

ASTROPHYSIQUE

4 – LUMIÈRE



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA





QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE ?

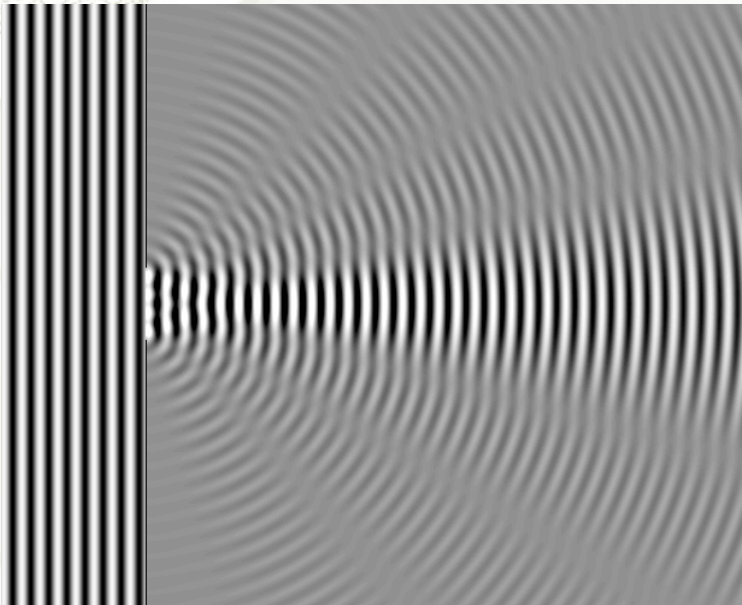
17 novembre 2011

Alain Bouquet - Astrophysique 4 - La lumière

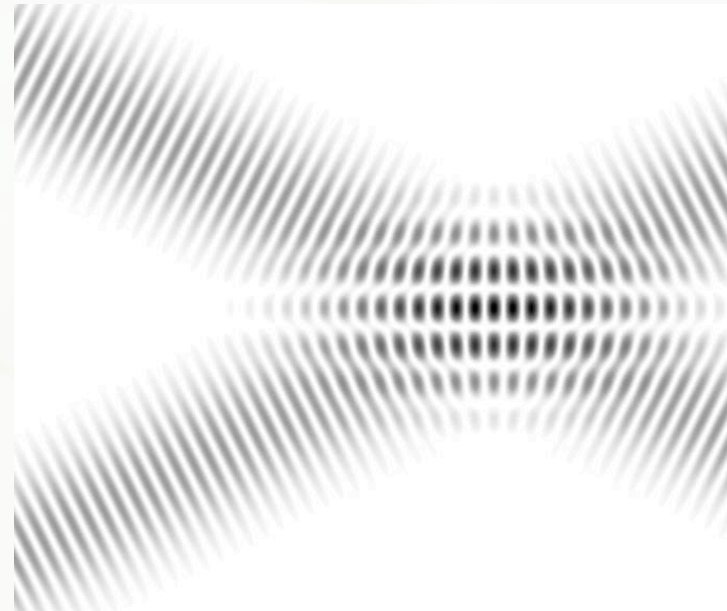
2

LA LUMIÈRE EST UNE *ONDE* ÉLECTROMAGNÉTIQUE

- Diffraction (F.M. Grimaldi 1618-1663)
 - La lumière qui passe par une petite ouverture ne projette pas une image nette (zone de *pénombre*)



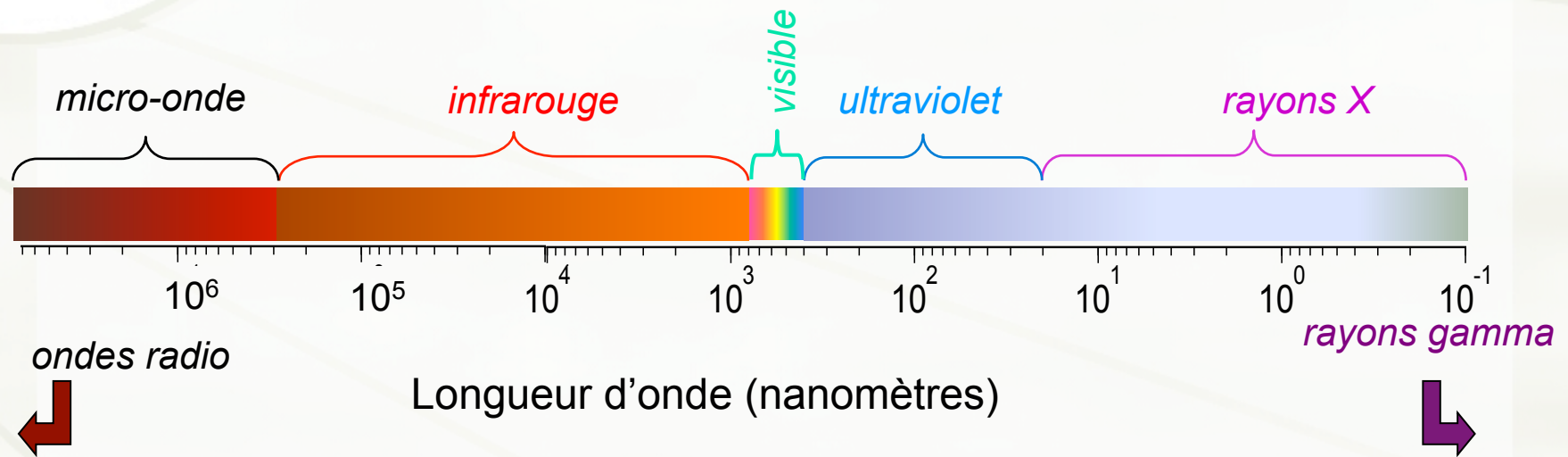
- Interférences : expériences de Thomas Young (1773-1829) en 1801
 - Deux ondes peuvent s'additionner ou **se soustraire**



- Augustin Fresnel (1788-1827) : théorie ondulatoire de la lumière

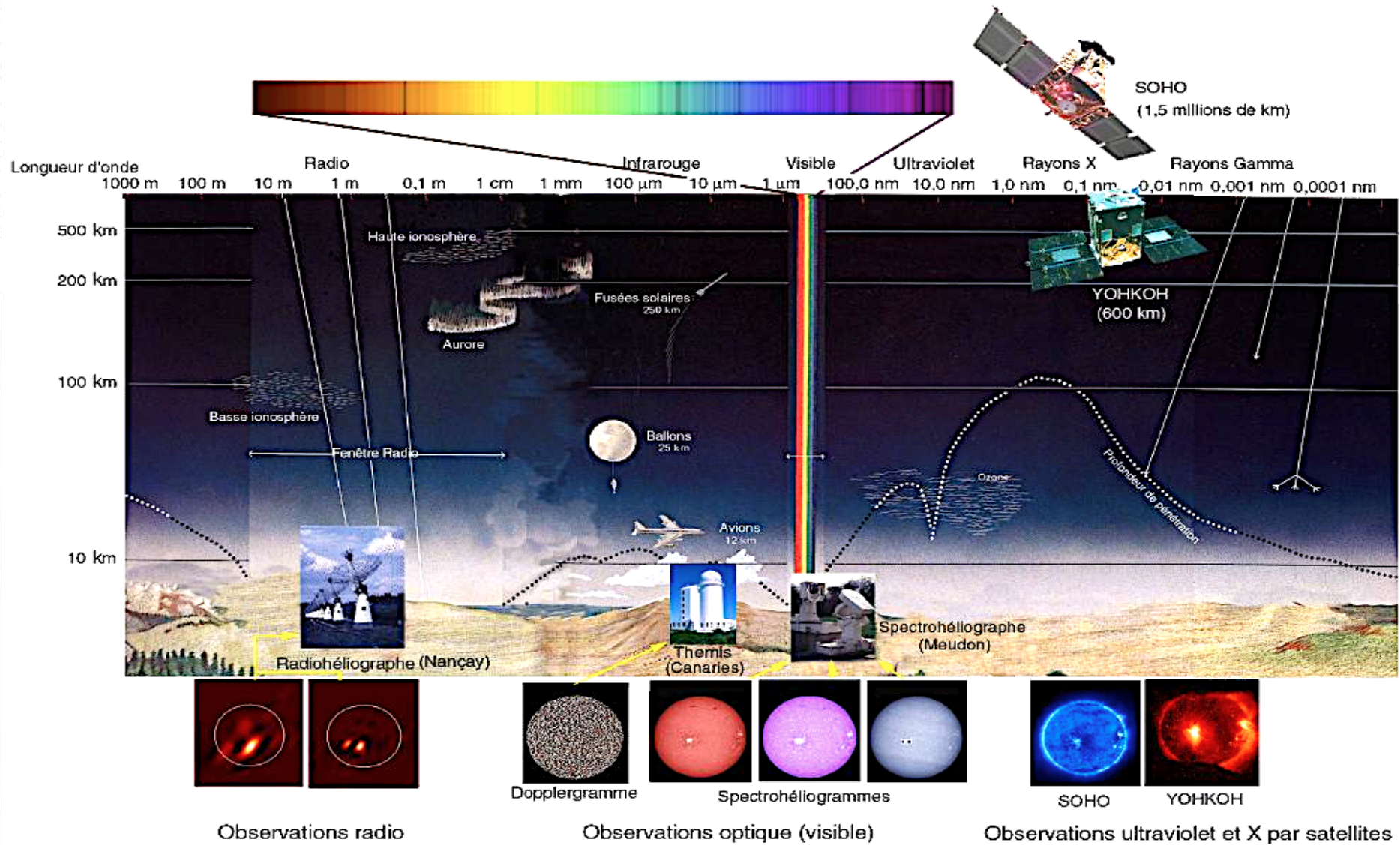
ONDE \Rightarrow FRÉQUENCE ν ET LONGUEUR D'ONDE λ

- Relation $\nu = c/\lambda$ (où c est la vitesse de l'onde)
- Large gamme de longueurs d'ondes (« spectre »)



