

Chapitre 3

Rayonnement et matière

Caractérisation et unités de mesure

Contrairement aux autres domaines de la physique:

- 1- pas d'accès « in situ », ou très limité
- 2- souvent difficile de vérifier la répétabilité de l'expérience
- 3- la seule source d'information sont les photons

Mais:

- 4- difficulté de mesurer des distances et donc aussi des flux absolus
- 5- les photons sont absorbés voire même déviés par les milieux interstellaire et intergalactique



Caractérisation et unités de mesure

La mesure de flux lumineux, soit à une longueur d'onde donnée (photométrie), soit en fonction de la longueur d'onde (spectroscopie), sont les seuls indices permettant d'identifier les phénomènes physiques à l'origine des objets astronomiques.

La lumière s'interprète soit en tant qu'onde, soit en tant que particule: on parle de dualité onde/corpuscule

Chaque grain de lumière (photon) transporte une énergie

$$E = h\nu$$

Energie d'un « grain » de lumière

Fréquence l'onde associée



Caractérisation et unités de mesure

$$E = h\nu$$

h : constante de Planck

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

ν : fréquence du photon

λ : longueur d'onde du photon $\lambda = \frac{c}{\nu}$

Les photons ont aussi une impulsion (quantité de mouvement):

$$E = pc$$

$$p = h \nu / c$$

Caractérisation et unités de mesure

Depuis la Terre, on mesure des flux de photons par unité de longueur d'onde ou de fréquence.

Flux = énergie « diluée sur une surface »

Comme les phénomènes astronomiques sont longs devant un temps de vie humain, on mesure les flux par unité de temps.

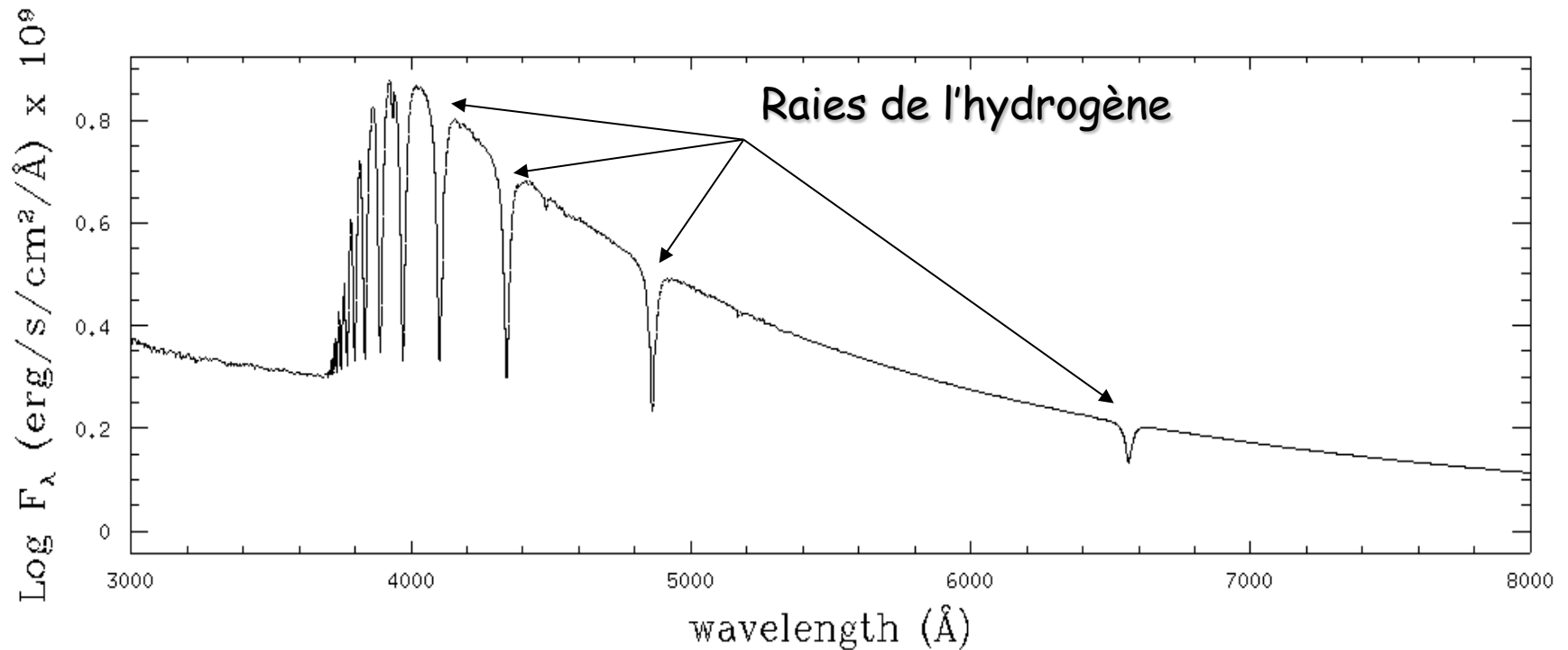
$$F_{\lambda} : \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$$

