

INTRODUCTION À L'ASTROPHYSIQUE

LUMIÈRE



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

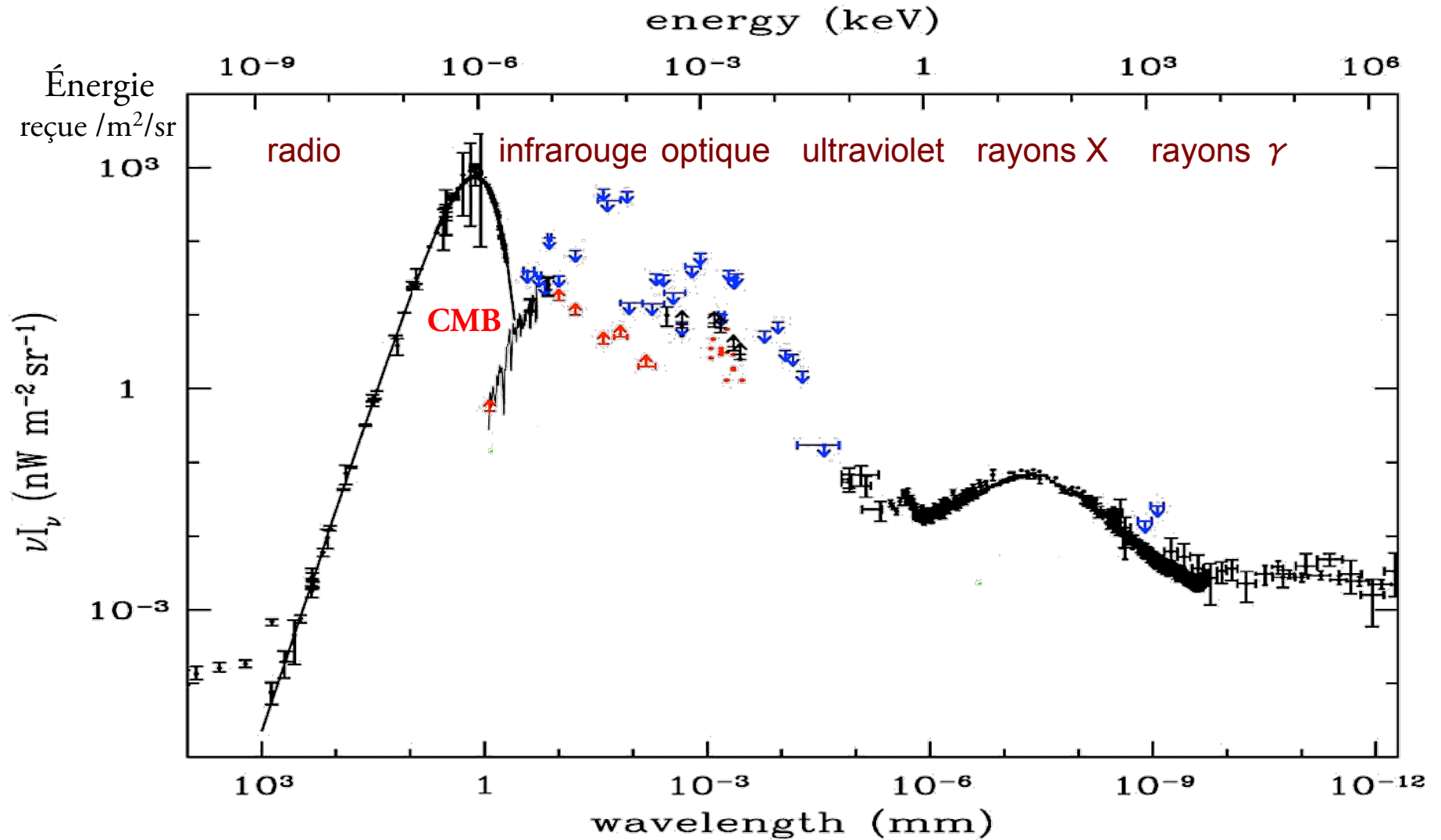
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

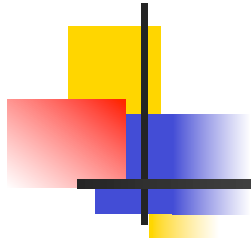


LA LUMIÈRE DES ÉTOILES DE L'UNIVERS



Les sources de lumière dans l'univers



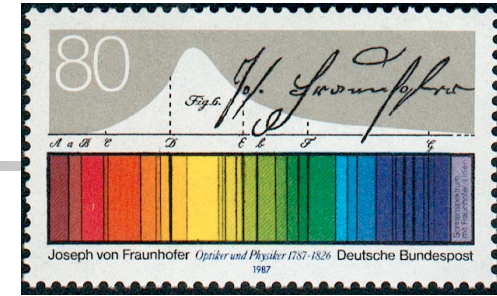


SPECTROSCOPIE

Fraunhofer

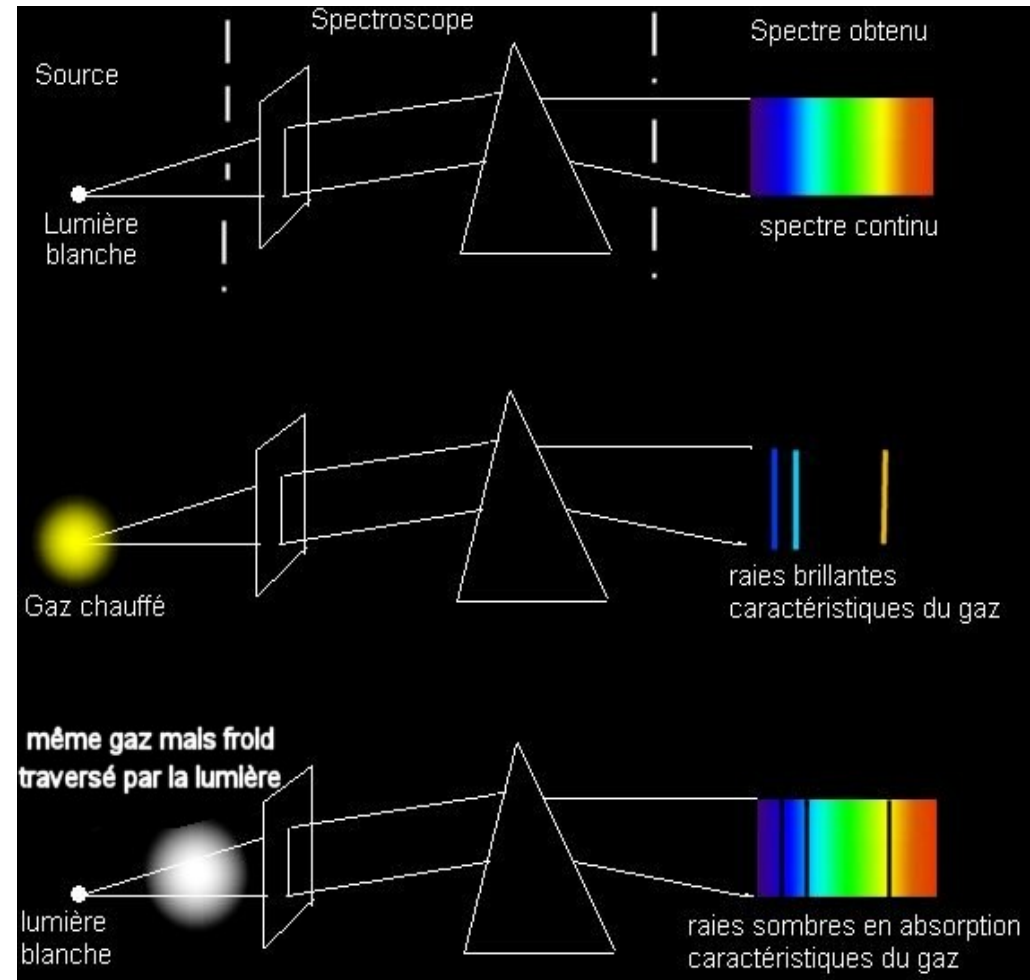
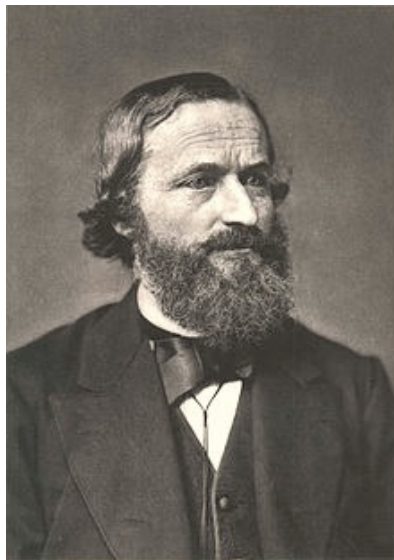
- Joseph Fraunhofer (1787-1826)

- Découvre en 1814 les raies du spectre solaire (parallèlement à Wollaston)
- Invente le premier spectroscopie en 1815
- Étudie la diffraction par des réseaux

