

La spectroscopie: un outil de choix pour étudier les astres

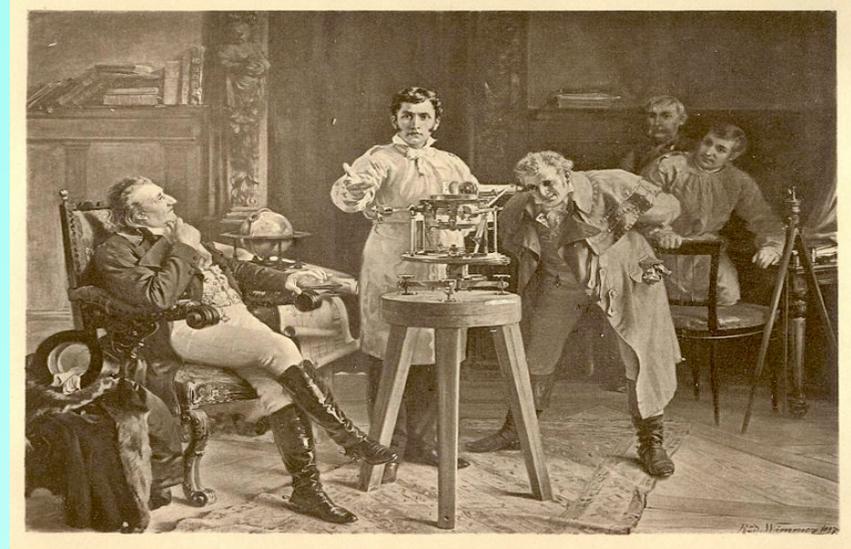
Patrick Boissé

Université Pierre et Marie Curie

Institut d'Astrophysique de Paris

Plan de la présentation:

- Nature de la lumière et spectroscopie
- Principes, quelques expériences
- Informations portées par un spectre
- Exemples: étoiles, nuages interstellaires, galaxies, rayonnement fossile
- La spectroscopie de nos jours, quelques projets d'actualité



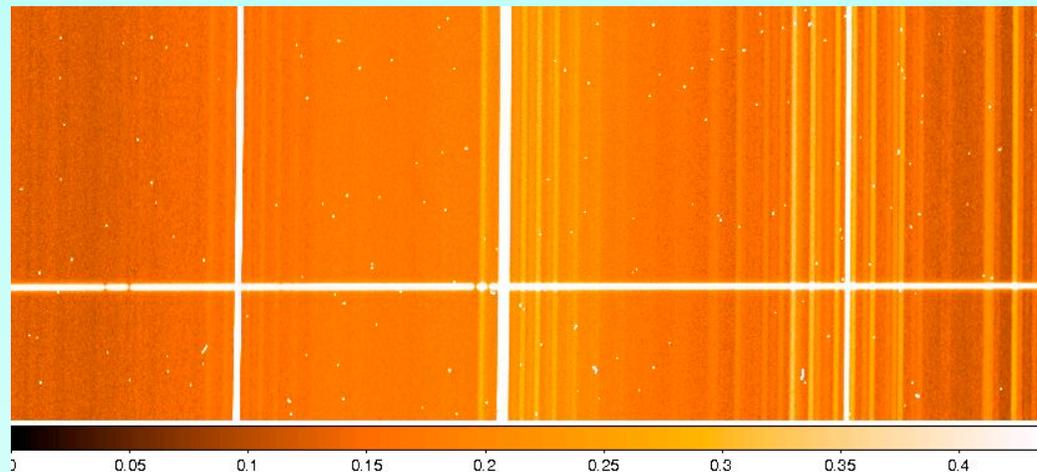
Fraunhofer (1787 - 1826)

Informations portées par la lumière : images et spectres

- Image $I(x,y)$: ce qu'on voit (avec instrument...)



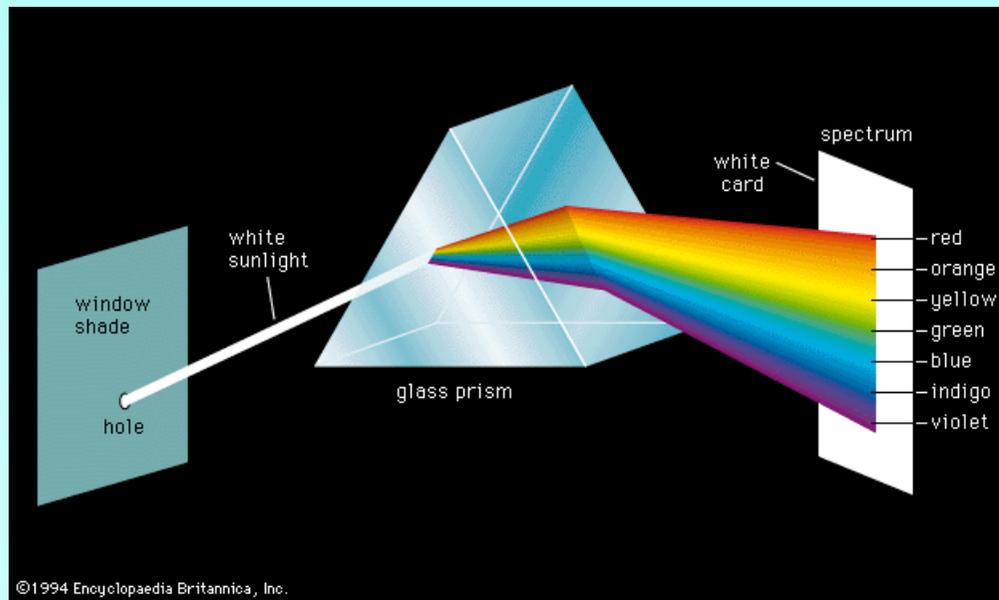
- Spectre $I(\lambda)$: « qualité » non perceptible par l'œil (seult : couleur)



Un peu d'histoire: nature de la lumière et spectroscopie

Quelques étapes :

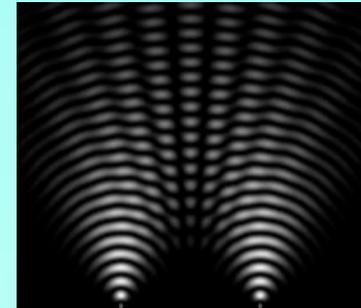
- **Aristote** : analogie avec le son --> lumière = onde
- 1637 : lois de la réfraction, **Descartes**
- 1666 : expériences de **Newton** sur la décomposition de la lumière
la réfraction sépare les couleurs. Lumière = corpuscules



Les couleurs sont une propriété intrinsèque à la lumière

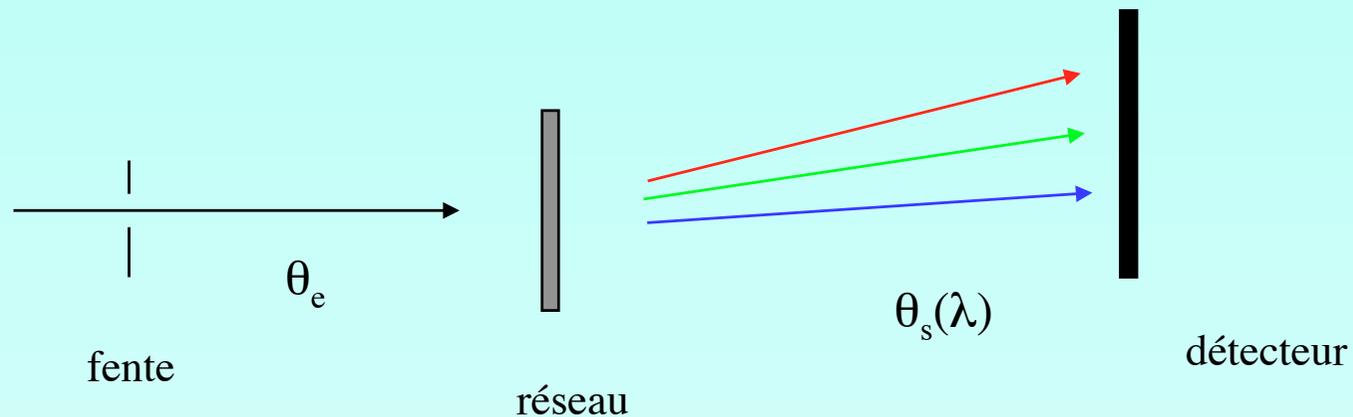
Nature de la lumière et spectroscopie / 2

- **Huygens** (1629 - 1695): interprète réflexion et réfraction par la théorie ondulatoire
- Expérience d'**Young** en 1801
- Théorie ondulatoire : **Fresnel** (1788 - 1829)
- **Fraunhofer**: spectroscopie, réseaux, raies du spectre solaire (≈ 1813)
- **Bunsen et Kirchhoff** interprètent le spectre solaire (≈ 1850)
- **Maxwell** (1831, 1879): électromagnétisme
- **Janssen et Lockyer** (1868) : raie jaune inconnue (He, 1868)
- **Planck** (1900), **Einstein** (1905): nature corpusculaire de la lumière



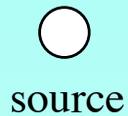
Principe d'un spectrographe

- **Système dispersant** (prisme, réseau)
direction de sortie = $F(\text{direction entrée}, \lambda)$
- **fente d'entrée**
sélectionne ≈ 1 direction d'entrée
- **Détecteur** (plaque photo, caméra CCD)
direction de sortie = $f(\lambda)$



Quelques expériences

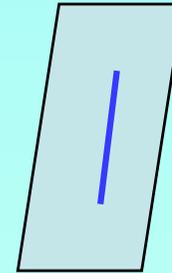
- **Lumière blanche + filtre ou absorbant**



filtre ou absorbant



spectroscope



Écran (détecteur)

- **Equivalent astrophysique**

source = planète, soleil, étoile, galaxie, quasar

absorbant = nuage interstellaire ou intergalactique, galaxie ...

détection = télescope + spectrographe

Informations portées par un spectre astrophysique

- **Forme générale du spectre continu**

étoiles : bleues --> chaudes (jeunes)

rouges --> froides (vieilles)

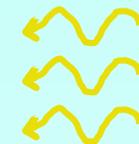
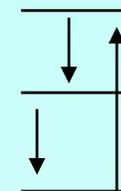
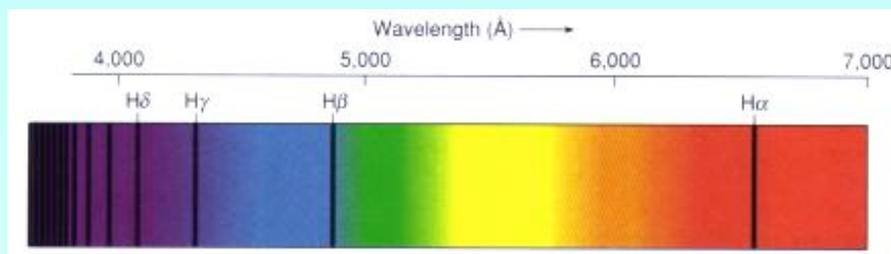
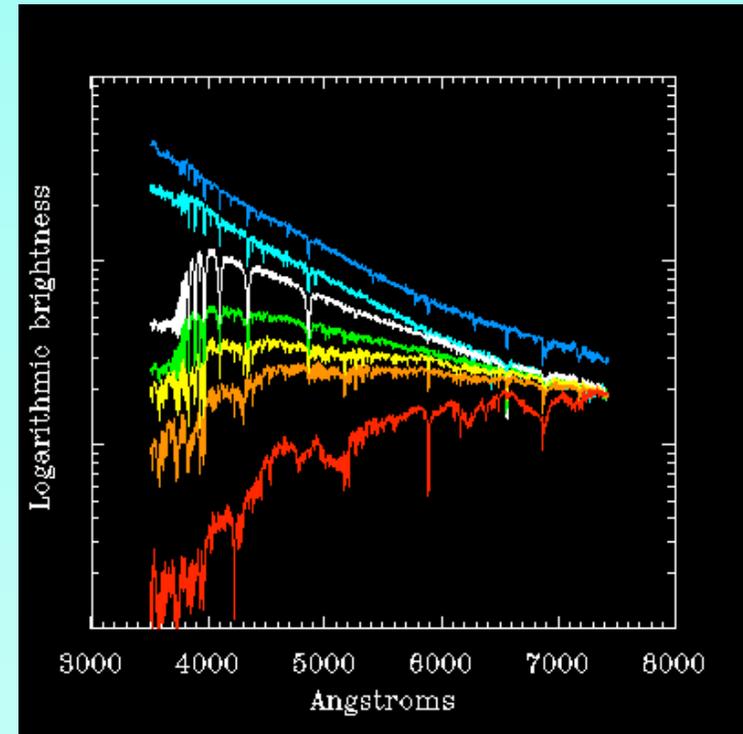
galaxies : bleues --> étoiles jeunes

