

# Récepteurs Spectrométrie

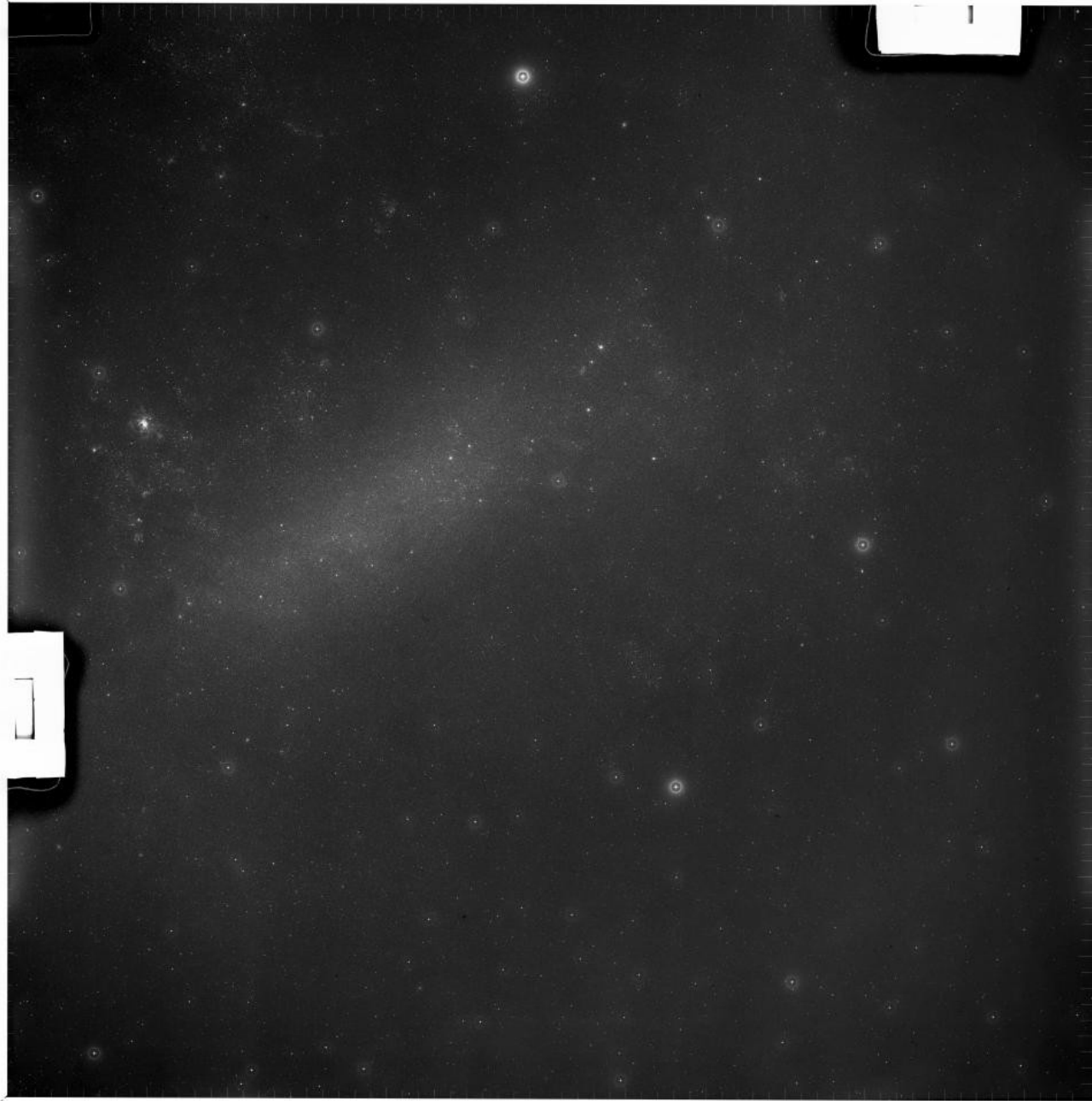
# Récepteurs du rayonnement

- Transformer l'énergie en signal exploitable
- L'observation donne un échantillonnage: spatial, temporel, spectral, en énergie.
- Chaque récepteur possède
  - Une réponse spectrale
  - Seuil de sensibilité, et de saturation

