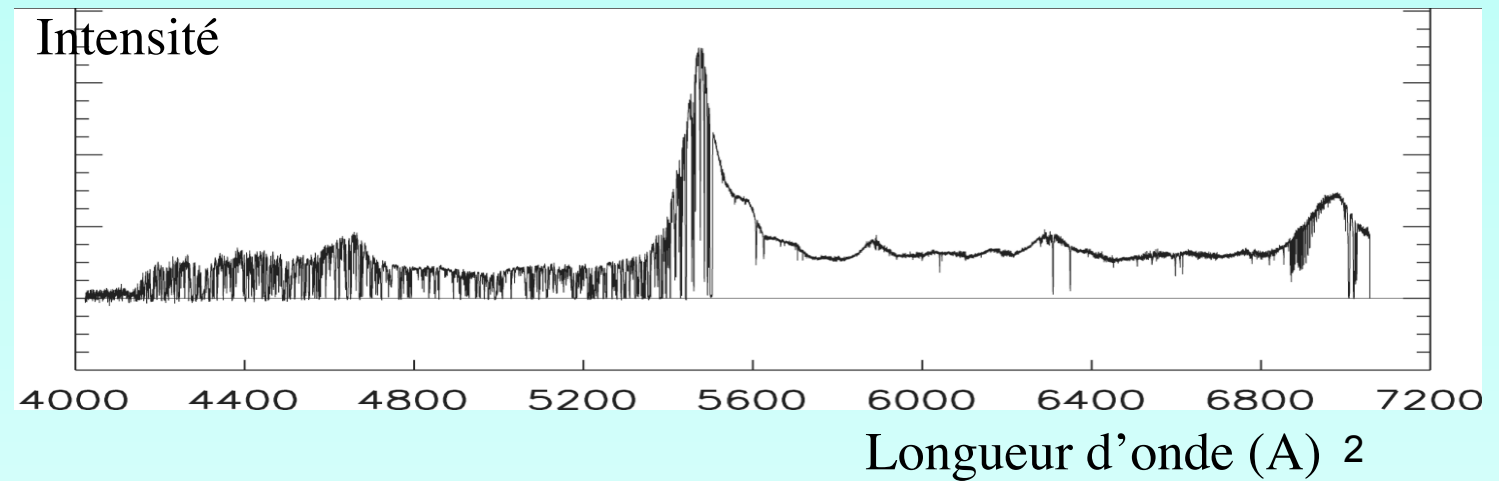
- Généralités sur la lumière et la spectroscopie
- Information portée par les raies d'émission et d'absorption
- Identification des raies, uniformité des lois et constantes
- Mesure de la vitesse des astres
- Abondances dans le gaz, taille et structure des nuages
- Perspectives

Images / spectres

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



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

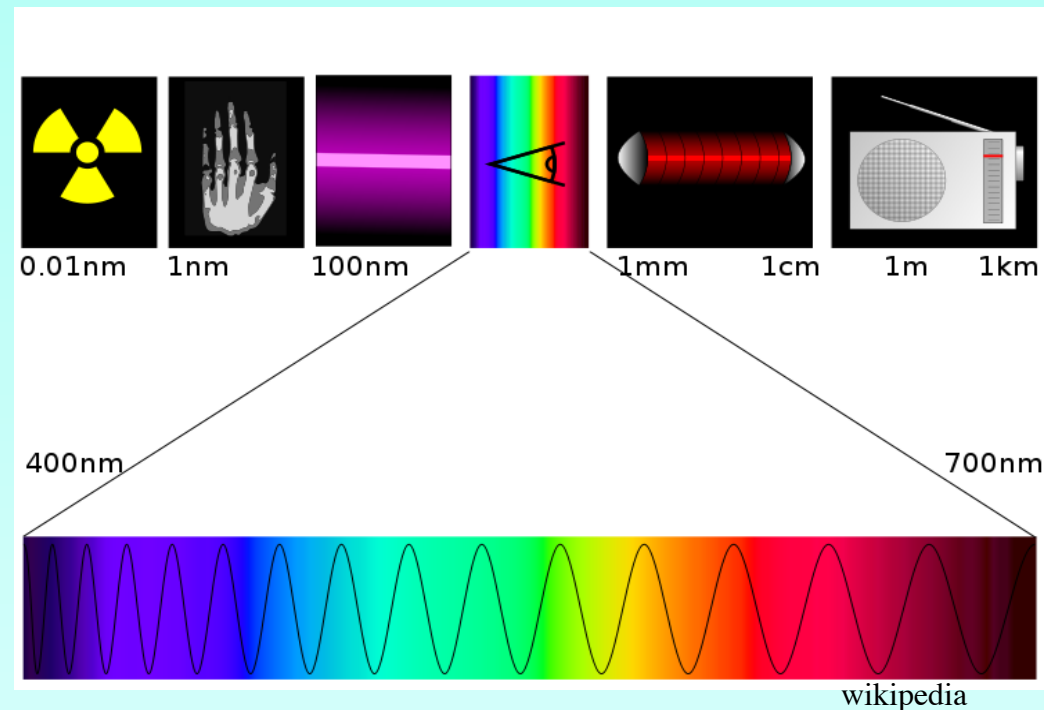
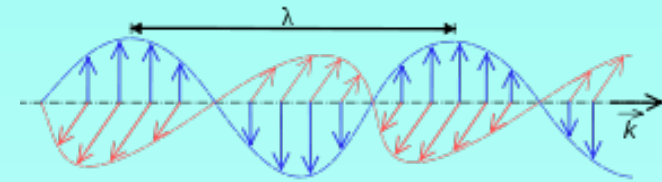


Spectre électromagnétique et astronomie multi-longueurs d'ondes

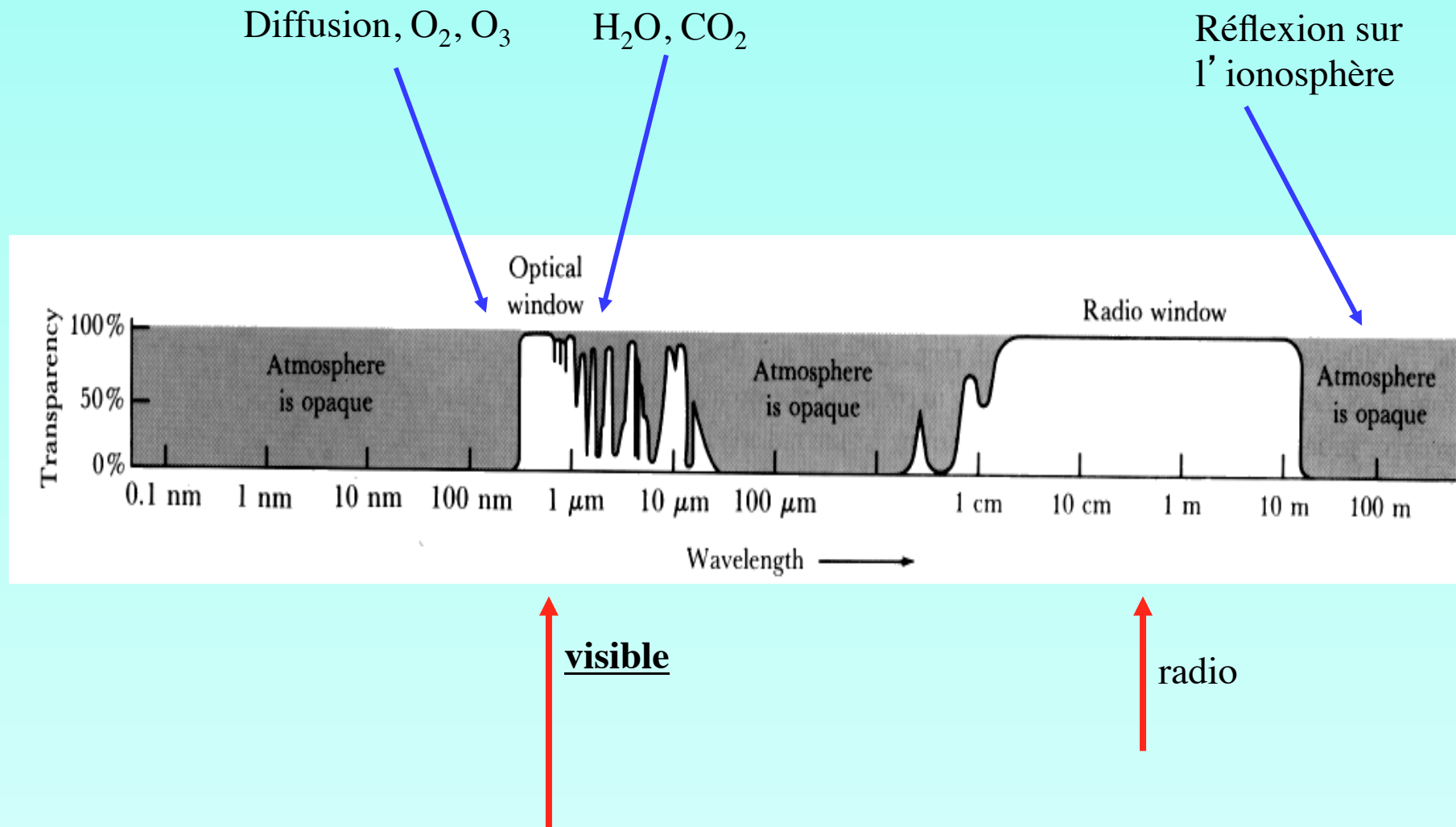
Dualité onde électromagnétique -particule :