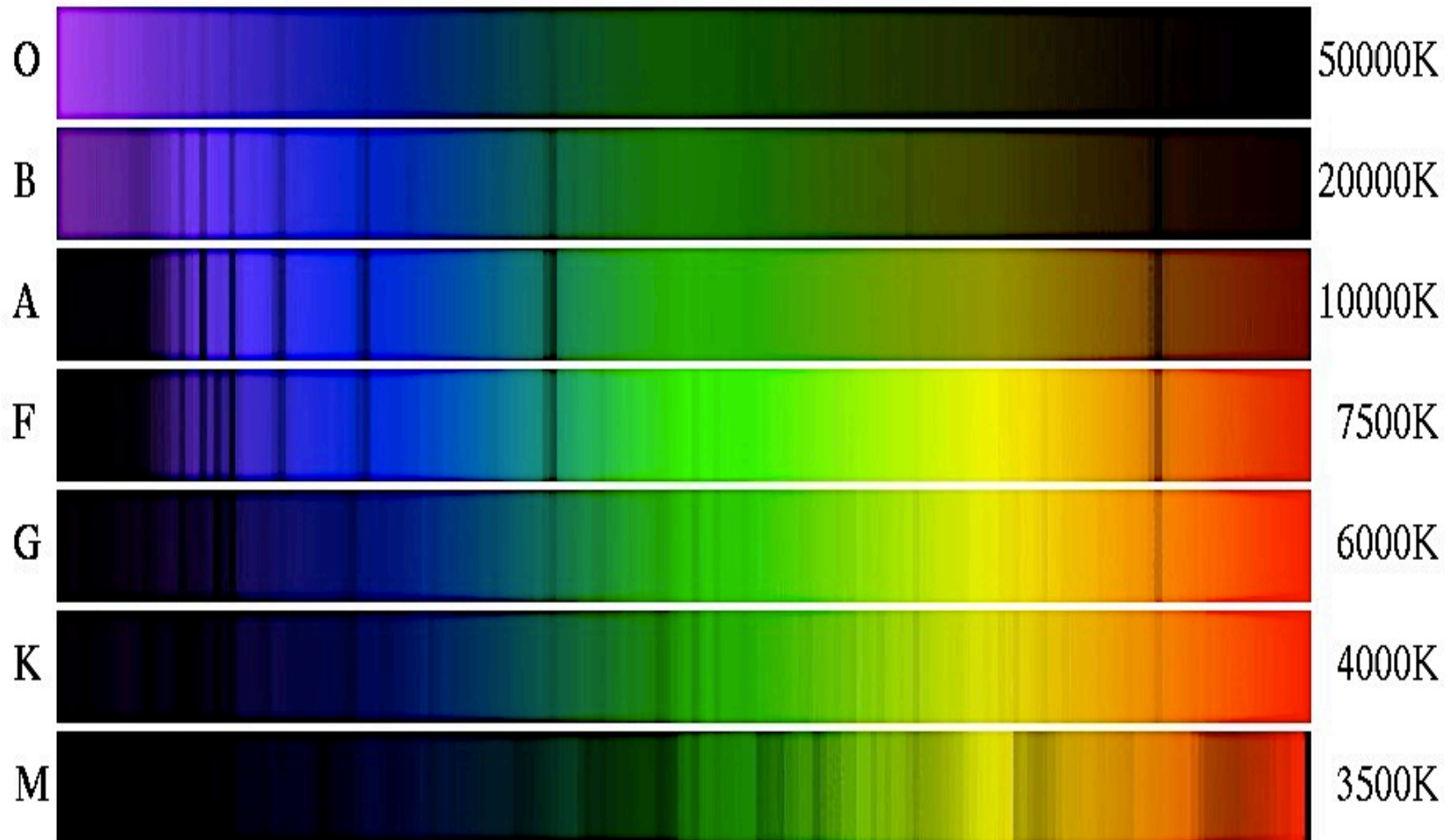


Kirchhoff

- Gustav Kirchhoff (1824-1887)
 - Les 3 lois de la spectroscopie
 - Objet chaud → spectre continu
 - Gaz excité → spectre de raies
 - Objet froid → raies en absorption



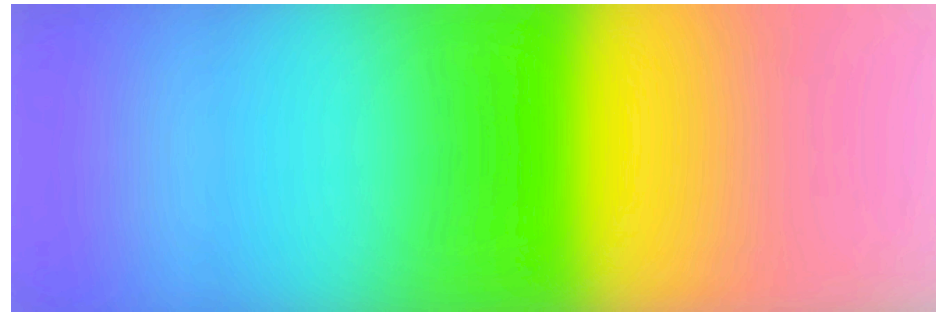
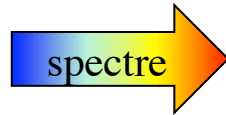
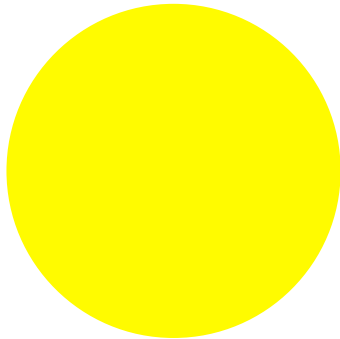
Couleurs et spectres des étoiles



Spectres d'étoiles

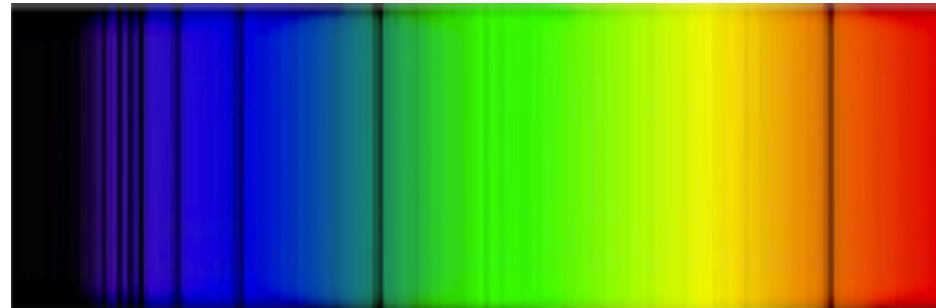
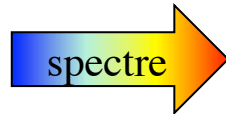
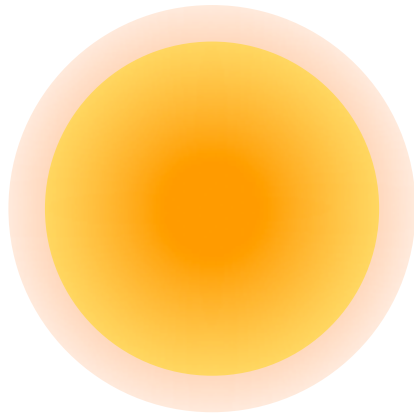
- Spectres continus

→ les étoiles sont chaudes

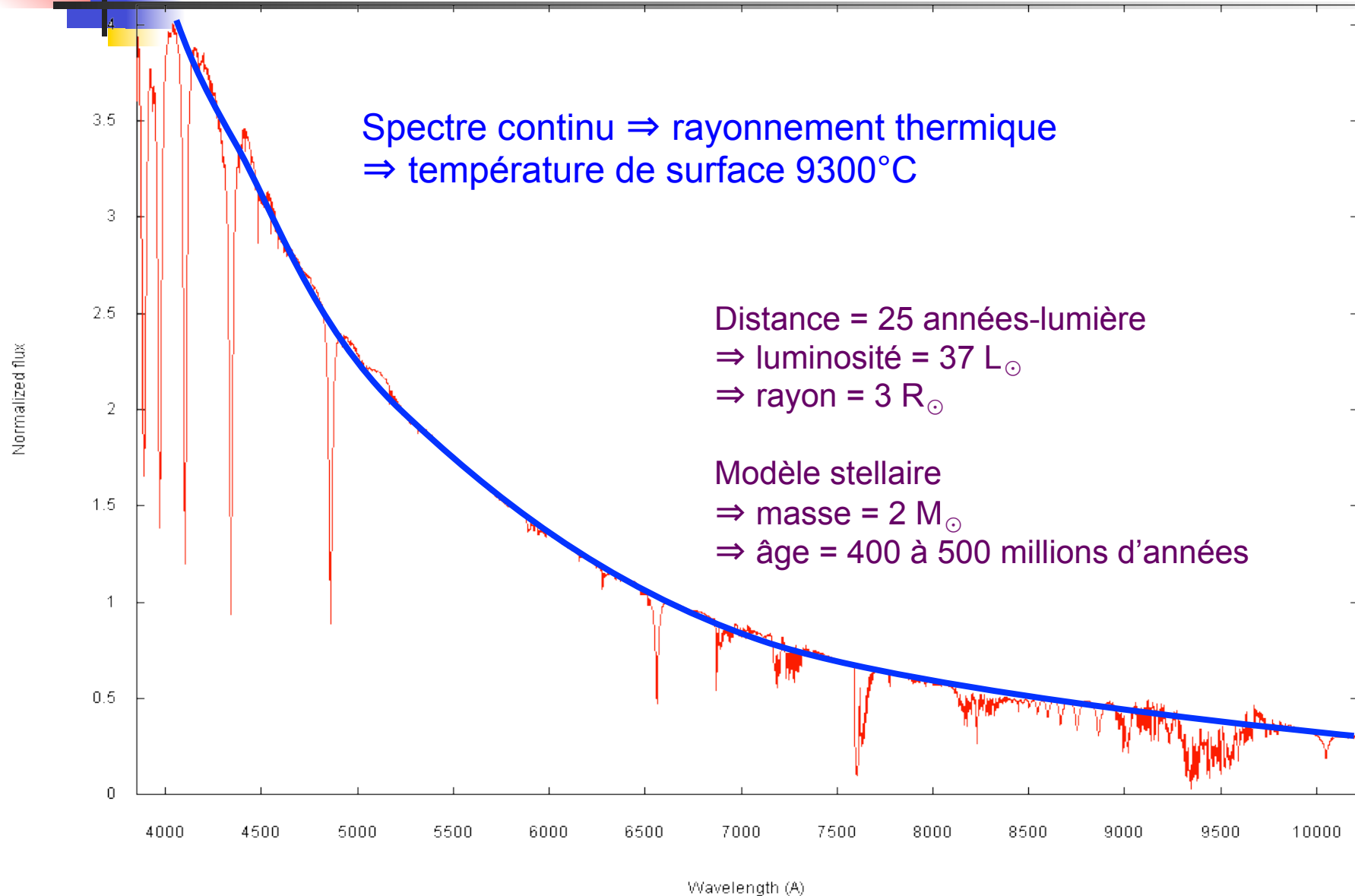


- Barrés par des raies noires

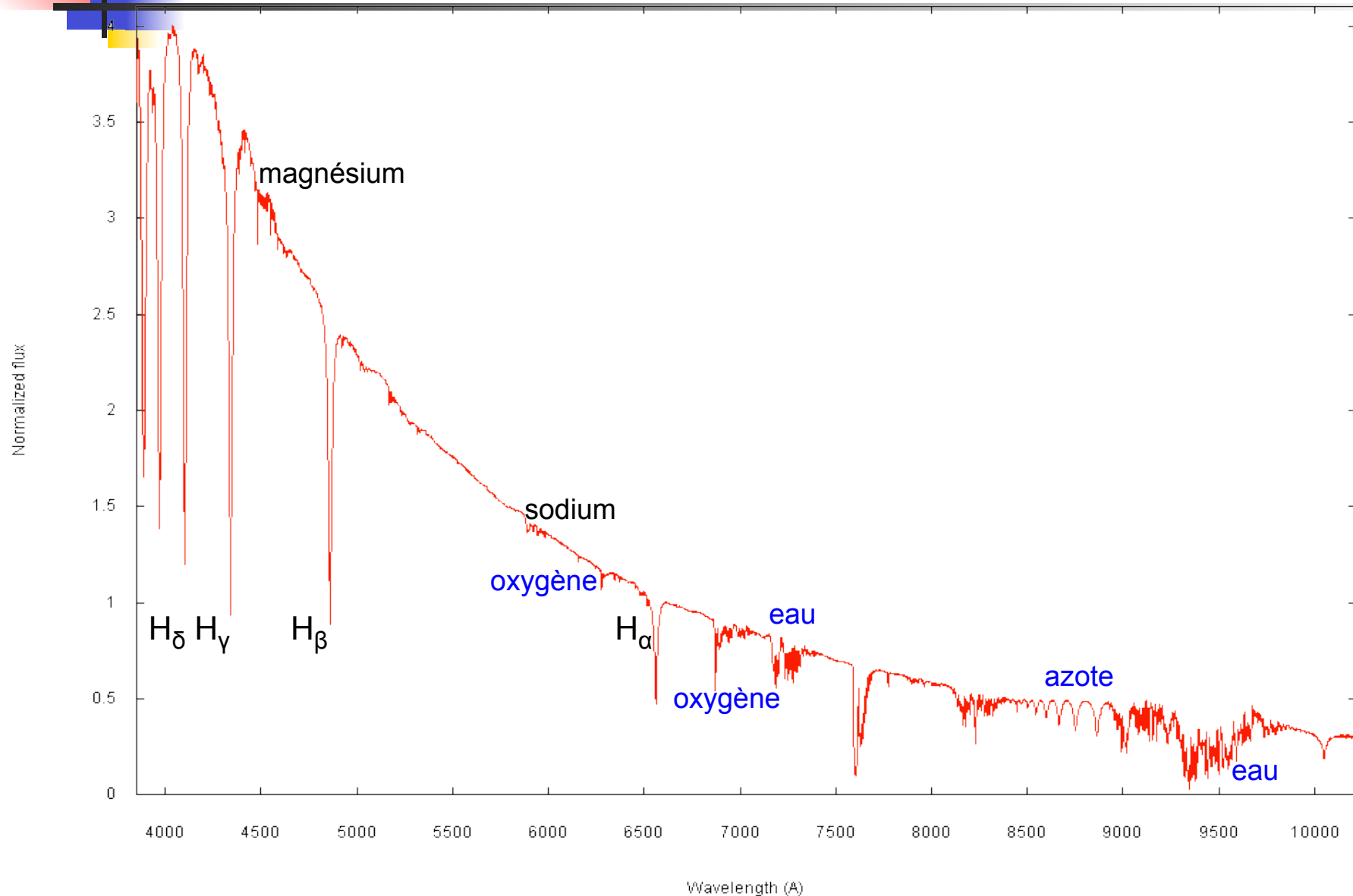
→ composition chimique de leur **enveloppe**