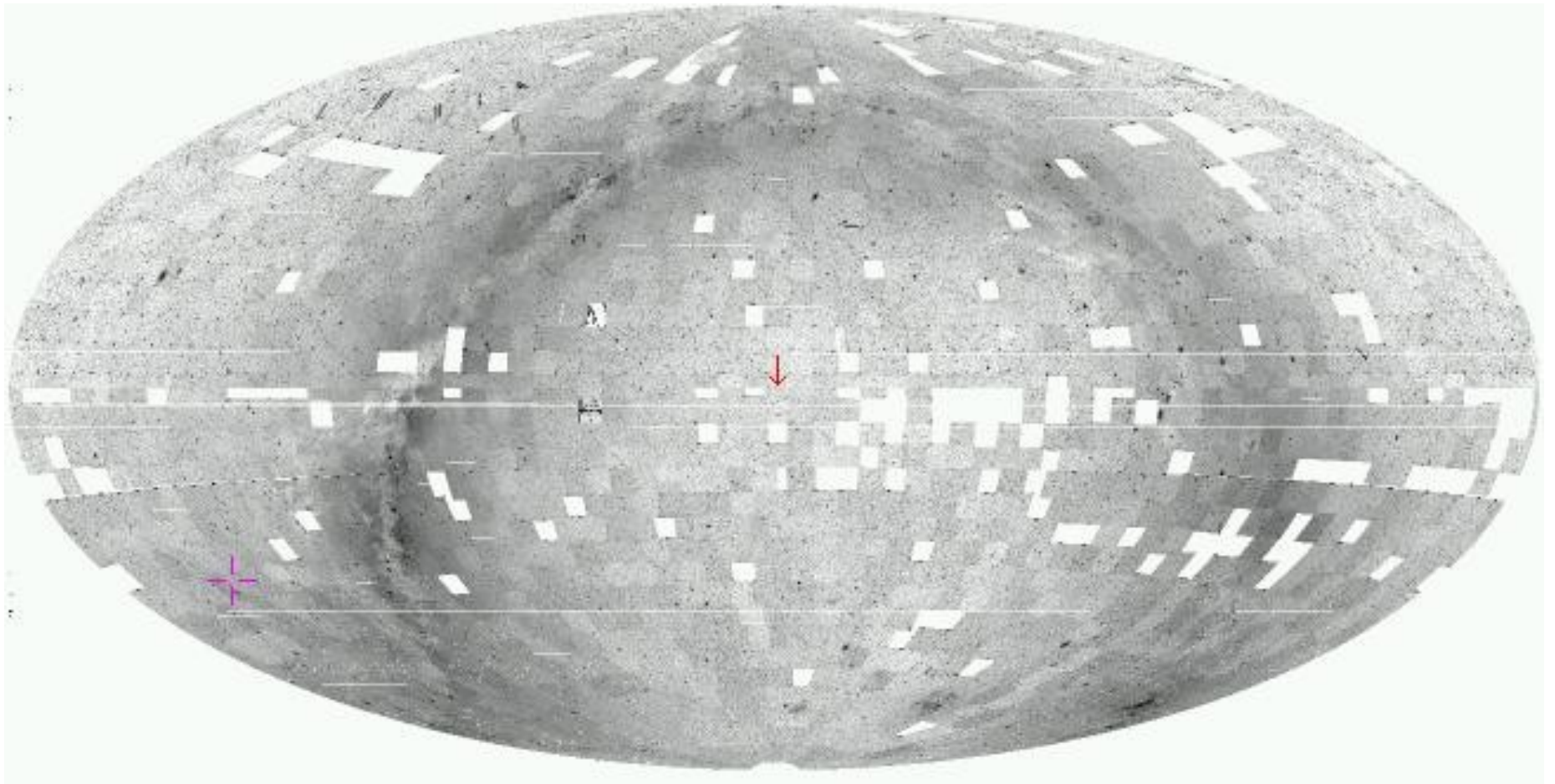
# Récepteurs du rayonnement

- Récepteur d'amplitude (mesure l'amplitude instantanée du champ de l'onde)
- Récepteur quadratique : signal proportionnel à la puissance moyenne de l'onde
- Récepteur monocanal: balayage
- Récepteur multicanal: pixels