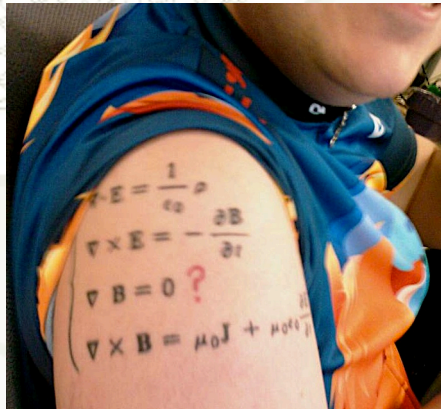
- S'étendant bien au delà de ce qu'on appelle usuellement « la lumière »

LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE



LA LUMIÈRE EST UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

- Équations de l'électromagnétisme James Clerk Maxwell 1861

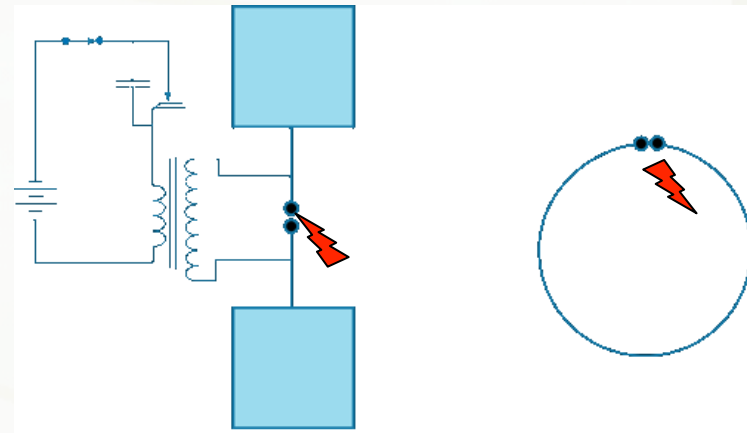


$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \frac{\vec{J}}{\epsilon_0 c^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

- Permettent de décrire tous les phénomènes électriques et magnétiques alors connus
- Prévoient des champs électrique et magnétique oscillant de manière couplée (ondes)
- Font apparaître la vitesse de la lumière comme vitesse de ces ondes
- ⇒ la lumière est une onde électromagnétique

- Heinrich Hertz

- Les ondes électromagnétiques existent bien (1888)



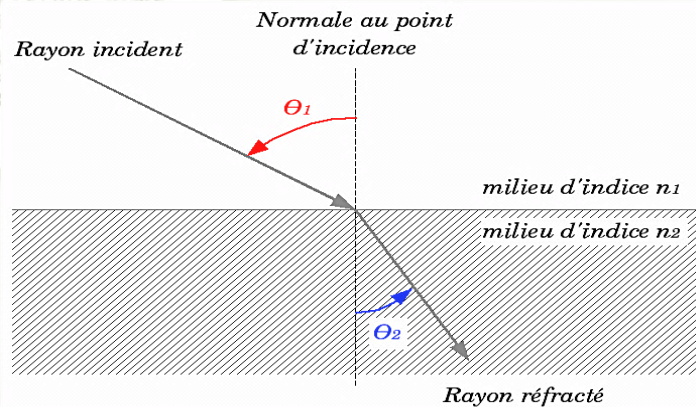
Émetteur

Récepteur

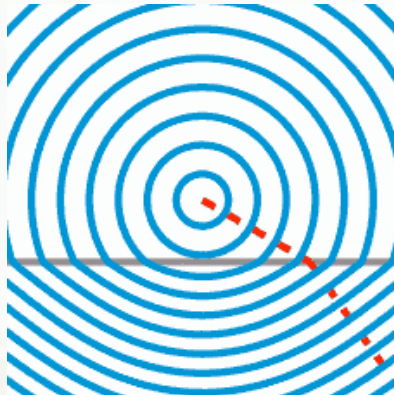
- Elles se réfléchissent, se diffractent et interfèrent comme la lumière
- ⇒ la lumière est une onde électromagnétique

LA LUMIÈRE EST UNE PARTICULE

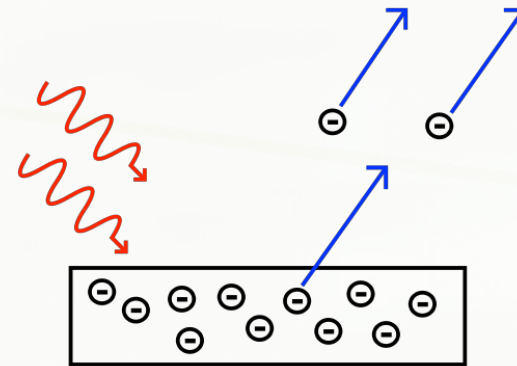
- Lois de la réflexion et réfraction
 - Connues des Arabes (Ibn Sahl ~983) et des scolastiques, redécouvertes par Snell en 1625 et Descartes en 1637



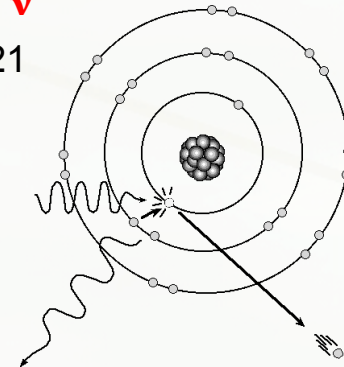
- Christiaan Huyghens (1629-1695) : ceci est aussi explicable par des ondes

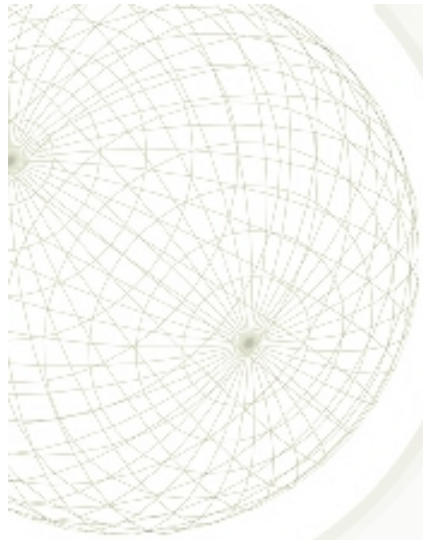


- Effet photoélectrique
 - La lumière peut arracher des électrons à certains matériaux



- Mais l'effet exige une longueur d'onde minimale *pas* une intensité minimale
 - Einstein 1905 : **photons** d'énergie individuelle $E = h \nu$
 - → prix Nobel 1921