Spectre d'une étoile : Véga (α Lyrae)



Spectre d'une étoile : Véga (α Lyrae)



Transparence de l'atmosphère

- L'atmosphère terrestre absorbe presque tous les rayonnements électromagnétiques

- Deux « fenêtres » seulement :

- radio
- optique

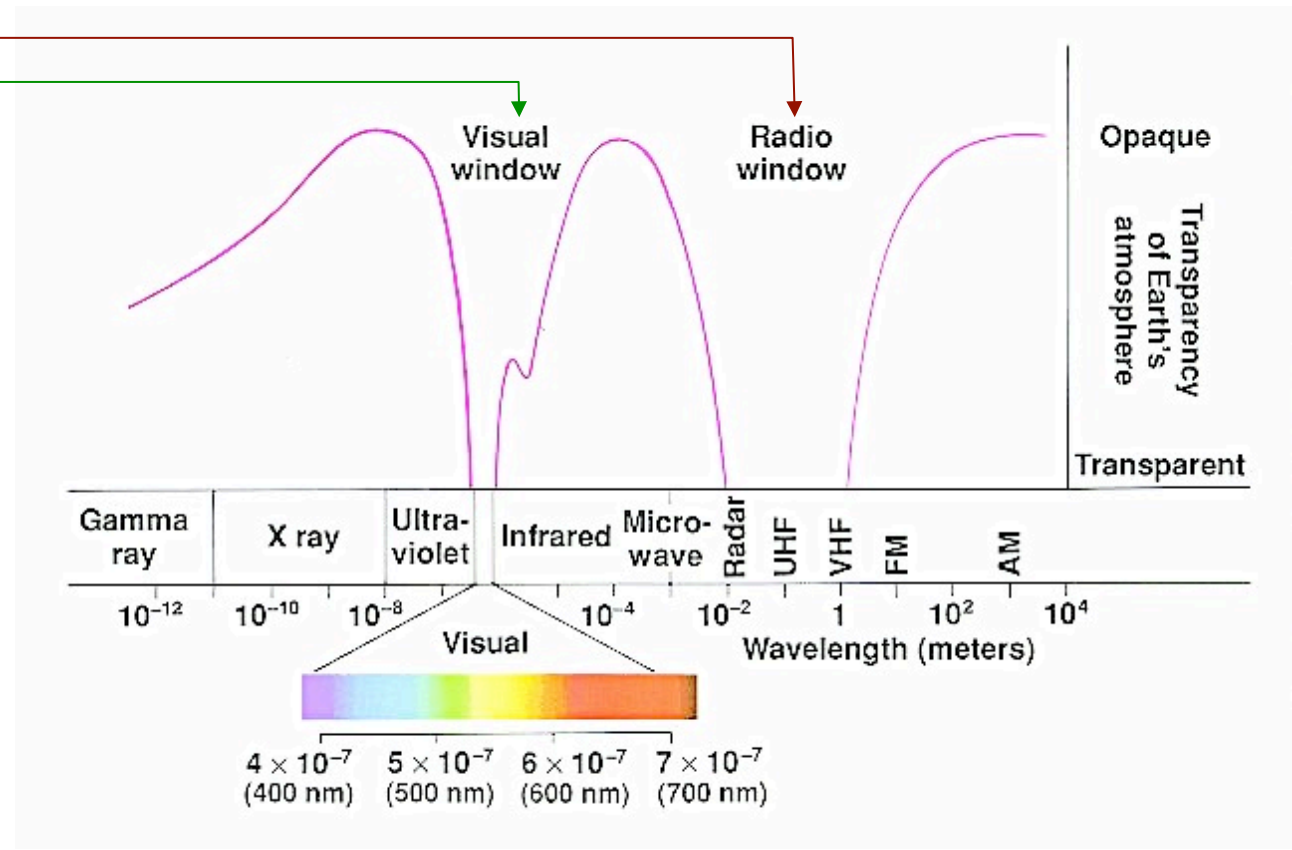
- Causes

- l'air
- l'eau

- observatoires

- en altitude
- dans le désert

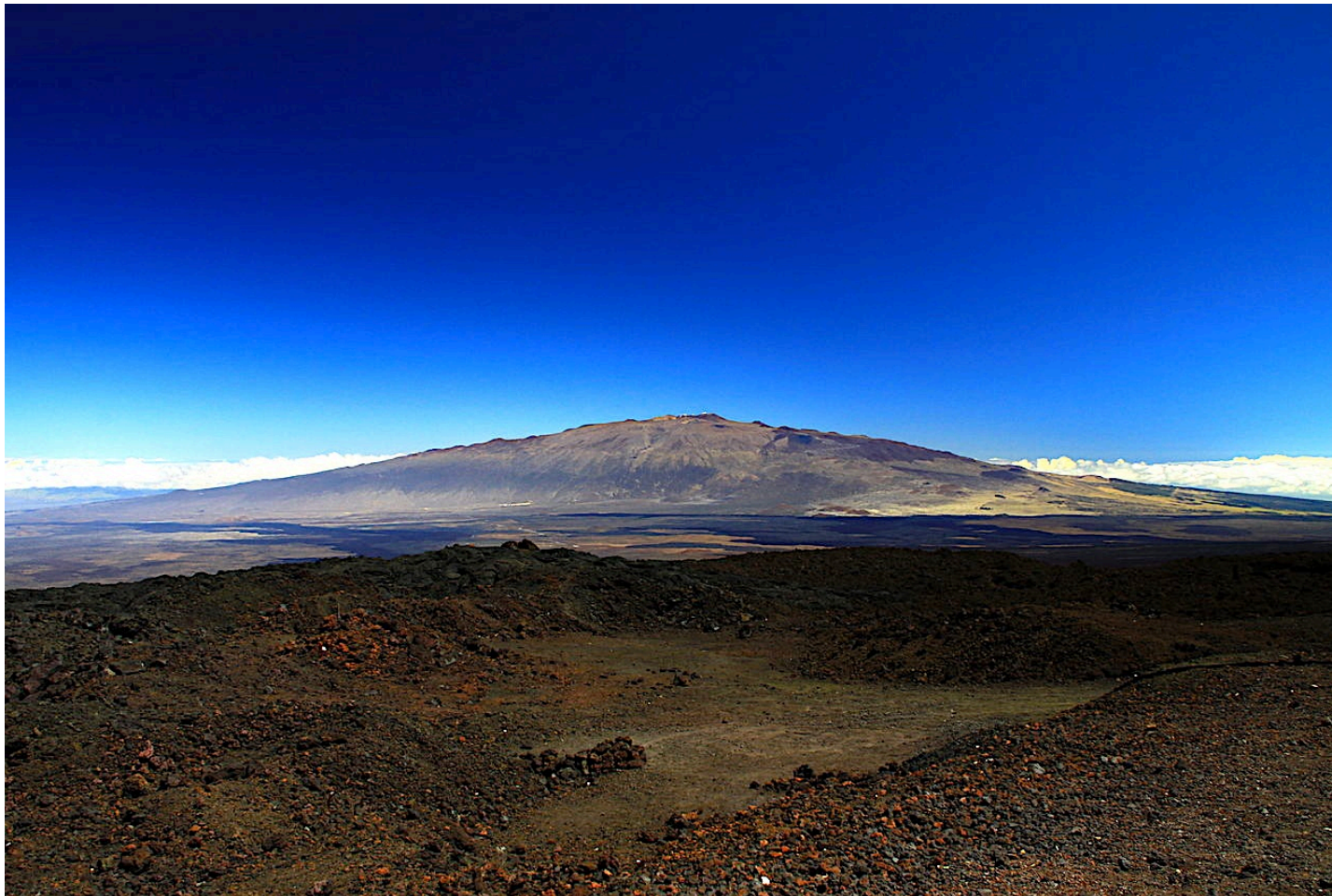
- satellites !