rouges : pas de formation stellaire

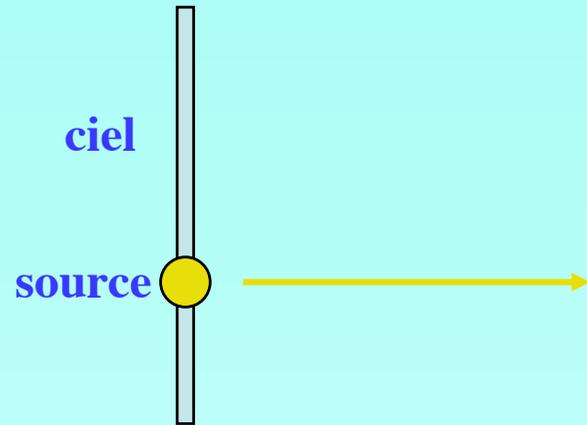
- **Raies d'absorption**

atmosphère de l'étoile

gaz interposé

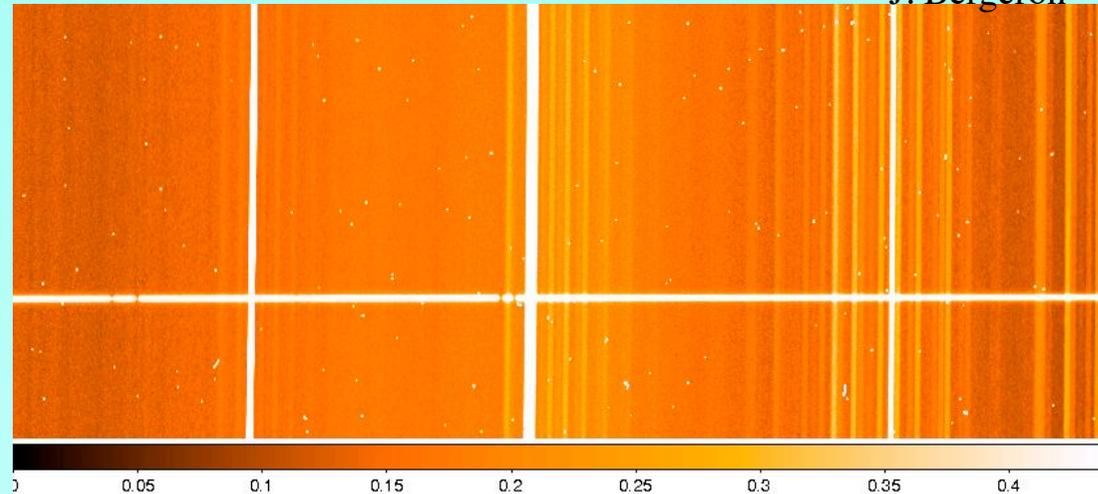


Exemple de spectre VLT (ESO, Chili)

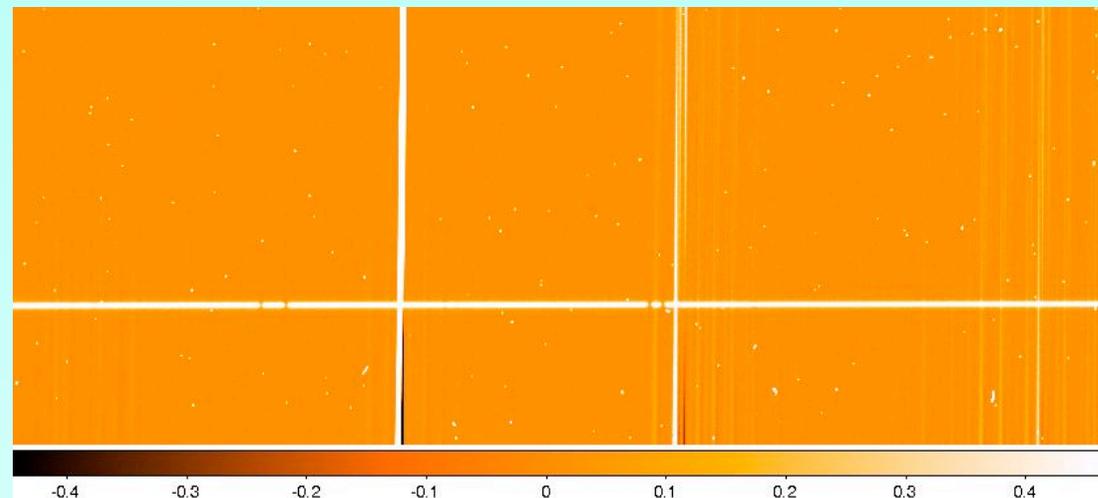


Caméra CCD

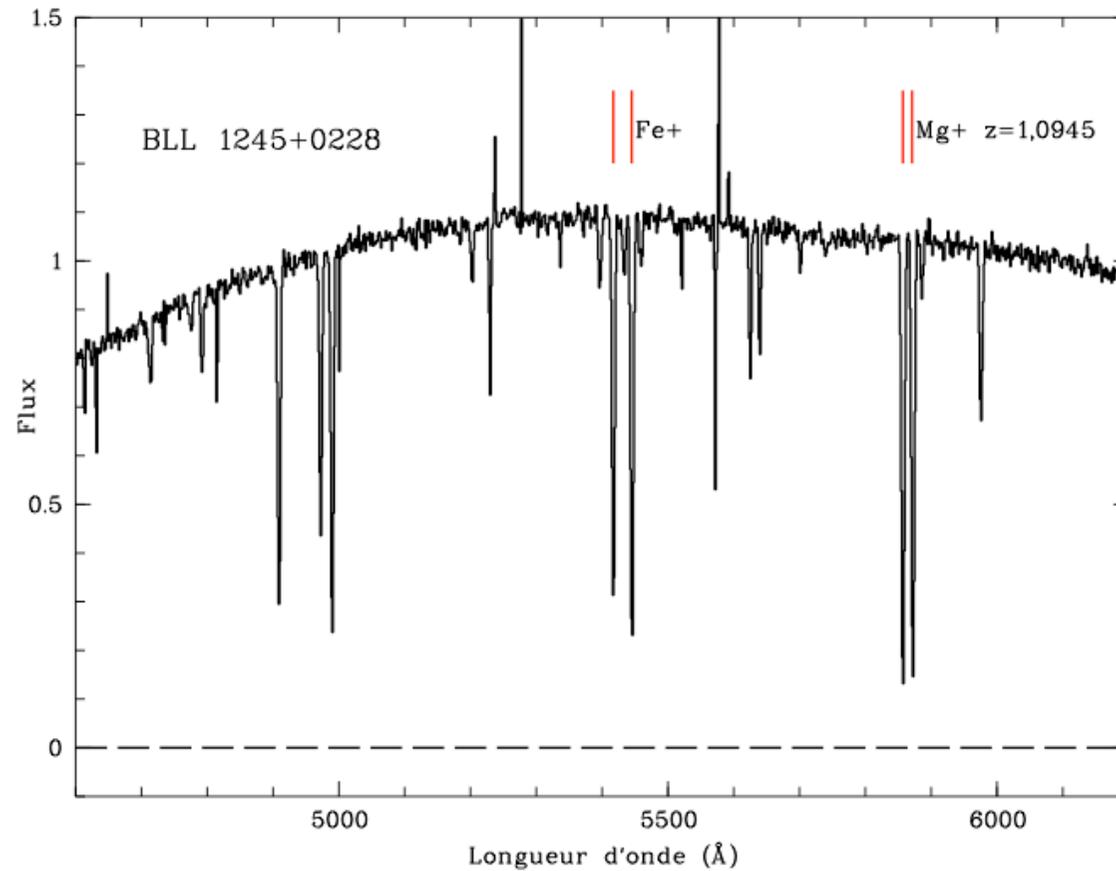
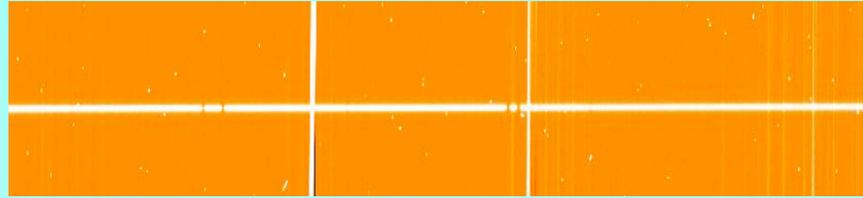
J. Bergeron



Spectre FORS2
de BLL 1245+0228



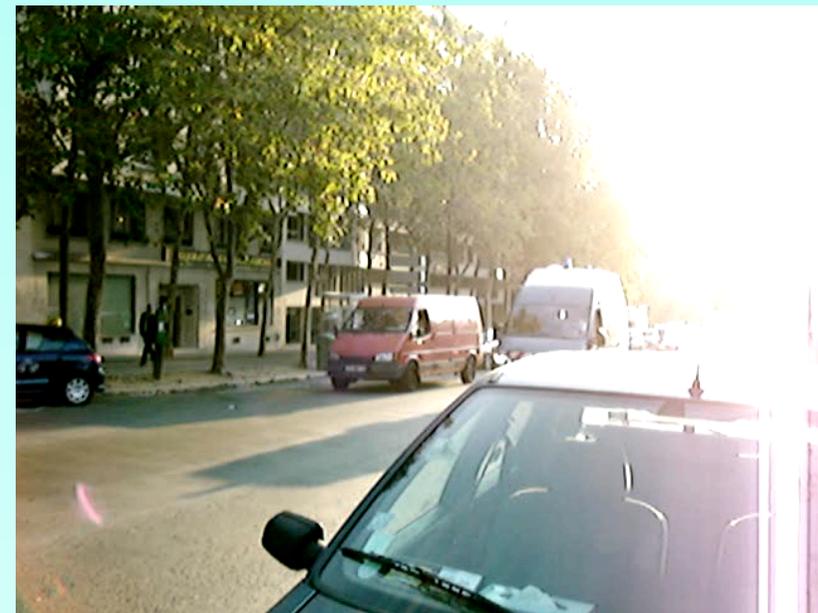
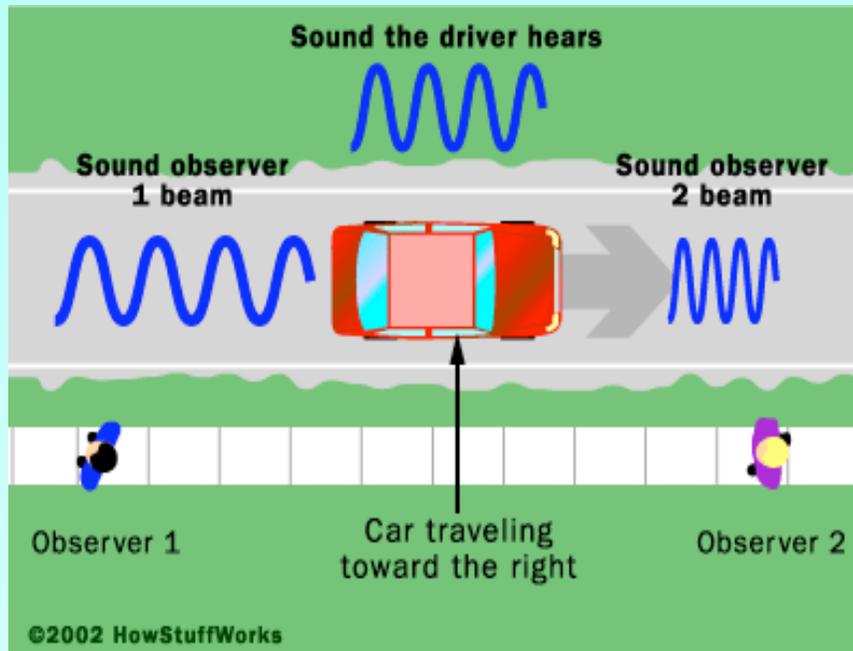
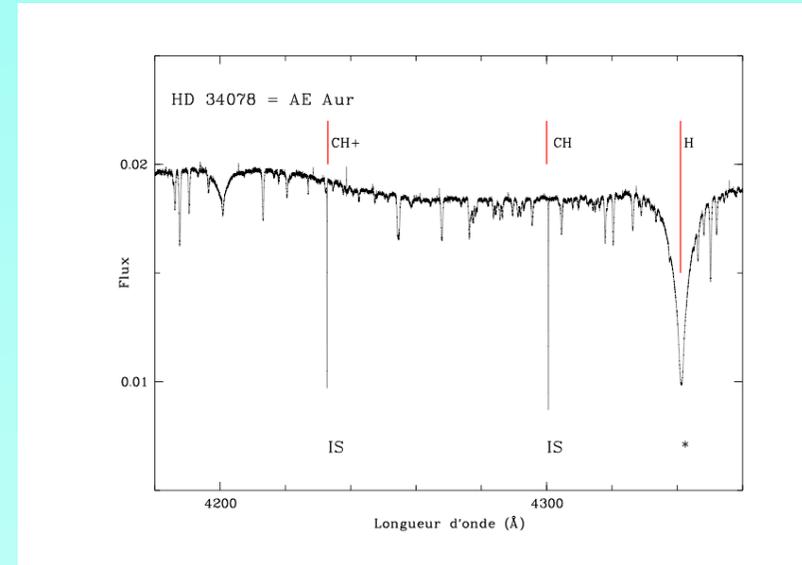
Exemple de spectre actuel (VLT/ESO)