$$F_{\nu} : \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$$

$$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$$

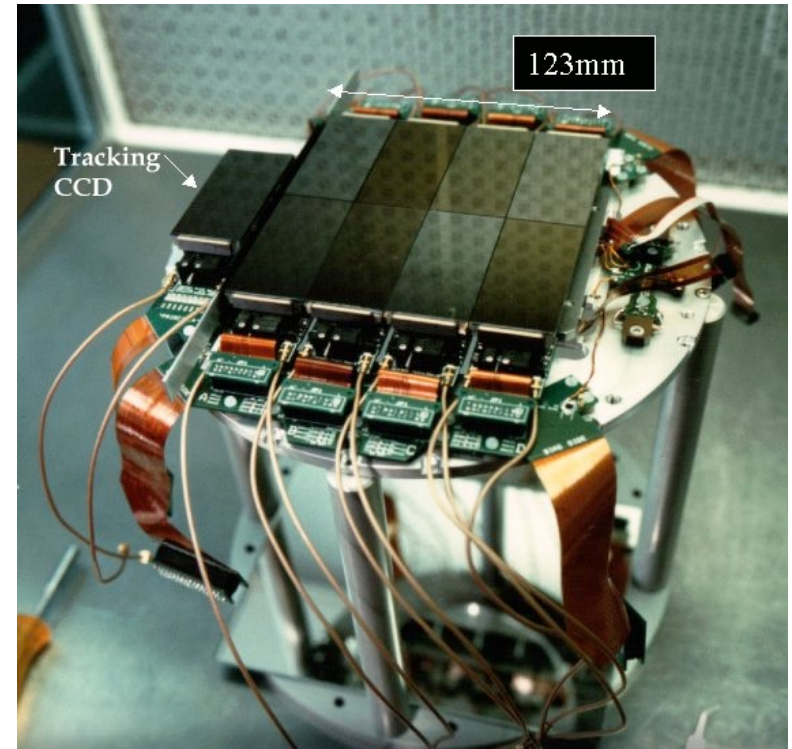
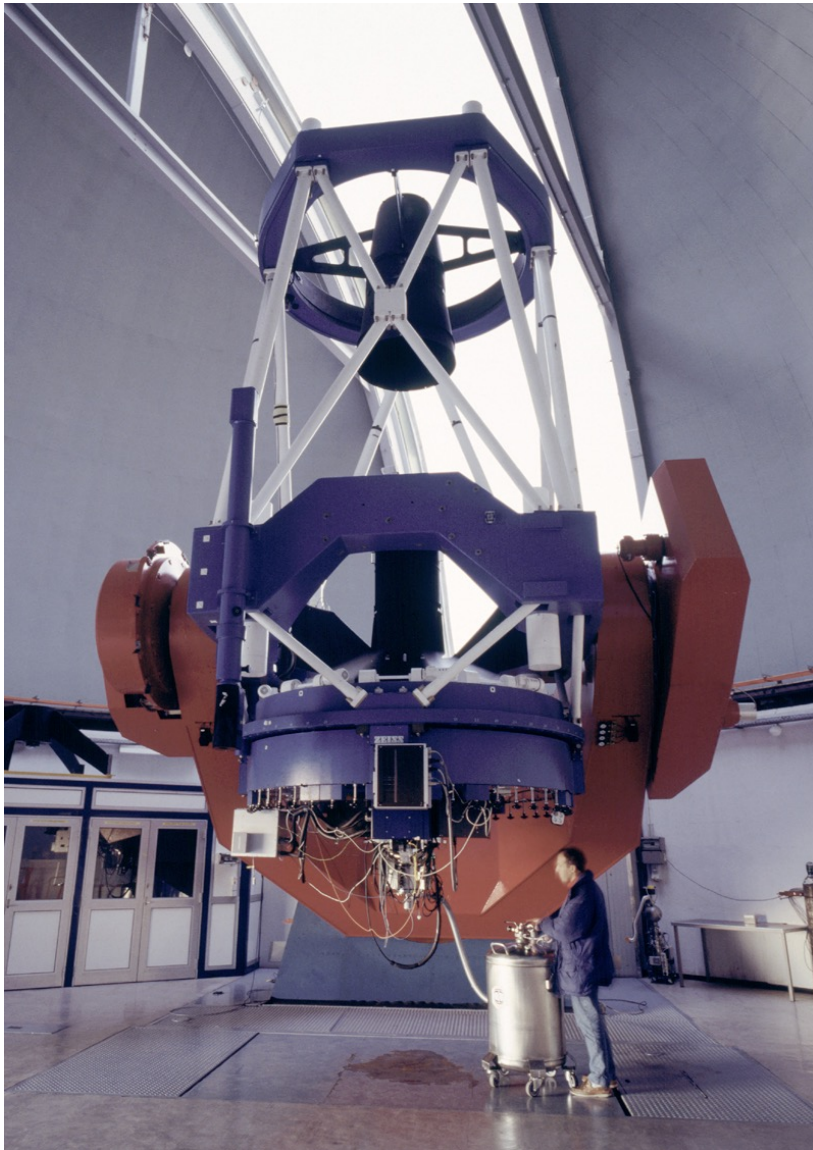
Attention: les énergies et les puissances sont souvent considérées comme identiques en astrophysique

Exemple de spectre continu et de raies: les étoiles (ici Vega)



Le spectre de Vega (et des étoiles en général) consiste en un continu et en plusieurs séries de raies en absorption et en émission, dues à l'hydrogène situé dans son atmosphère