Le rayonnement est à la fois :

- **une onde** (période, fréquence, longueur d'onde : $\lambda = c T$)
- **des particules, les « photons »** ($E = h \nu$)

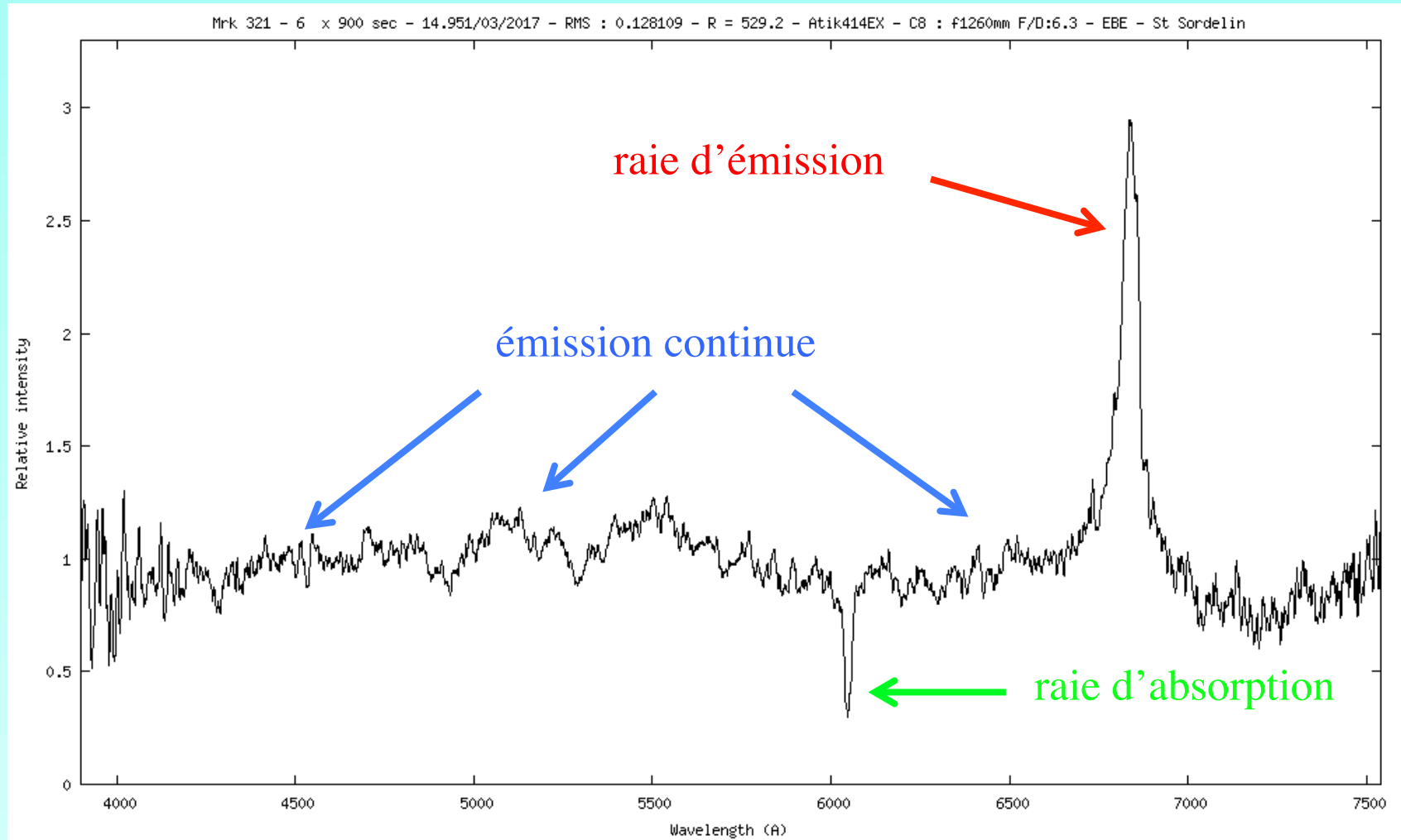


La transparence atmosphérique



Spectre d'une source : « continu » et raies

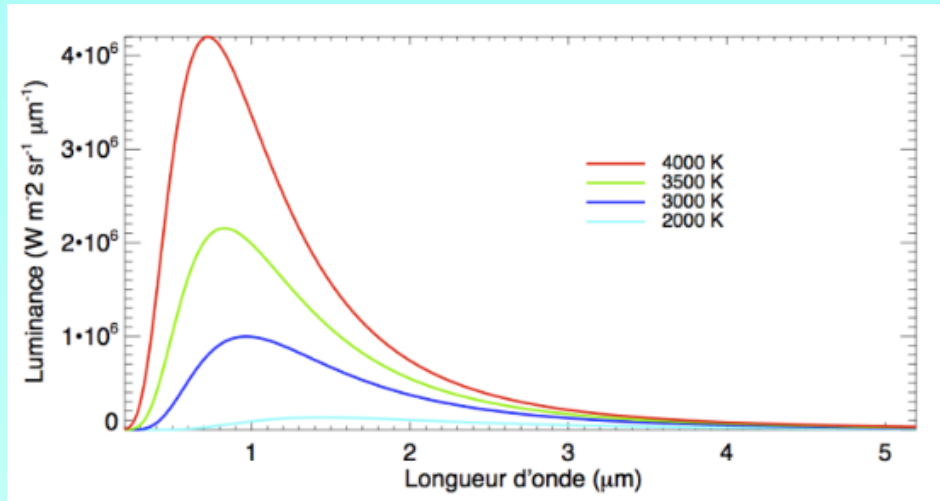
Spectre de quasar



Partie « continue » du spectre

Forme générale du « continu » → mécanisme d'émission

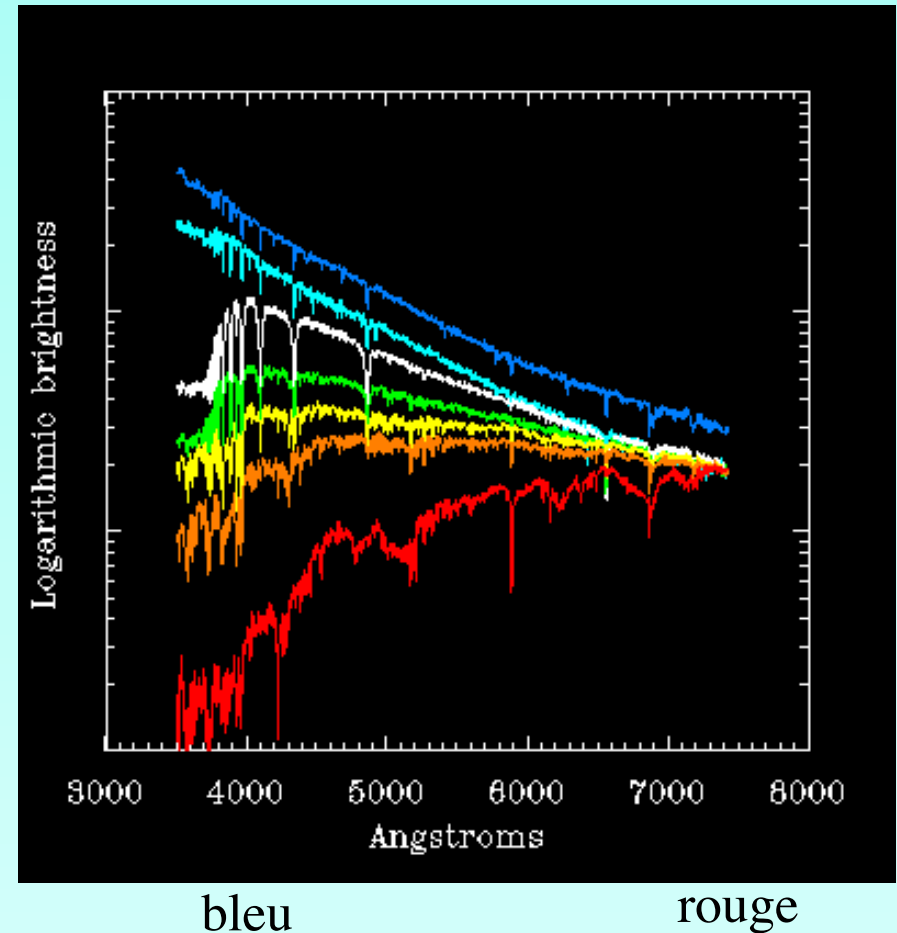
- Spectre « thermique » (corps chauds : loi de Planck)



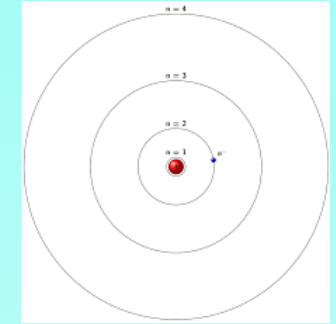
- Spectre « non thermique »

Étoiles

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



Raies et niveaux d'énergie d'une atome (ion ...)