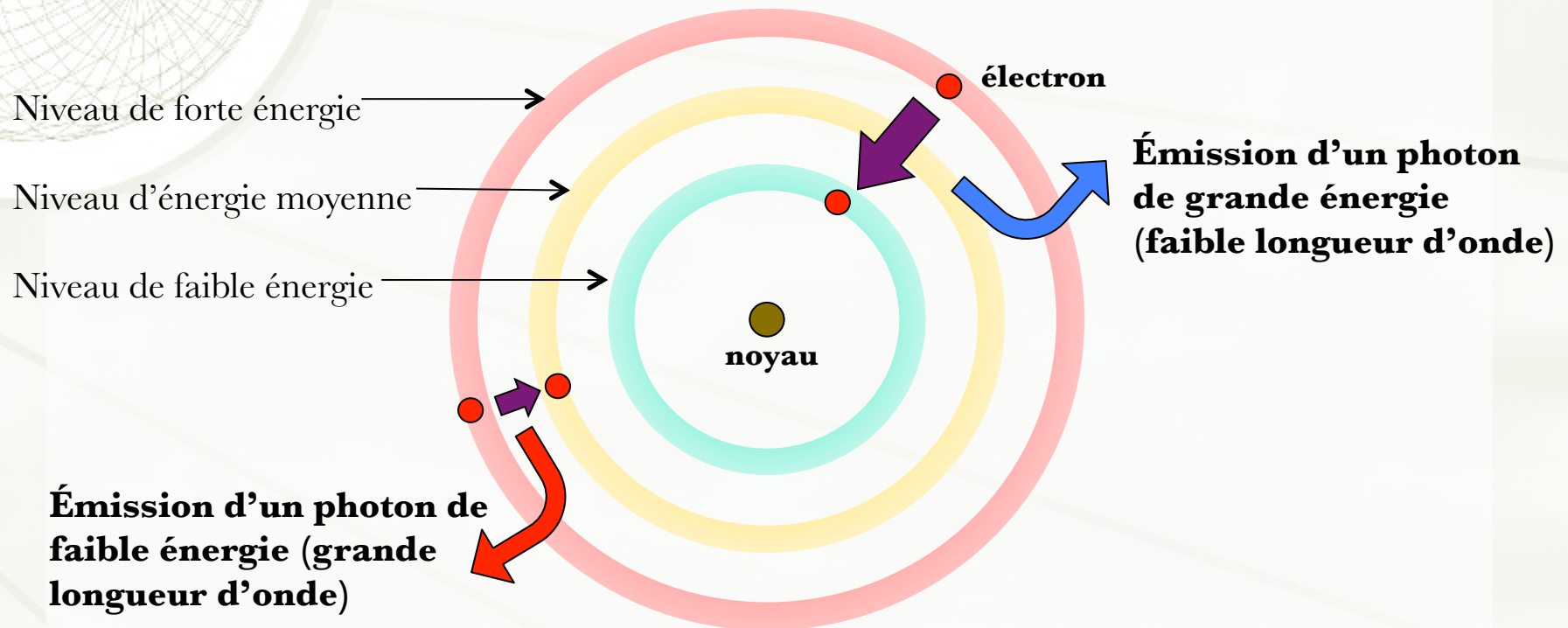




LA VIE D'UN PHOTON

FABRIQUER DE LA LUMIÈRE AVEC DES ÉLECTRONS

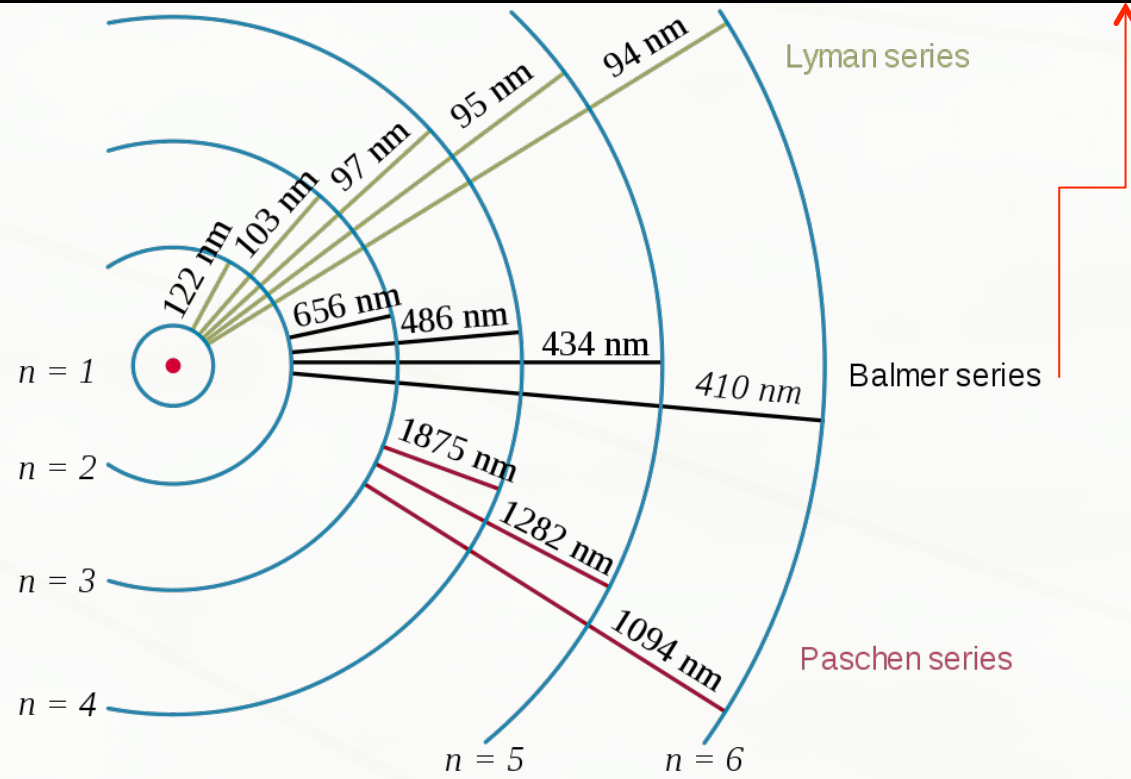
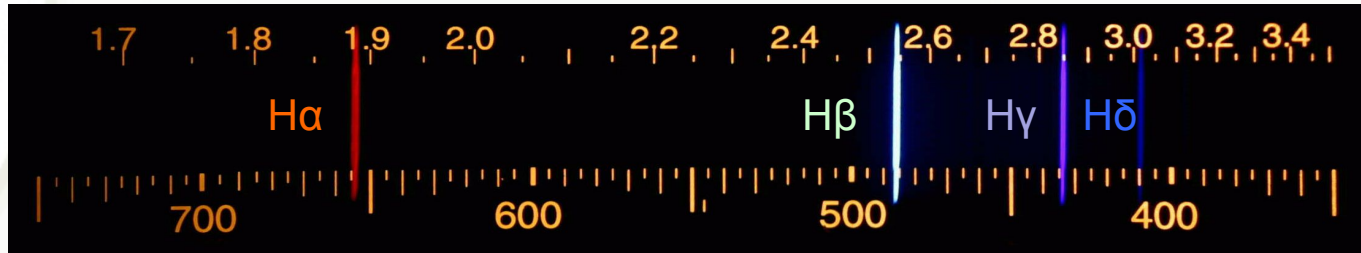
- Quantification de l'énergie des électrons dans l'atome → longueurs d'onde précises → **raies spectrales**



- Le même mécanisme est responsable de l'**absorption de lumière** par les atomes de la matière

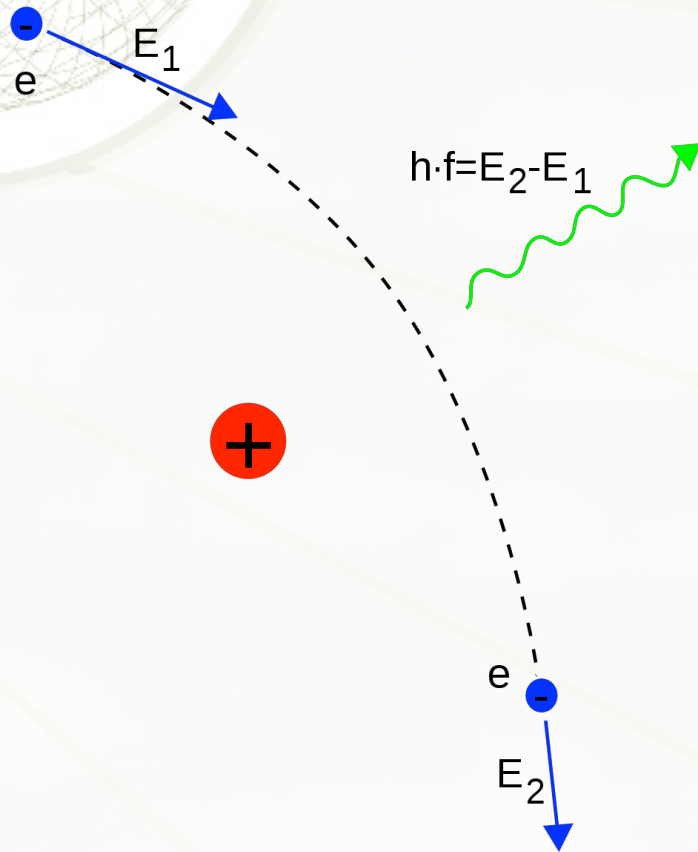
ÁTOME ET RAIES SPECTRALES

- Hydrogène

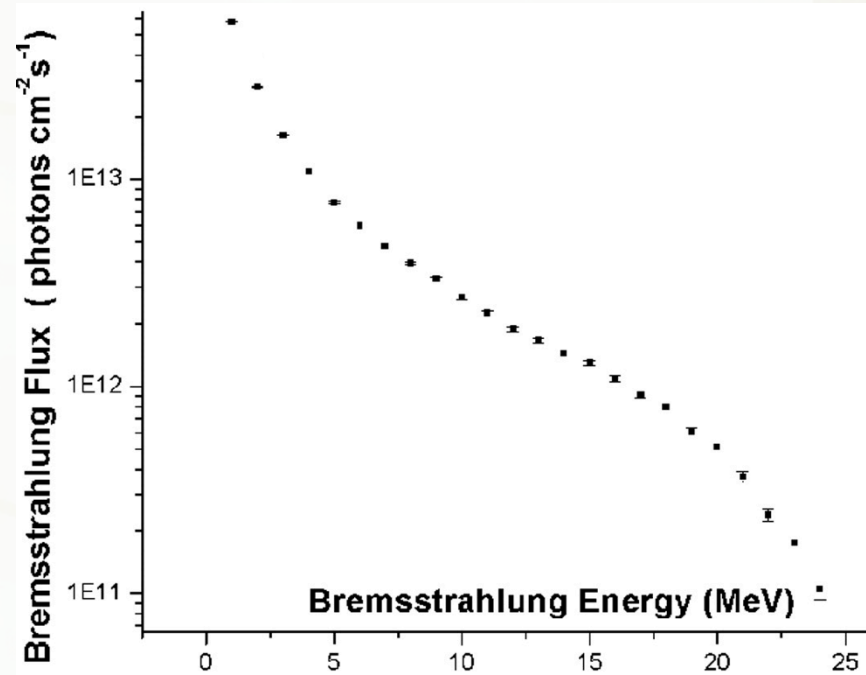


FABRIQUER DE LA LUMIÈRE EN ACCÉLÉRANT UNE CHARGE

- Rayonnement de freinage (bremsstrahlung)



- \Rightarrow spectre continu



- L'immense majorité des photons a une faible énergie (*échelle logarithmique*)
- Il existe une énergie maximale: celle qu'avait initialement l'électron

FABRIQUER DE LA LUMIÈRE AVEC DE LA CHALEUR

■ Corps chaud

- atomes et électrons agités
- vitesses très variées
- température \Leftrightarrow vitesse moyenne

■ Collisions entre atomes et électrons

- perte d'énergie \Leftrightarrow émission de photon
- gain d'énergie \Leftrightarrow absorption de photon

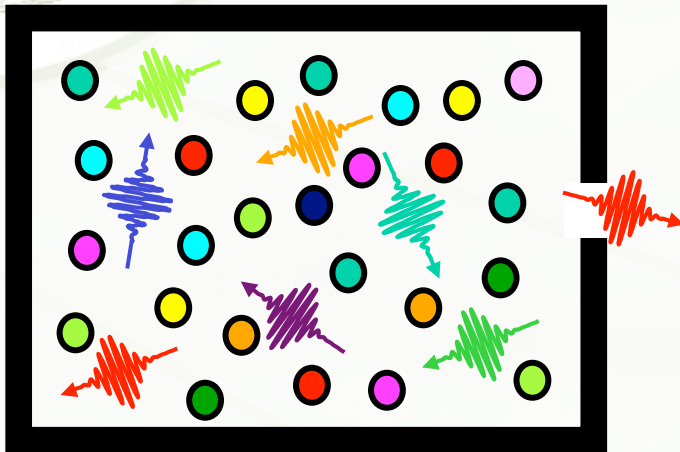
■ À l'équilibre

- photons de toutes les longueurs d'onde
 \Leftrightarrow spectre continu
- avec un maximum corrélé à la vitesse moyenne des particules de matière
- \Rightarrow loi de Wien
- \Rightarrow loi de Stefan-Boltzmann



LE « CORPS NOIR »

- Absorbe tous les rayonnements sans en réfléchir aucun (il est donc « noir »)
- Émet tous les rayonnements (il est donc brillant!)
- **Spectre totalement indépendant de la nature physique ou chimique du corps**
- Ne dépend que de la température



- Exemples
 - Un four de potier
 - Une ampoule à *incandescence*
 - Une étoile
 - Le fond micro-ondes (CMB)



LES LOIS DU « CORPS NOIR »