Imagerie optique

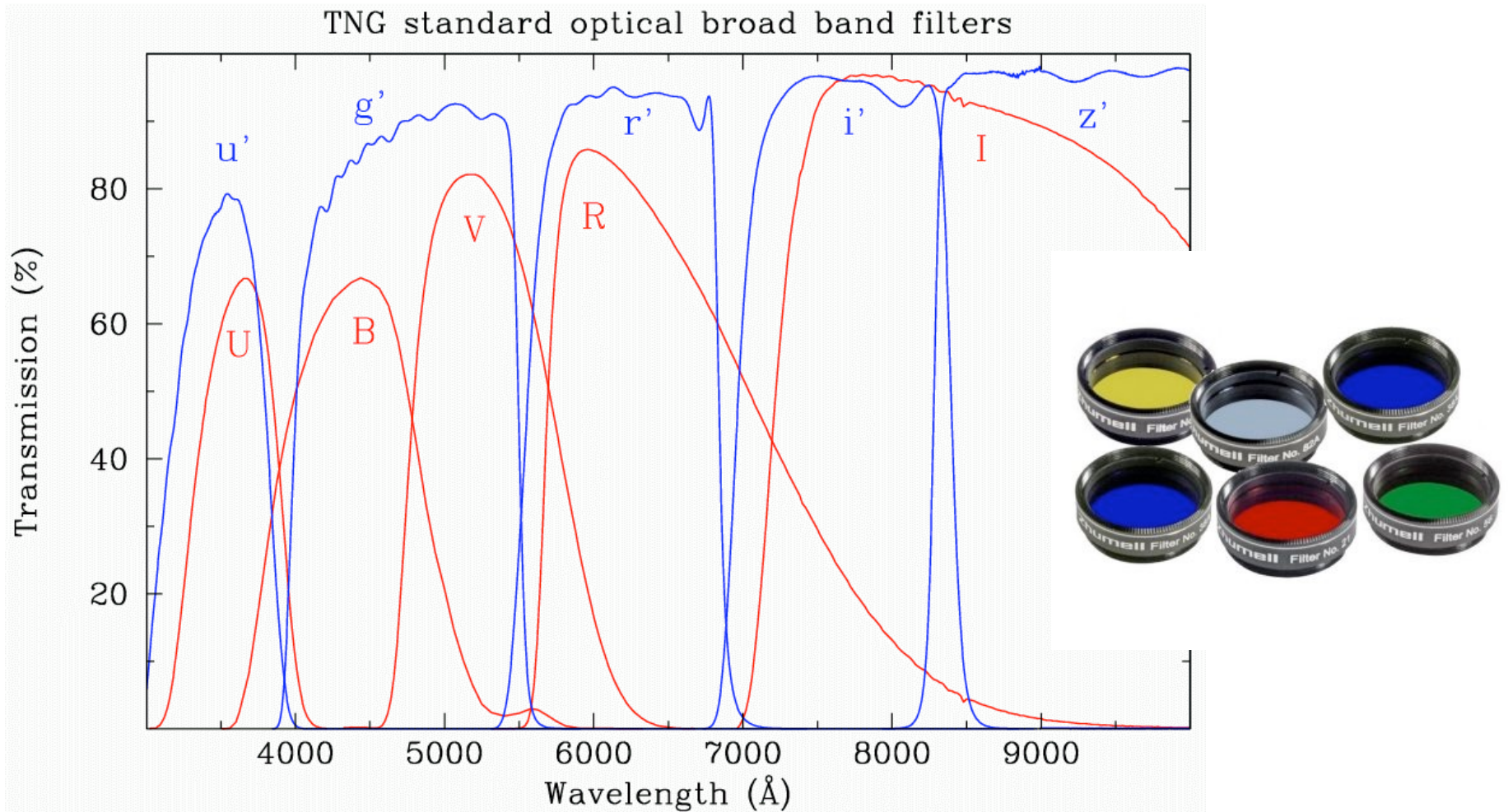


Télescope de 2.2m de diamètre de l'ESO et sa caméra à grand champ

8 CCDs : champ de 0.5 degrés

64 Mpixels !

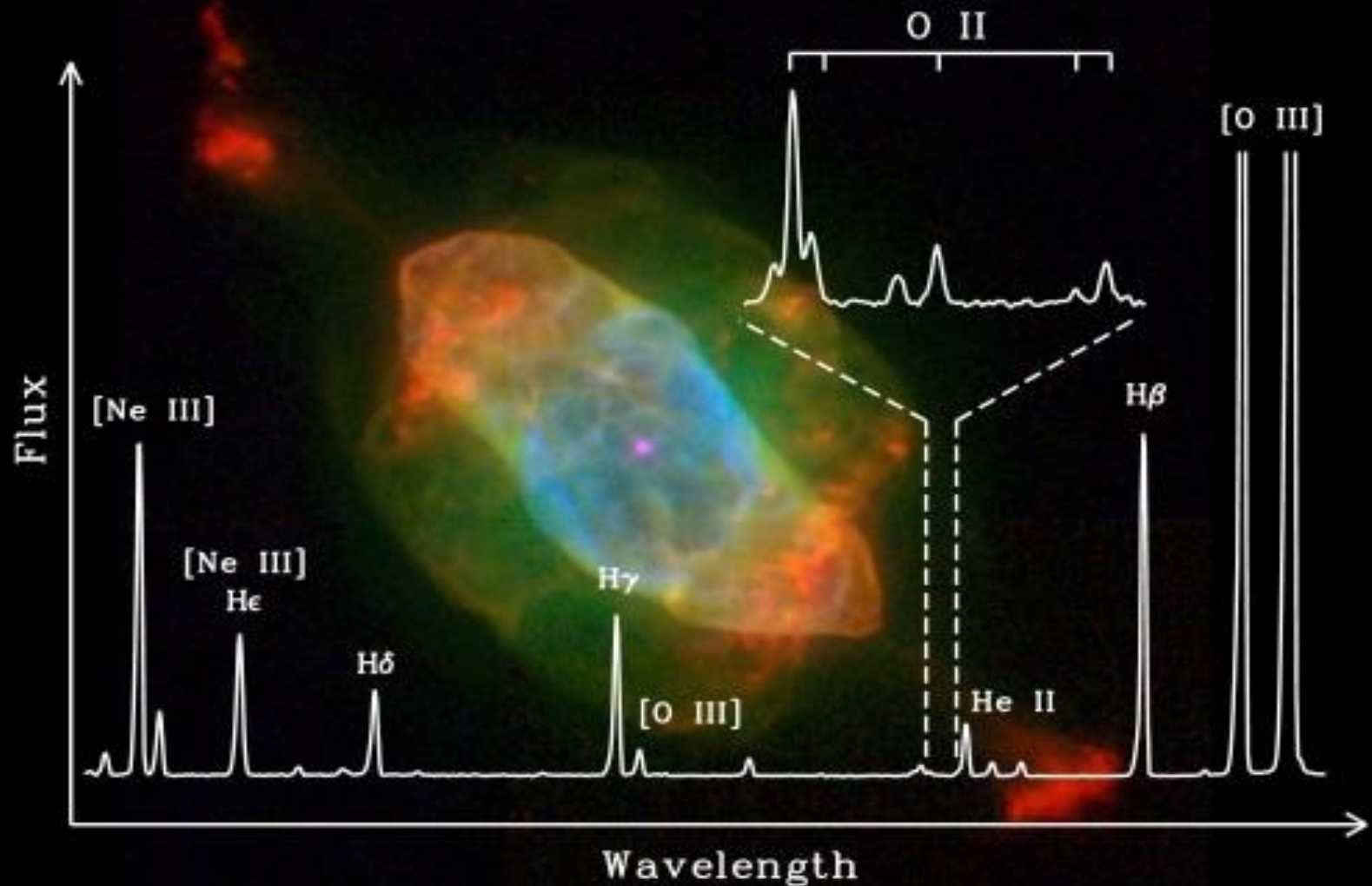
Imagerie optique



Les images en « vraies couleurs » sont obtenues à travers différents filtres optiques et recomposées. Les courbes montrées ici sont celles du télescope italien « Galileo » de 3.5m de diamètre, située à La Palma (Canaries)

Exemple de spectre de raies: les nébuleuses « planétaires »

NGC 7009



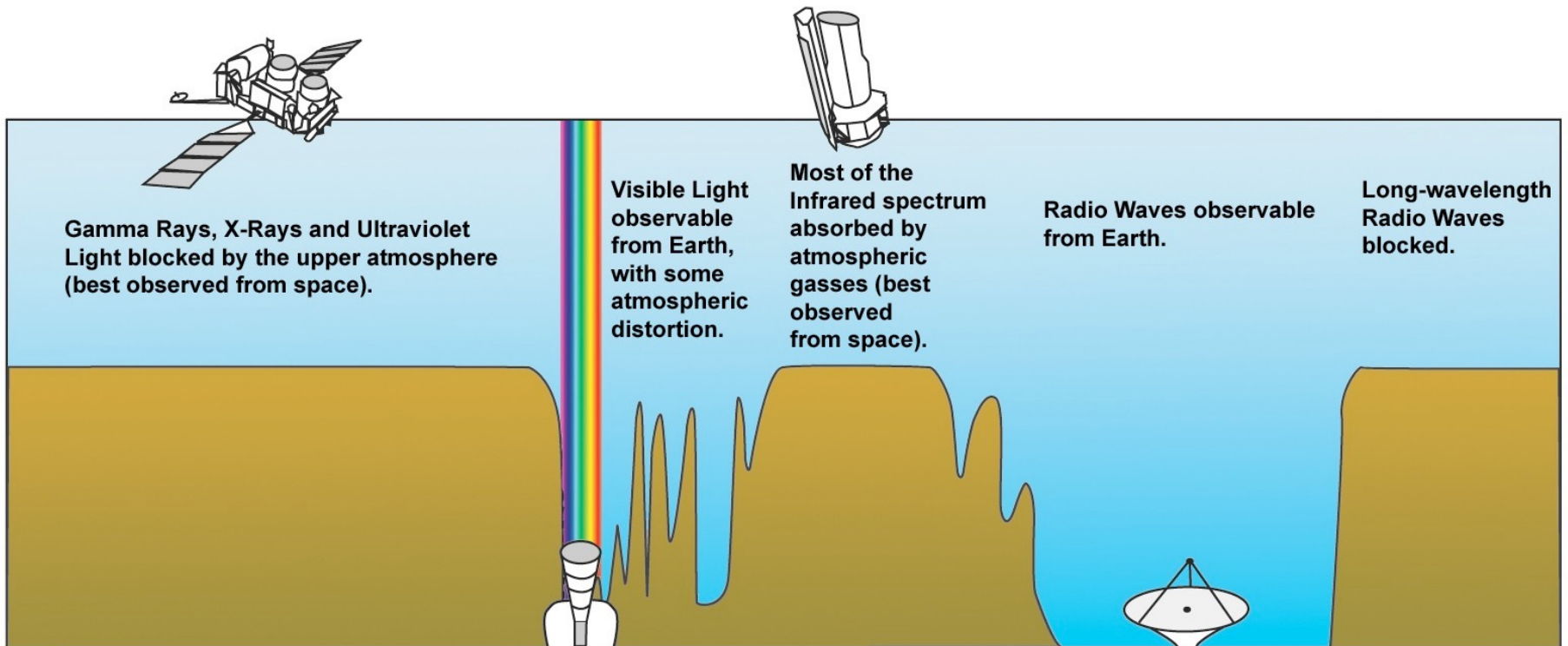
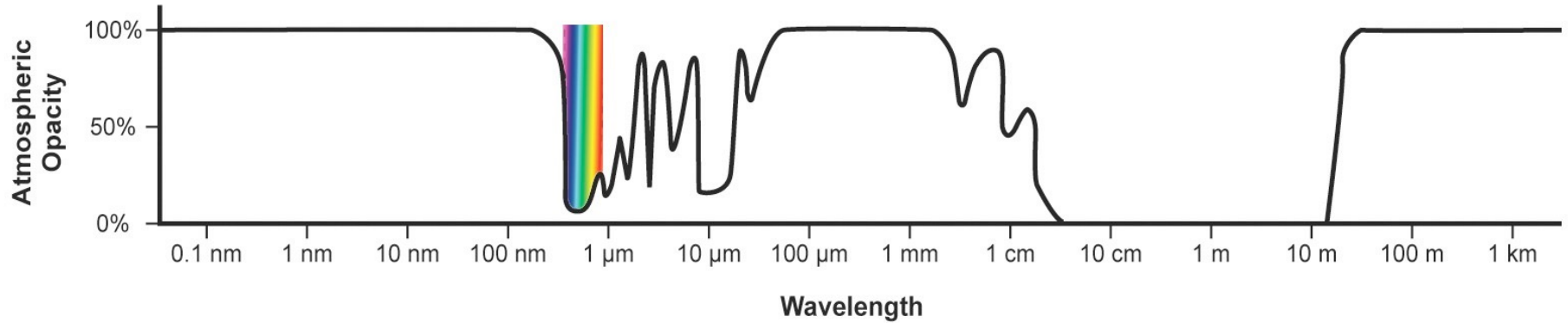
Nébuleuse planétaire « Helix » (NGC 7293) à 700 al