L'observatoire du Mauna Kea à Hawaï

- Altitude 4200 m



Les VLT au Cerro Paranal

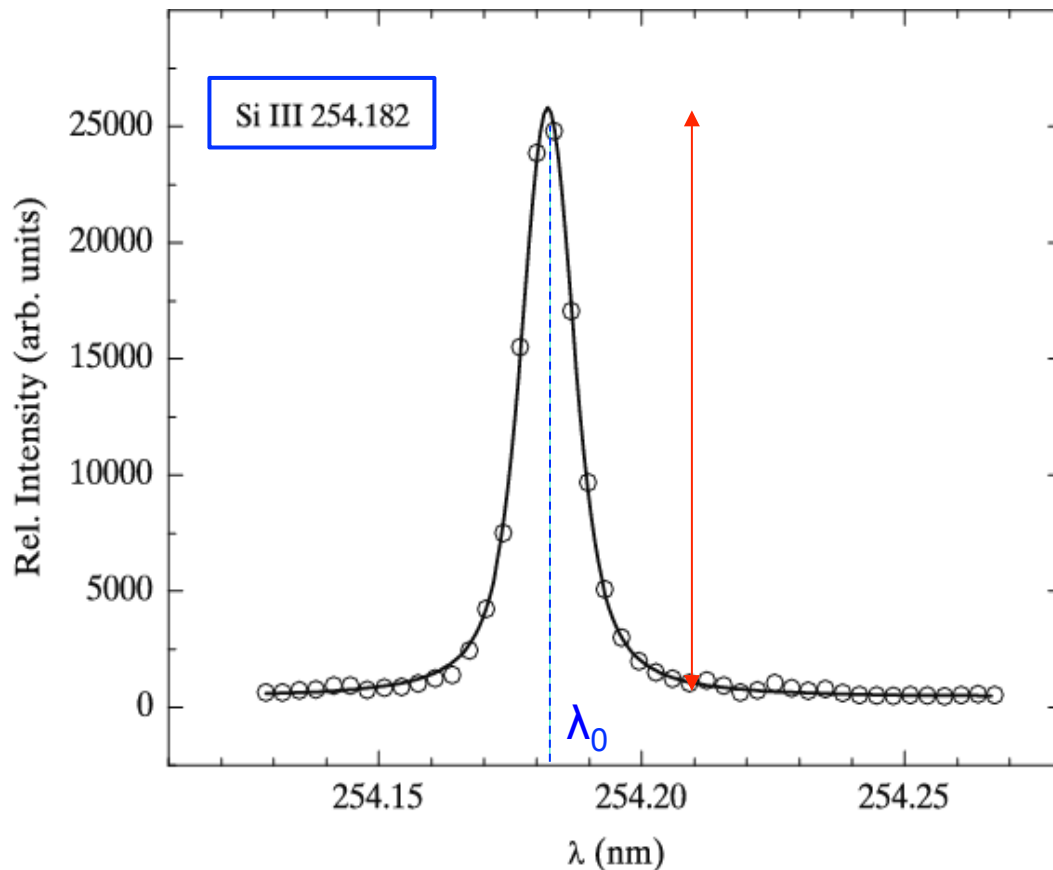
- Altitude 2600 m, désert d'Atacama → site le plus sec du monde après le pôle Sud



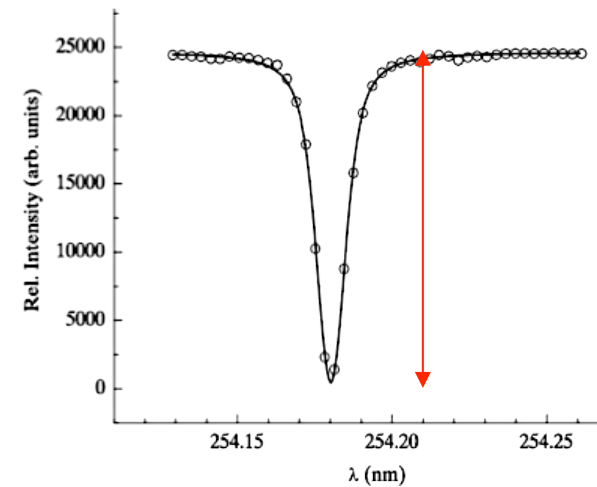
Une raie spectrale très bavarde

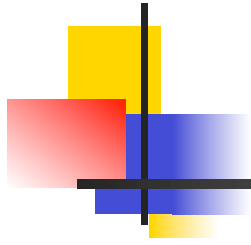
Prenons une raie banale

- sa position λ_0 indique de quel atome ou molécule il s'agit → ici du **silicium**



- sa hauteur \updownarrow indique la **quantité** d'atomes émetteurs
- en absorption, la profondeur \updownarrow indique la quantité d'atomes absorbeurs



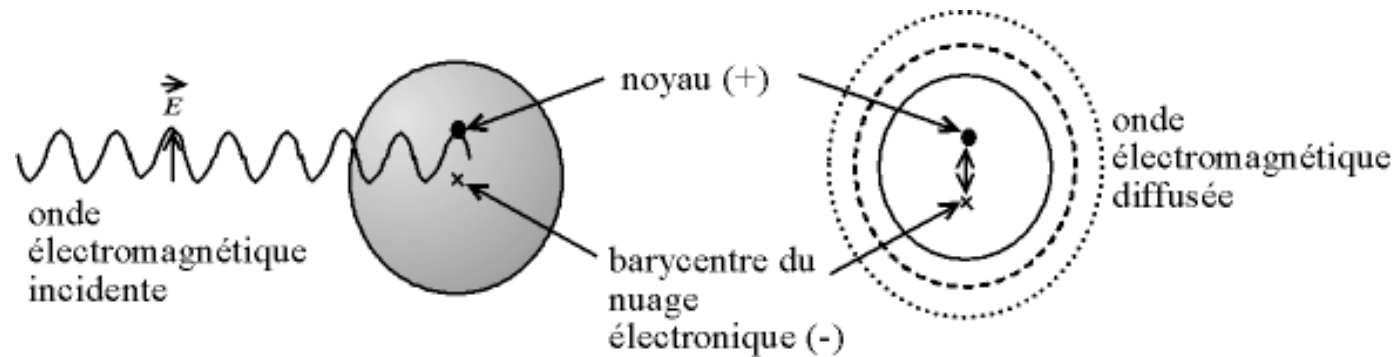


TRANSMISSION

Transmission : une succession absorption - réémission

■ Diffusion Rayleigh

- Une onde électromagnétique arrivant sur un atome de matière déforme son nuage électronique (d'autant plus que la longueur d'onde est petite)
- Le dipôle ainsi créé réémet à son tour une onde électromagnétique
- L'émission se fait *préférentiellement* selon l'axe d'arrivée



■ Résultat net:

- L'onde transmise a la même direction et une intensité un peu plus faible que l'onde incidente
- Mais elle a été ralentie \Leftrightarrow vitesse plus faible que dans le vide \Leftrightarrow indice $n > 1$
- Une partie de l'onde incidente est diffusée dans toutes les directions, d'autant plus que sa longueur d'onde est courte

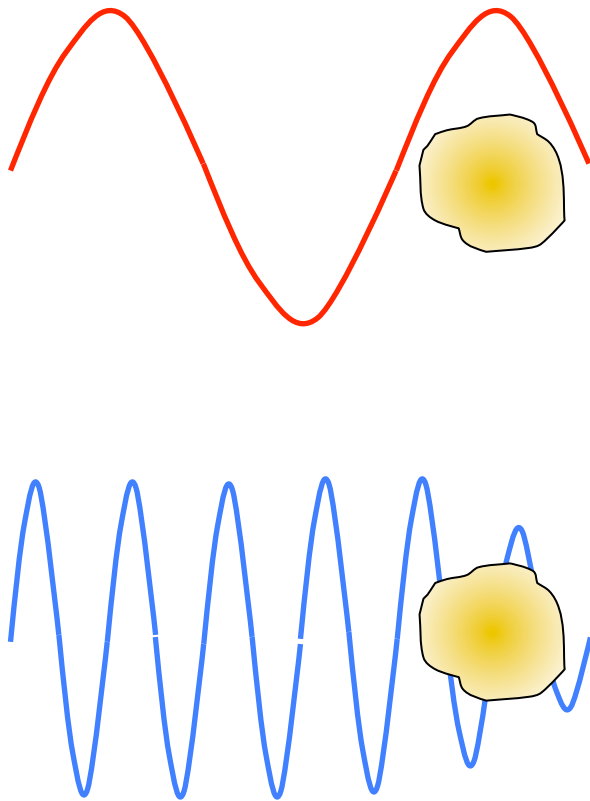
Diffusion de la lumière

- Diffusion Rayleigh
 - Diffusion par des particules beaucoup plus petites que la longueur d'onde λ
 - Intensité diffusée en $1/\lambda^4$
 - Bleu 10 fois plus diffusé que le rouge
 - Bleu du ciel
- Diffusion de Mie
 - Particule de taille comparable à la longueur d'onde
 - Intensité diffusée \sim constante (avec des résonances)
 - Gris-blanc des nuages

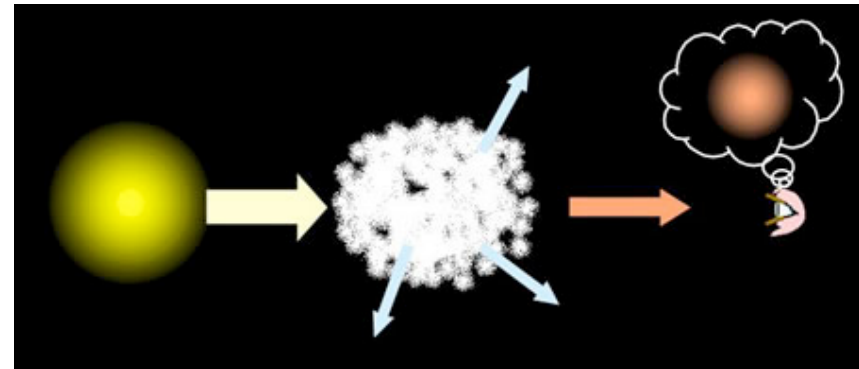


Absorption dépendant de la longueur d'onde

- Petit grain de poussière interstellaire



- Un grain a une taille de l'ordre de $1 \mu\text{m}$
 - Lumière bleue $0,4 \mu\text{m}$
 - Lumière rouge $0,7 \mu\text{m}$
- Une source paraît plus rouge derrière un nuage de poussière



- Les nuages sont plus transparents en IR ou en radio

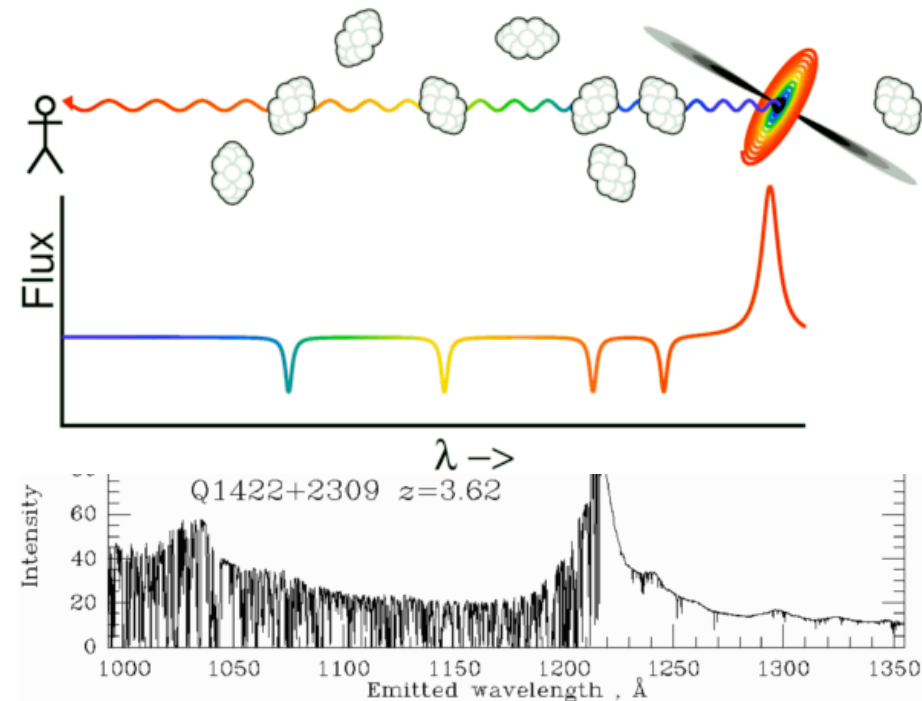
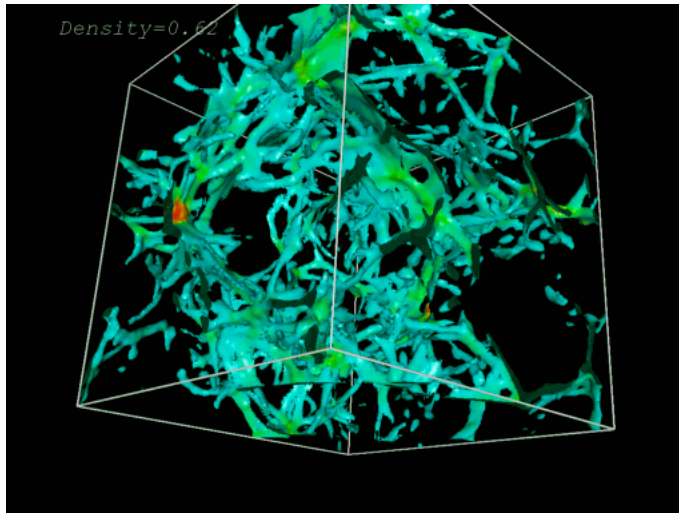
Le nuage noir Barnard 86 et l'amas ouvert NGC 6520