- Loi de Wien

- La longueur d'onde du maximum d'émission varie en raison inverse de la température

$$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

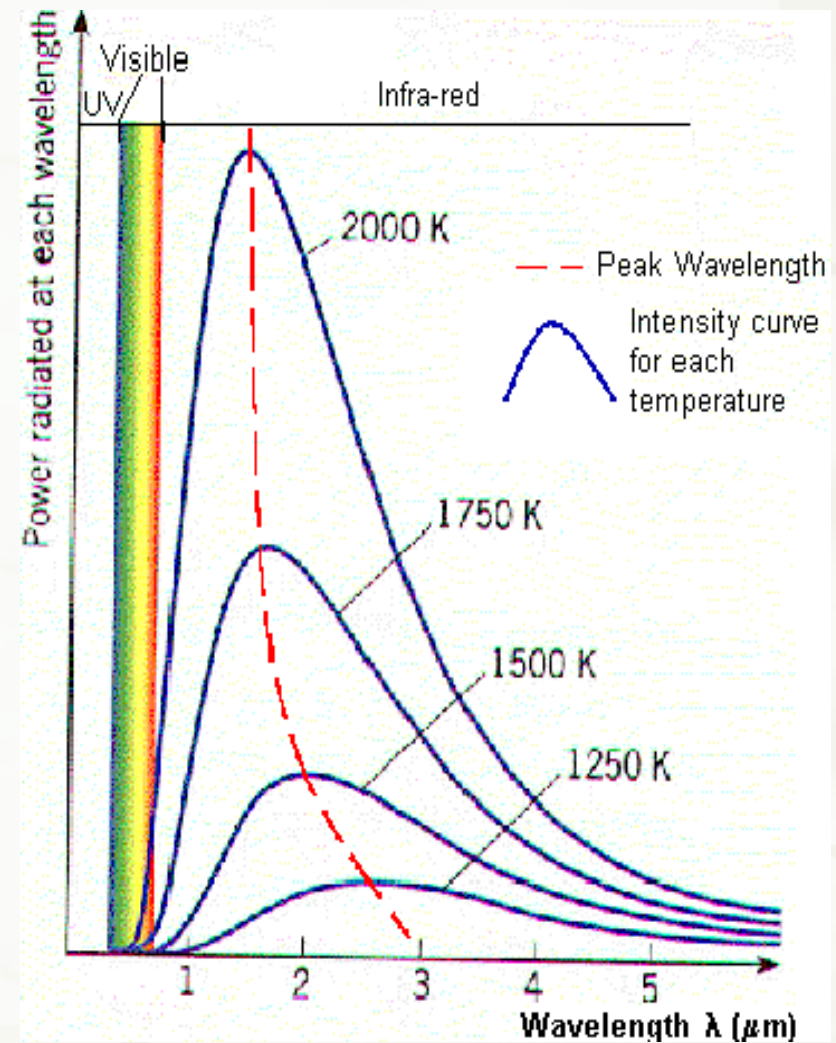
- ⇔ lien entre température et couleur

- Loi de Stefan-Boltzmann

- L'énergie émise varie comme la puissance **quatrième** de la température

$$E = \sigma T^4$$

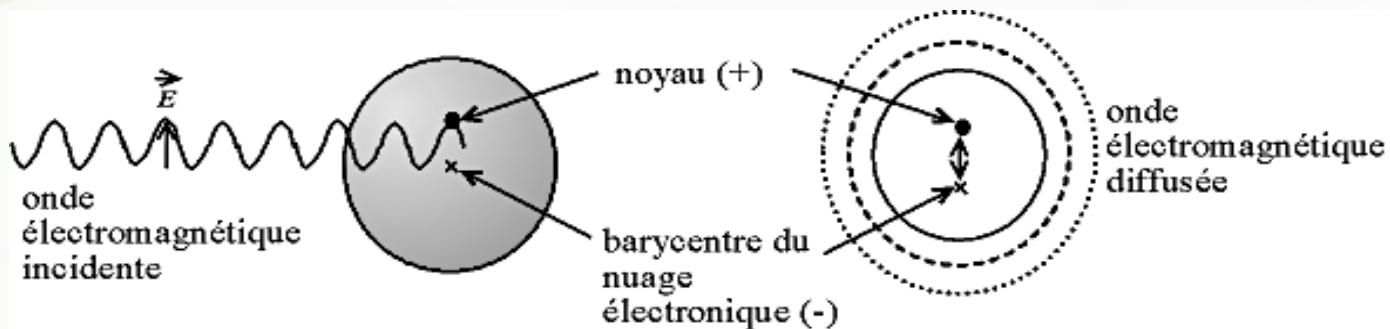
- ⇔ une étoile chaude est *beaucoup* plus brillante qu'une étoile froide



TRANSMISSION : 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, rouge du soleil couchant

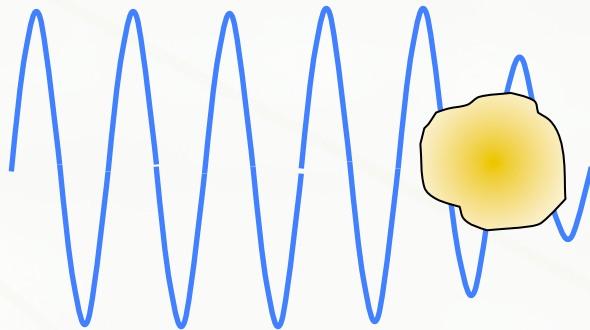
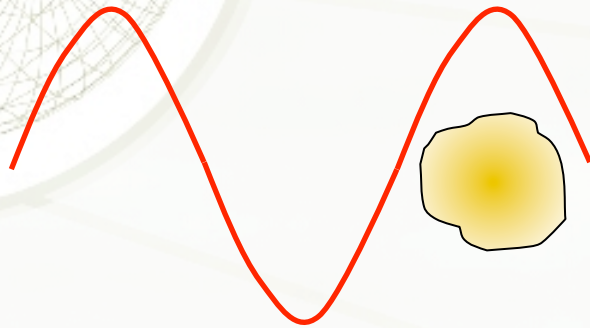
■ Diffusion de Mie

- Particule de taille comparable à la longueur d'onde
- Intensité diffusée \sim constante (avec des résonances)
- ☞ Gris-blanc des nuages

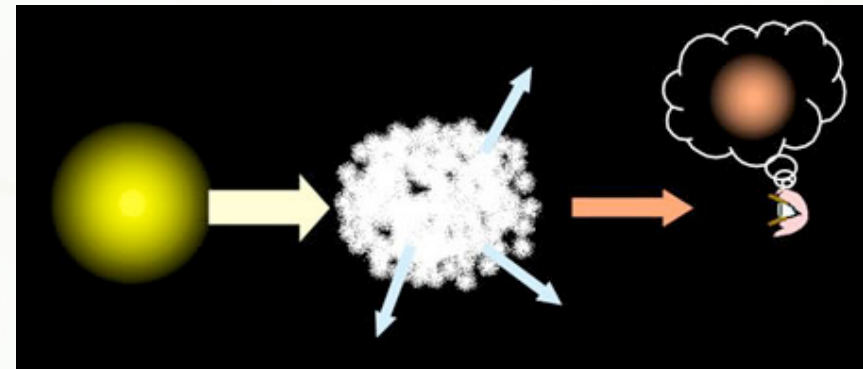


ABSORPTION DÉPENDANT DE LA LONGUEUR D'ONDE

- 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



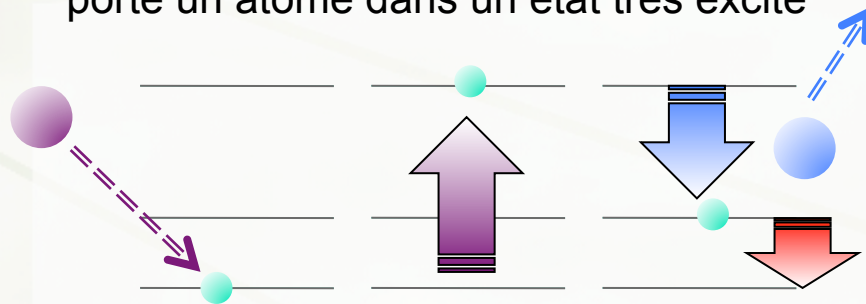
- Les nuages sont plus transparents en infrarouge et en radio

LE NUAGE NOIR BARNARD 86 ET L'AMAS OUVERT NGC 6520



UN PEU PLUS COMPLIQUÉ

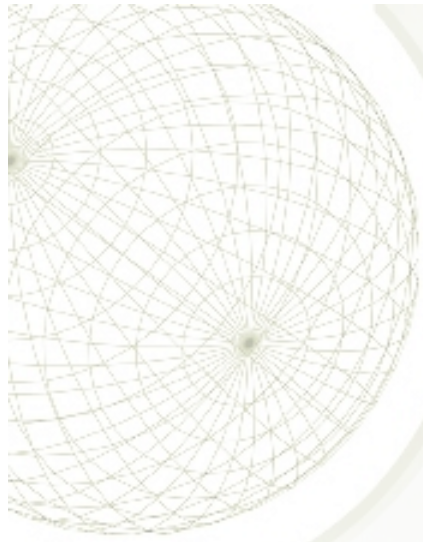
- La lumière réémise par un atome n'est pas nécessairement à la même longueur d'onde que la lumière incidente
- Un photon de haute énergie (UV p.e.) porte un atome dans un état très excité



- Le retour à l'état de plus basse énergie peut se faire par émission de 2 (ou plus) photons d'énergie plus faible