Nébuleuse planétaire « Helix » (NGC 7293) à 700 al



Absorption atmosphérique



Observatoire de La Silla (Chili, 2300m)



14 télescopes entre 0.5m et 3.6m de diamètre

ESO: European Southern Observatory -> sur 2 sites

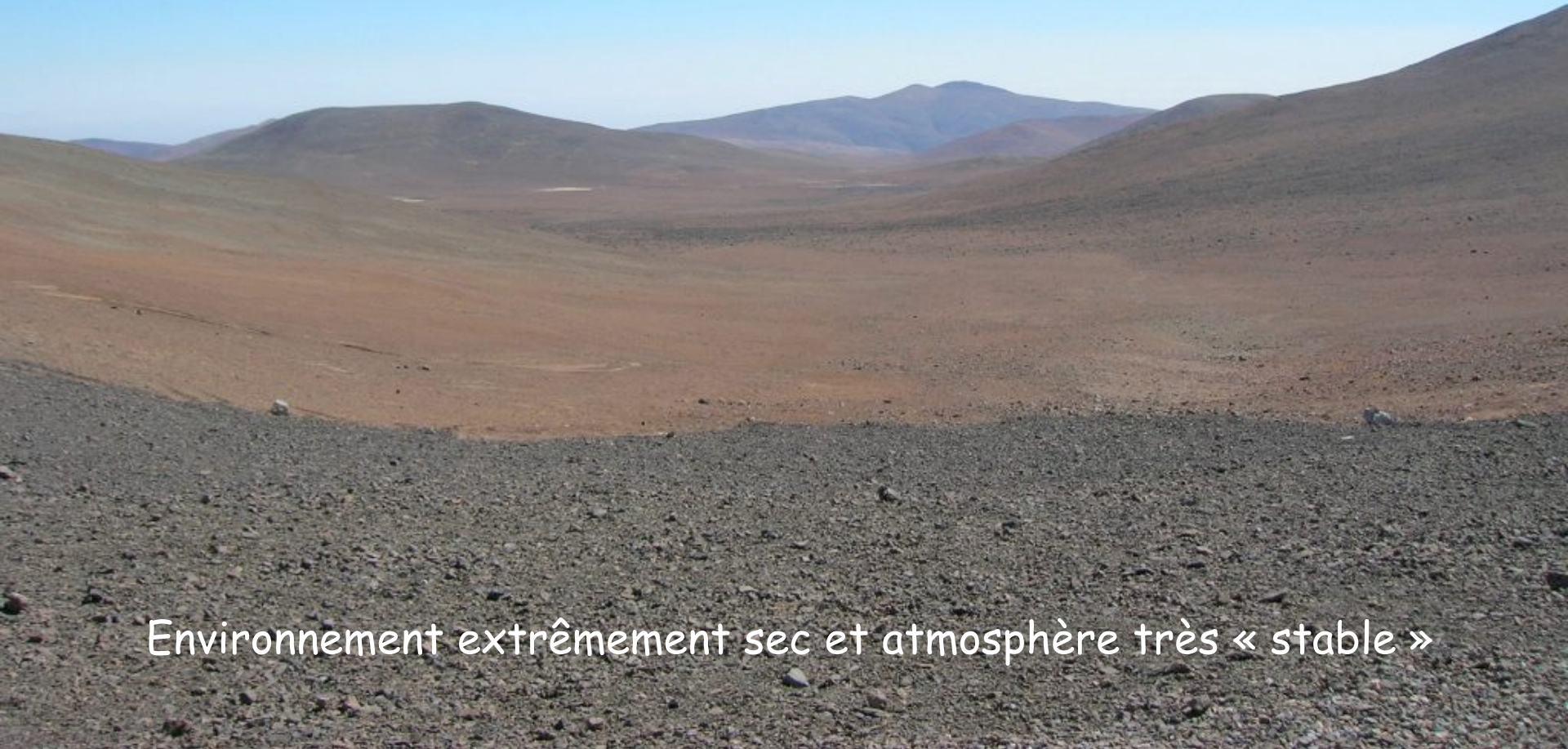
Crée en 1962, 15 pays membres, dont la Suisse

Observatoire de Cerro Paranal (Chili, 2600m)



4 télescopes de 8.2m plus télescopes auxiliaires

Observatoire de Cerro Paranal (Chili, 2600m)



Environnement extrêmement sec et atmosphère très « stable »



The Paranal Residencia

ESO Press Photo 07a/08 (25 March 2008)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.





Observatoire de Cerro Paranal (Chili, 2600m)
Hotel pour ~200 personnes

Observatoire de Cerro Paranal (Chili, 2600m)

Hotel pour ~200 personnes



L'atome d'hydrogène

Transitions électroniques de l'atome d'hydrogène

L'énergie des photons émis par un atome d'hydrogène prend des valeurs bien déterminées: on dit que les niveaux d'énergie sont quantifiés.

Modèle simplifié d'atome d'hydrogène: modèle de Borh

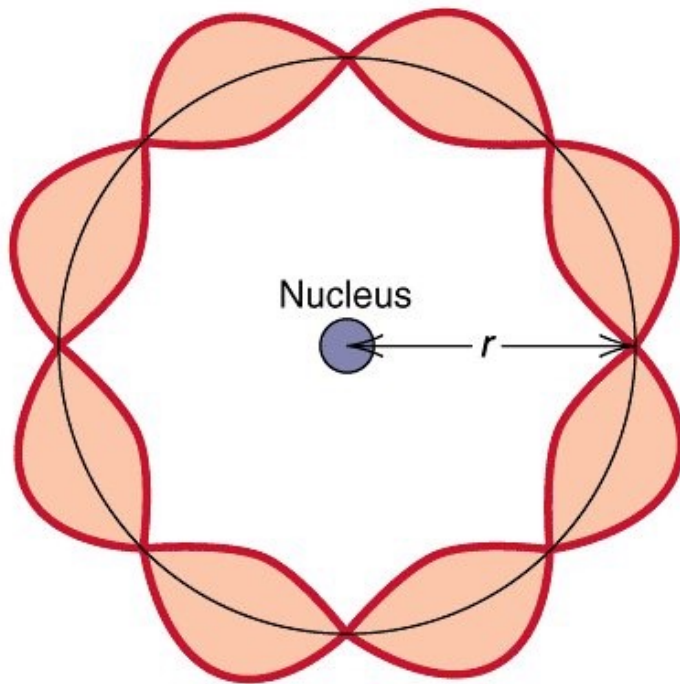
-> l'électron est en orbite autour du proton.