# Plaques photographiques



# Plaques photographiques



# Plaques photographiques

- **Avantages:**

- très grande surface (jusque 50cm de côté)
- nombre élevé de pixels ( $\sim 10^{10}$ )
- stockage permanent

ex: plaques de Schmidt, 30x30cm et pixels de quelques microns

- **Inconvénients:**

- non-linéarité (écart à la loi de réciprocity: hypersensibilisation de l'émulsion)
- dynamique assez limitée
- grain, besoin de microdensitométrie pour conversion analogique - numérique

# Plaques photographiques

- **Microdensitométrie:**
  - un pixel transmet une fraction  $I/I_0$
  - la densité de l'émulsion est définie par
$$d = -\log_{10}(I/I_0)$$
- **Relevés complets du ciel:**
  - Palomar all sky survey ( $\delta > -33^\circ$ ) - bleu et rouge
  - ESO ( $\delta < -17^\circ$ )
- **Machines pour numériser**
  - MAMA (France), COSMOS (GB)

# CCD

- Récepteurs à transfert de charge
  - Effet photoélectrique dans les solides
  - Micro-électronique
- Développement très rapide depuis les années 70
- Très bon rendement quantique (CCD silicium: 0.8)
- Grand nombre de pixels
  - MEGACAM: 40 x 2048 x 4612 pixels
  - PanSTARRS:  $(8 \times 8) \times (8 \times 8) \times (600 \times 600) = 1.4 \text{ Gpix}$