Caractéristiques des raies spectrales / 1

- **longueur d'onde** (position dans le spectre)
 - identification de l'élément (H, C, Fe, ...)
 - vitesse radiale : effet Doppler-Fizeau

$$\lambda_{\text{obs}} = \lambda_{\text{labo}} (1 + V_r/c)$$



Caractéristiques des raies spectrales / 2

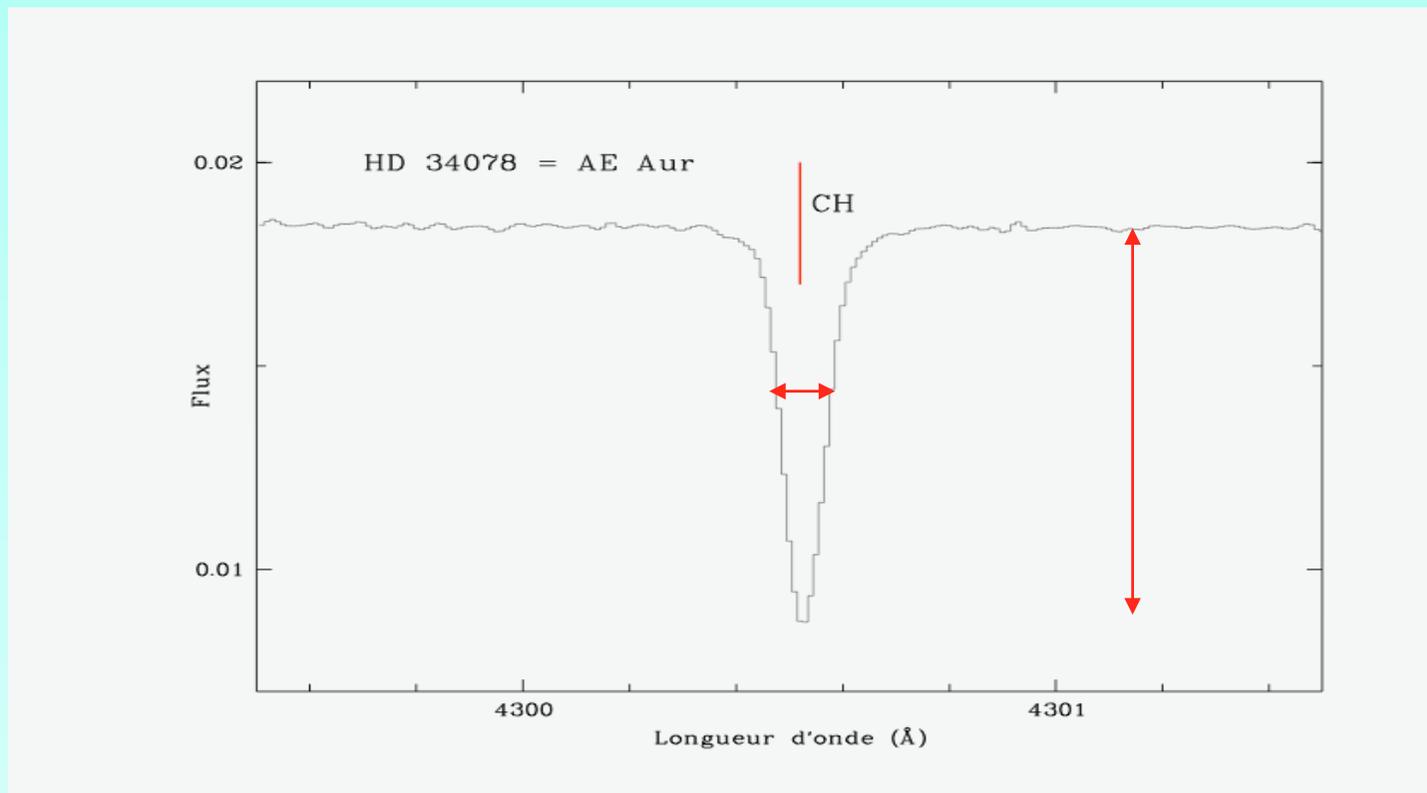
- **largeur**

- agitation (température) et turbulence
- rotation (étoiles, galaxies)

- **Intensité ou profondeur**

--> quantité de l'élément (CH, H, ...)

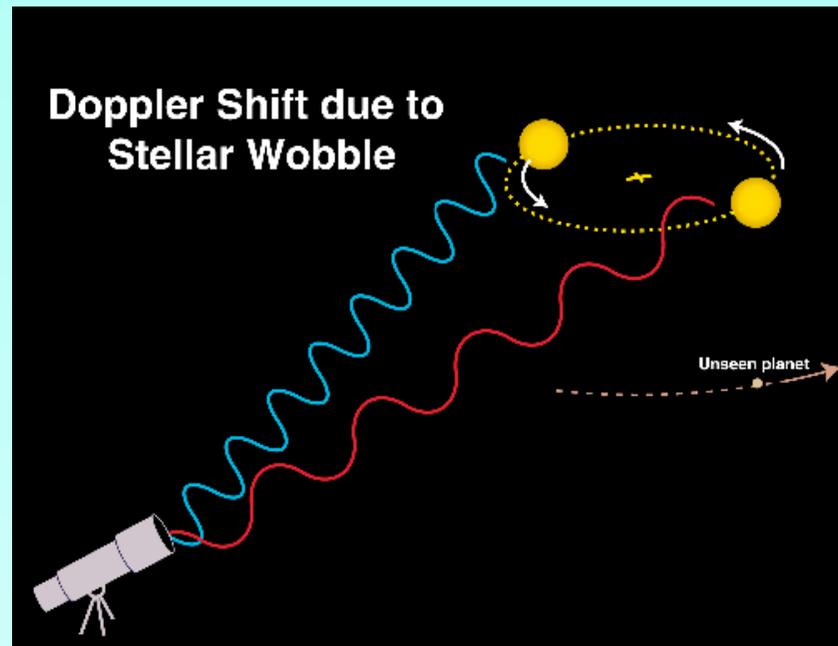
$N(\text{CH})$, $N(\text{H})$... si raie non « saturée »



Mouvement des étoiles

Etoiles

- vitesse radiale / terre ou soleil (... jusqu'à ≈ 700 km/s)
- variations temporelles de V_r
 - > compagnon (étoile, planète) --> exoplanètes, « Jupiters chauds »

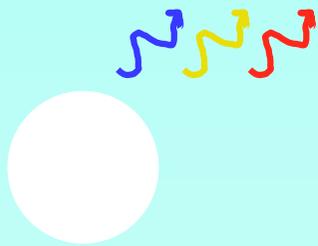


- vitesse de rotation sur elle même (mesure de $V_{\text{sin } i}$)

... et champ gravitationnel (Sirius B)

Etoile binaire Sirius A, B (type A0 + naine blanche)

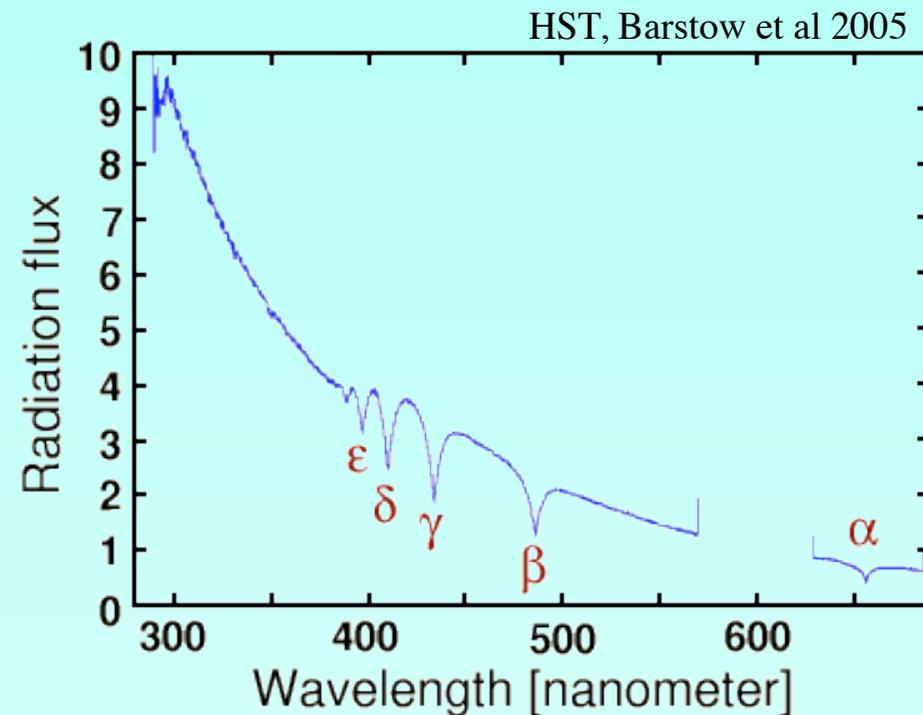
- période ≈ 50 ans
- vitesse radiale Sirius A: $V_r = -7$ km/s (Huggins ≈ 1860)