Niveaux d'énergie « quantifiés » ($\rightarrow$ mécanique « quantique »)

« Carte d'identité » de l'atome ...

Niveaux d'énergie $\rightarrow$ transitions

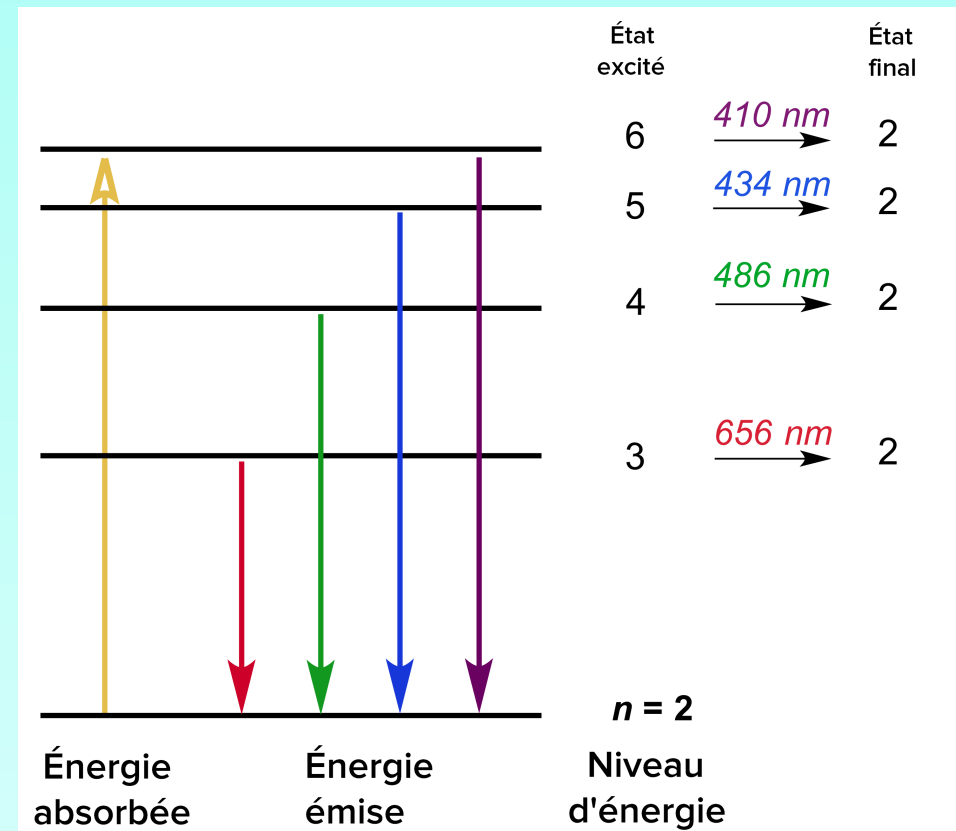
Niveau 2 $\rightarrow$ 6 : absorption d'un photon d'énergie donnée

Niveau 5 $\rightarrow$ 2 : émission d'un photon

$\rightarrow$ Dans le spectre : lumière

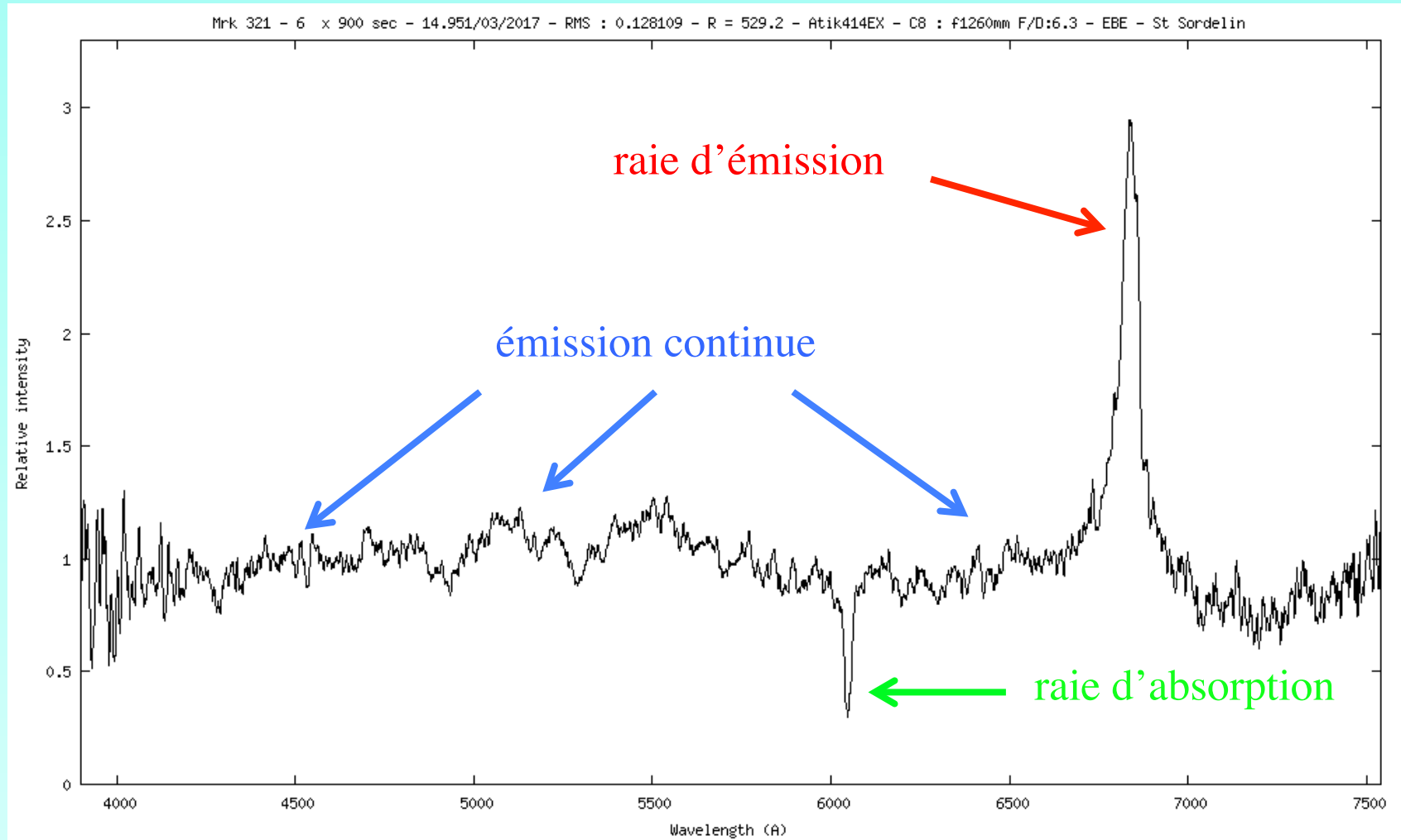
- en moins (absorption) ou
- en plus (émission)

aux longueurs d'ondes associées



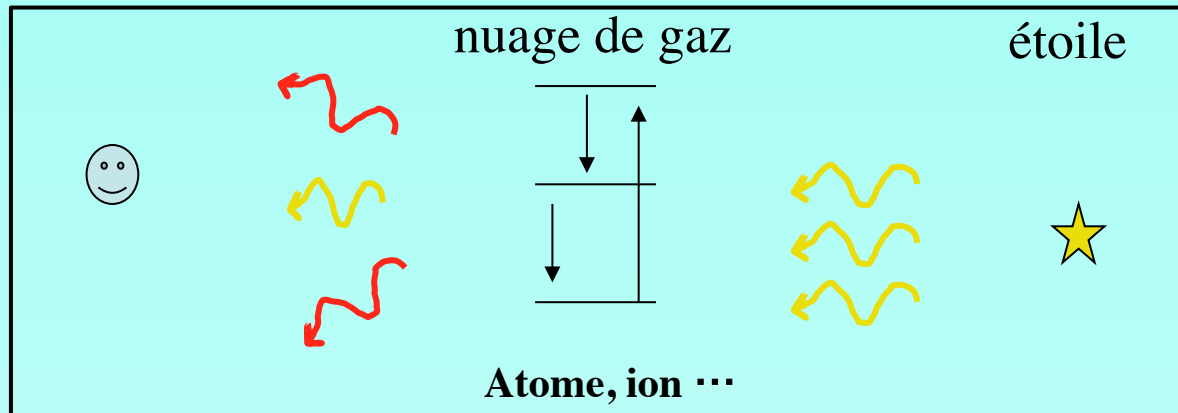
Spectre d'une source : « continu » et raies