Equilibre entre la force de Coulomb et l'accélération centripète

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

Où r est le rayon de l'orbite et e la charge de l'électron, v est sa vitesse

Transitions électroniques de l'atome d'hydrogène



L'hypothèse fondamentale est la quantification du moment cinétique de l'électron

$$m v r = n \times \hbar$$

avec $\hbar = h / 2\pi$

n est un entier

h est la constante de Planck

$$h = 6,626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$$

Cela revient à dire que

$$2\pi r = n \times \lambda \quad \text{où } \lambda \text{ est la longueur d'onde de de Broglie: } \lambda = \frac{h}{p}$$

Transitions électroniques de l'atome d'hydrogène

Electron en orbite circulaire $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r}$

Quantification moment cinétique: $mv r = n \times \hbar$

Permettent de calculer l'énergie totale de l'électron : $E_{\text{Tot}} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$

en exprimant r et v en fonction de n et h

$$E_{\text{Tot}} = -\frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

Transitions électroniques de l'atome d'hydrogène

$$E_{\text{Tot}} = - \underbrace{\frac{me^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2}}_{C} \frac{1}{n^2}$$

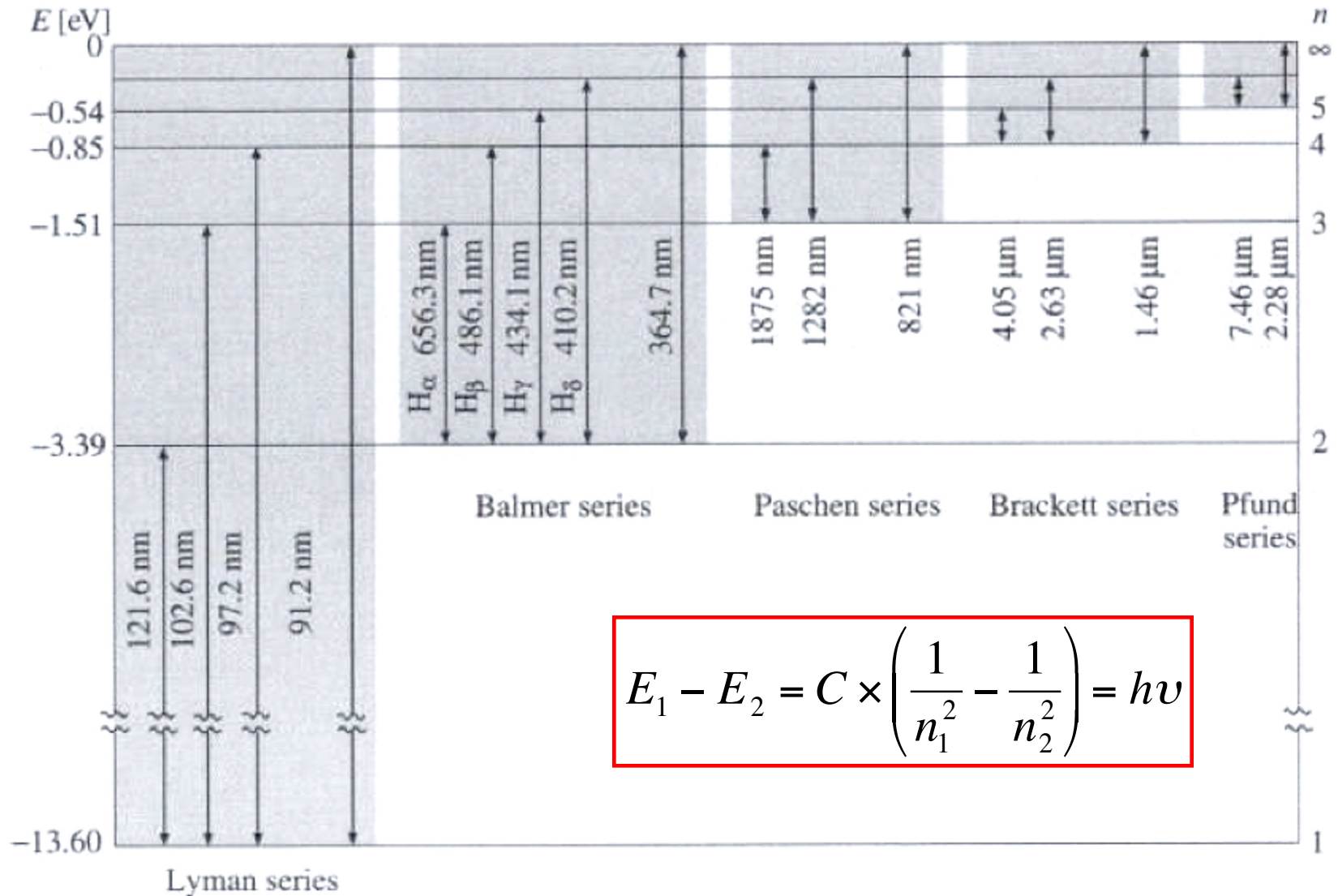
Constante ayant la dimension d'une énergie

$$C = -2,18 \times 10^{-18} \text{ J} \\ = -13,6 \text{ eV}$$

La différence d'énergie entre deux niveaux n_1 et n_2 donne la longueur d'onde des photons correspondants puisque