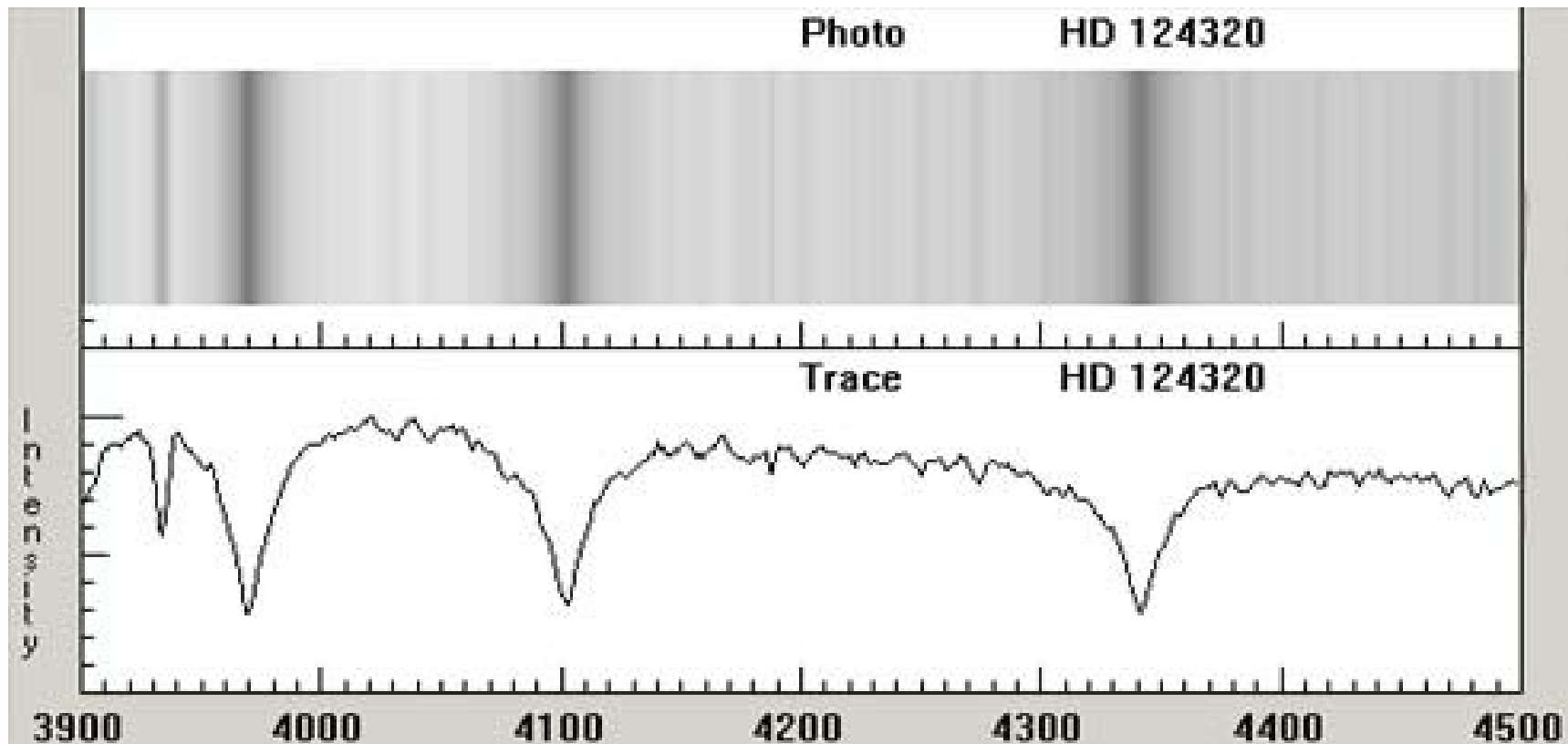
# Autres dispositifs

- Photomultiplicateurs: tube évacué contenant une série d'électrodes
- Caméra électronique
- Caméra à comptage de photons
- Photodiodes à avalanche
- Bolomètres
- Scintillateurs

# Analyse spectrale

# Les spectres

- Rayonnement reçu d'une source:  $I(\nu, \Theta)$
- Spectre de la source = dépendance en fréquence de  $I(\nu, \Theta)$



# Formation des spectres

- Interaction matière – rayonnement:

$$\nu_0 = (E_2 - E_1)/h$$

- Le rayonnement  $I(\nu)$  résulte de l'addition macroscopique d'un grand nombre d'interactions élémentaires sur la ligne de visée (au sein de la source ou sur le trajet source-observateur): émissions, absorptions, diffusions...