Spectre de quasar

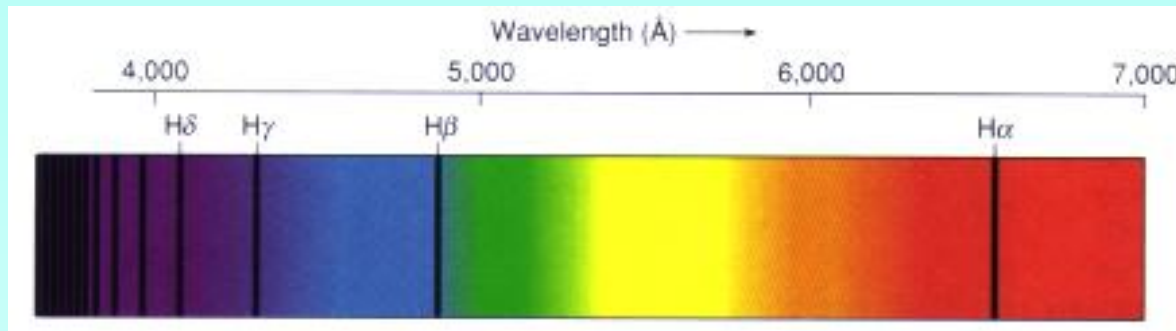


Raies d'absorption

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



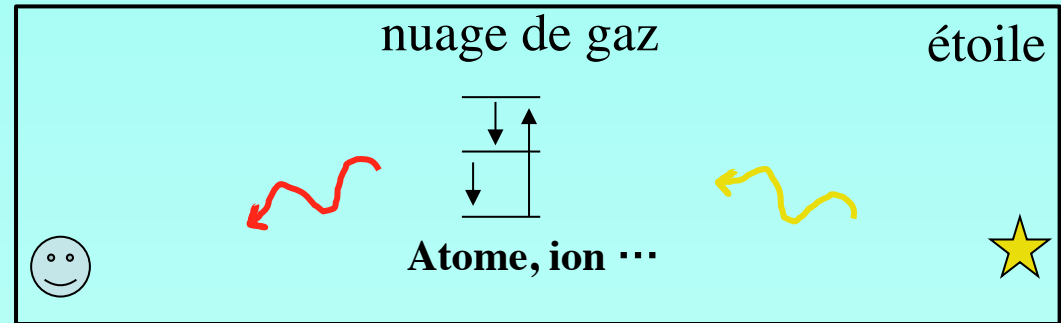
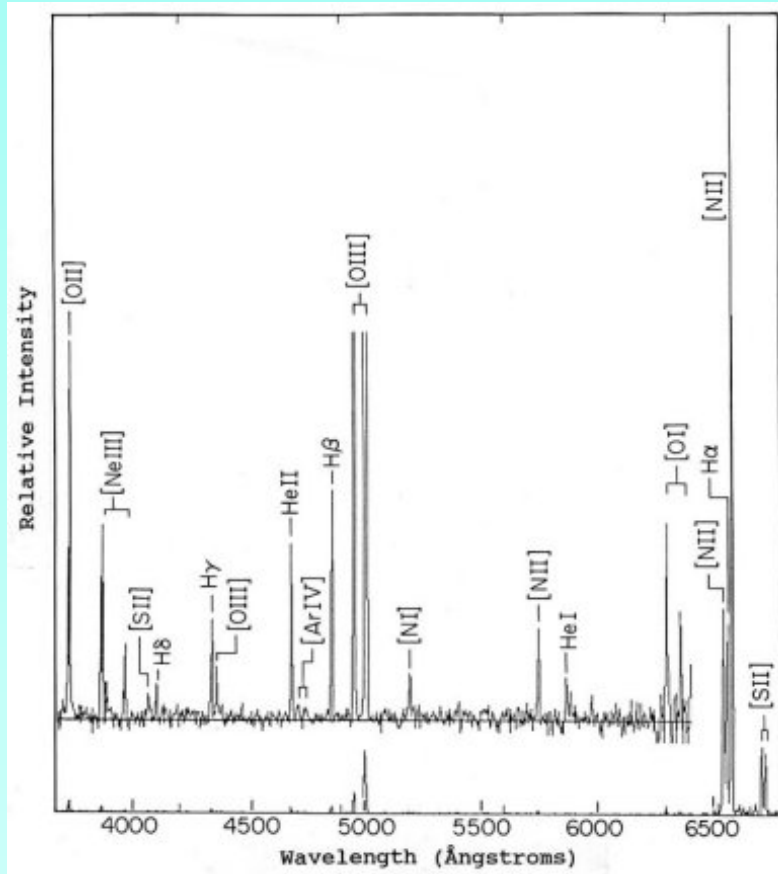
Raies de
l'hydrogène
≈ « code barre »



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

Raies d'émission

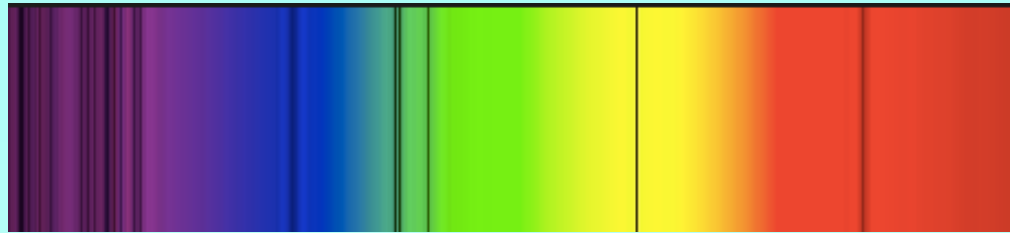
... d'atomes, d'ions ou de molécules « excités »



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

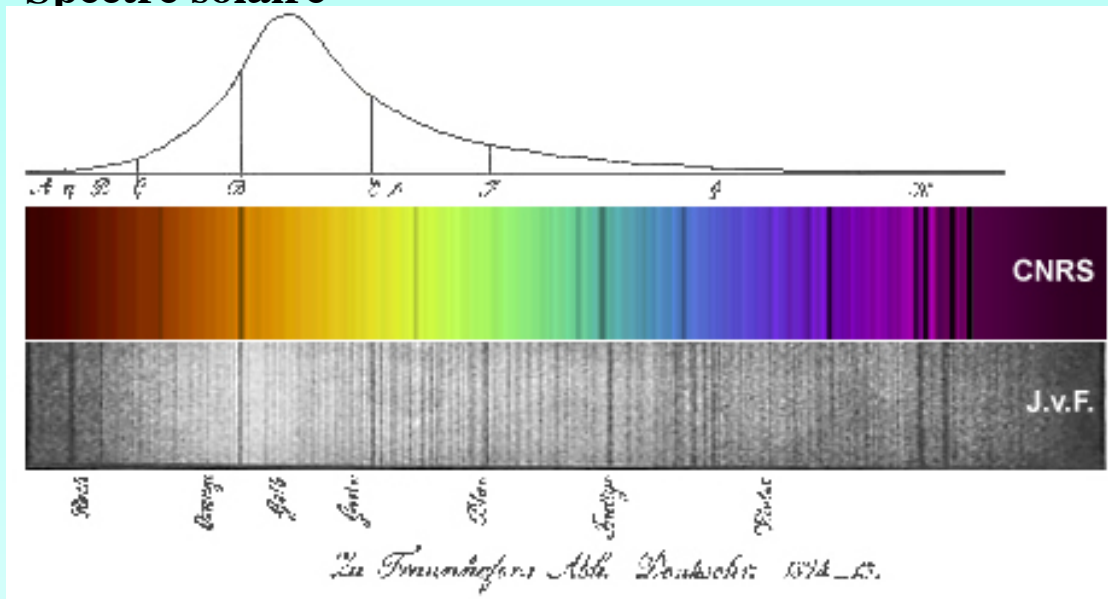
Position des raies dans le spectre et composition du gaz / 1

- Pour des étoiles ou nuages de notre propre Galaxie (vitesses faibles) :
ensemble de raies détectées → éléments présents dans la matière (C, Si, ...)



Bunsen et Kirchhoff, vers 1850 : identifient les raies du spectre solaire
→ la matière du soleil (et étoiles proches) est de même nature que celle sur terre !

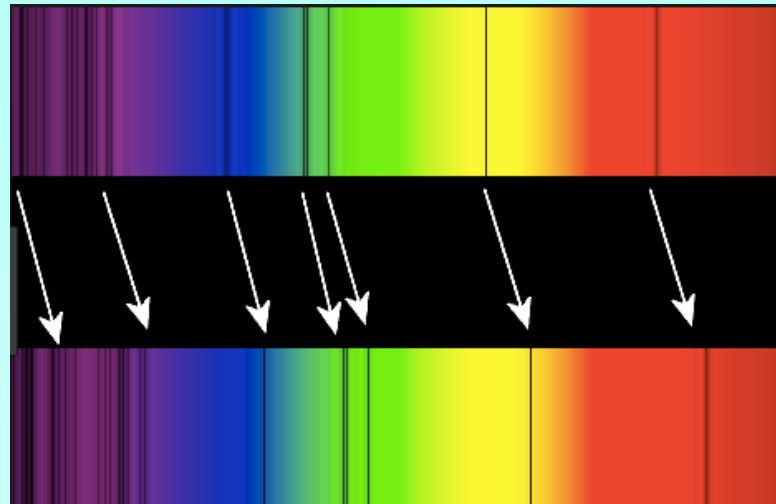
Spectre solaire



Auguste Comte en 1835:
« Nous ne saurons
jamais étudier par
aucun moyen la
composition chimique
des étoiles » ...