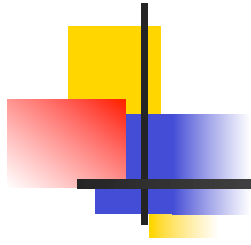
Informations sur les milieux traversés

■ Forêt Lyman alpha

- Un quasar lointain
- Donc très décalé vers le rouge
- Des nuages absorbants
- Moins décalés
- Une raie d'absorption pour chacun
- Position et densité



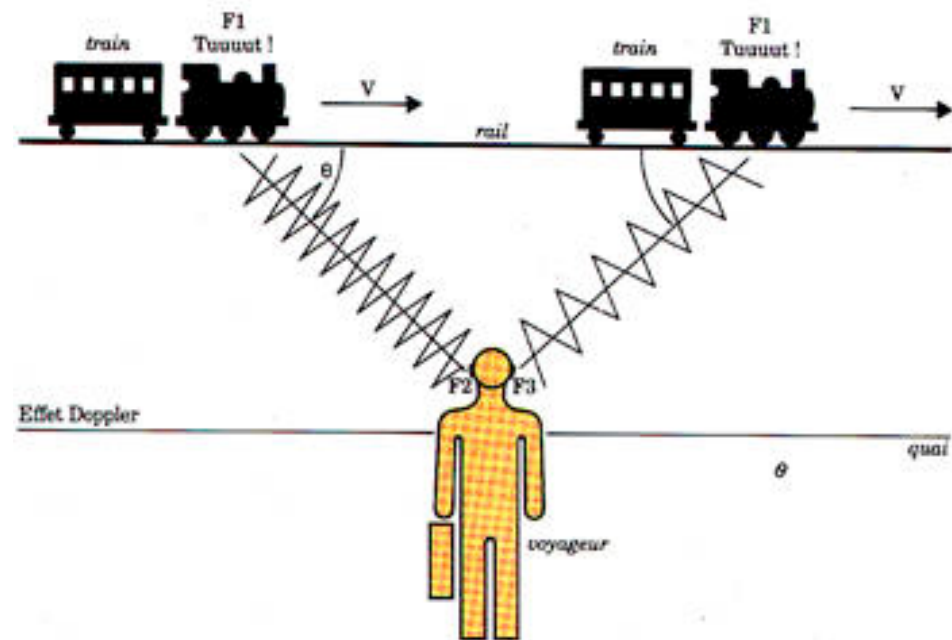
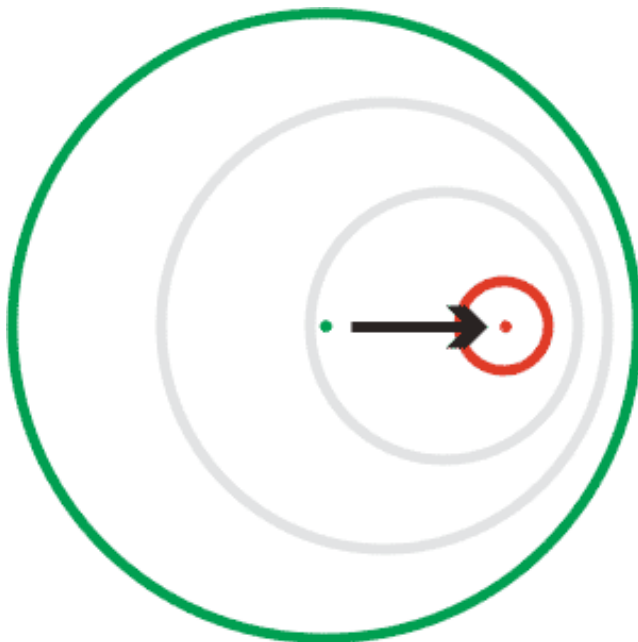
- Permet d'établir des cartes de la répartition de la matière à très grande échelle



DOPPLER ET ZEEEMAN

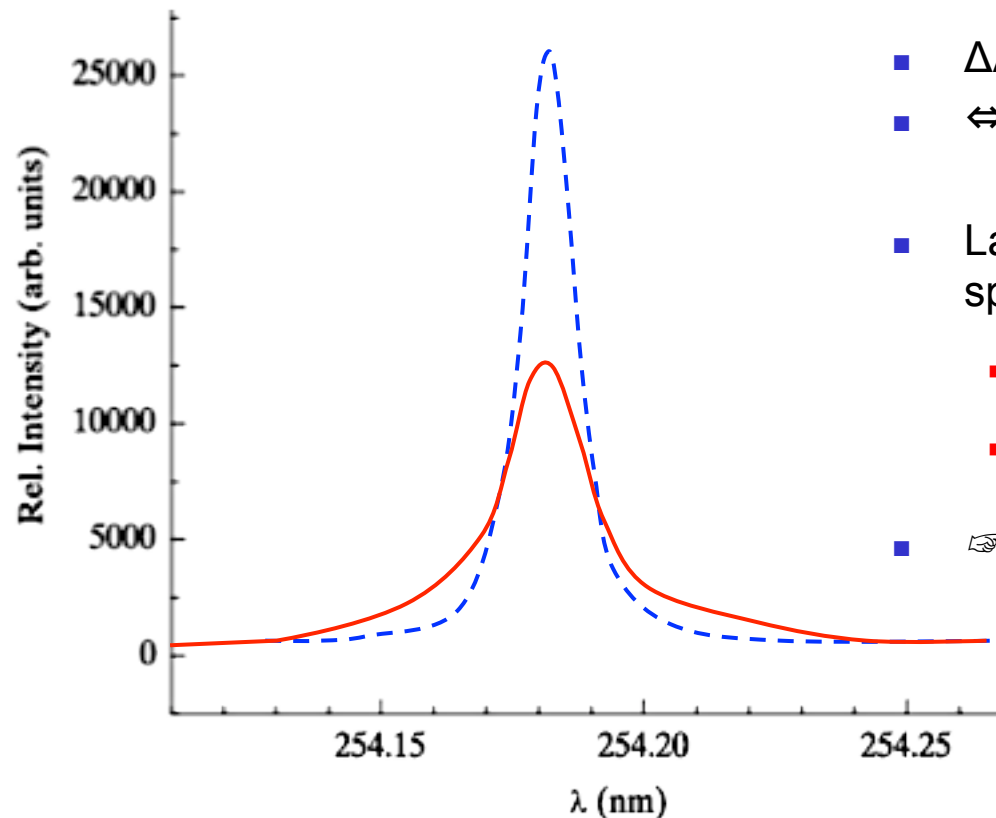
Effet Doppler

- La fréquence (et la longueur d'onde) d'une onde émise par une source en mouvement est d'autant plus décalée que la vitesse de la source est grande
- Le décalage augmente la fréquence quand la source se rapproche (\Leftrightarrow son plus aigu) et la diminue quand la source s'éloigne (\Leftrightarrow son plus grave)



Une raie spectrale très bavarde

- Une raie nous dit bien plus de choses que la nature et la quantité des atomes émetteurs
- Élargissement \Leftrightarrow température élevée [ou turbulence de l'étoile]

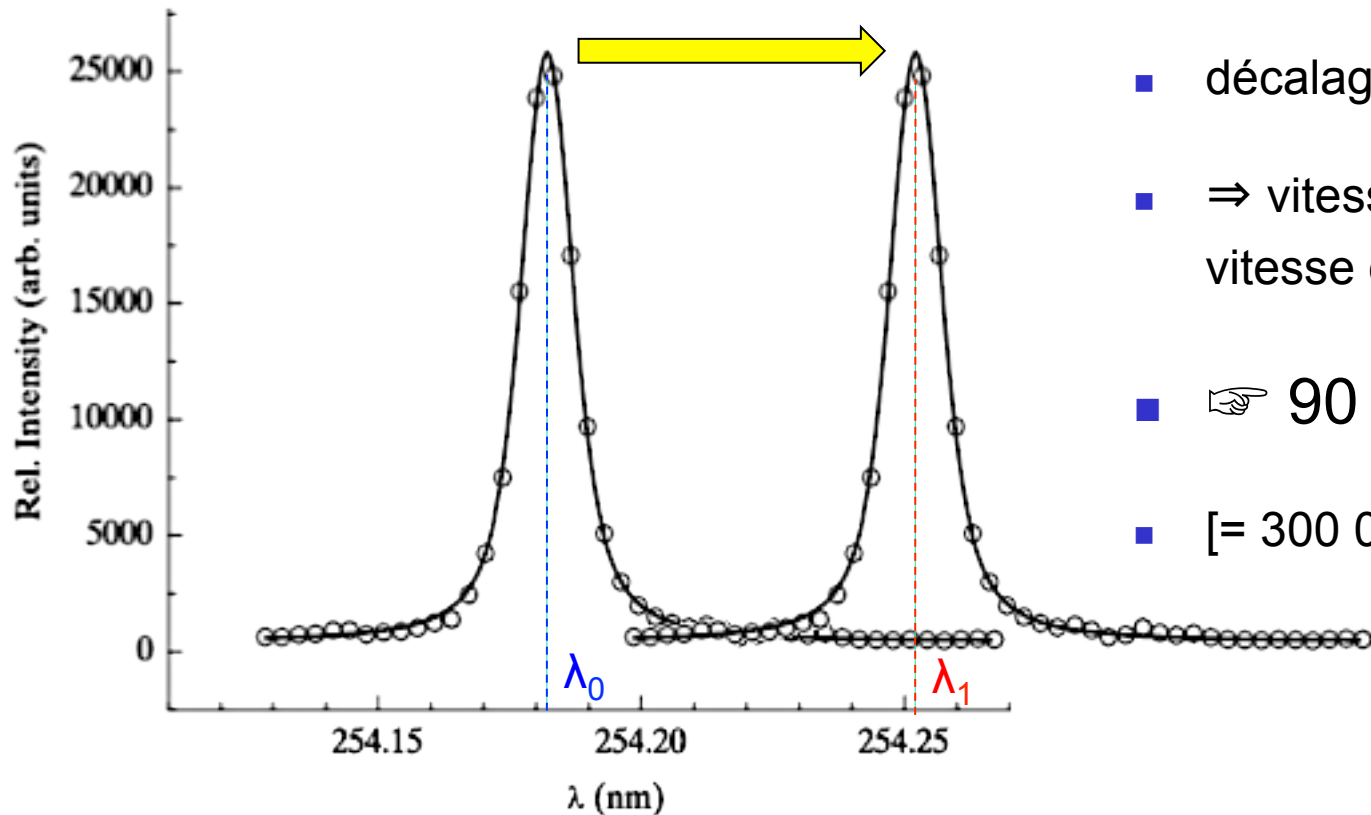


- $\Delta\lambda/\lambda = 0.02/250 = 0.00008$
- $\Leftrightarrow V = 0.00008 c = 24 \text{ km/s}$
- La température est connue par le spectre continu (thermique)
 - $\rightarrow \frac{1}{2} mV^2 = 3/2kT \rightarrow V_{\text{thermique}}$
 - ex: $T = 10\,000 \text{ K} \rightarrow V_{\text{thermique}} = 16 \text{ km/s}$
- \rightarrow on en déduit la turbulence $\approx 8 \text{ km/s}$