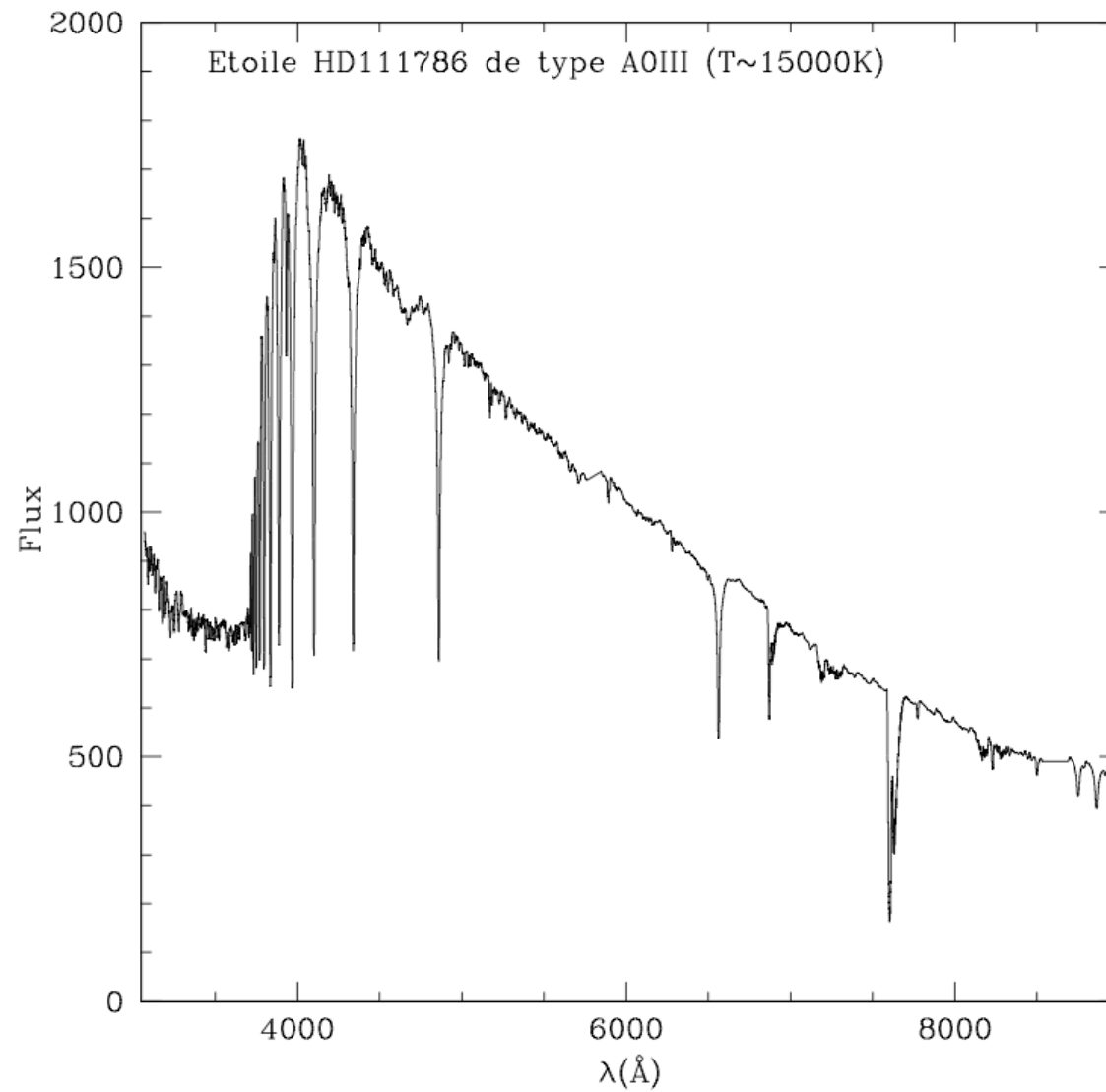
$$E_1 - E_2 = C \times \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = h\nu$$

Transitions électroniques de l'atome d'hydrogène

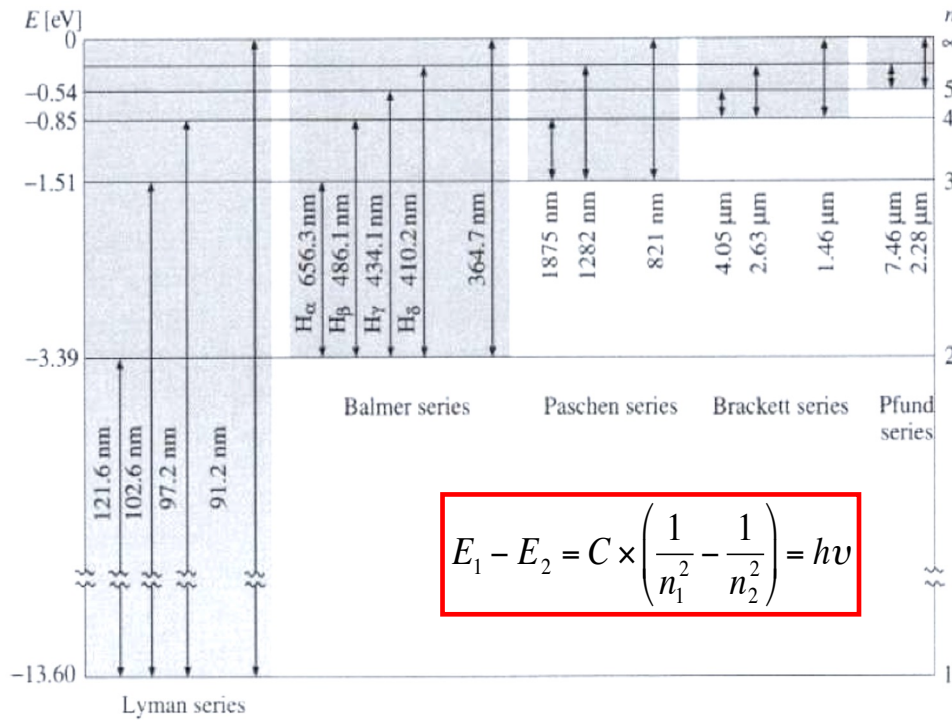


$$E_1 - E_2 = C \times \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = h\nu$$