Position des raies dans le spectre et composition du gaz / 2

- Pour des objets lointains (galaxies, quasars ...) : expansion de l'Univers
mouvement rapide d'éloignement → décalage vers le rouge ou « redshift »
idem pour objets proches en mouvement (« hypervelocity stars » $\approx 1000\text{km/s}$)
- Effet Doppler-Fizeau :
 - décalage Doppler-Fizeau, faible V_e : $\lambda_{\text{obs}} = (1 + V_e/c) \lambda_0$
 - grand décalage : $\lambda_{\text{obs}} = (1 + z) \lambda_0$



- Les motifs de raies sont déplacés, mais on peut toujours les reconnaître et identifier les éléments car pour deux raies 1 et 2 : $\lambda_{\text{obs},2} / \lambda_{\text{obs},1} = \lambda_{0,2} / \lambda_{0,1}$

Spectroscopie et étude des mouvements dans l'Univers

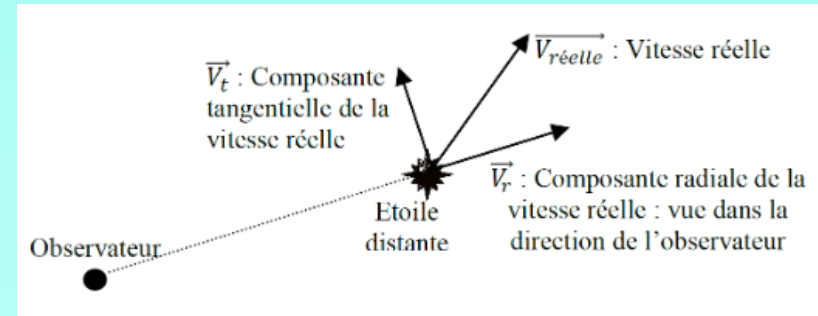
- Position des raies dans le spectre →

- Identification des éléments
- Vitesse **radiale** de l'astre source, nuage absorbant ...

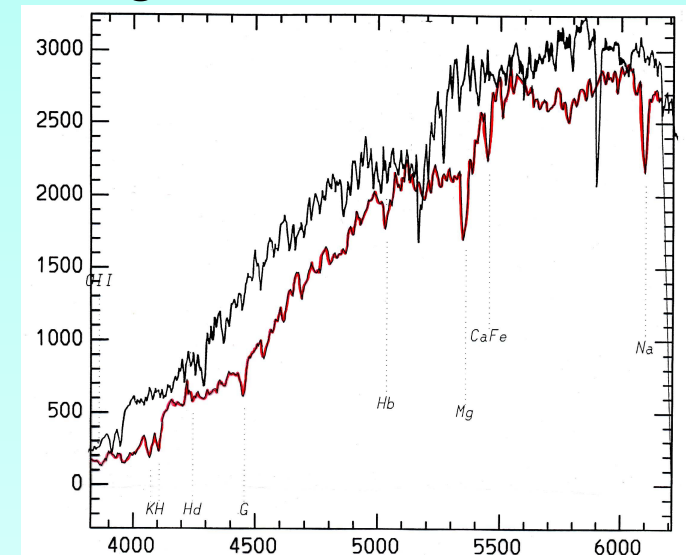
- Multiples applications

- Vitesse des étoiles et nuages proches (< 100 km/s)
- Étoiles « hypervitesse » : jusqu'à 1000 km/s
- Détection des exoplanètes (qq m/s)
- Vitesse des galaxies proches
expansion de l'Univers et loi de Hubble (1929)
- Jets de gaz émis par les noyaux actifs de galaxies
Vitesses relativistes ($v \approx c$)

Vitesse radiale



V(galaxie/M31) = 10600 km/s



Autres informations portées par les raies

- largeur

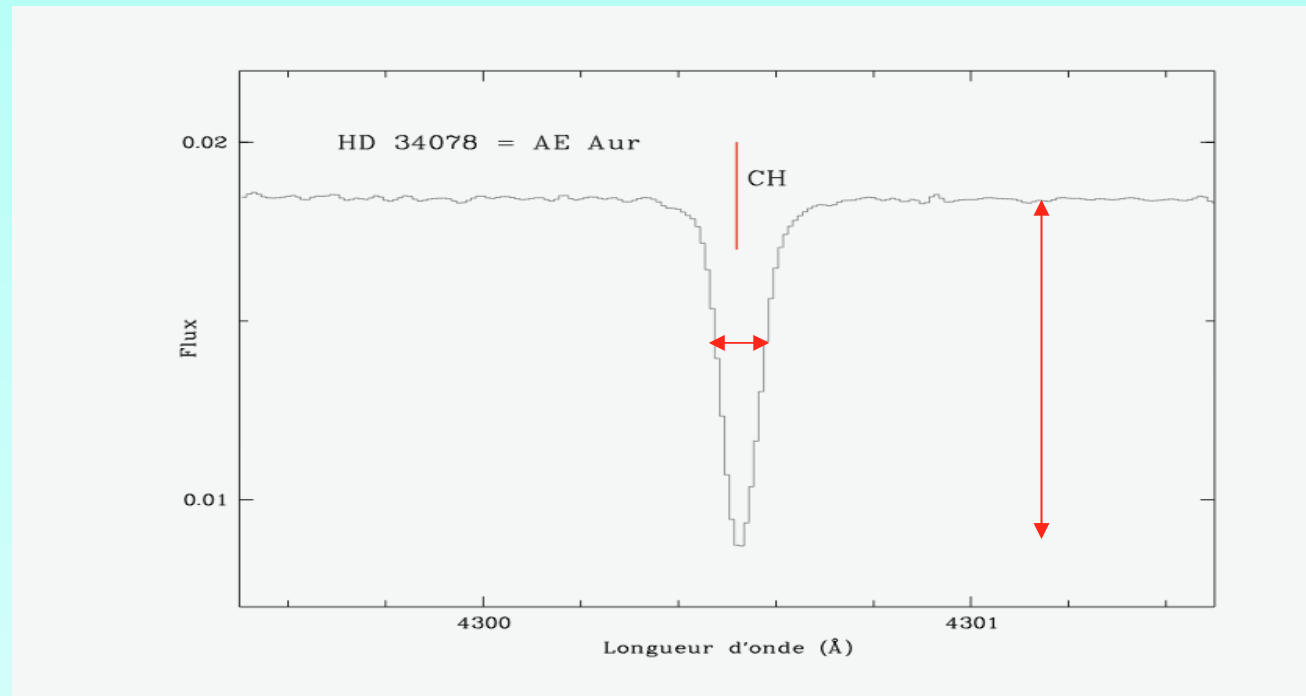
- agitation dans le gaz (micro/macro)
- rotation (étoiles, galaxies)

- Intensité ou profondeur

mesure précise de la quantité de l'élément

→ $N(\text{CH})$ (si raie non « saturée »)

Etude de la « composition » (Fe/H, C/H etc)



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.)



18 mai 2019



Univers et Spectroscopie

15

Utilisation des raies dans un 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 dans l'espace et le temps des lois de la physique

- Identification possible des raies décalées

==> **mêmes atomes partout dans l'univers et à toute époque !**

--> **les lois et constantes de la physique n'ont pas (ou très peu ...) changé sur plusieurs milliards d'années.**

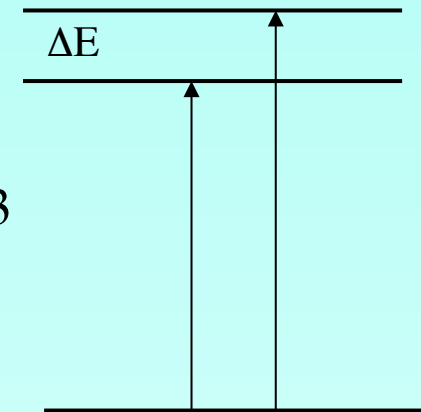
- Tests très précis possibles sur :

- **variation de $\alpha = e^2/hc$?** → multiplets de Si^{3+} , Fe^+ , Mg^+

variation relative $\Delta\alpha/\alpha \leq \approx 1/1000\ 000$ entre $z \approx 0$ et $z \approx 3$