Décalage gravitationnel

$$z_g \approx GM/(R c^2) \rightarrow$$

$$V_g \approx 80 \text{ km/s}$$



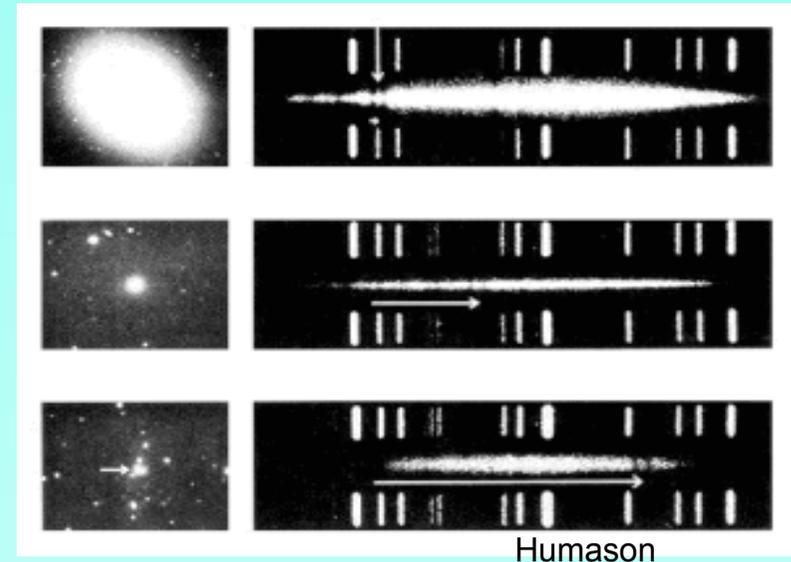
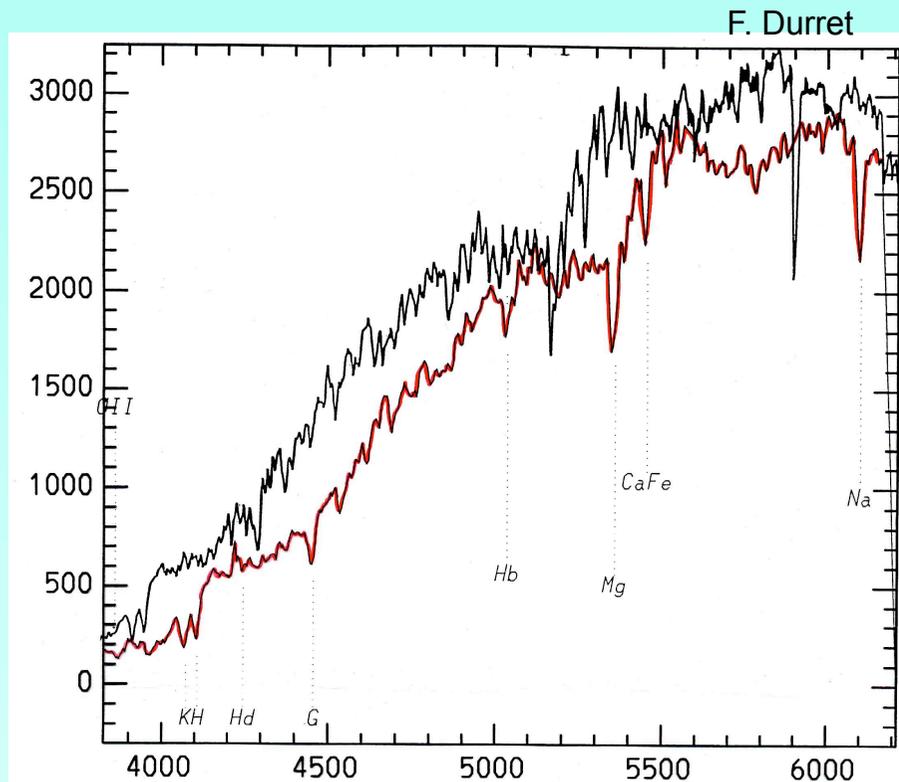
Mouvements dans l'Univers / galaxies

Vitesse radiale (/ terre ou soleil)

--> expansion de L'Univers,

loi de Hubble : $V_r = H_0 D$ (faible V_r)

$$\lambda_{\text{obs}} = (1 + z) \lambda_{\text{labo}}$$



Vitesse radiale / M31

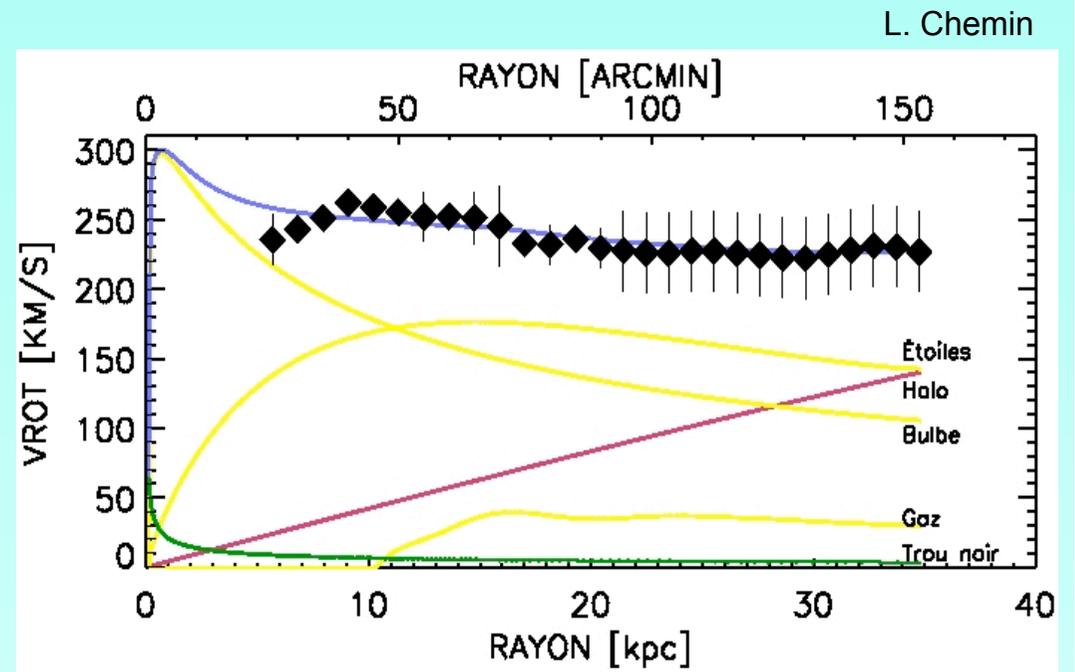
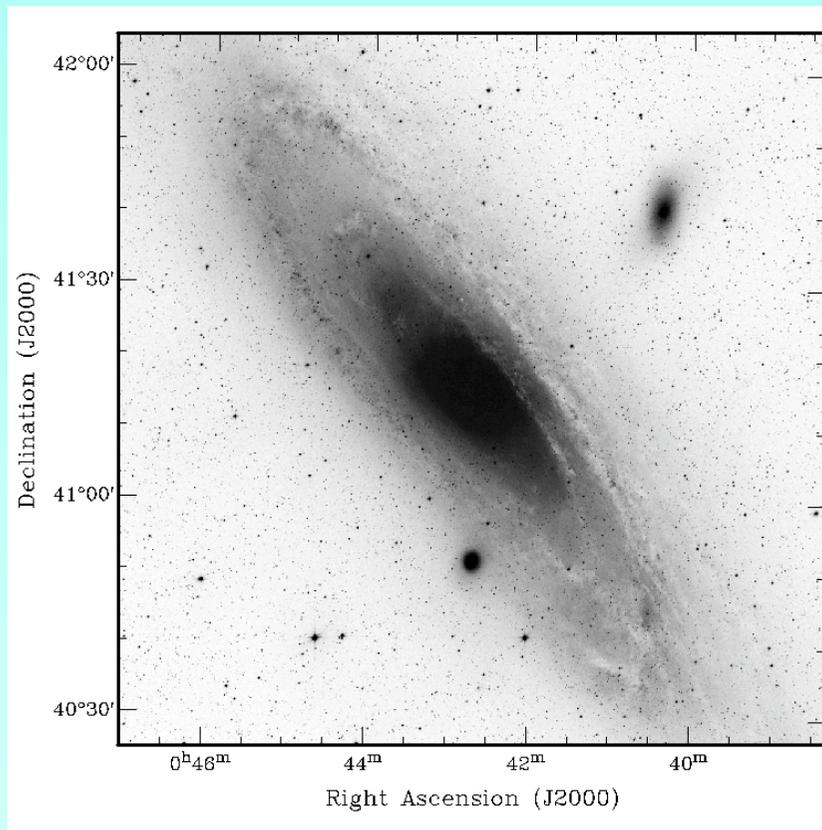
10580 ± 20 km/s, $z = 0.0353$

Mouvements dans l'Univers / galaxies

Courbe de rotation

--> masse manquante, matière noire

M31

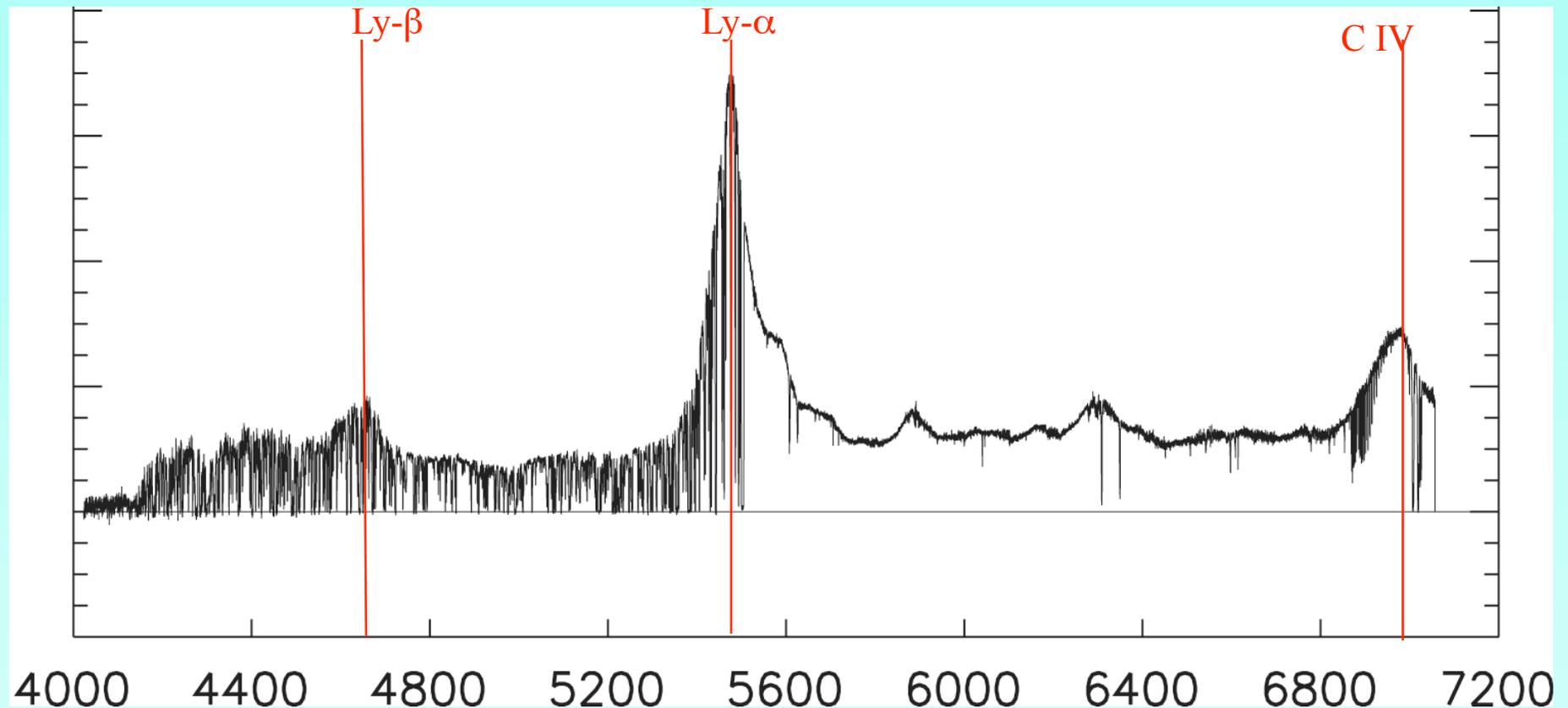


Les objets les plus lointains, quasars

Quasar : noyau « actif » de galaxie (raies d'émission larges)