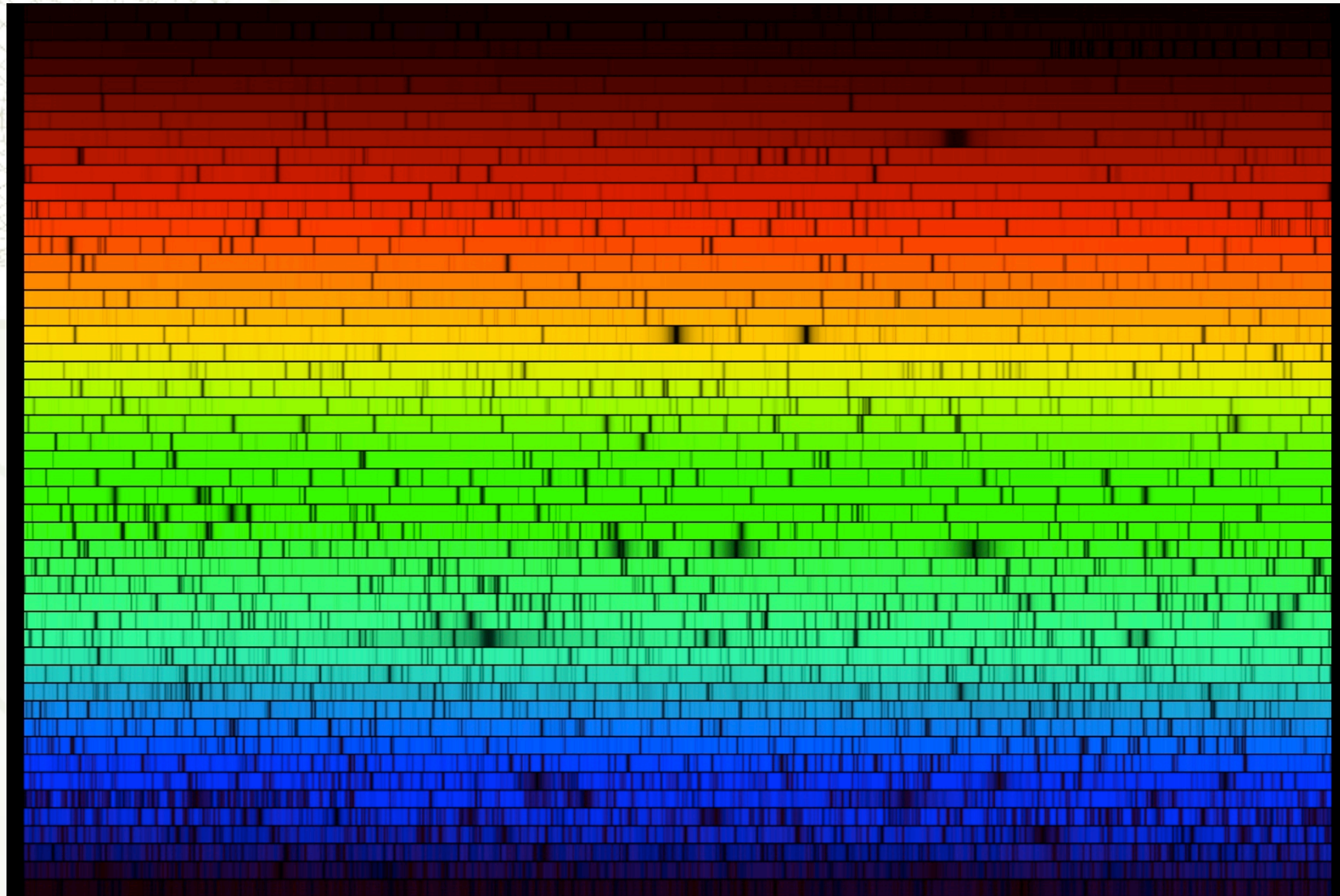
- Nébuleuse planétaire NGC6751
 - L'étoile chaude centrale irradie l'enveloppe de gaz en UV
 - Celle-ci réémet de la lumière visible



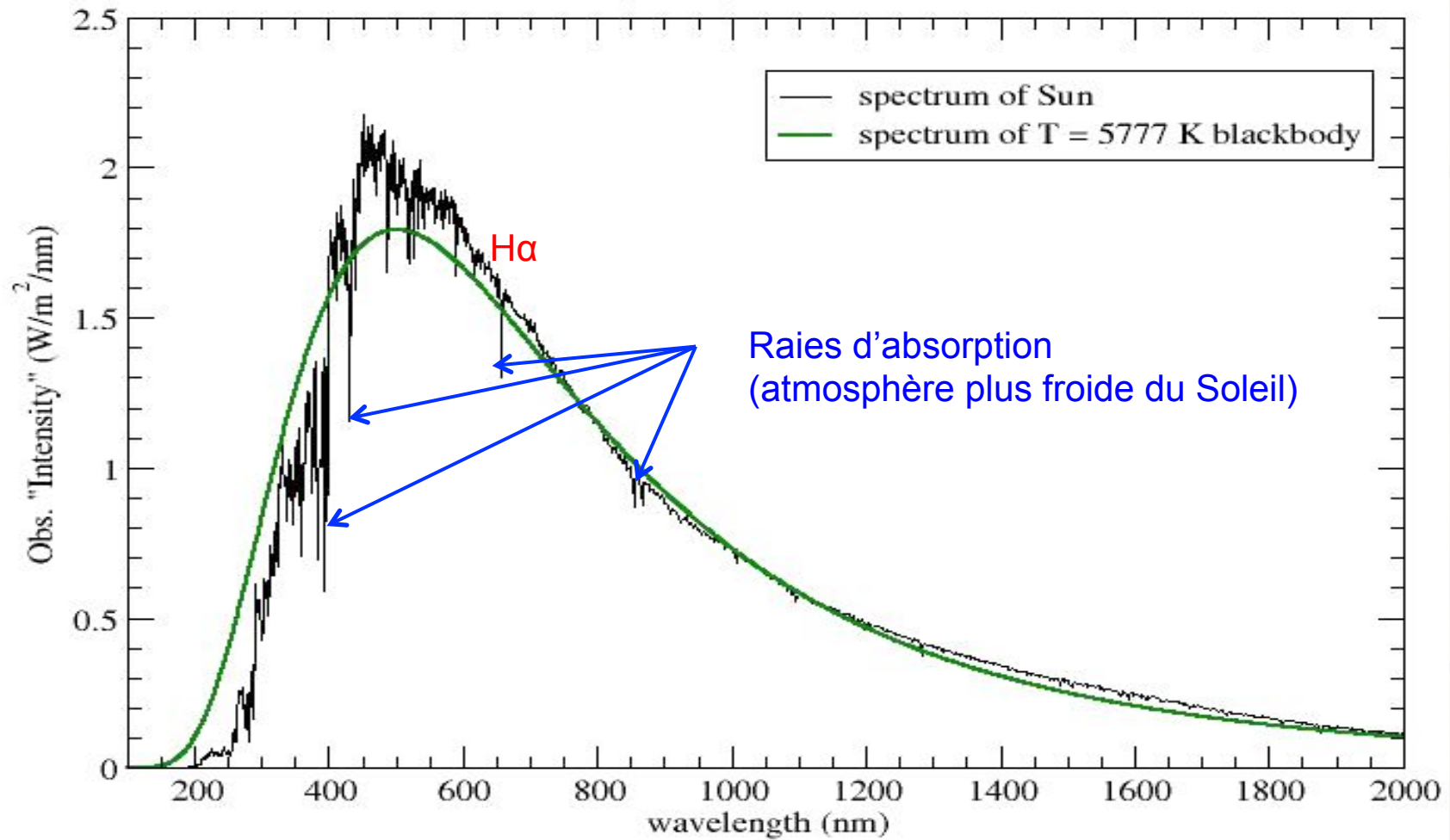


SPECTROSCOPIE

SPECTRE DU SOLEIL

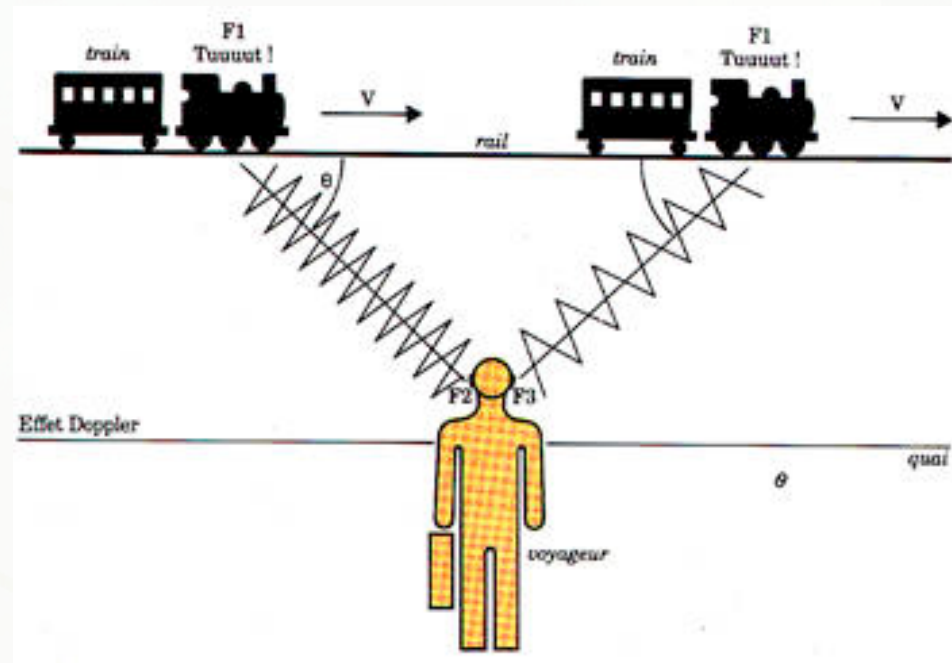
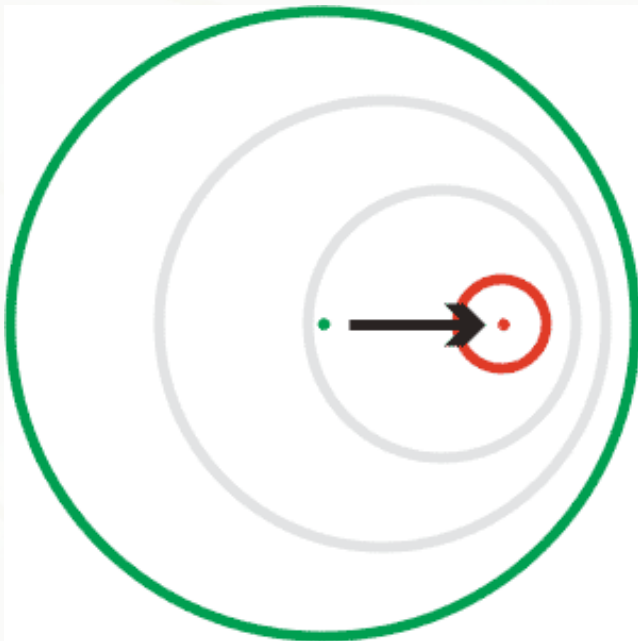


SPECTRE DU SOLEIL



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)