Une raie spectrale très bavarde

Elle nous dit bien plus de choses encore :

- décalage de position $\lambda_0 \rightarrow \lambda_1 \Leftrightarrow$ vitesse de la source (effet Doppler)



- décalage de +0,03%
- \Rightarrow vitesse = 0,03% de la vitesse de la lumière
- \Rightarrow 90 km/s
- [= 300 000 km/h]

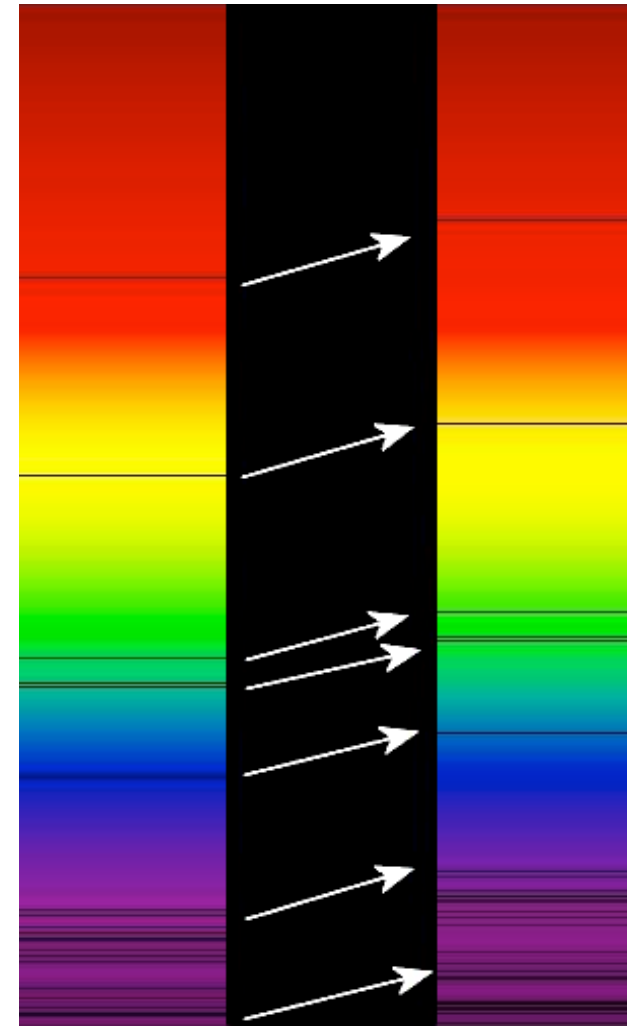
Effet Doppler

- L'effet Doppler multiplie – ou divise - **toutes** les longueurs d'onde par le **même** facteur

$$\frac{\lambda_o}{\lambda_s} = \frac{f_s}{f_o} = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$$

où $\beta = v/c$

- Cela permet de distinguer les raies d'un élément donné, mais décalées par effet Doppler, des raies non décalées d'un autre élément
 - certaines raies peuvent coïncider
 - mais pas toutes !
- Le décalage est plus facile à observer avec les raies qu'avec le continuum (thermique p.e.)

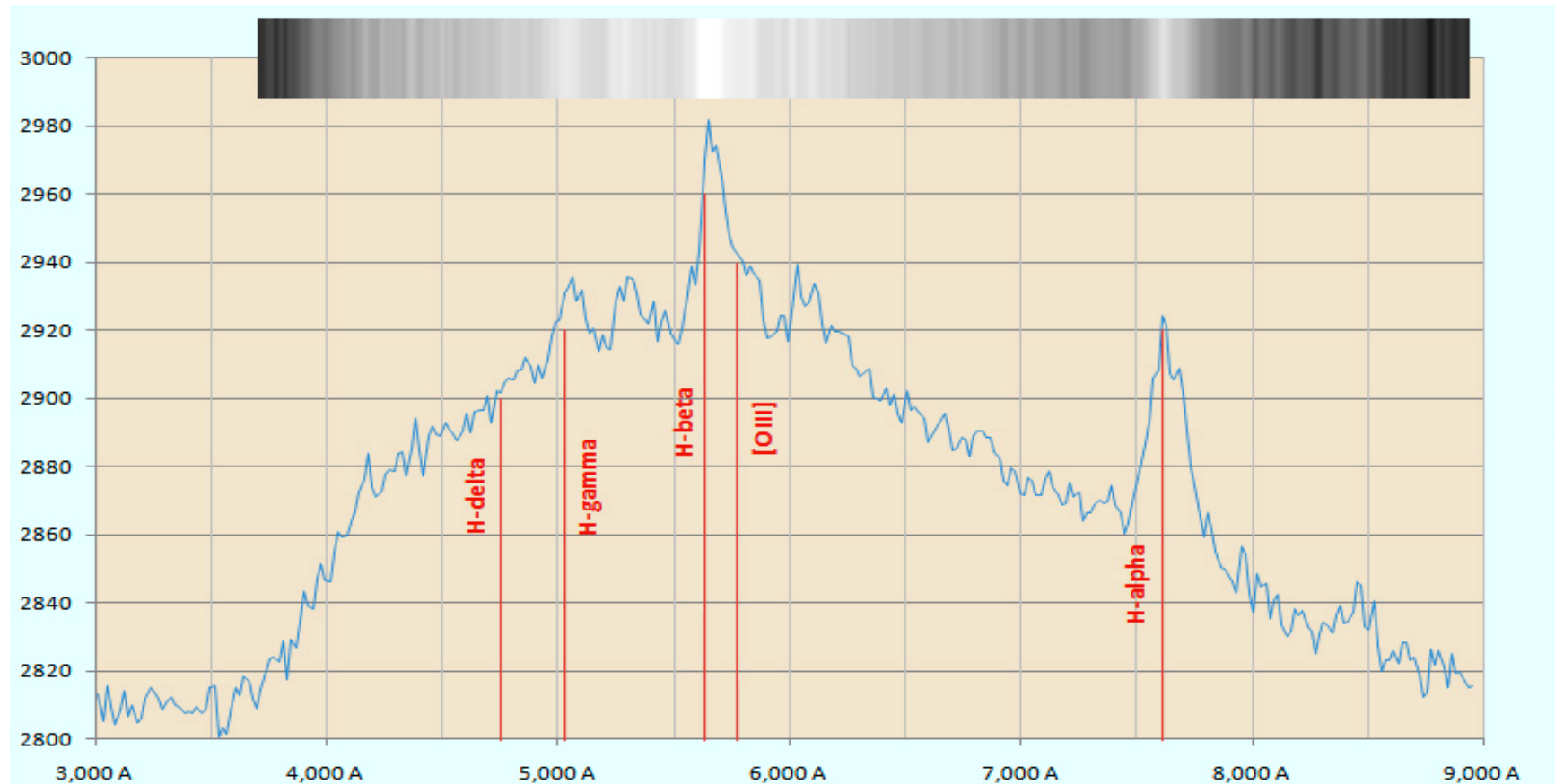


Informations sur les sources : quasars

- Quasar 3C273

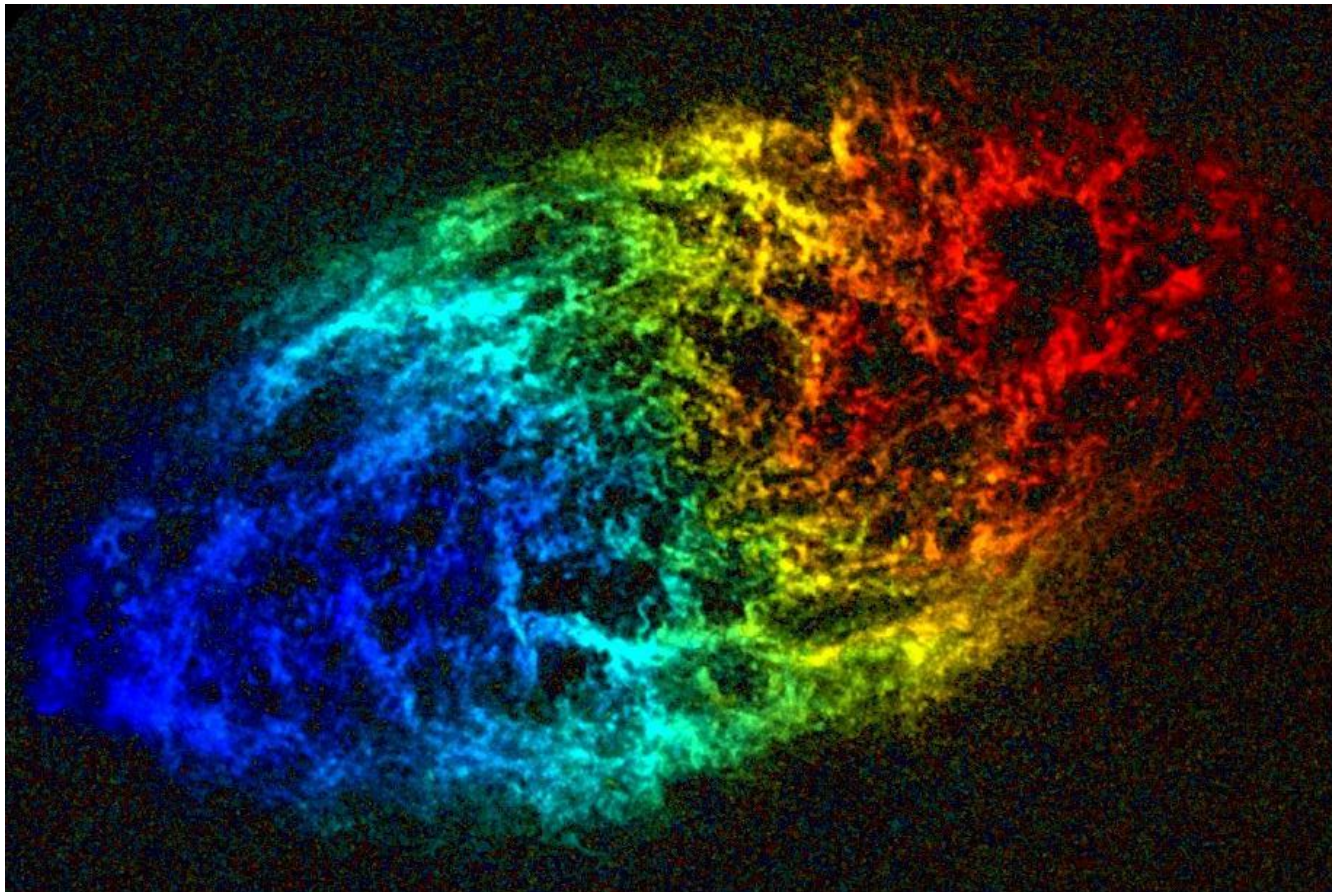
⇔ Galaxie très lointaine (2,4 Md a.l.)