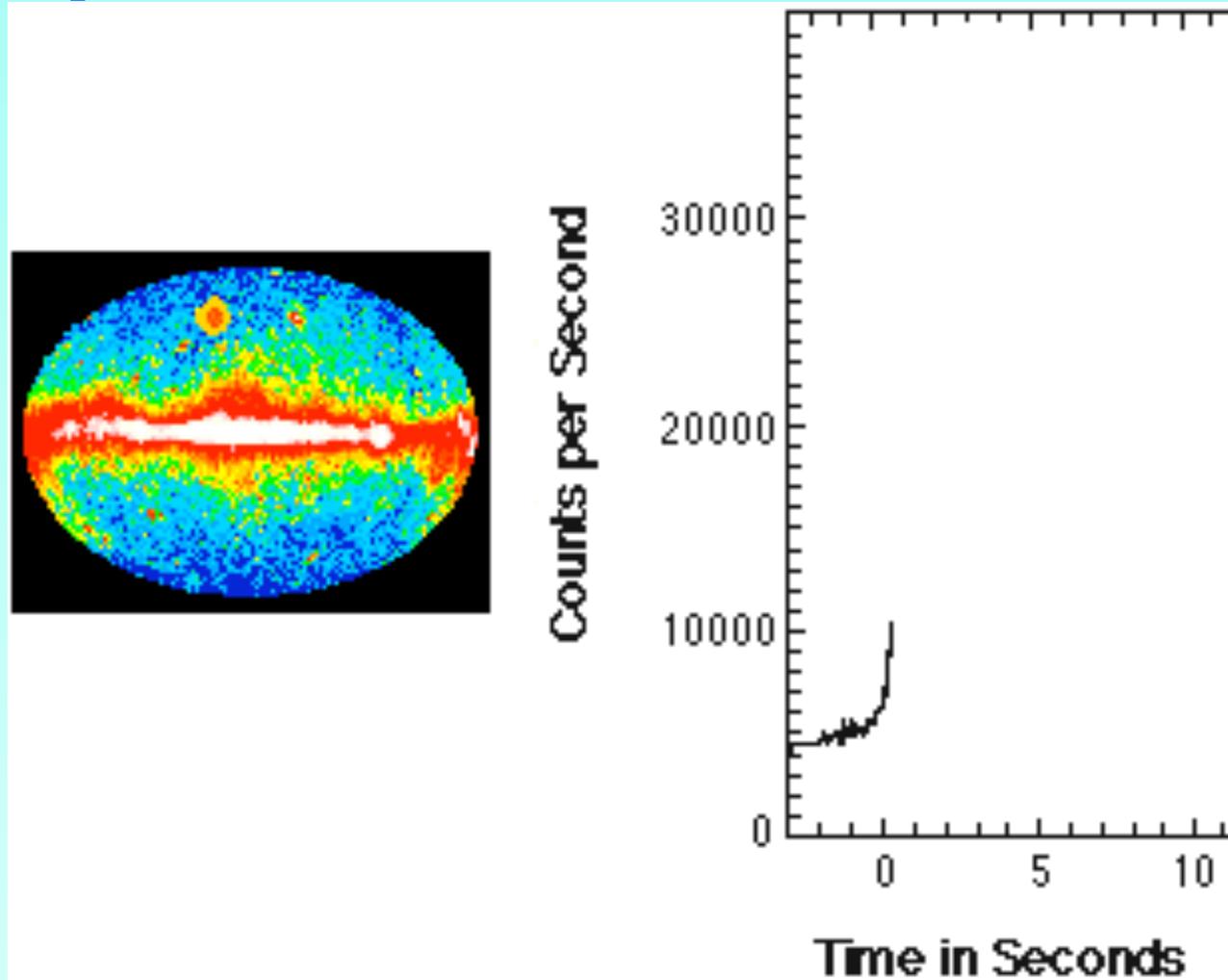
Décalage vers le rouge: $z \approx 4$

$$\lambda_{\text{obs}} = (1 + z) \lambda_{\text{labo}}$$



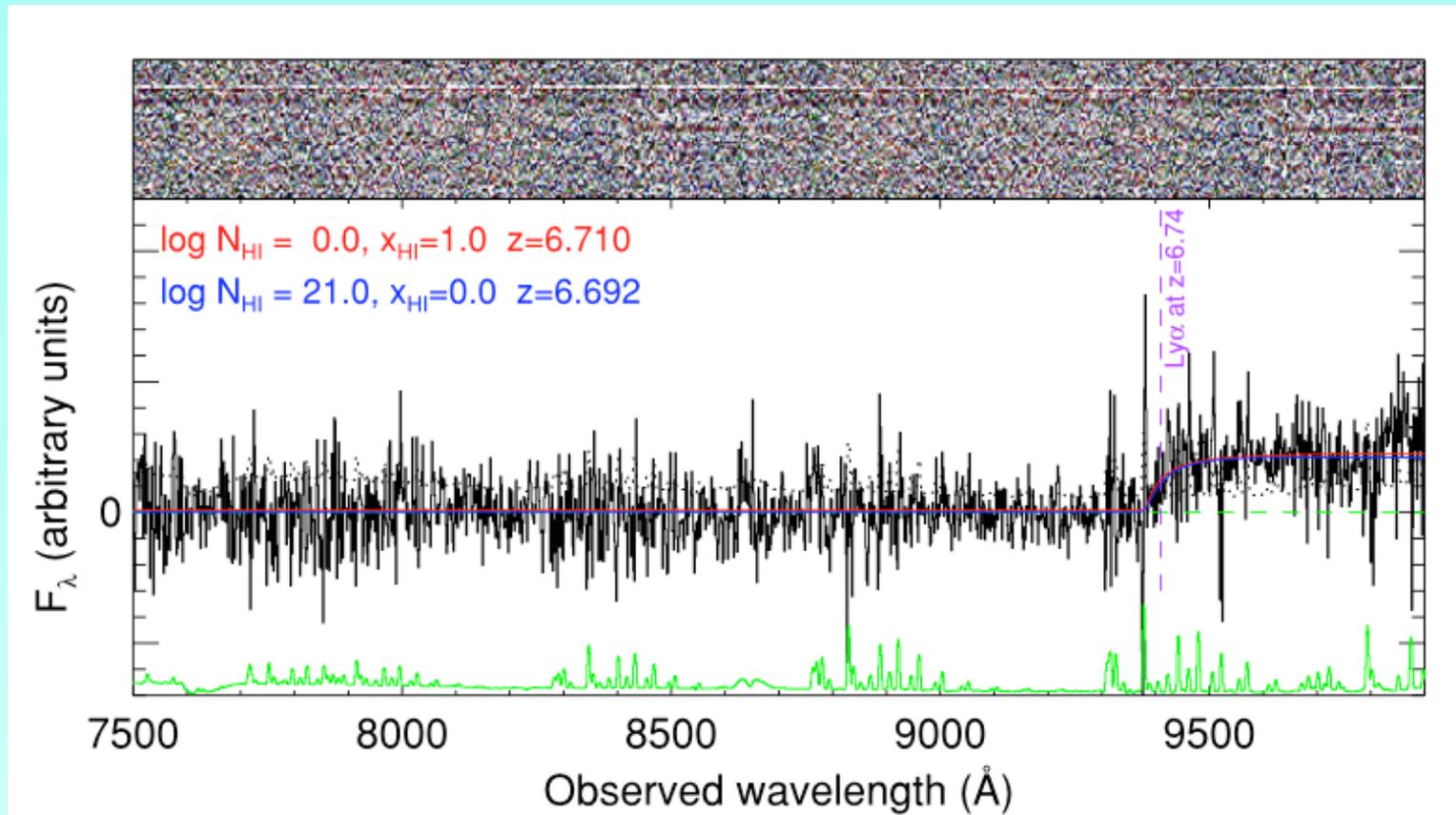
Les objets les plus lointains: sursauts γ

Sursauts γ : explosion d'étoile massive



Les objets les plus lointains : sursauts γ

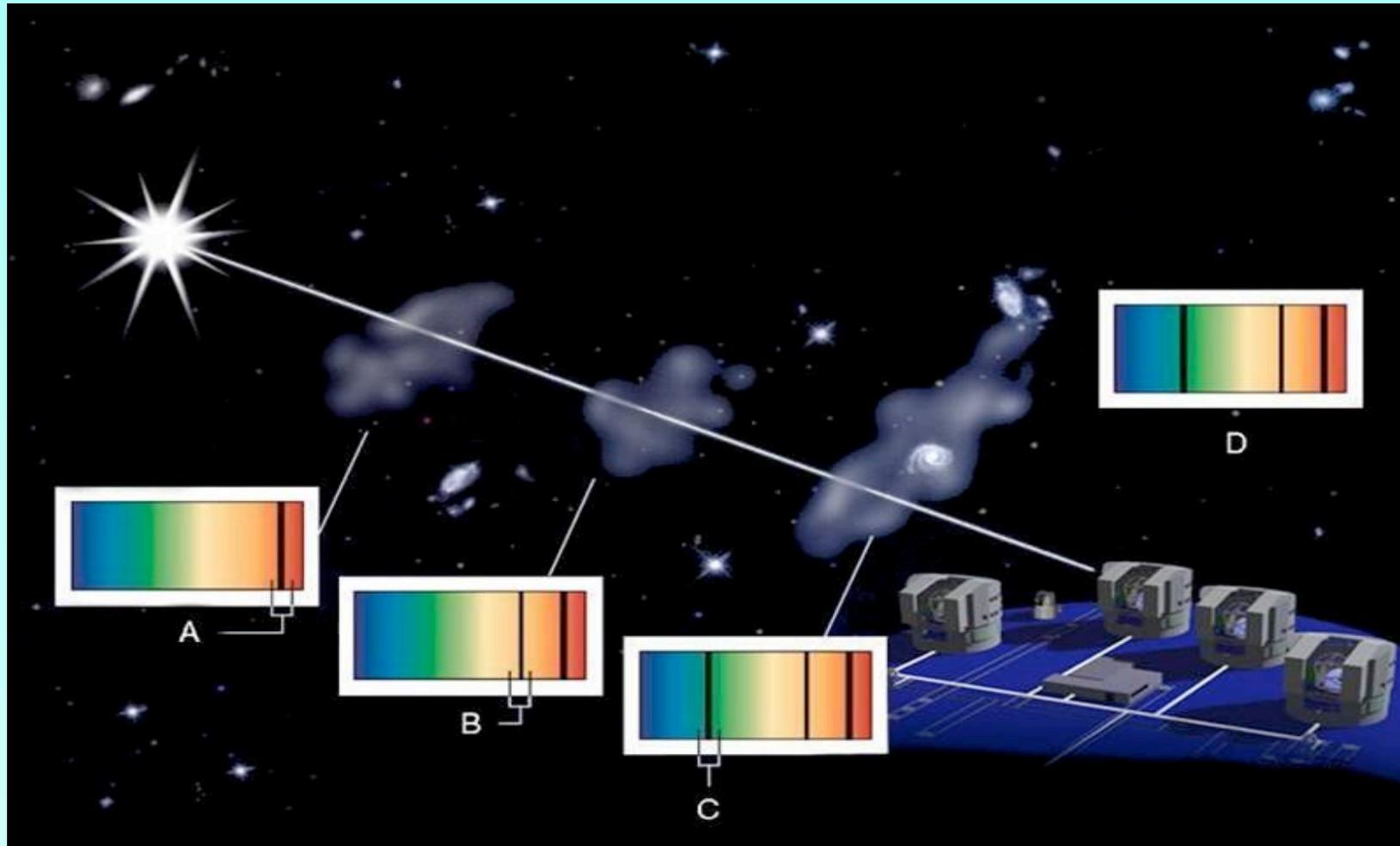
Décalage vers le rouge: $z \approx 6,7$



Annance en 2009 d'un sursaut à $z = 8,2$ (Swift + VLT)