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

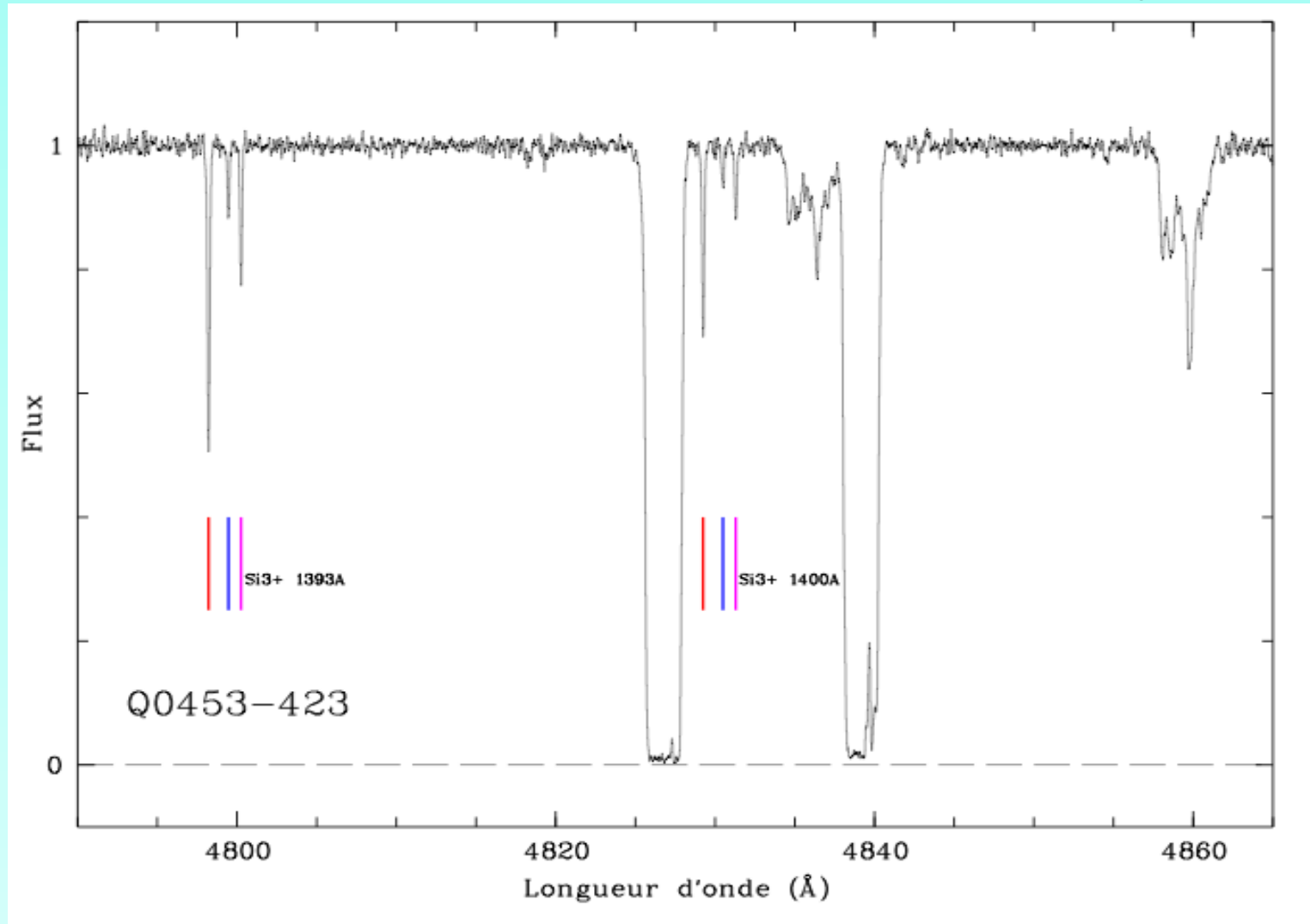
idem, variation relative $\Delta\mu/\mu < 1/1000\ 000$



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.



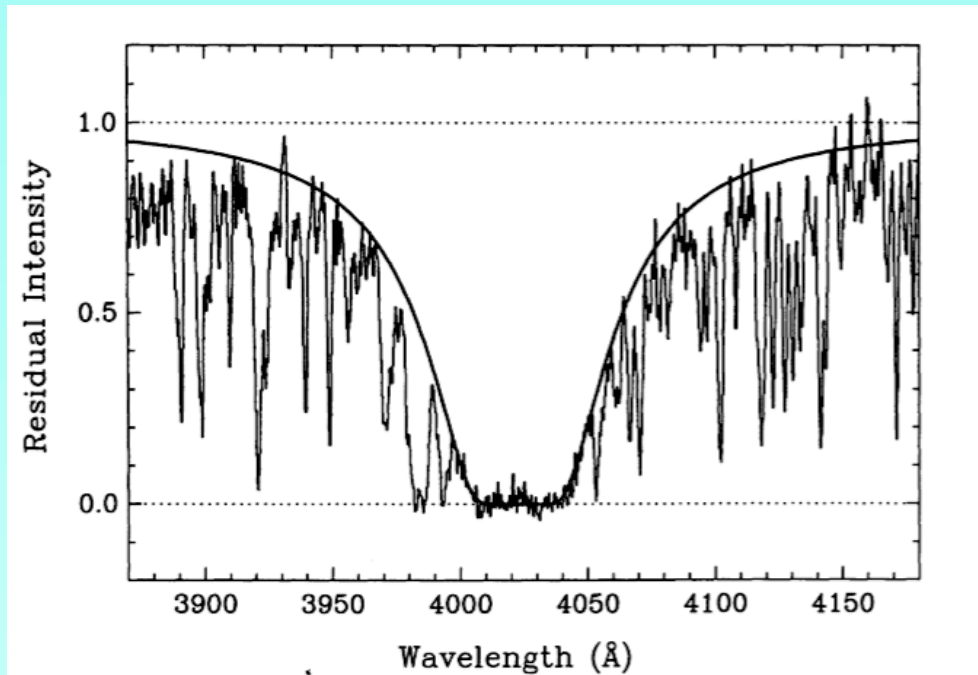
Abondance relative des éléments dans les galaxies lointaines

Raie Lyman α de H $z = 2,31$

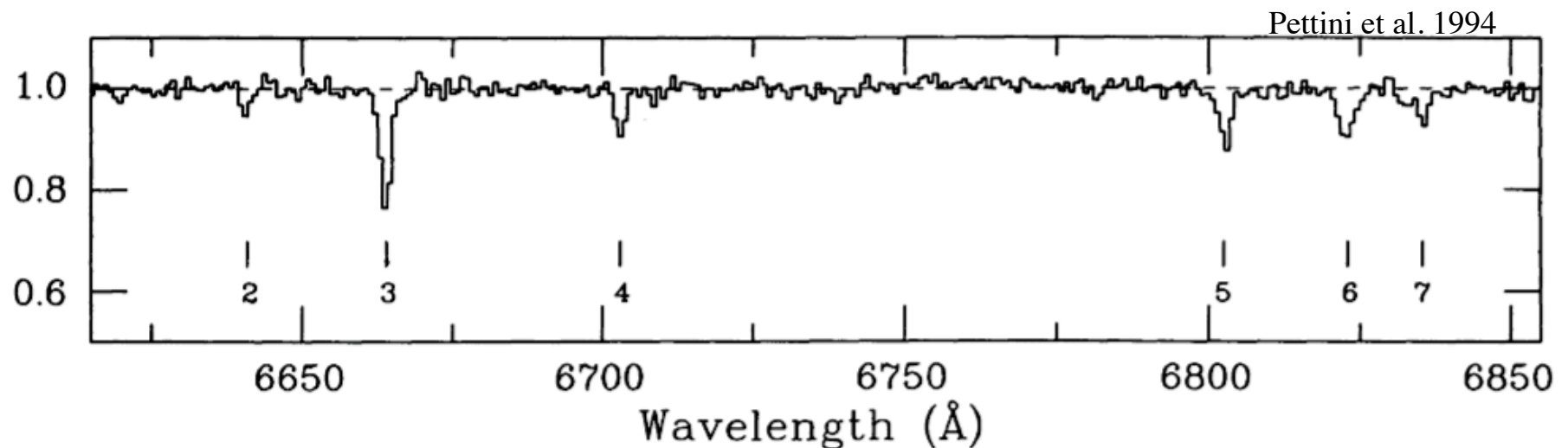
Etude de l'enrichissement du gaz en éléments lourds (C, Fe, Zn, Cr, Ni ...)

via l'étude des rapports Fe/H, C/H, Zn/H, ...