⇔ H α est à 6563 Å z = 0.158



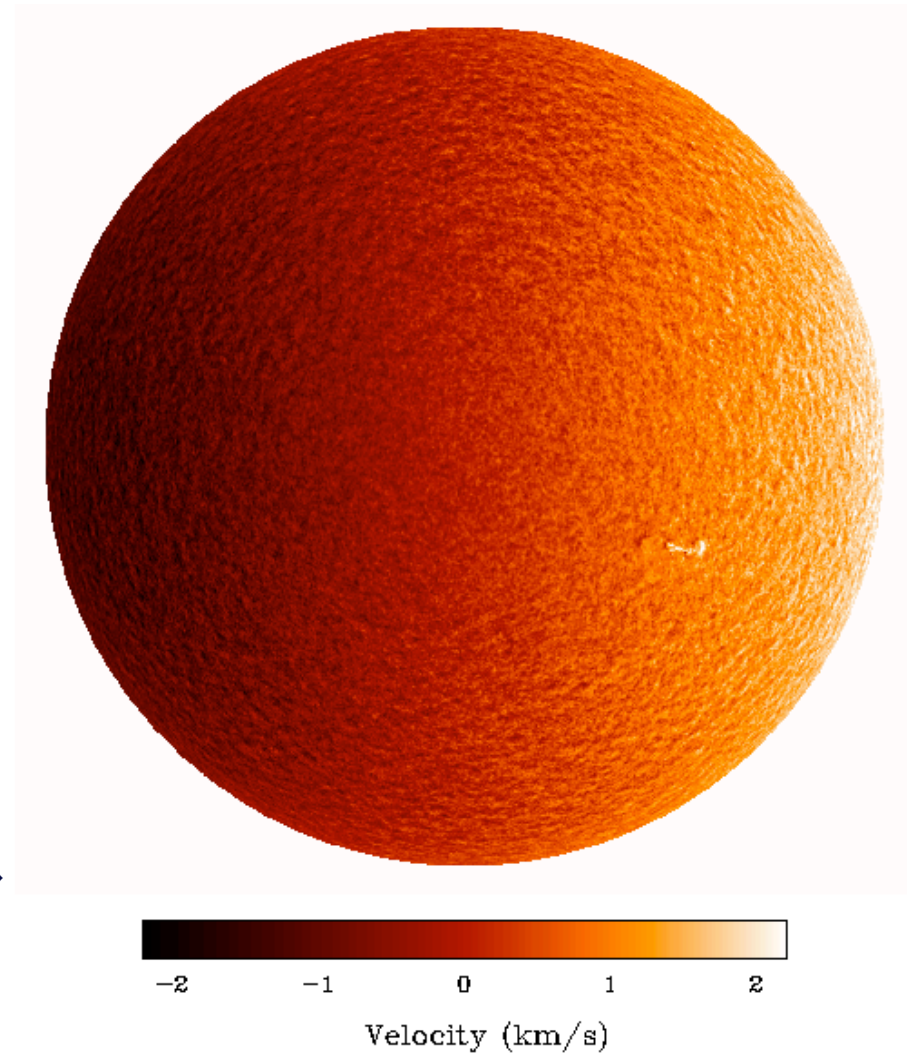
Galaxie M33

- Décalages Doppler indiquant la rotation de la galaxie sur elle-même

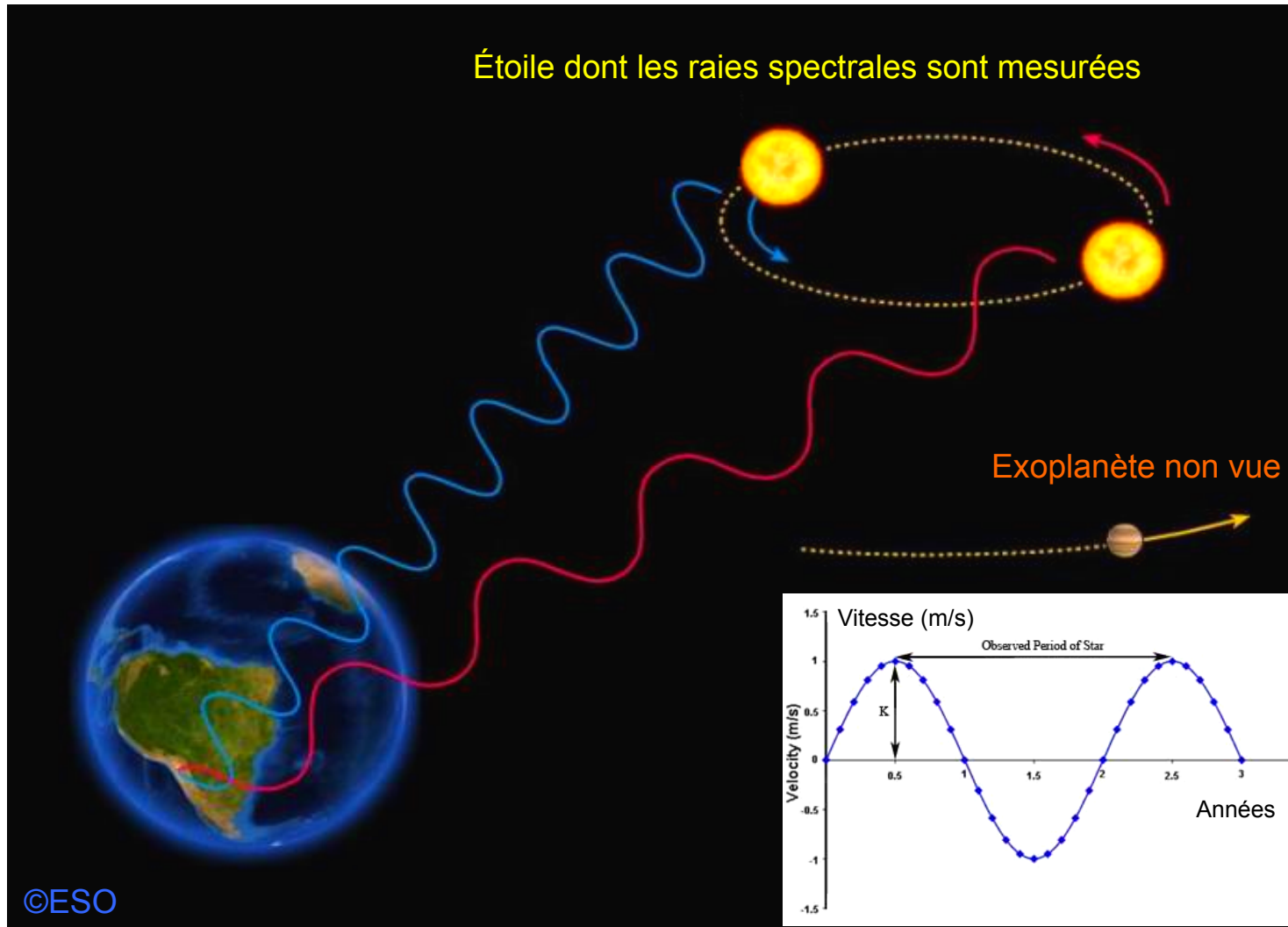


Dopplergramme du Soleil

- Rotation d'ensemble du Soleil
- Granulation = turbulences de l'atmosphère du Soleil
- Région active sur la droite au sud de l'équateur

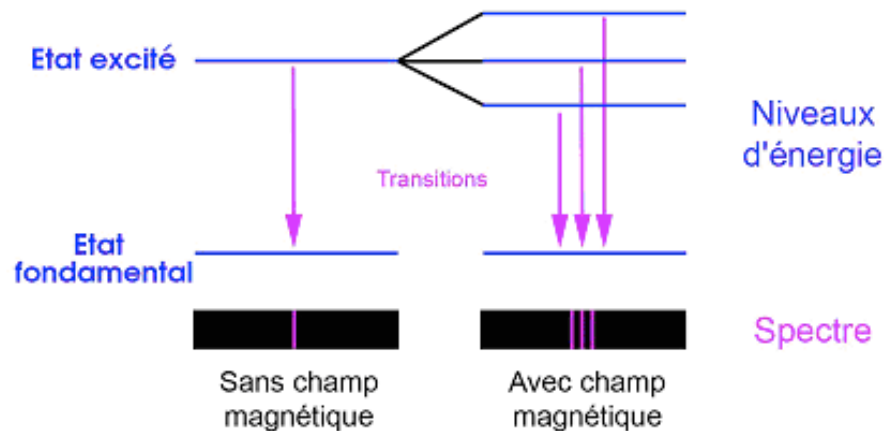


Détection d'une exoplanète par effet Doppler

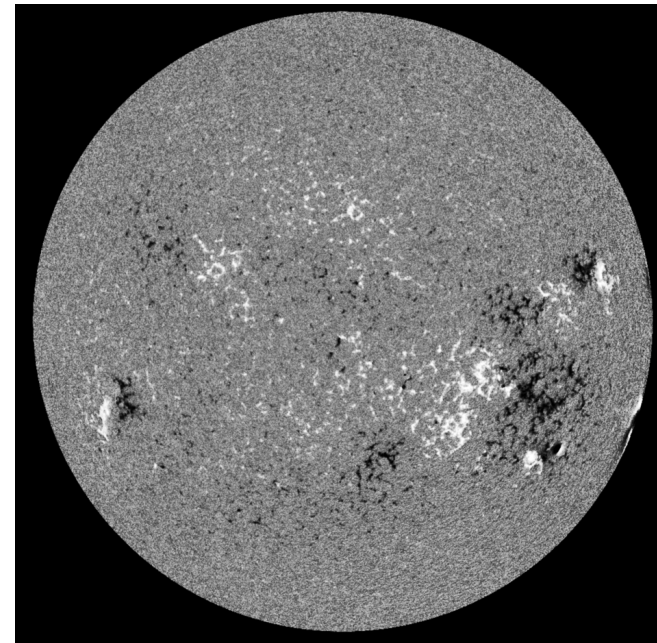


Effet Zeeman

- Une onde électromagnétique est affectée par un champ magnétique
- L'effet —faible— fut observé en 1896 par Pieter Zeeman
- Une longueur d'onde se sépare en composantes polarisées (ou s'élargit si le champ est faible)