Abondance des éléments dans l'univers lointain / 1

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



Abondance des éléments dans l'univers lointain / 2

Raie Lyman α de H

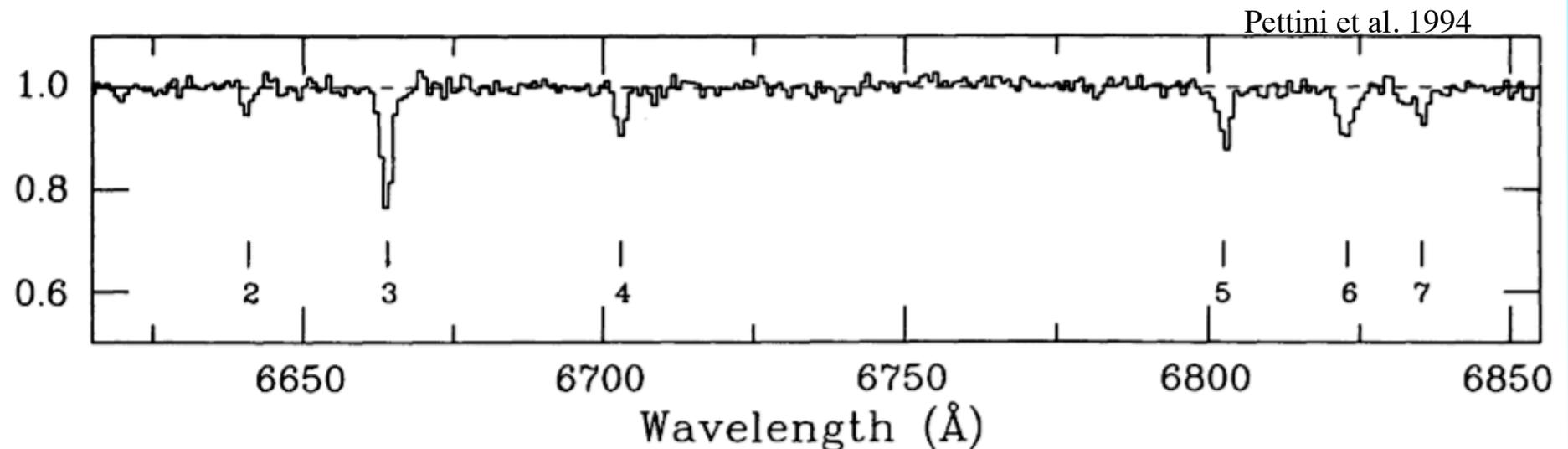
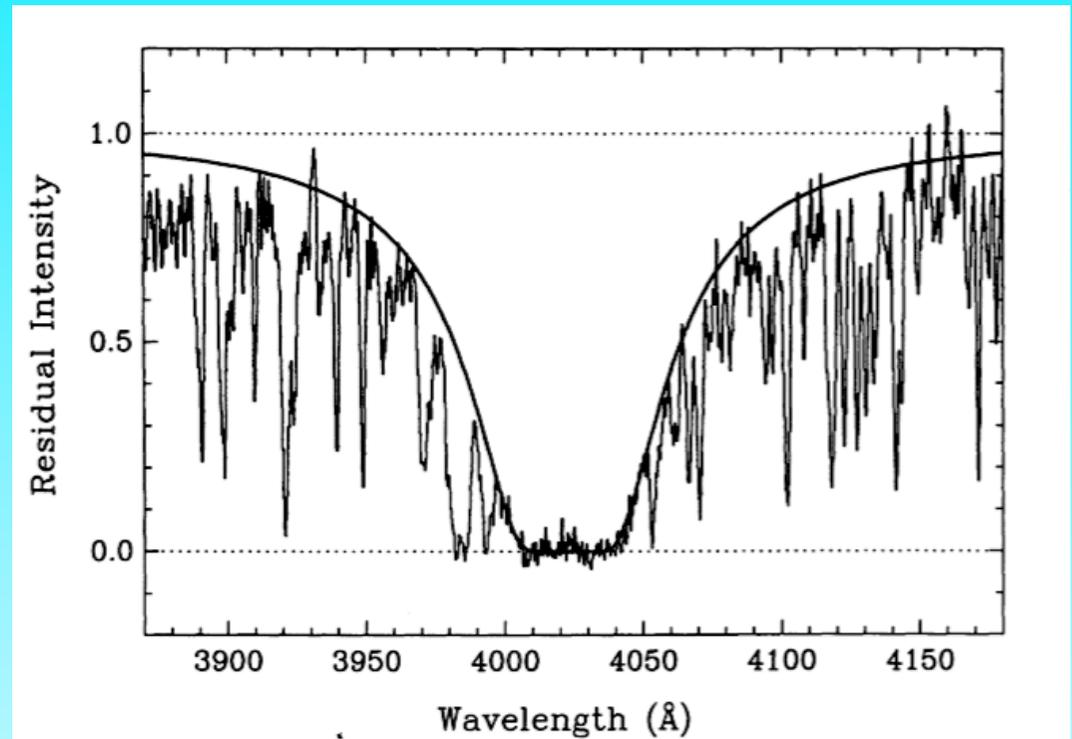
$z = 2,3091$

- Fe/H, Zn/H, Cr/H

→ enrichissement en métaux

→ poussières

Raies de Fe⁺, Zn⁺, Cr⁺:



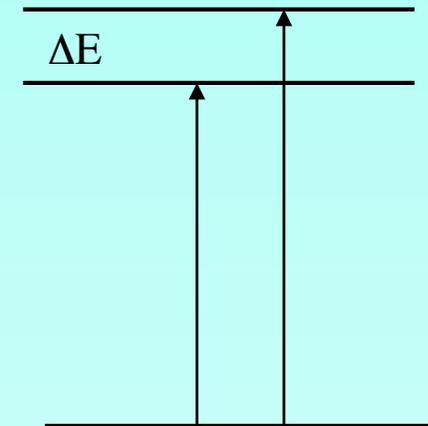
Variation avec le temps des constantes de la physique ?

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

- Tests précis possibles (cf P. Petitjean, J.P. Uzan ...)
 - **variation de $\alpha = e^2/\hbar c$** : doublets de Si^{3+} , Fe^+ , Mg^+

$$\Delta\alpha/\alpha \leq \approx 1/100\,000$$

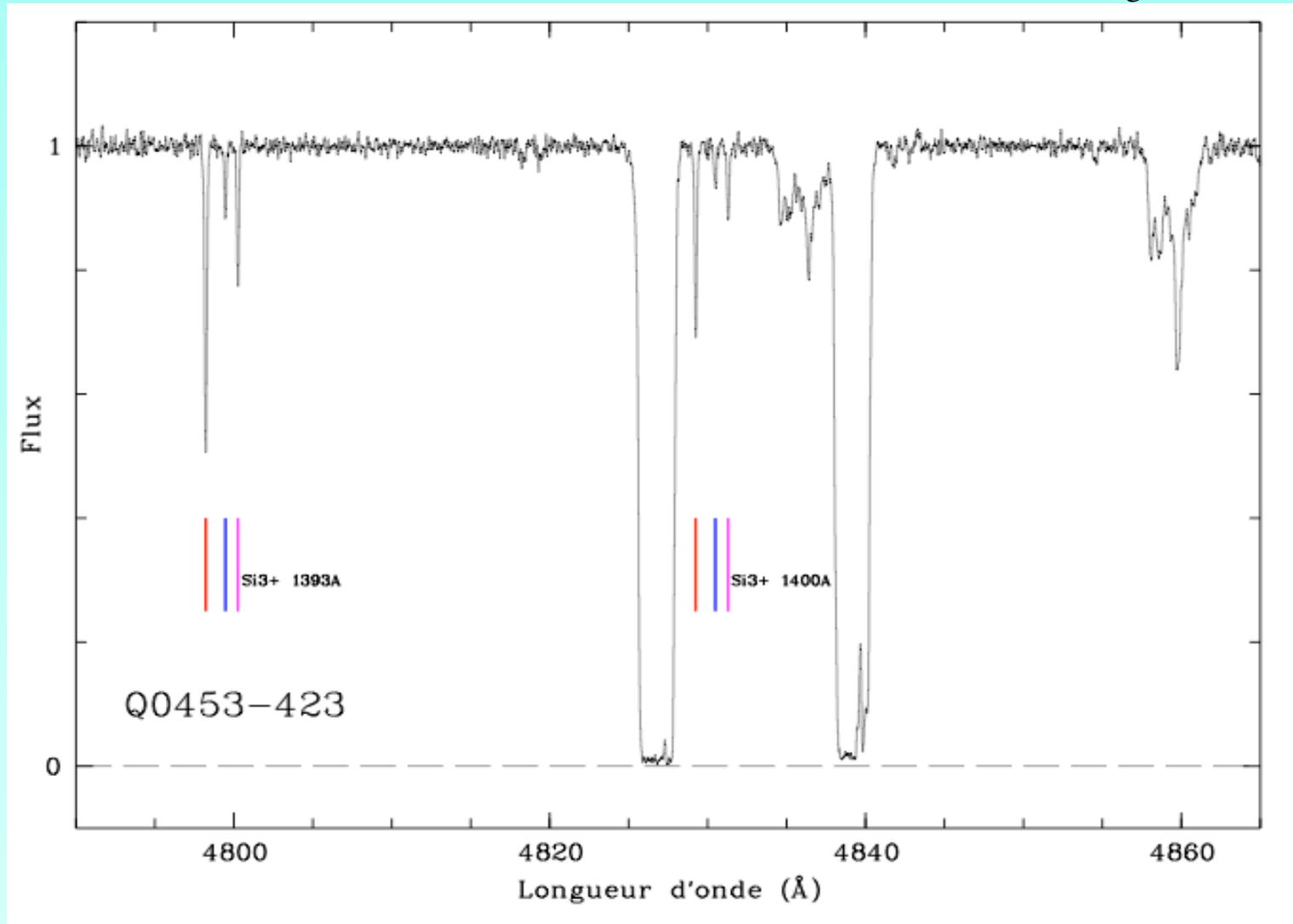
- **variation de $\mu = m_e/m_p$** : raies de H_2 et de HD



Variation avec le temps des constantes de la physique ?

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

Bergeron et al.