→ Les galaxies lointaines contiennent ≈ 10 fois moins d'éléments lourds que le soleil

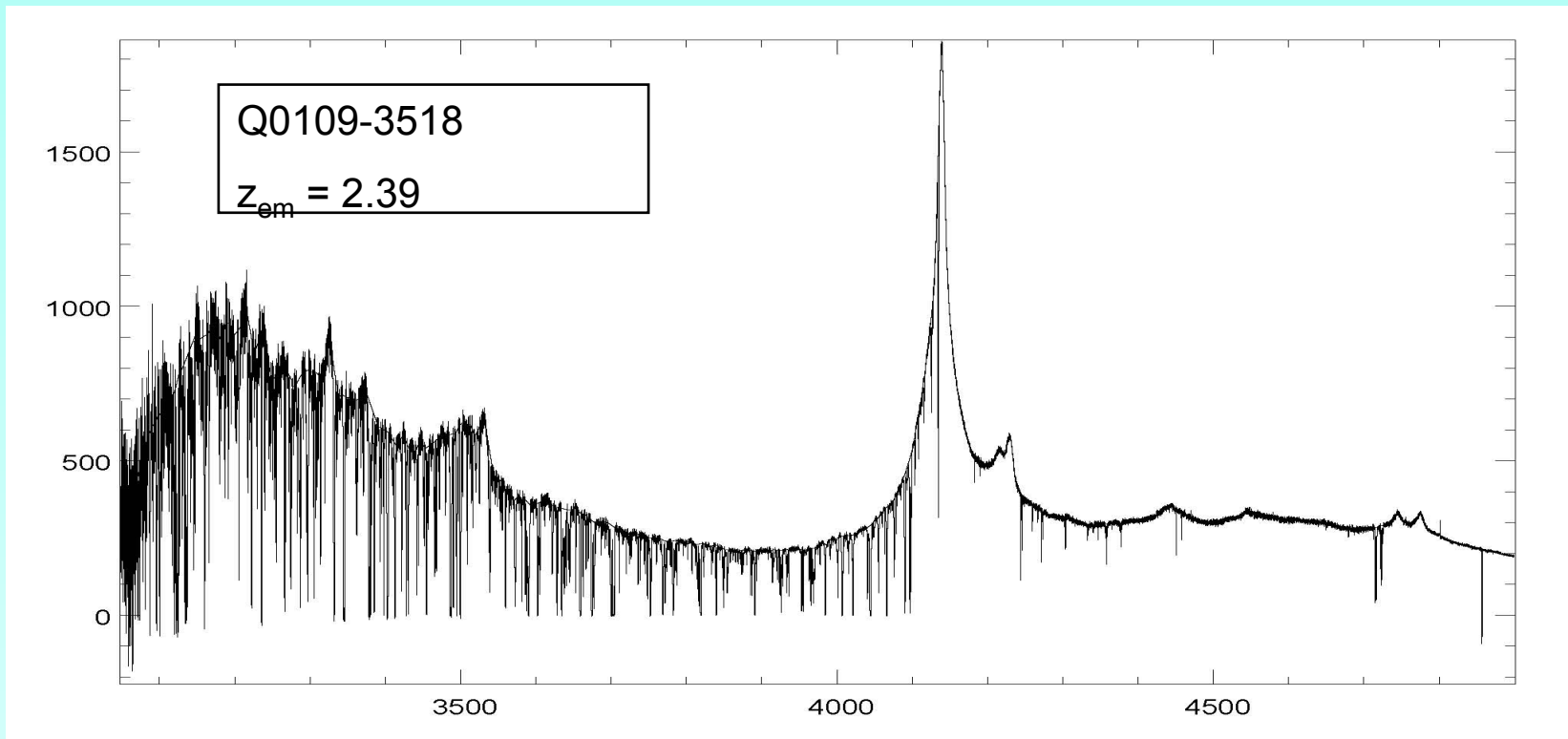
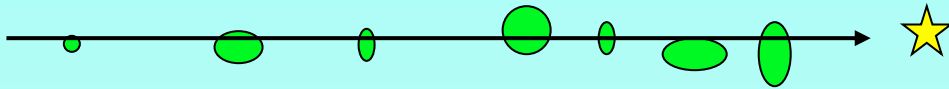


Raies de Fe⁺, Zn⁺, Cr⁺:



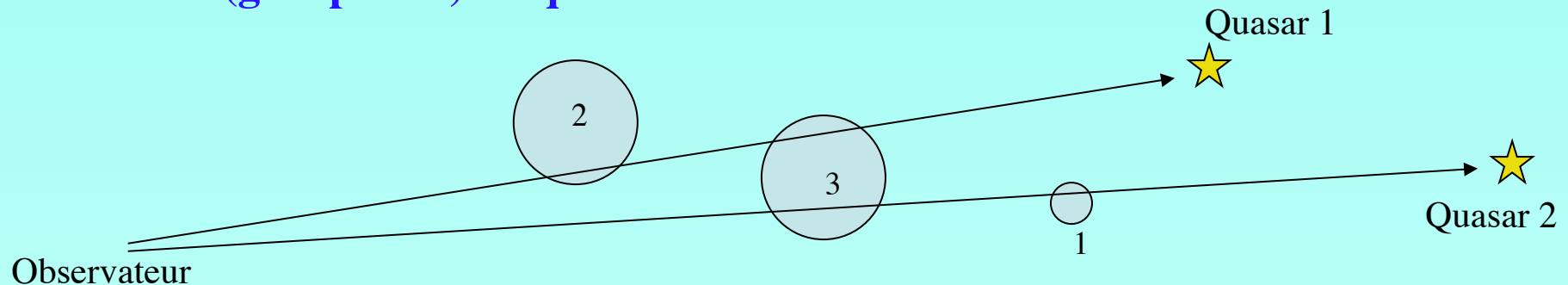
Nuages intergalactiques

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



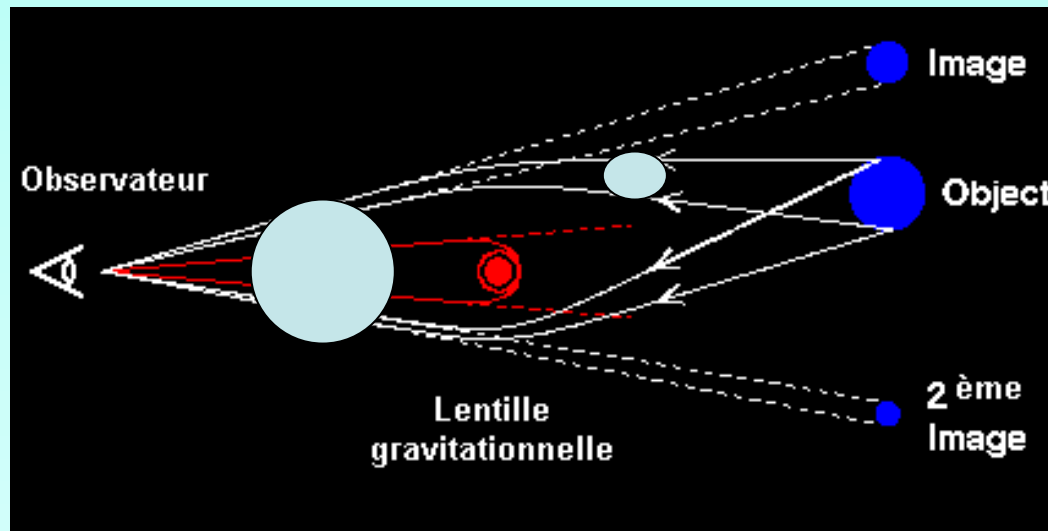
Taille, forme et structure des nuages intergalactiques