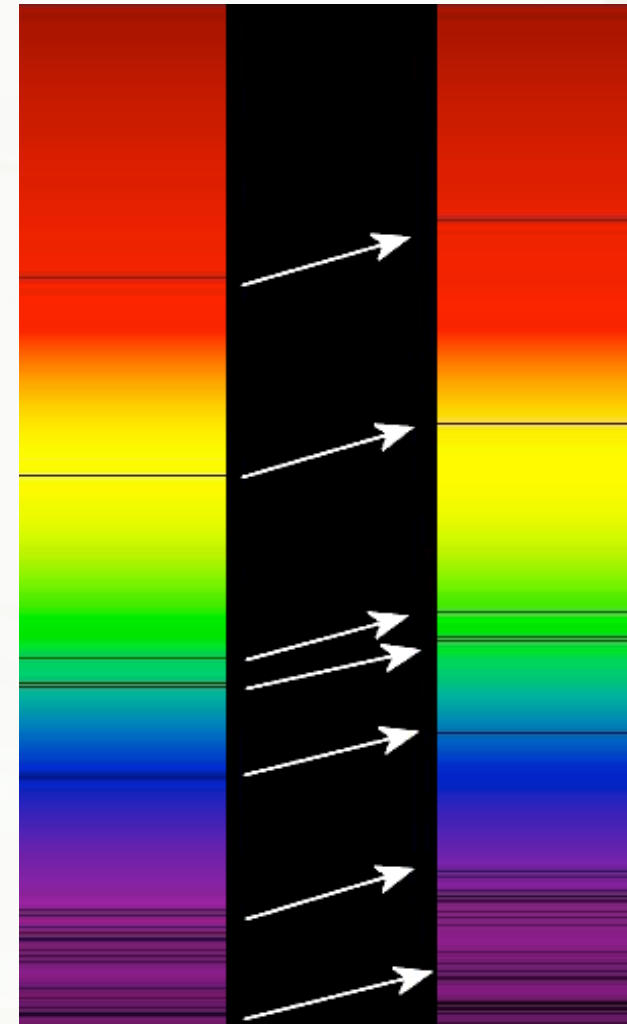
EFFET DOPPLER

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

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

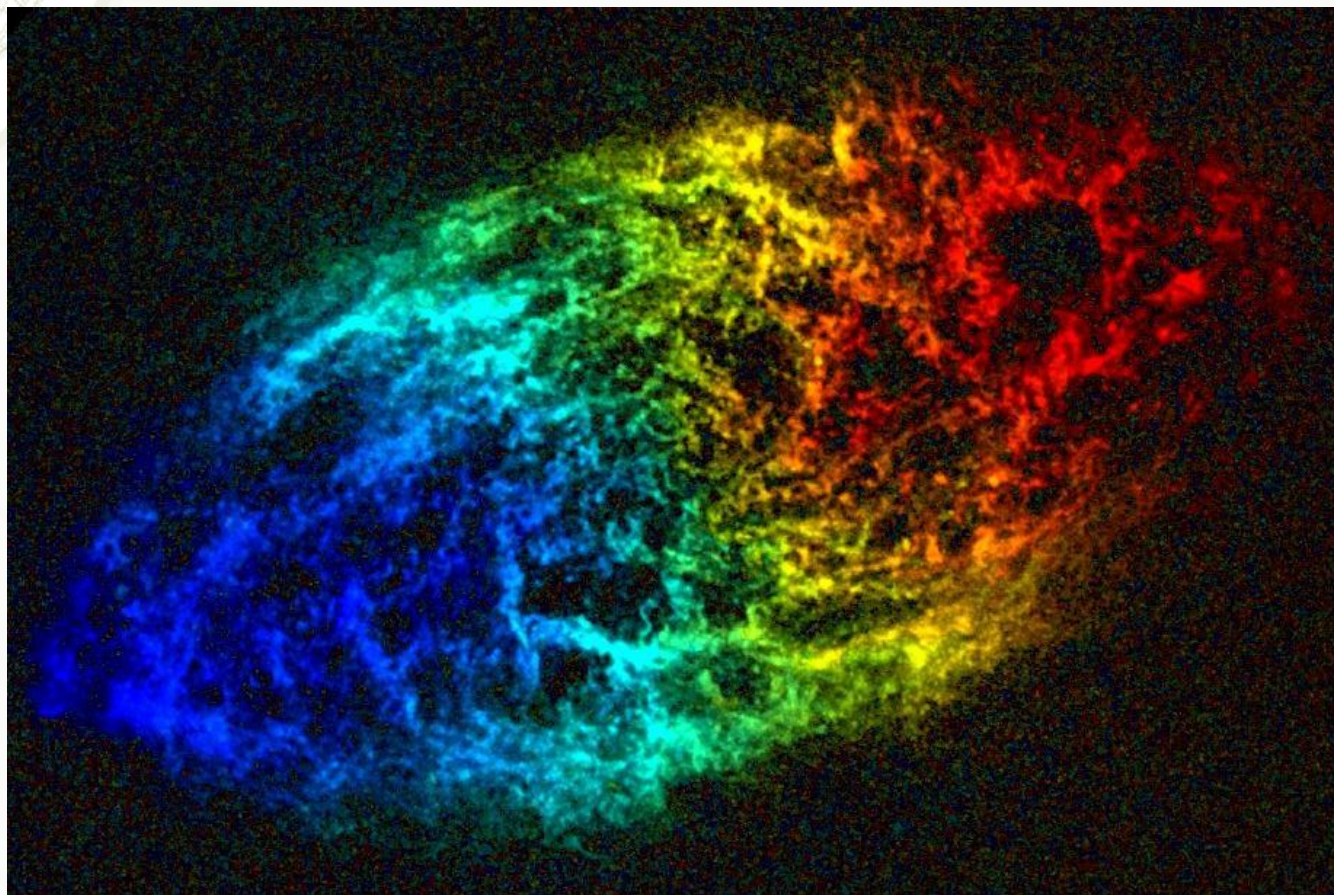
où $\beta = v/c$

- 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.)