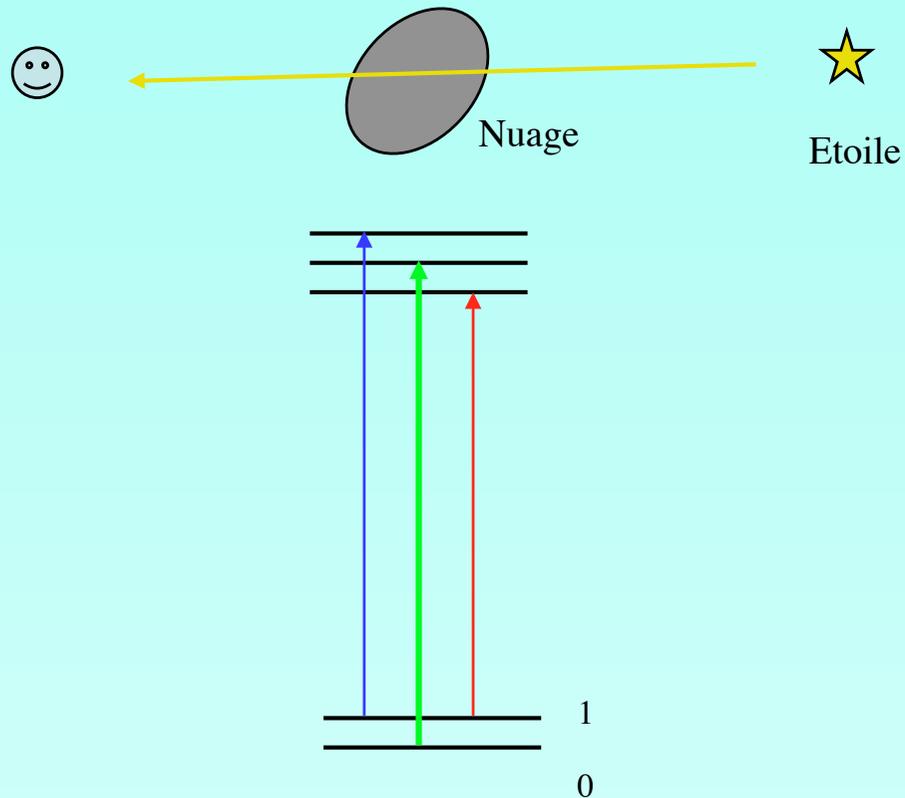


Mesure de température

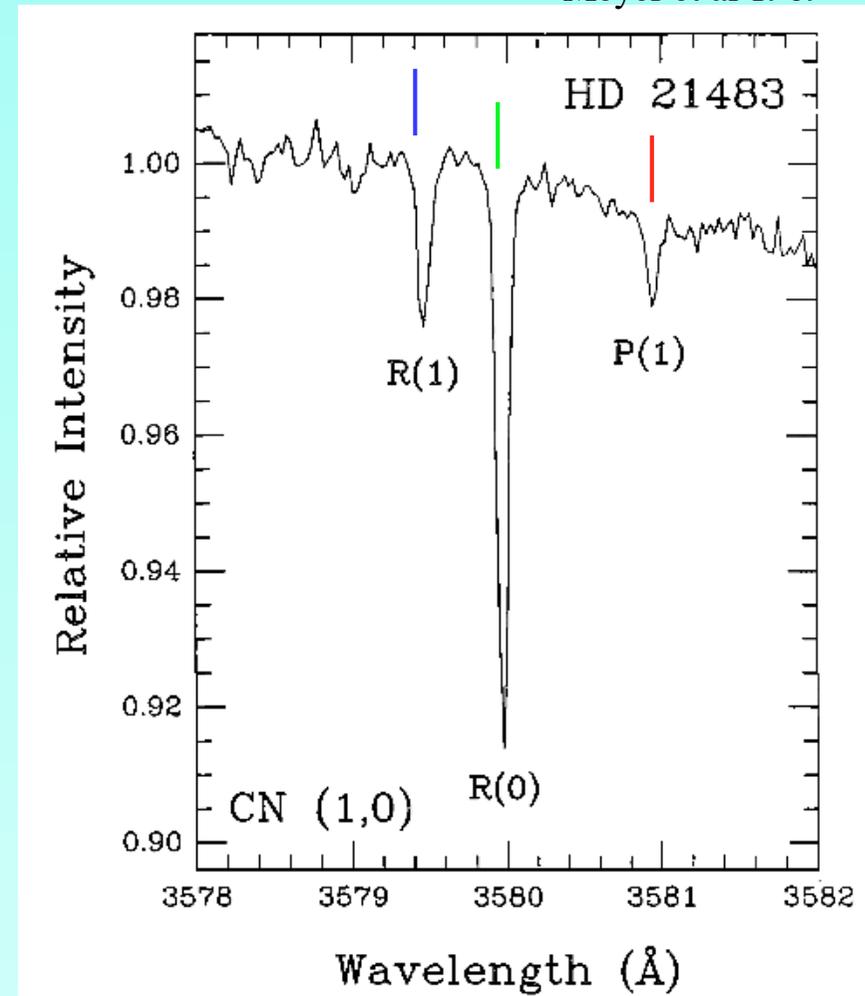
Fond de rayonnement cosmologique

thermomètre = molécules CN

dans notre Galaxie ($z \approx 0$)

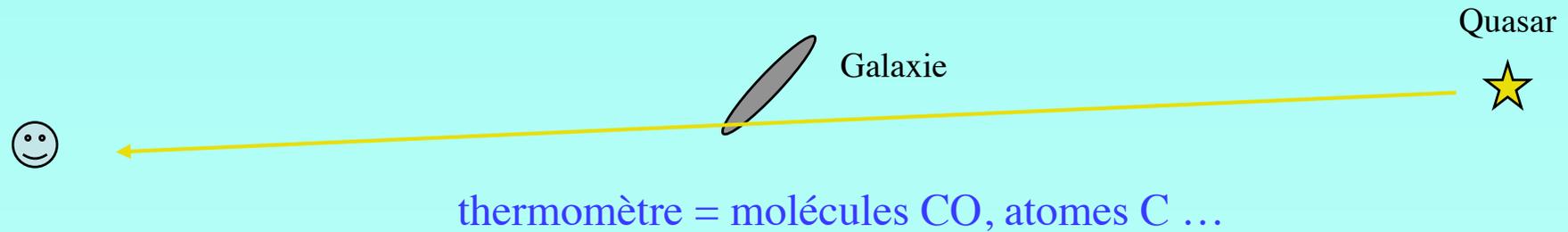


Meyer et al 1989



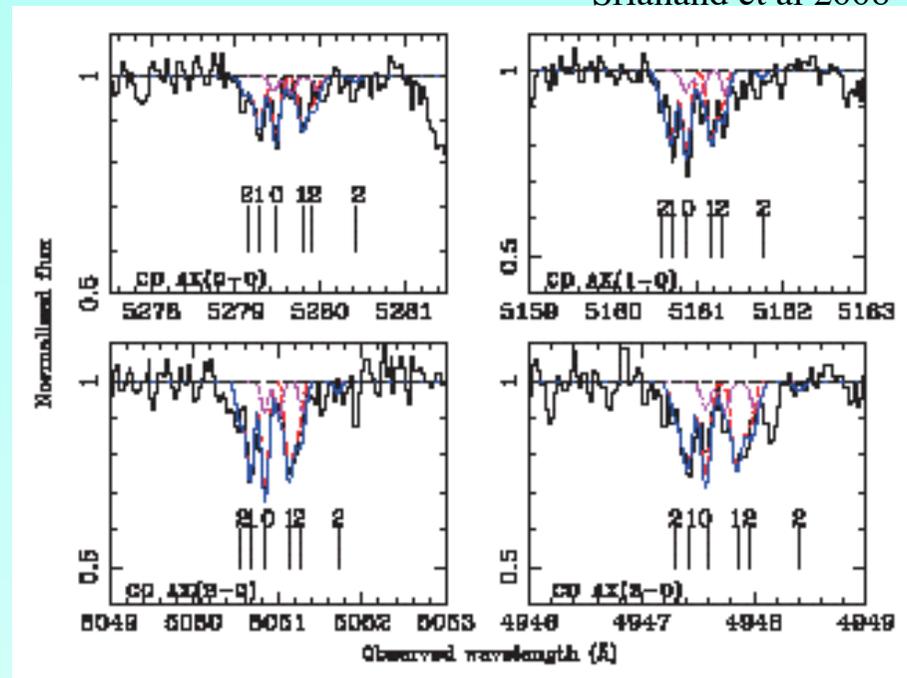
$$T = 2,76 \pm 0,07 \text{ K}$$

Fond de rayonnement dans l'Univers lointain



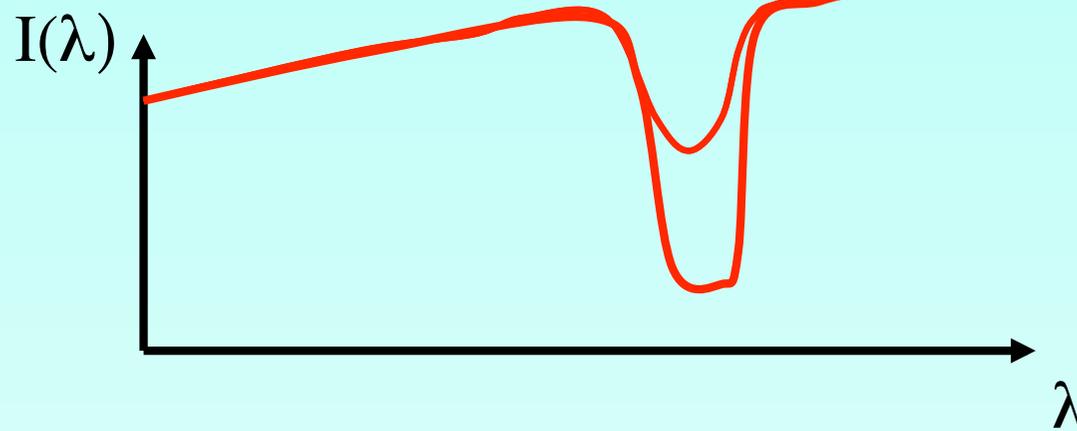
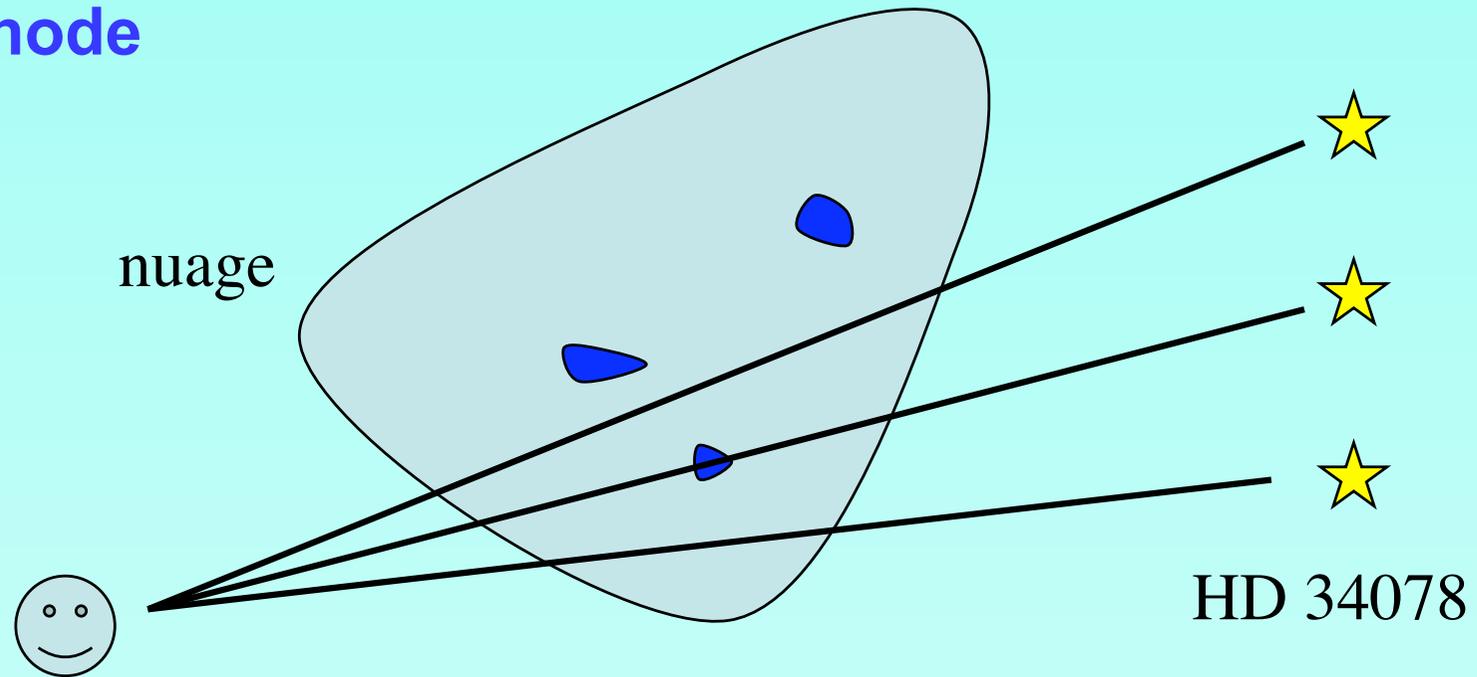
- Première détection de CO en absorption à grand z (2,42)
- T (rayonnement) = $9,1 \pm 0,7$ K
- prédiction $T = 9,31$ K