- Paires (groupes ...) de quasars



→ taille des nuages supérieure à 10 fois la taille des galaxies

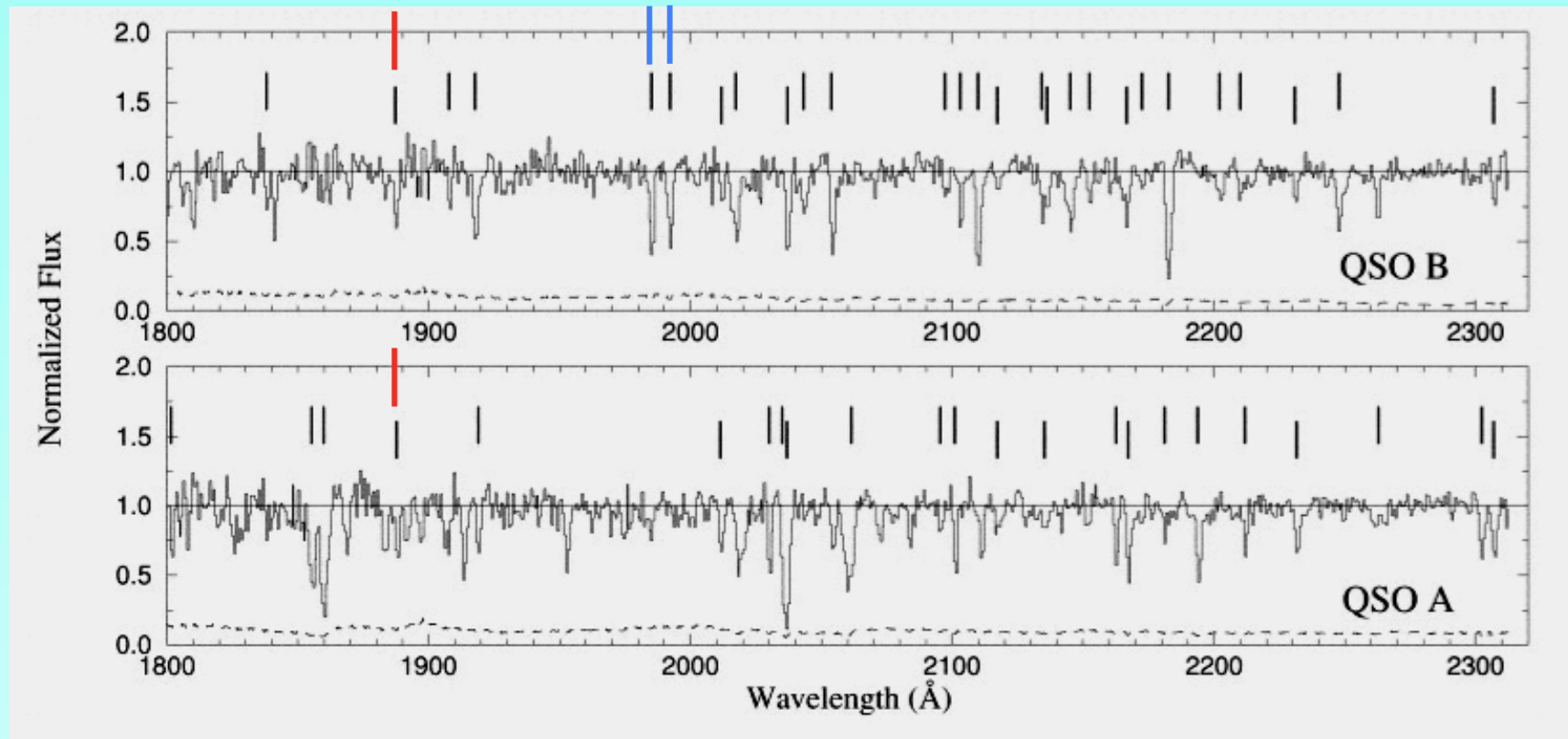
- Mirages gravitationnels



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

Perspectives

Mise en service récente d'ESPRESSO

- résolution spectrale $R=140\,000$ (≈ 2 km/s)
- grande stabilité dans le temps

Etude d'objets plus lointains

→ visible et IR

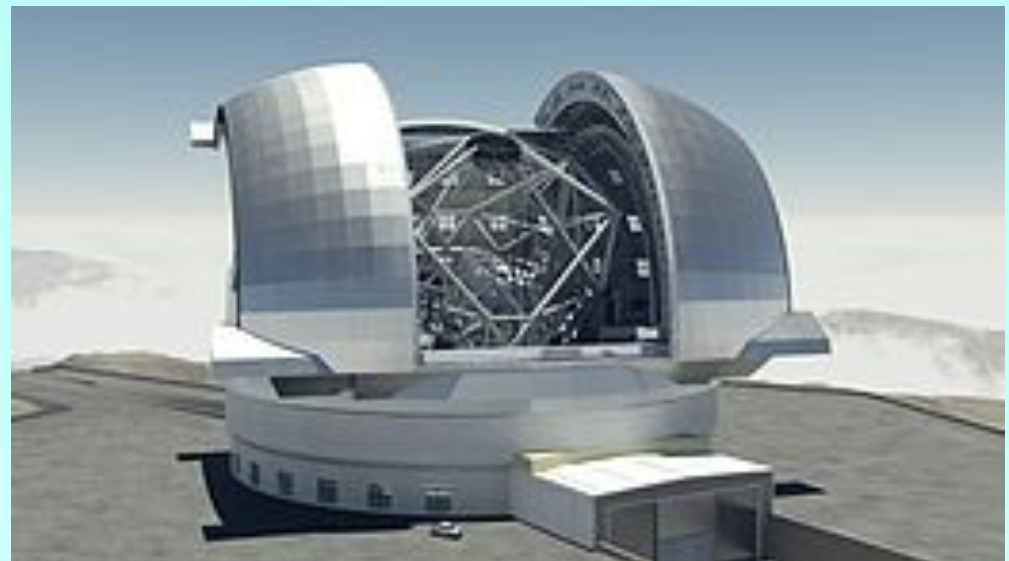
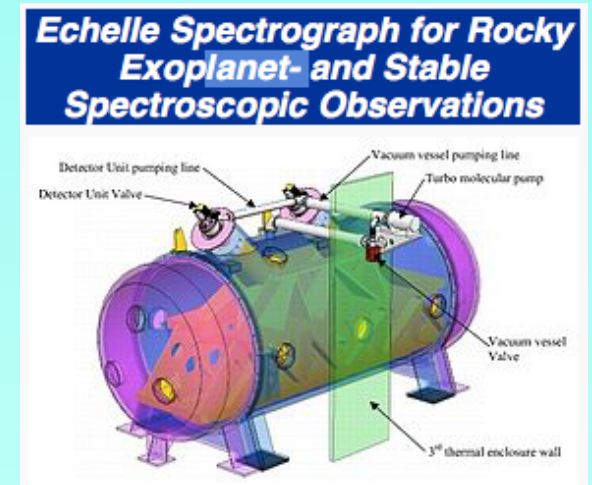
Etude détaillée de sources très faibles

→ Optique adaptative

→ Spectroscopie Intégrale de champ

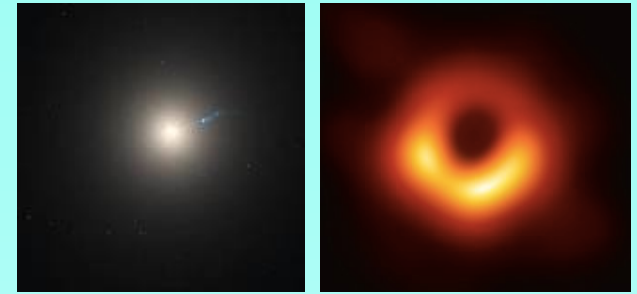
Projet ELT

mise en service prévue en 2024



Merci
pour votre attention !

La première « image » d'un trou noir/1



Annonce du 10 avril 2019 :

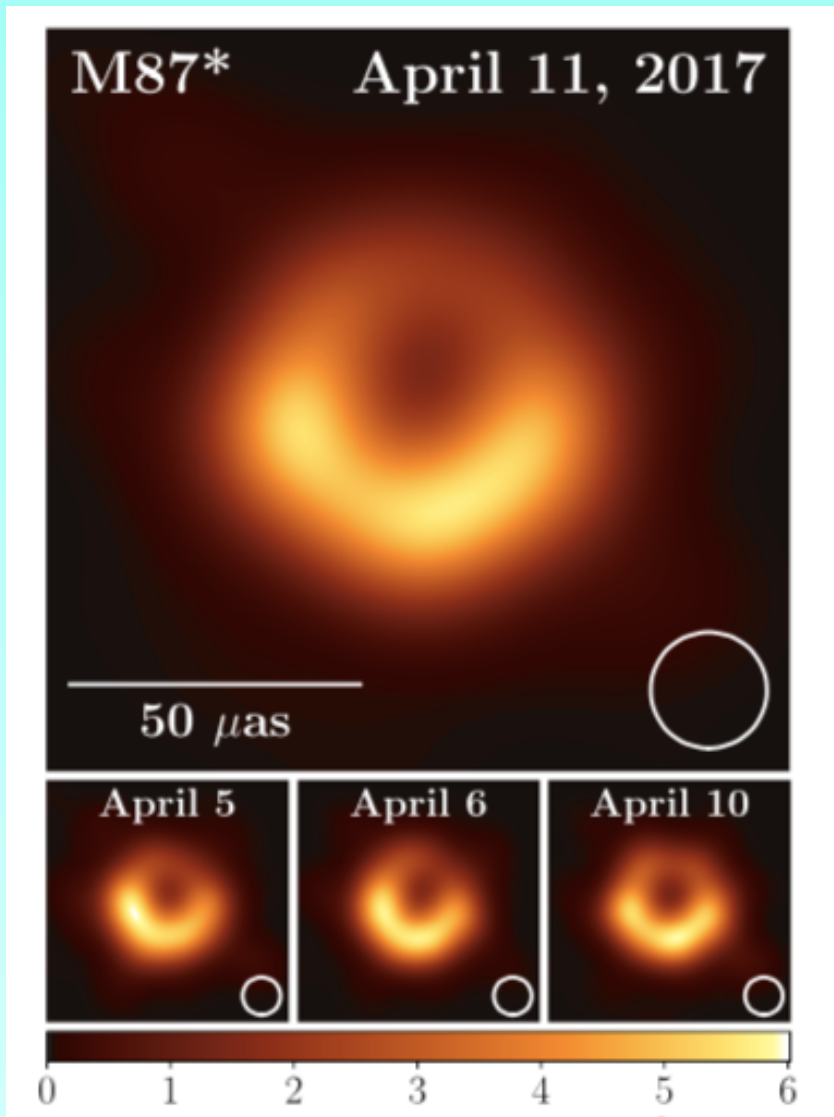
- Observation du centre d'une galaxie proche : M87 (53 M.a.l.)
- Image dans le domaine millimétrique ($\lambda = 1,3$ mm et non visible !)
- Utilisation de 8 télescopes répartis sur toute la Terre
- Nécessité d'avoir une météo excellente sur les 8 sites simultanément
- Recombinaison a posteriori des 8 signaux (interférométrie VLBI)

Synchronisation par horloges atomiques à mieux que 10^{-12} s (1 ns/1000)

→ Capacité à distinguer des détails de 20 millièmes de seconde d'arc

1 seconde d'arc = 5 mm vus depuis 1km → 1mm vu depuis 1000km

La première image d'un trou noir / 2



Observations fiables ?

- Stabilité des images / temps
- Comparaison / simulations

Que voit-on ?

- Emission à 1,3 mm du noyau actif (disque d'accrétion + jet)
- Effets de courbure marqués dus au trou noir → « ombre » du TN

→ Masse = $6,5 \pm 0,7$ milliards Mo