Effet sur les spectres stellaires



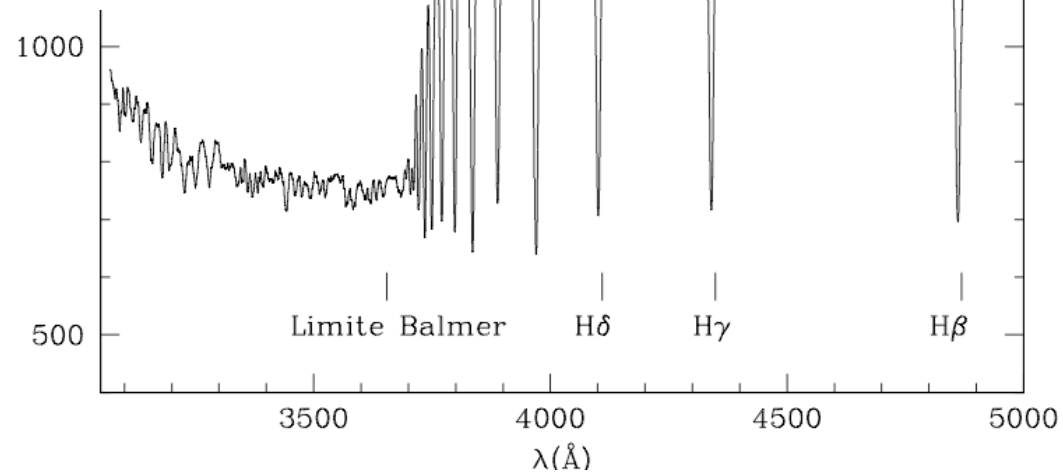
Effet sur les spectres stellaires



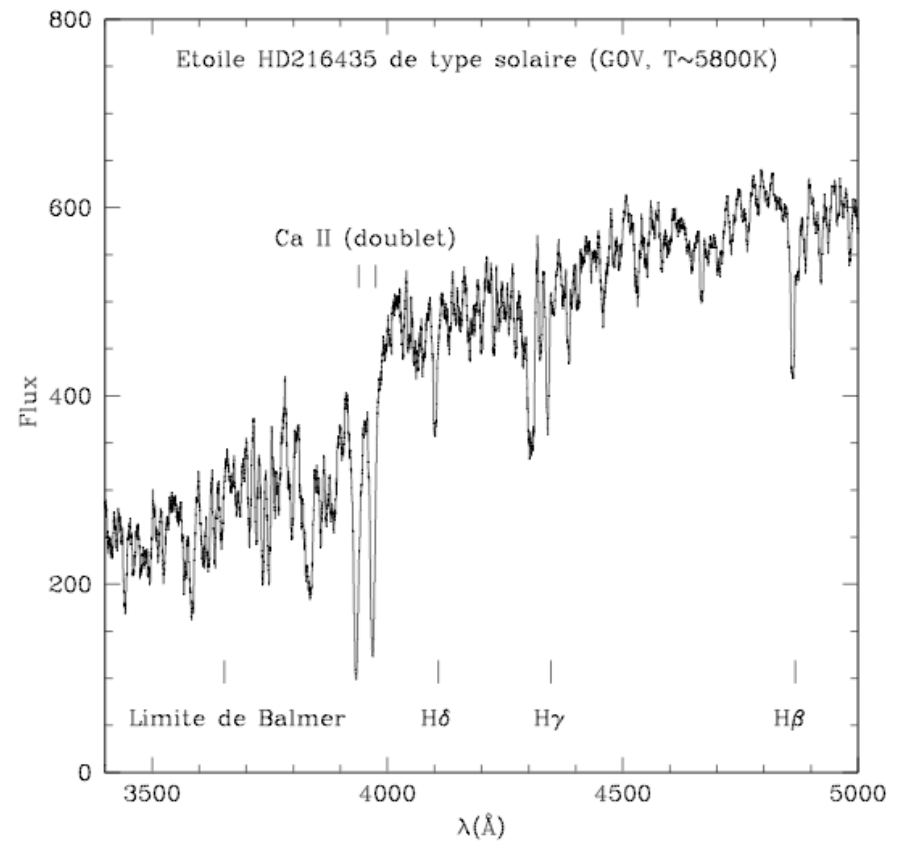
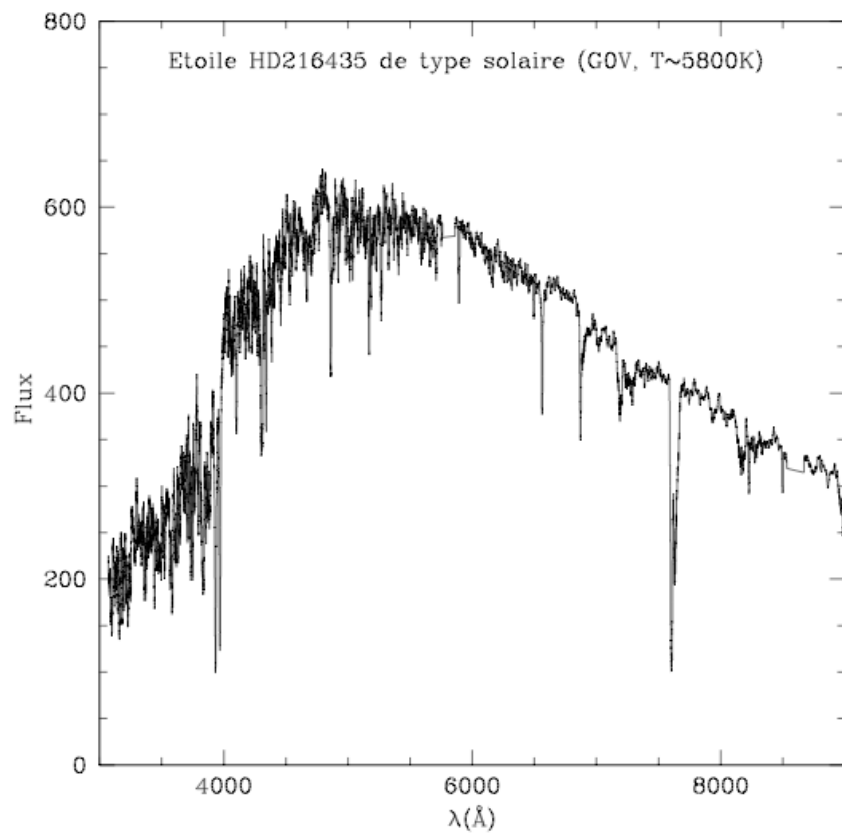
$$E_1 - E_2 = C \times \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = h\nu$$

Etoile HD111786 de type A0III ($T \sim 15000\text{K}$)