- Magnétogramme du Soleil

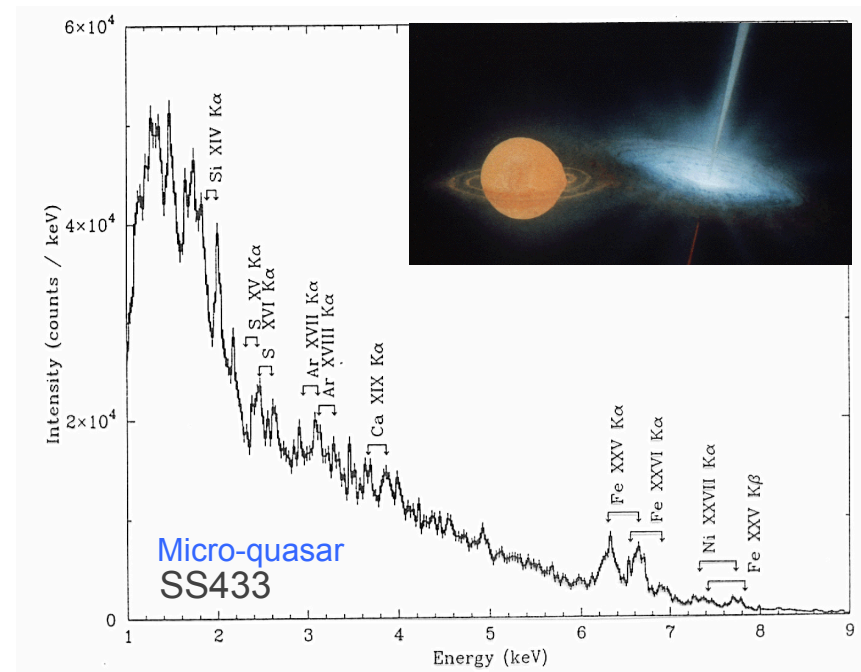


- Les niveaux de gris mesurent l'intensité du champ magnétique
- Les taches solaires sont le siège de champs particulièrement intenses

La spectroscopie ne se limite pas à l'optique!

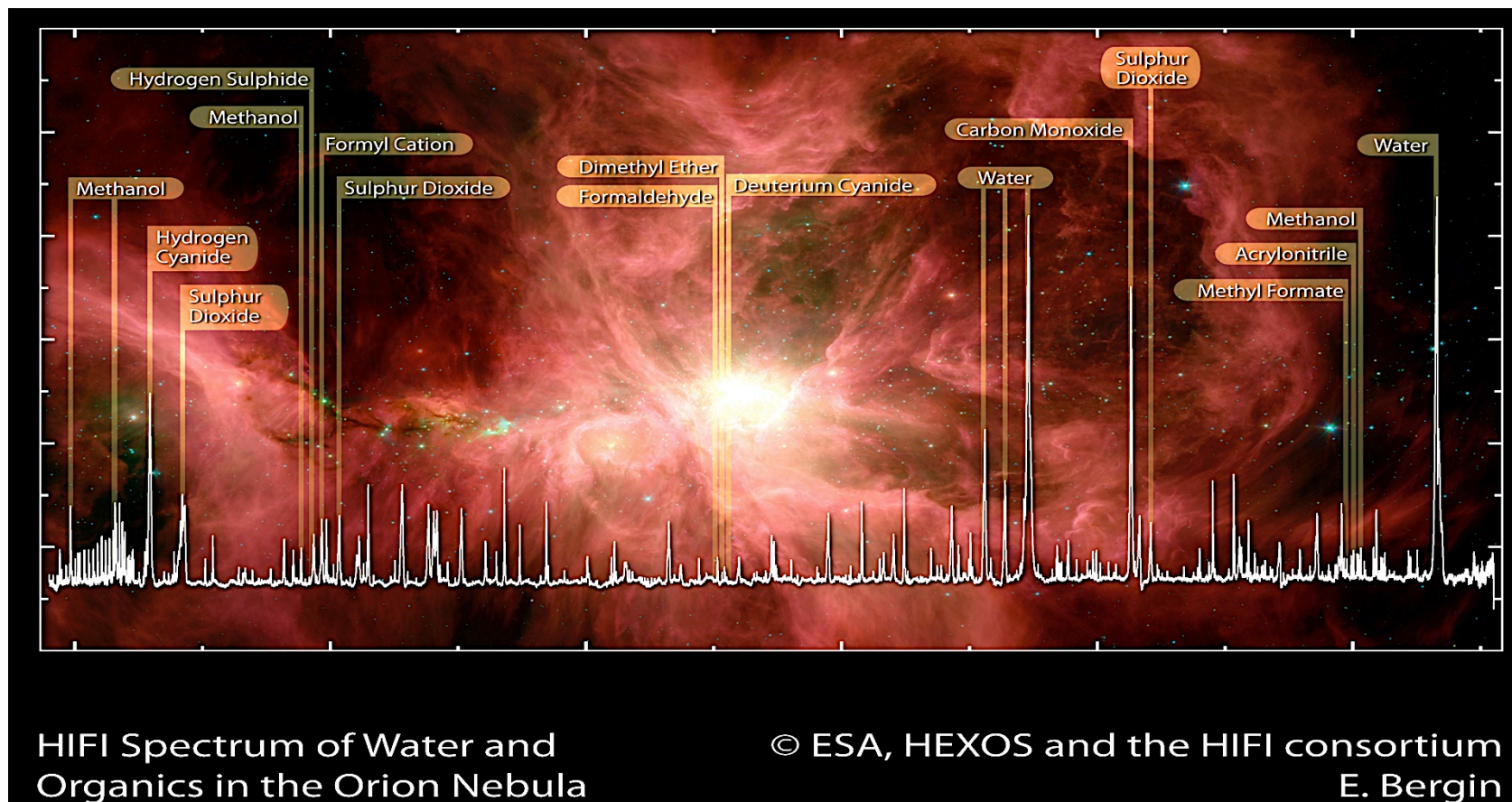
- Les transitions atomiques des électrons sont souvent dans le visible
- Mais pas toujours
 - Transition atomique entre 2 niveaux *très* proches
 - ⇔ faible différence d'énergie
 - ⇔ faible énergie du photon émis
 - ⇔ grande longueur d'onde
 - Exemple: raie de l'hydrogène neutre à $\lambda = 21$ cm
 - Raies d'excitation moléculaire (vibration, rotation) dans l'**infrarouge** voire le *millimétrique*
 - Bremsstrahlung & rayonnement synchrotron

- Les atomes très ionisés, et plus encore les transitions **nucléaires**, mettent en jeu des énergies bien plus grandes
 - ⇔ longueurs d'onde dans le domaine des **rayons X** ou gamma



La spectroscopie n'est pas réservée aux étoiles

- Nébuleuse d'Orion (image infrarouge prise par le satellite Herschel)
- → présence de nombreuses **molécules**, en plus des atomes



En général, il y a un peu de tout...

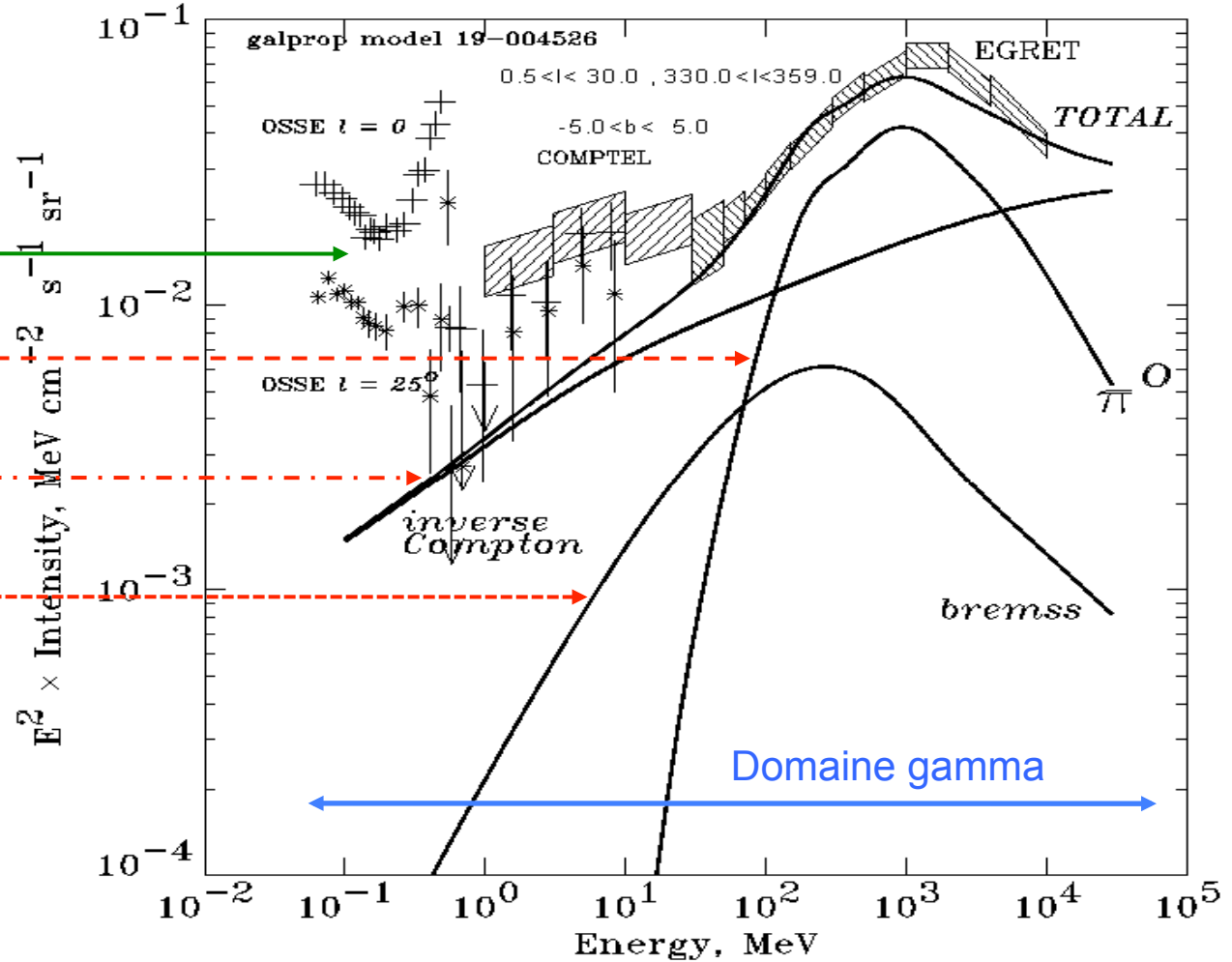
- Spectre γ diffus

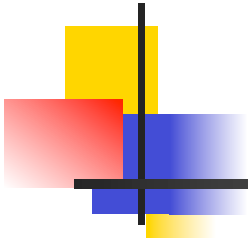
- Observations

- Annihilation π^0

- Compton inverse

- Bremsstrahlung





Merci de votre attention !