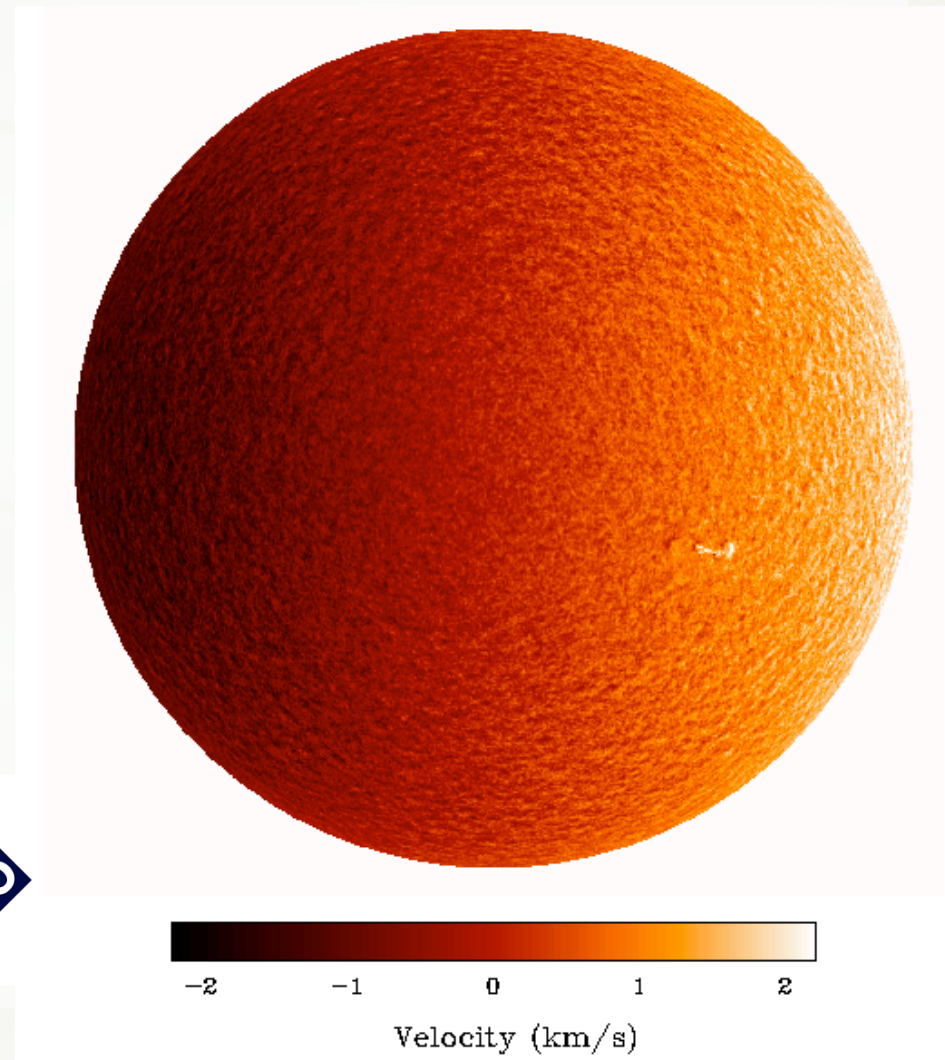
GALAXIE M33

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

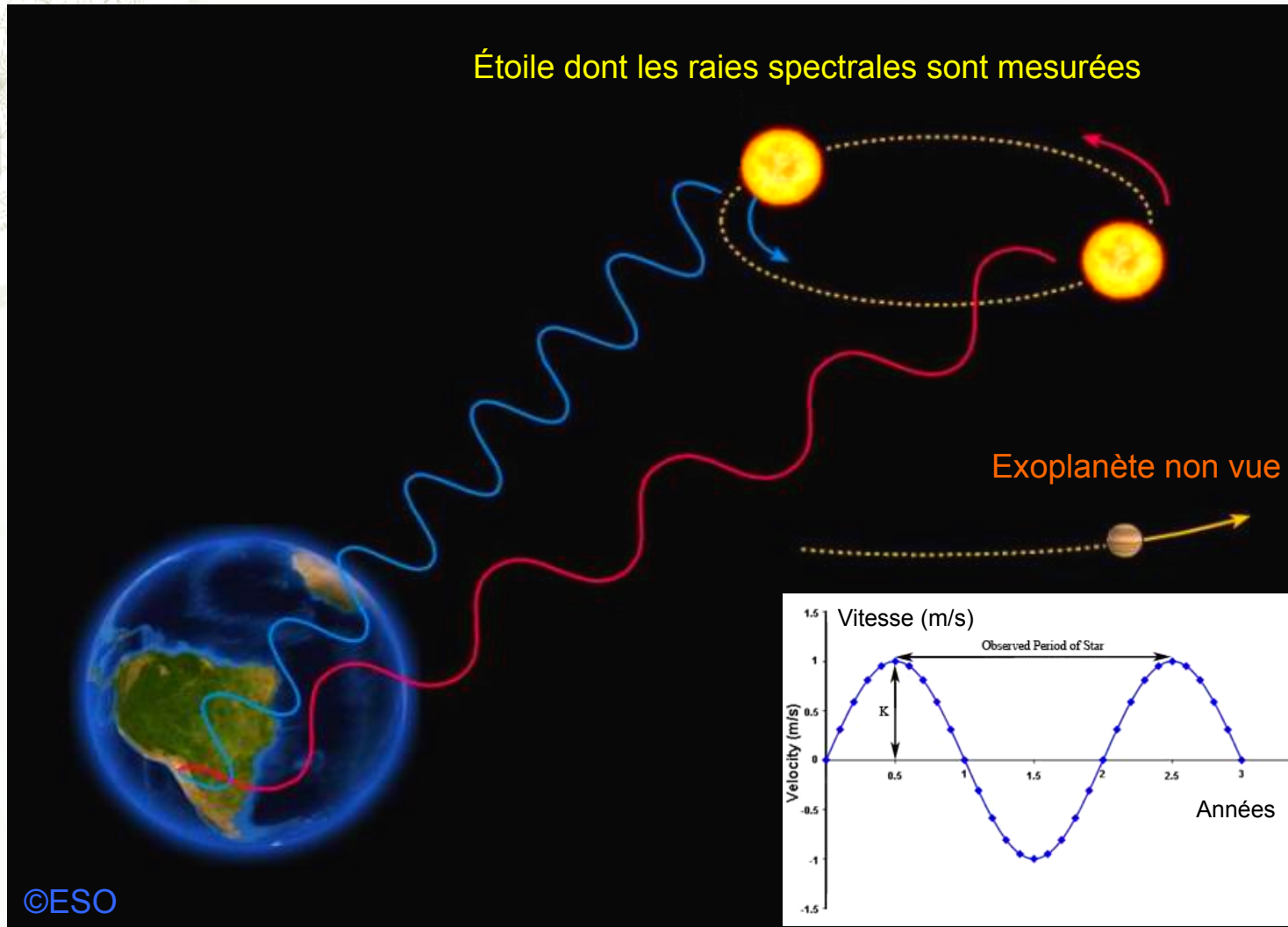


DOPPLERGRAMME DU SOLEIL

- 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



ANATOMIE D'UNE RAIE SPECTRALE

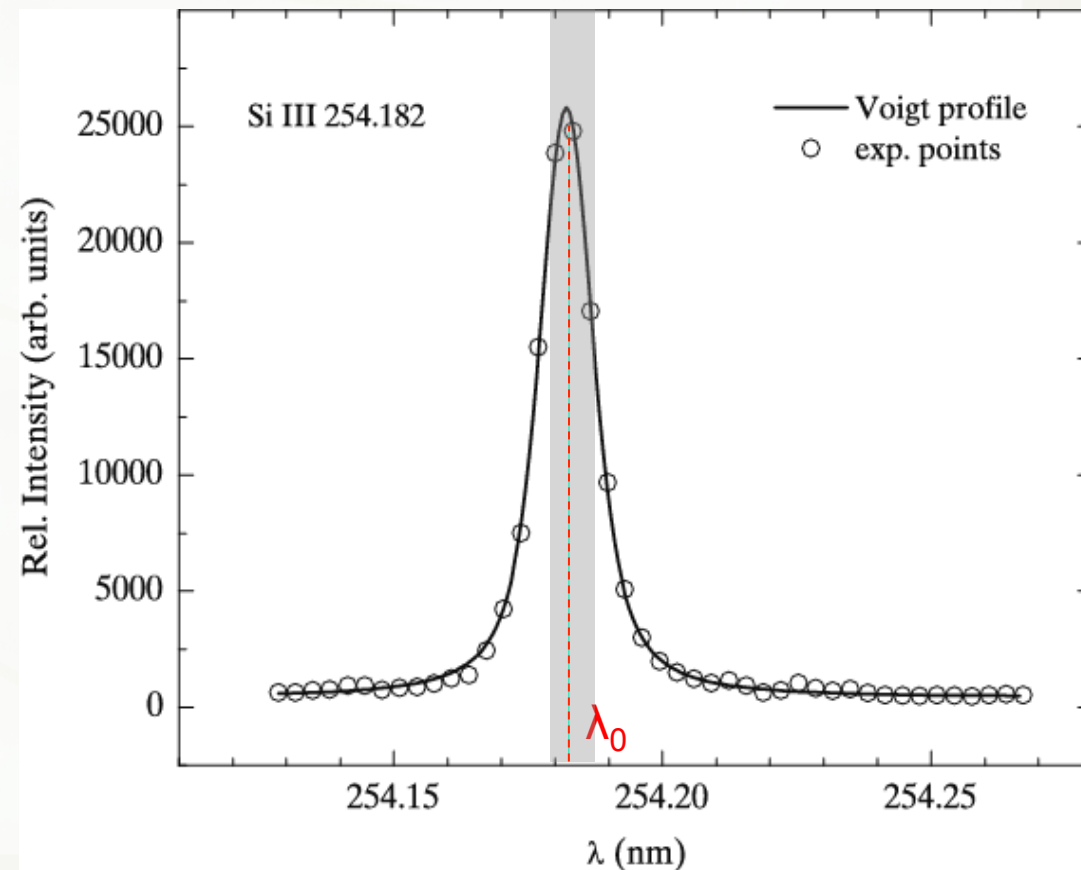
- Une raie n'est jamais infiniment étroite

- Élargissement naturel (Heisenberg)
- Élargissement Doppler
- Élargissement dû aux atomes voisins
- Ensemble = profile de Voigt

- La hauteur (ou la profondeur) de la raie dépend

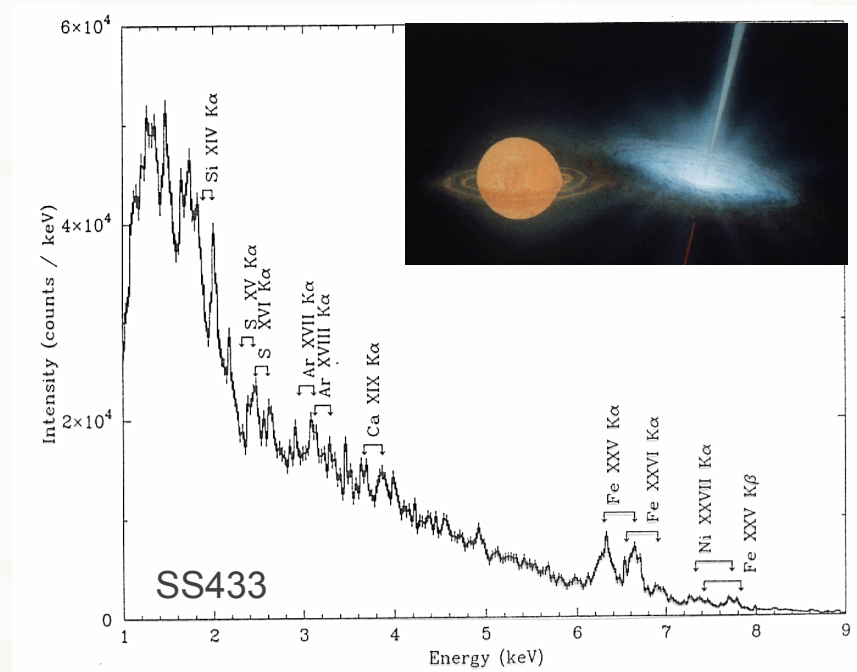
- du nombre d'atomes
- de la probabilité d'émission de cette raie (% aux autres)

Largeur équivalente W



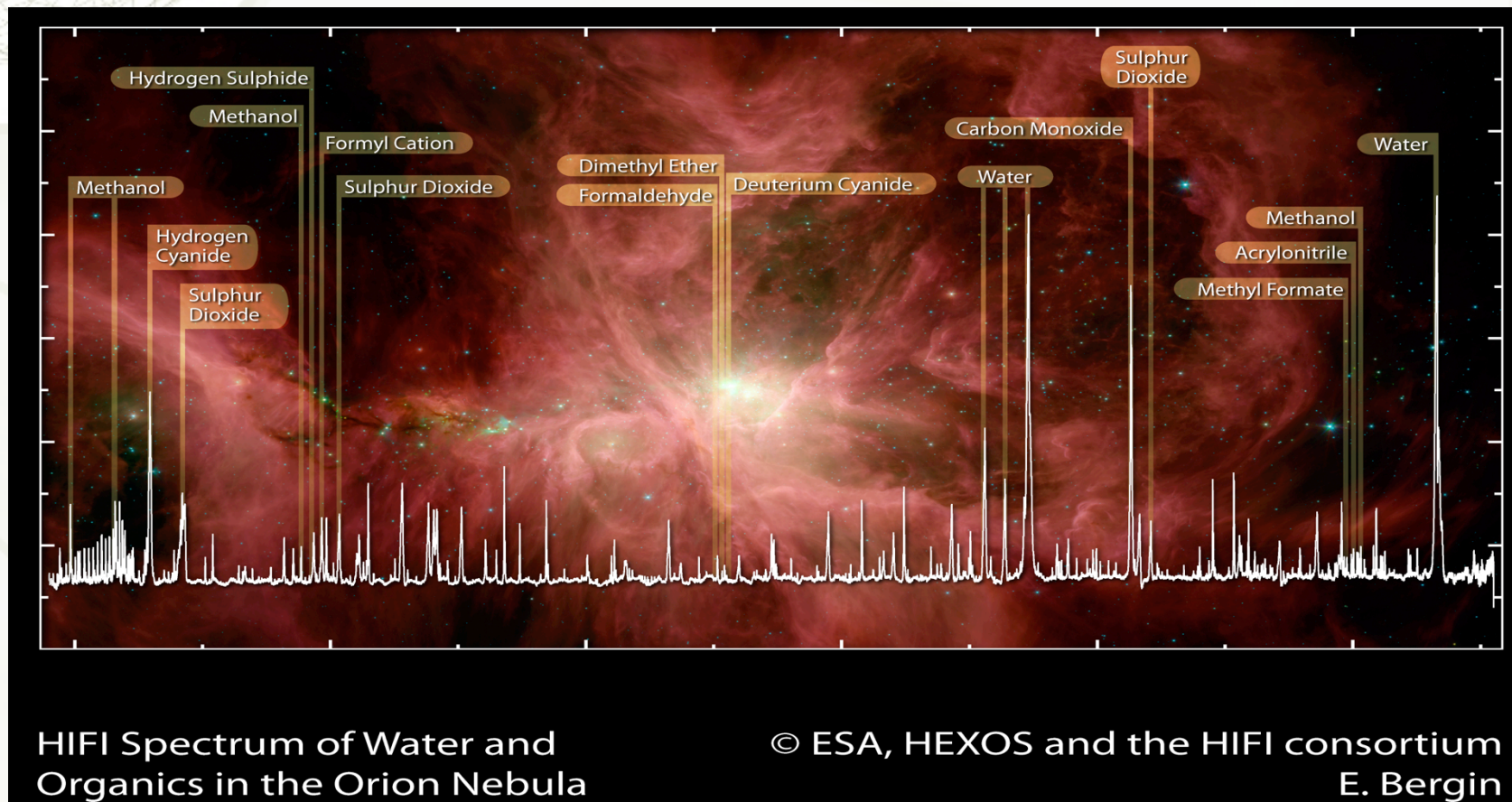
LA SPECTROSCOPIE NE SE LIMITE PAS À L'OPTIQUE!