Srianand et al 2008



Structure d'un nuage interstellaire

Méthode

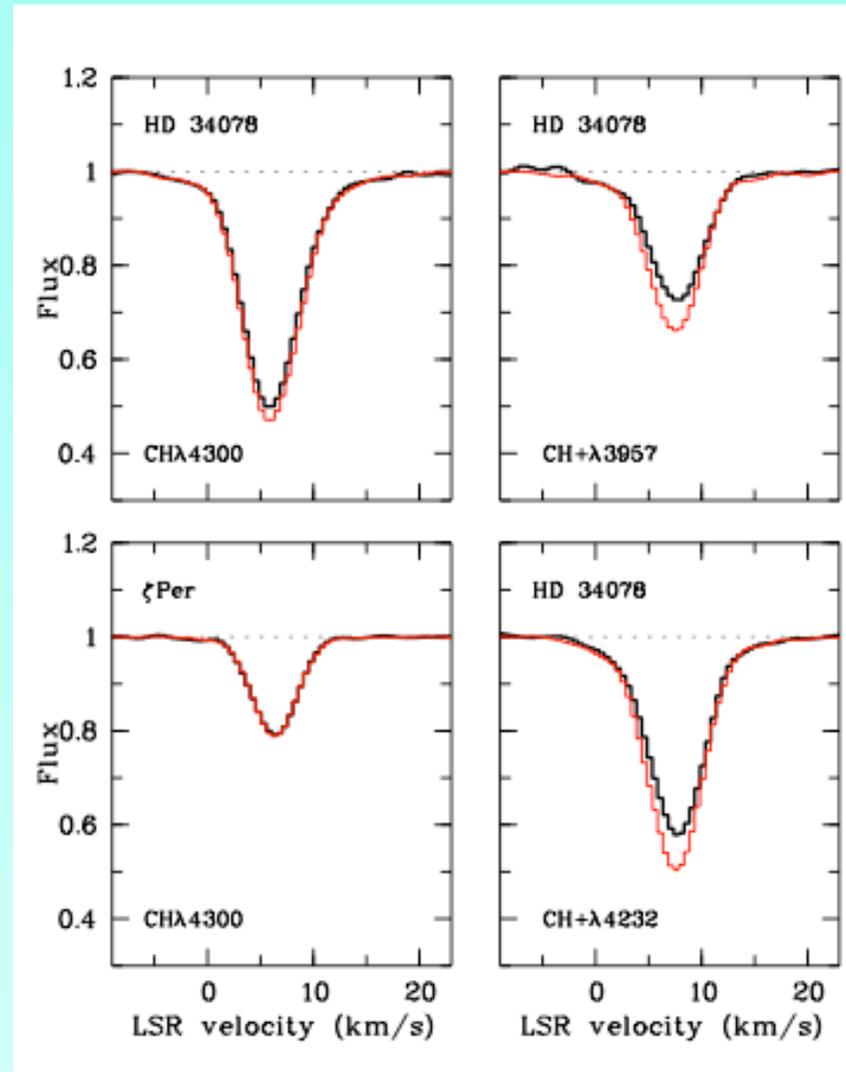


Structure d'un nuage interstellaire

Résultats

- Variations temporelles de CH et de CH⁺ vers HD34078
- stabilité des raies de ζ Per

... mais l'étoile passe près du nuage et le perturbe !



Spectroscopie dans d'autres domaines : rayons X

Amas de galaxies de Persée

$V_r \approx 5000 \text{ km/s}$; $D = 250 \cdot 10^6 \text{ a.l.}$

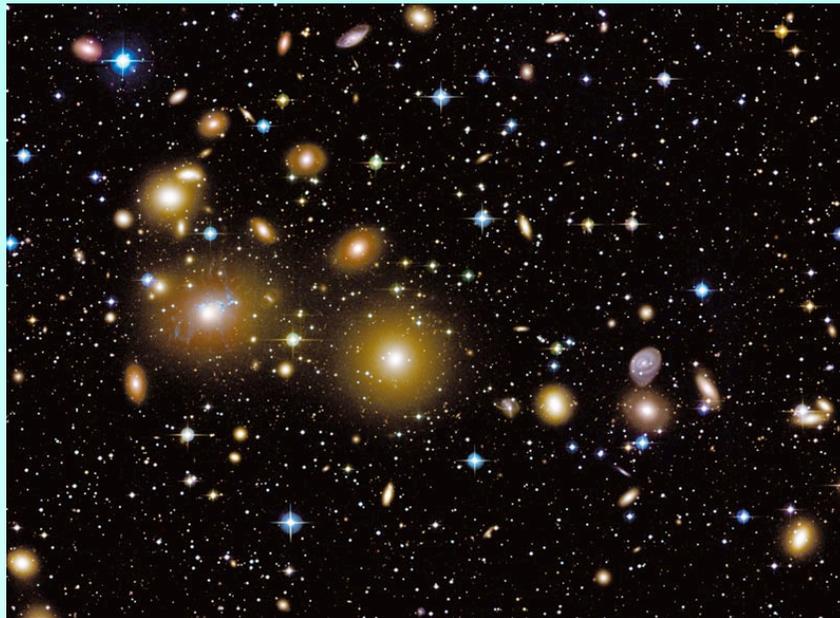
Gaz chaud intra-amas

spectre X $\rightarrow T = 80\,000\,000 \text{ K}$

Raie à 7 keV ($\lambda \approx 1,8 \text{ \AA}$) de Fe^{24+}

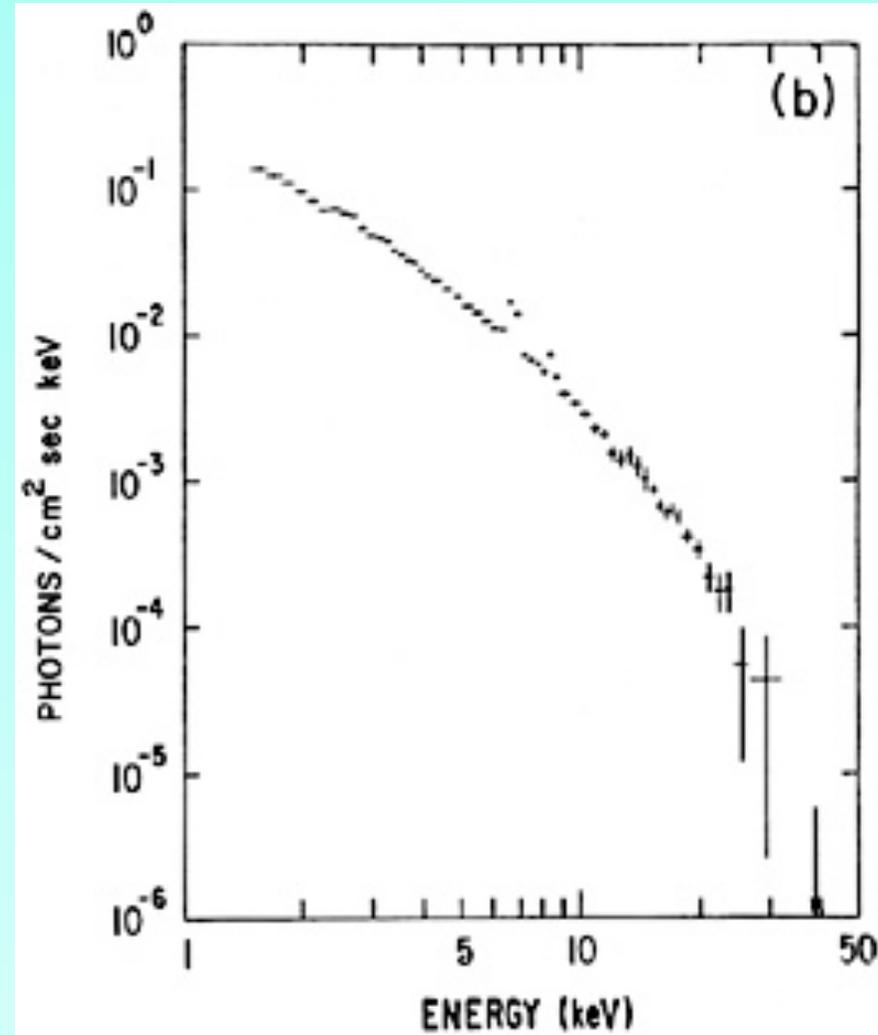
$\rightarrow \text{Fe}/\text{H} = 0,5 (\text{Fe}/\text{H})_\odot$

CFHT/APOD



8 août 2010

Henriksen 1985



La spectroscopie - Fleurance

28

Spectroscopie dans d'autres domaines : ondes mm

« Relevé » spectroscopique vers Sgr B2 (nuage dense proche du C. G.)

$\nu = 80 - 116 \text{ GHz}$, $\lambda \approx 3 \text{ mm}$

Détection de $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$

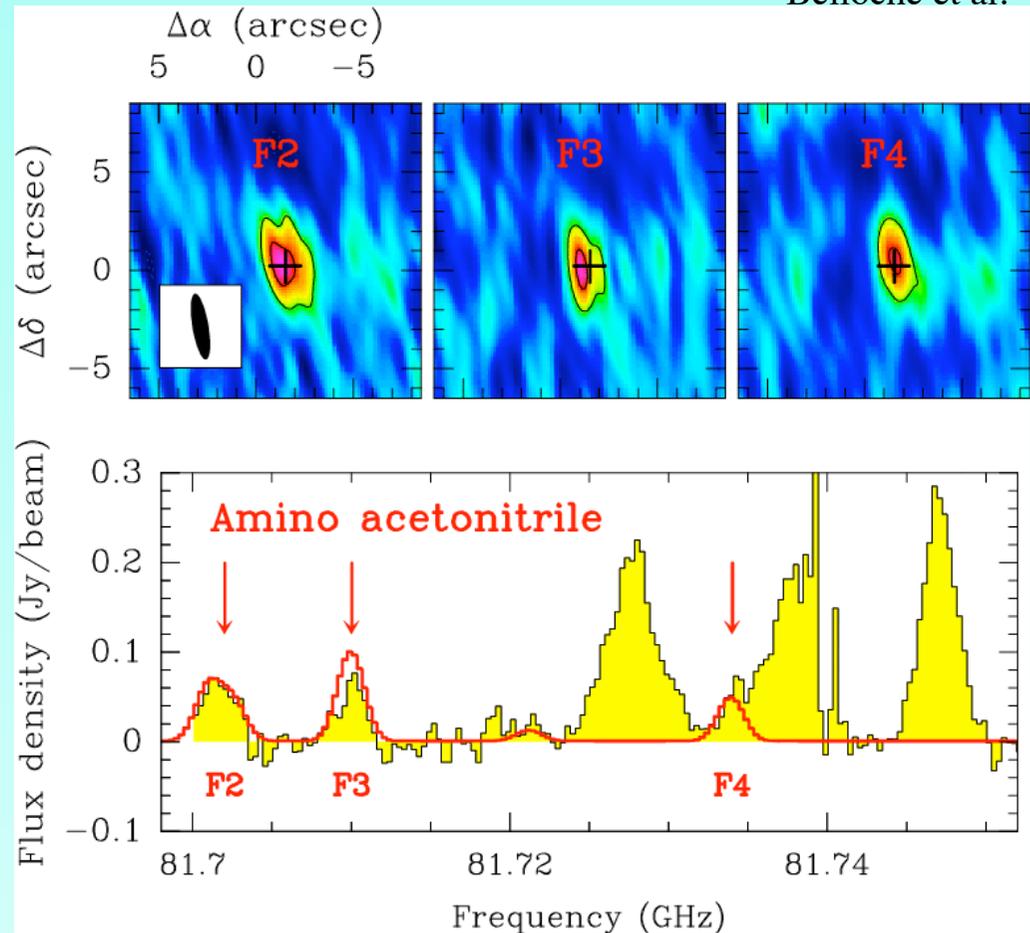
(précurseur de la glycine, $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$)

Raies non identifiées : 40 % !

IRAM, 30m



Belloche et al.



Conclusions

- Innombrables applications

champ magnétique (effet Zeeman) etc

- Autres types de spectroscopie

- multi-objets ou intégrale de champ

- par transformée de Fourier

- Quelques projets actuels

- Herschel, ALMA (domaine mm): formation stellaire

- JWST (infrarouge); 1ères galaxies)

- CODEX (ELT, visible): haute résolution et stabilité:
accélération de l'expansion etc

- Liens étroits avec la physique atomique et moléculaire