# Equation de transfert

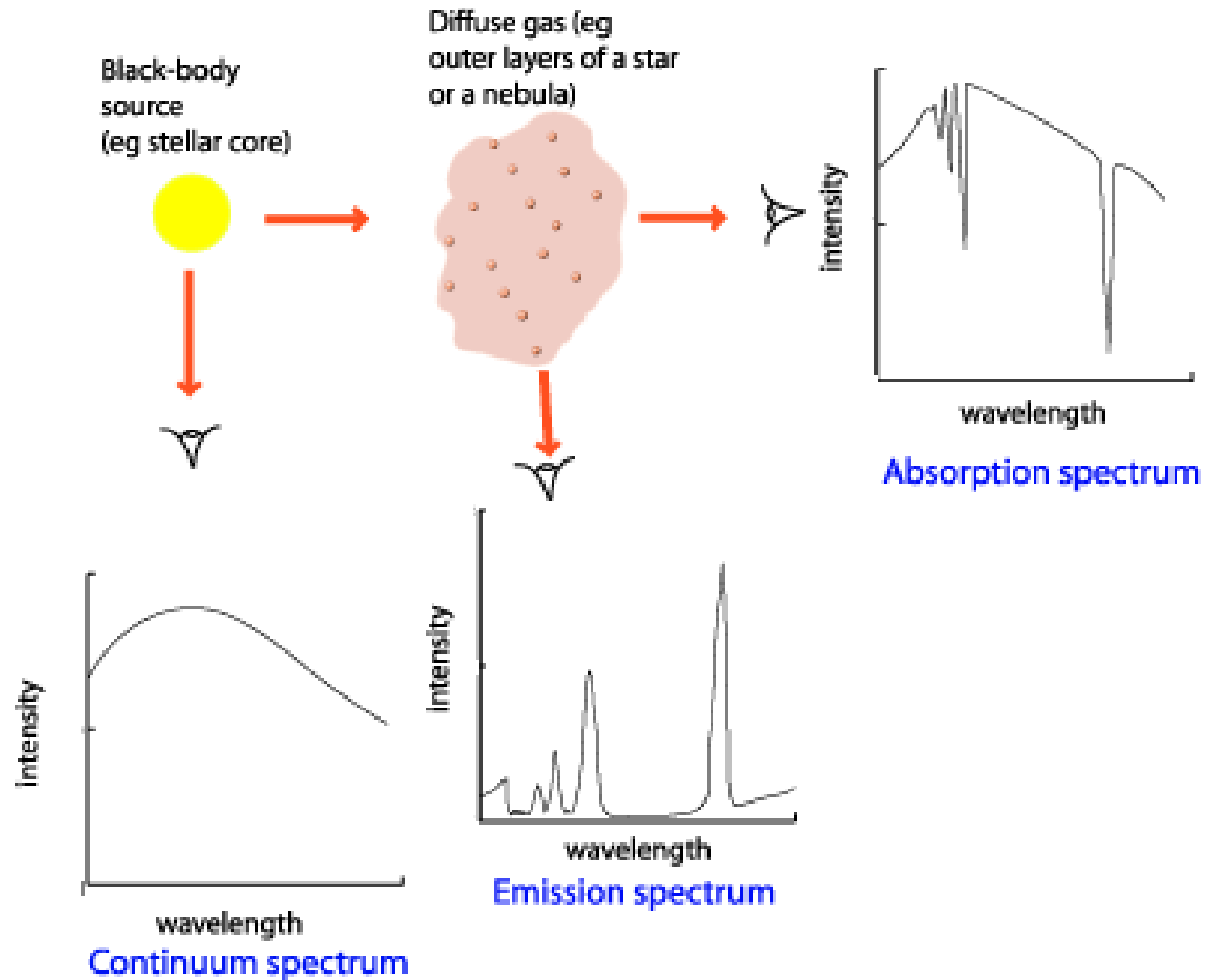
$$I(\nu) = \int_0^\infty S(\nu, x) e^{-\tau(\nu, x)} dx$$

- $S(\nu, x)$  est la fonction source, caractérisant l'émission au point d'abscisse  $x$ , mesurée le long de la ligne de visée et à la fréquence  $\nu$
- $\tau(\nu, x)$  est la profondeur optique entre 0 et  $x$  :  $\tau(\nu, x) = \int_0^x \kappa(\nu, \xi) d\xi$
- $\kappa(\nu, \xi)$  est le coefficient local d'absorption du rayonnement

# Equation de transfert

- L'inversion de l'équation de transfert est un problème fondamental:
  - déduire  $S$  du spectre mesuré
- Tâche complexe, car processus variés et milieux (étoiles, gaz, nuages moléculaires) très divers
- Spectre continu:  $I(\nu)$  varie lentement avec  $\nu$  (corps noir, continu solaire)
- Spectre de raies:  $I(\nu)$  varie sur  $\Delta\nu \ll \nu$

# Exemples



Lois de Kirchhof !