- 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 $\lambda = 21 \text{ cm}$
- Raies d'excitation moléculaire (vibration, rotation) dans l'**infrarouge** voire le **millimétrique**
- Bremsstrahlung
- 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**



INFORMATIONS SUR LES SOURCES : NÉBULEUSES

- Nébuleuse d'Orion (Herschel en IR) ⇔ nuage moléculaire

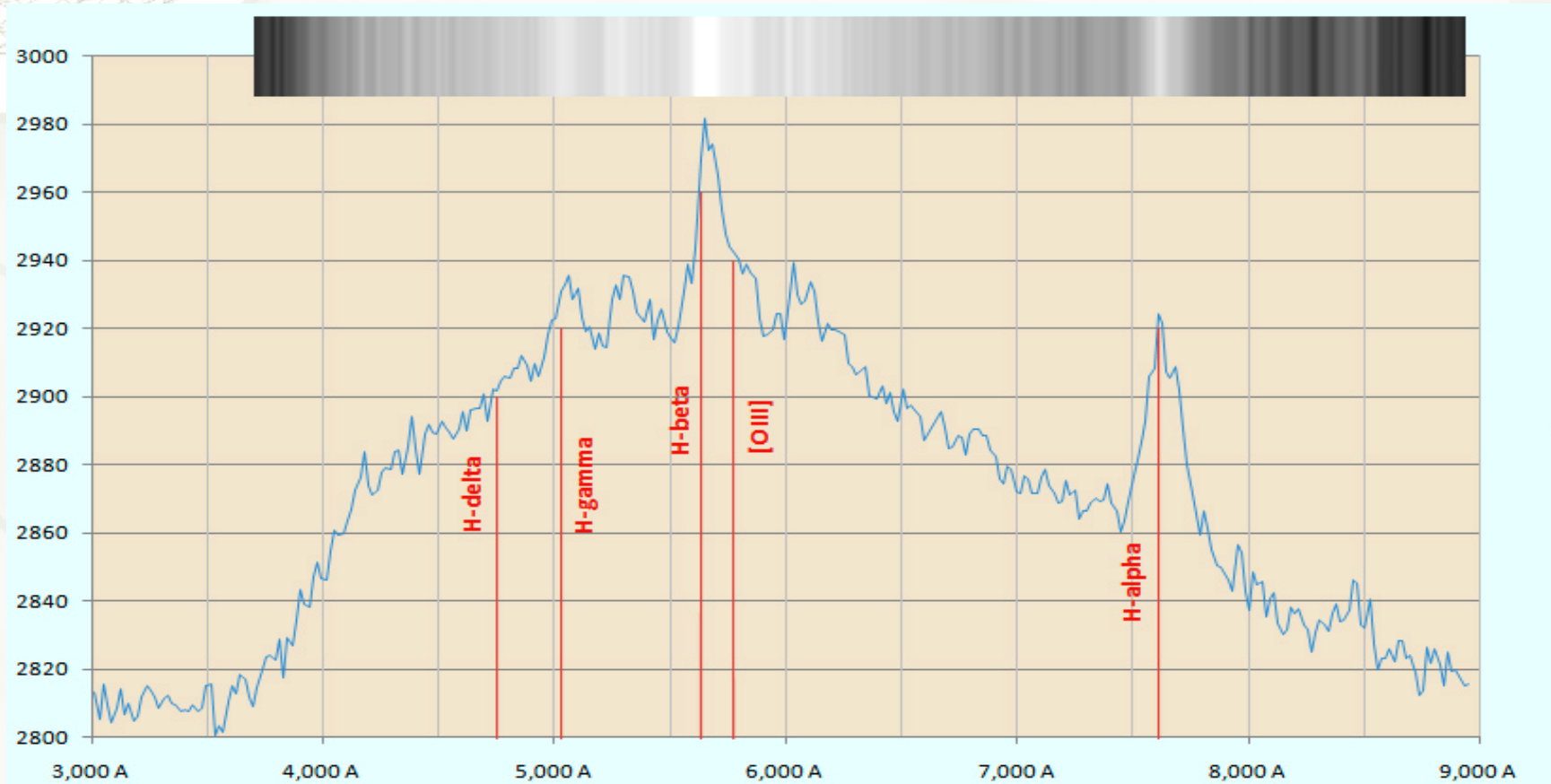


INFORMATIONS SUR LES SOURCES : QUASARS

- Quasar 3C273

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

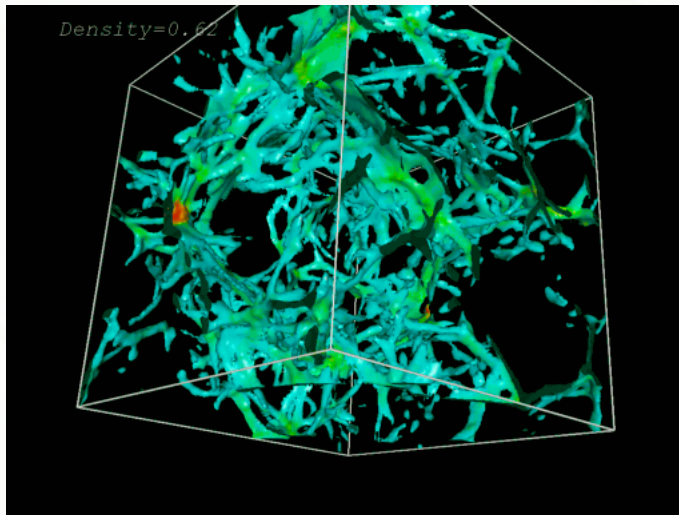
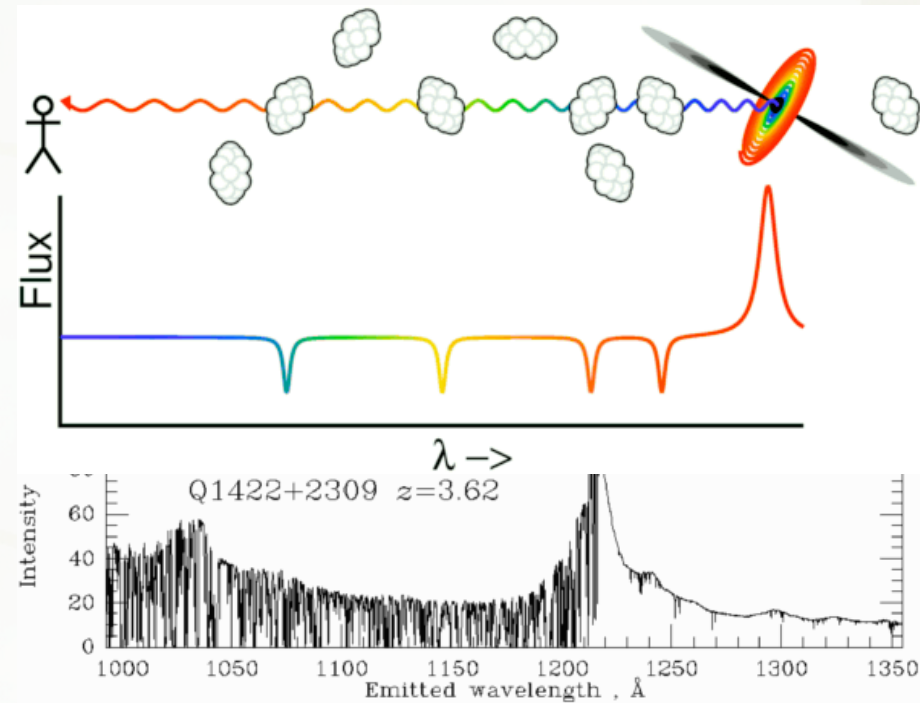
⇔ H α est à 6563 Å z = 0.158



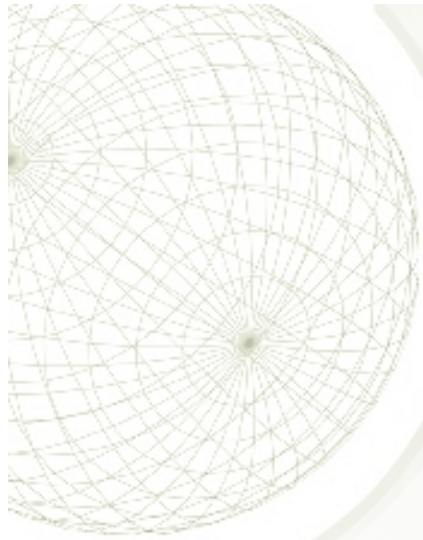
INFORMATIONS SUR LES MILIEUX TRAVERSÉS

- 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



Merci de votre attention !