# Quelques définitions

- Continu
- Raie : centre, flanc, aile
- Largeur à mi-hauteur
- Largeur équivalente
- Intensité, intensité relative

# Principales transitions

- Structure hyperfine, couplage spin-orbite : radio (ex: raie 21cm de H)
- Rotation moléculaire: mm, IR
- Rotation-vibration: IR
- Structure fine atomique: IR
- Transitions électroniques: UV, vis, IR
- Transitions nucléaires: X
- Annihilations: Gamma (ex: 511keV)

# Transitions électroniques

- Atome hydrogénoïde: formule de Rydberg ( $R=109\,737.31\text{cm}^{-1}$ )

$$\nu_0 = 2cRZ^2(m-n)/n^3$$

- Pour H, avec  $n, m < 5$  et  $Z=1$ ,  $h\nu \sim 10 - 0.1\text{eV}$ , soit  $T = h\nu/k \sim 10^3 - 10^5\text{K}$ 
  - raie Lyman  $\alpha$  ( $\lambda=121.6\text{nm}$ )
  - Balmer  $H\alpha$  ( $\lambda=656.3\text{nm}$ )

# Analyse d'un spectre

- Principale application: identification d'un élément (atome, molécule, ion) dans le milieu émetteur
  - découverte de l'Hélium (Lockyer, 1868)
- Mesure des champs de vitesse macroscopiques locaux
- Décalages plus faibles: gravitationnels, magnétiques

# Position de la raie

- La position d'une raie,  $\nu_0$ , est reliée à la transition responsable, et donc à un constituant donné.
- Décalage possible:
  - effet Doppler : émetteur en mouvement par rapport à l'observateur
    - non-relativiste ( $v \ll c$ )
    - relativiste
    - redshift:  $z = \Delta \nu / \nu$

# Position de la raie

- Décalage possible:

- effet Zeeman: raie produite dans un milieu magnétisé

- sous-niveaux: plusieurs composantes de fréquence et polarisation différente

- cas simple: 3 composantes ( $\pi$ )  $\nu_0$ , et ( $\sigma$ )  $\nu_0 \pm \Delta \nu$

$$\Delta \nu = eB/(4\pi m) = 1.4 \cdot 10^{10} B$$

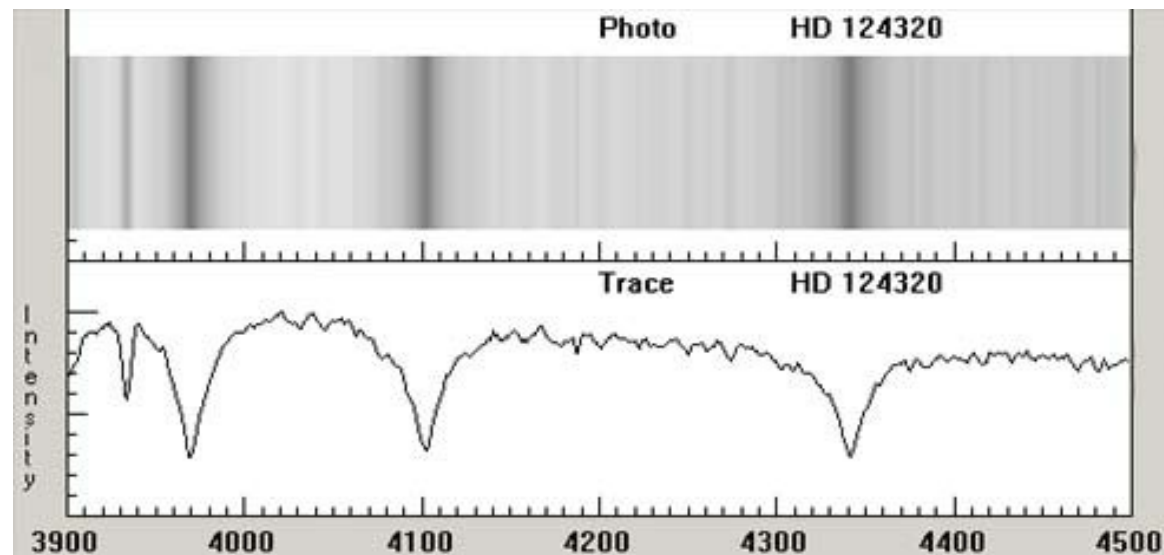
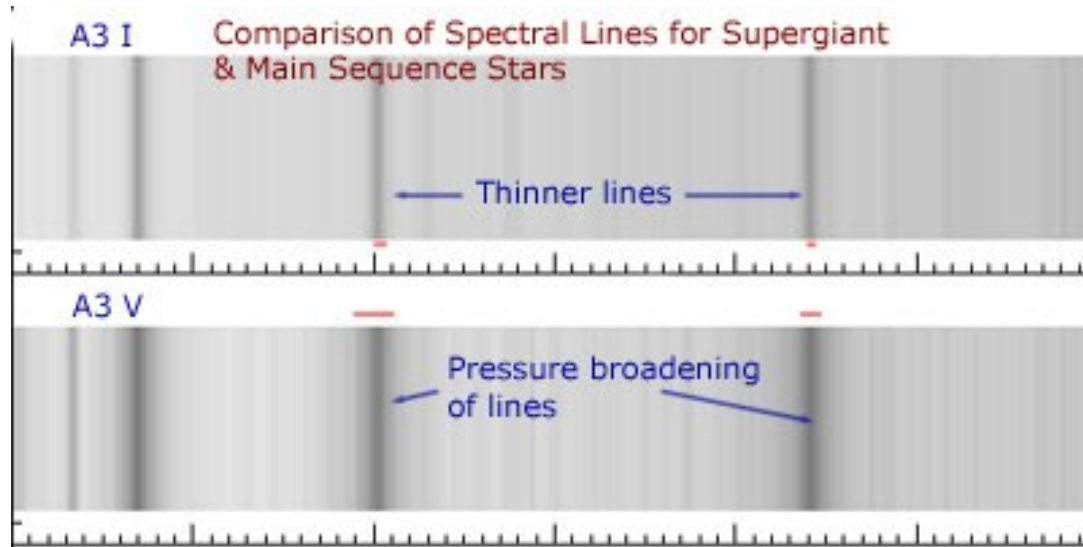
- effet Einstein: décalage vers le rouge lorsqu'un photon quitte un corps massif

$$\Delta \nu / \nu = GM/Rc^2 \text{ en champ faible}$$

# Autre informations

- Intensité de la raie
  - fonction du nombre  $N$  de noyaux, atomes, ions, grains, ... responsables de la transition
  - détermination de l'**abondance** d'un élément (métallicité pour les "métaux")
- Profil de la raie  $\phi(\nu)$ 
  - élargissement naturel
  - élargissement Doppler : agitation thermique maxwellienne à une température  $T$
  - profil de Lorentz: pression suffisante pour que les collisions fournissent un amortissement responsable d'un élargissement

# Examples



# Spectromètre

- Résolution spectrale: capacité du spectro à distinguer la variation de  $I$  avec la fréquence  $I(\nu, \Theta)$
- $R = \nu_0 / \Delta \nu_p$
- Capacité à séparer deux raies distantes de  $\Delta \nu_p$
- Jusque  $R = 10^7$
- Élément spectral: une mesure, échantillonnée sur le pas  $\Delta \nu_p$

# Modes d'un spectro

- Spectromètre séquentiel: analyse séquentielle dans le temps des éléments spectraux successifs sur une seule image
- Spectromètre multicanaux: élément dispersif et récepteur multi-éléments (pas de balayage spectral: gain de temps)
- Spectromètre imageur



Optical slicing of the on-sky image



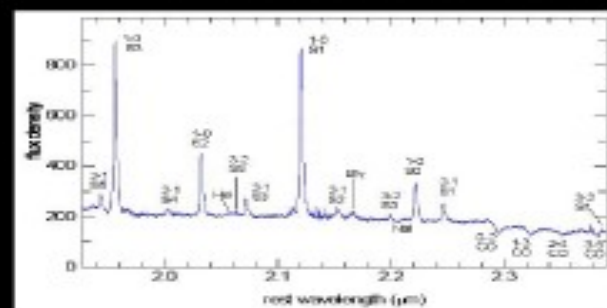
Spectral dispersion of the sliced image



Computer reconstruction of the 3D data cube



Spectrum of each 2D pixel



Computer reconstructed image



# The Principle of Integrated Field Spectroscopy (IFS)

# Diagramme HR