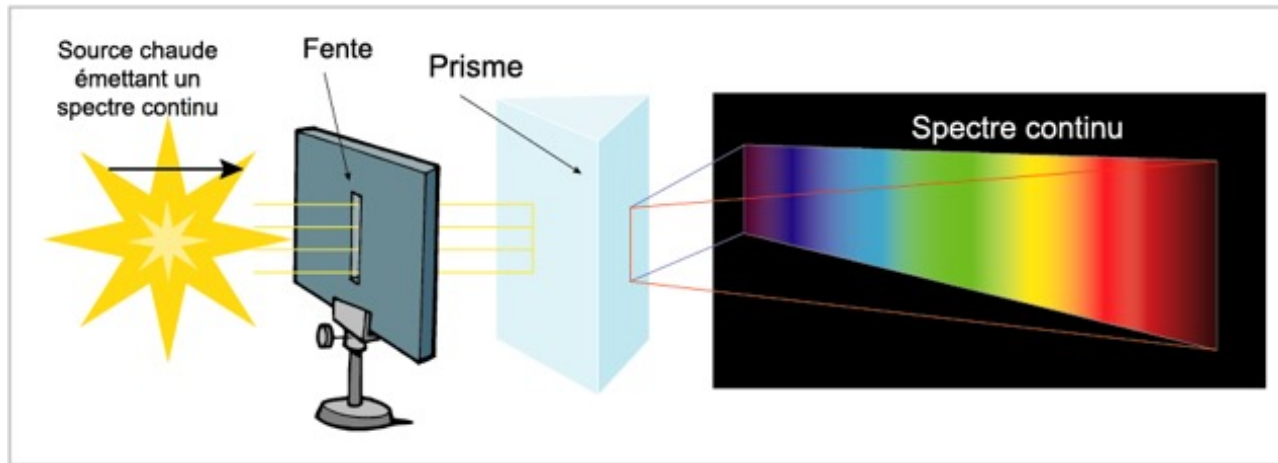
Discontinuite de Balmer



Spectre du type Solaire



Spectroscopie

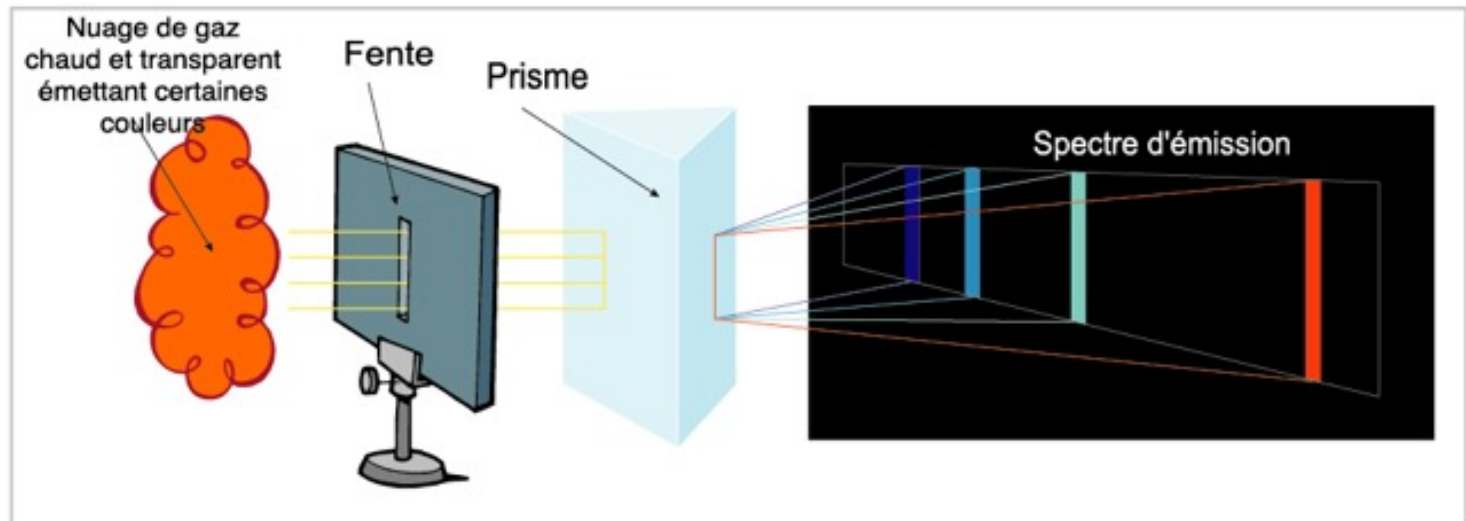
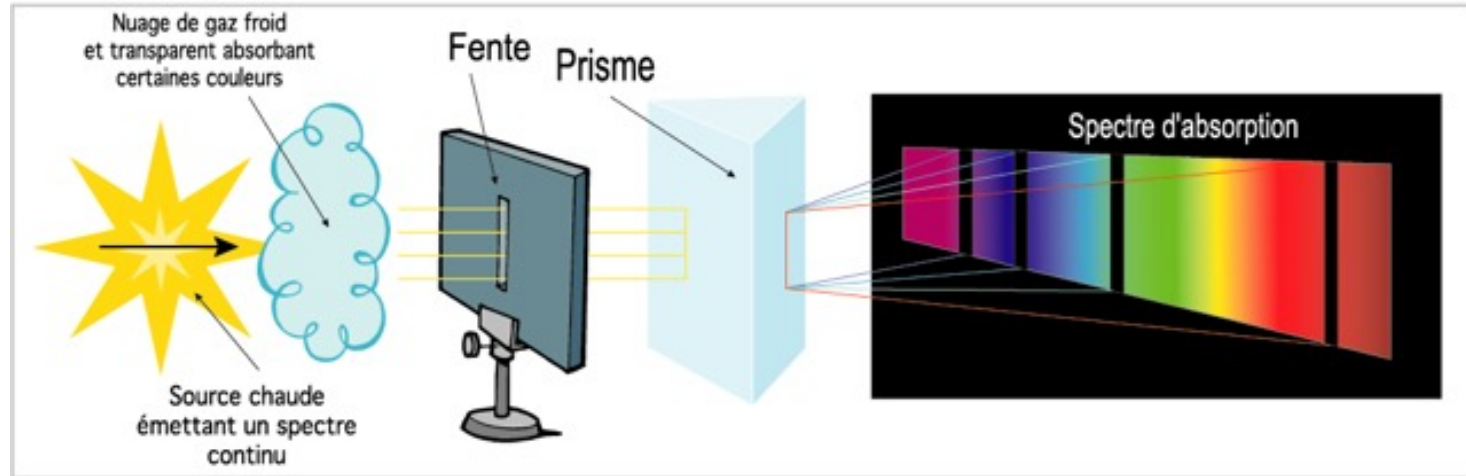


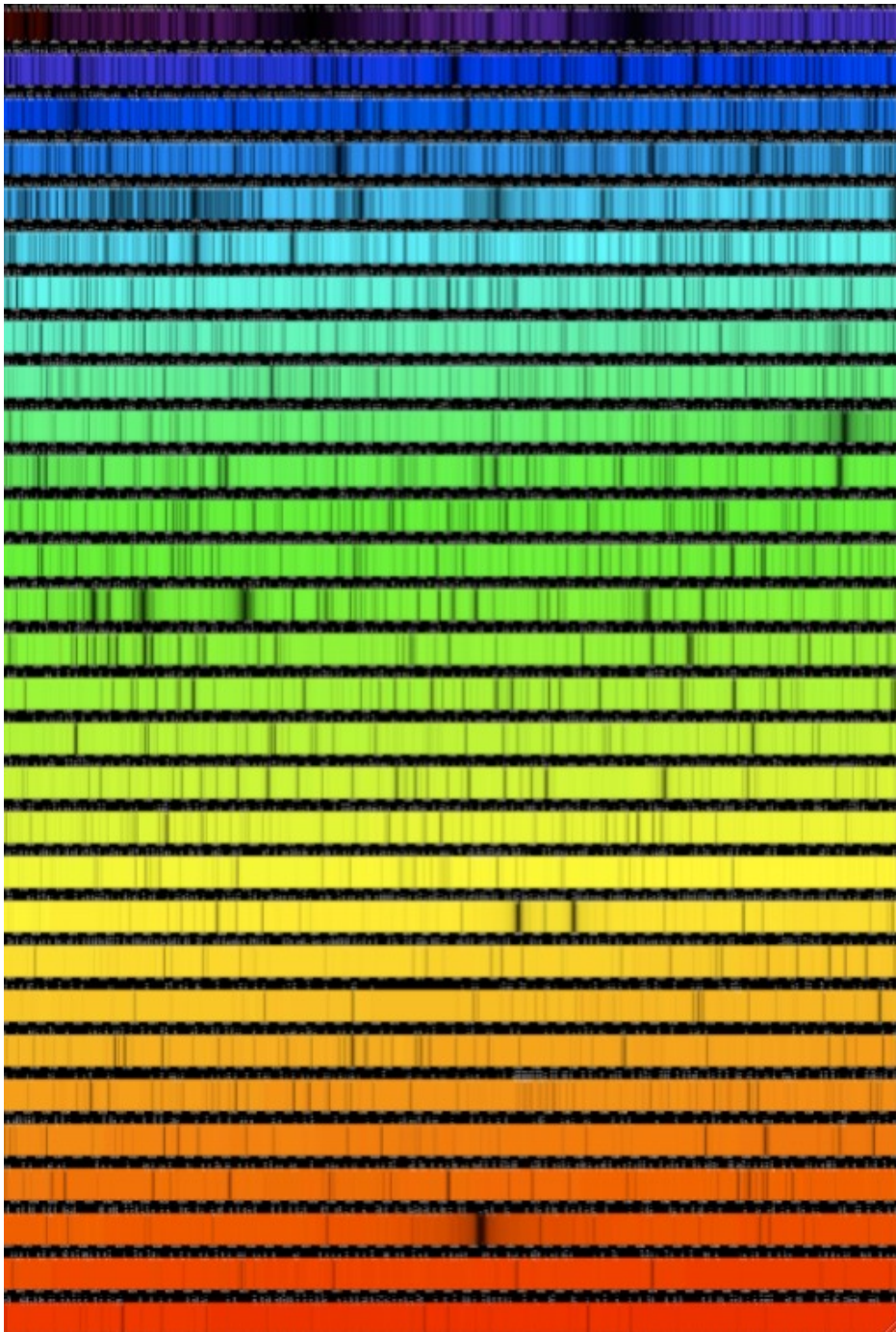
On distingue les rayonnements:

1. **Continu**, le plus souvent émis par un corps chauffé ou par des particules accélérées (électrons, protons, rayonnement « synchrotron »)
2. **de raies**, le plus souvent émis par des atomes dans divers « états d'excitation »

Les raies permettent de déterminer la composition chimique des astres.

Spectres de raies





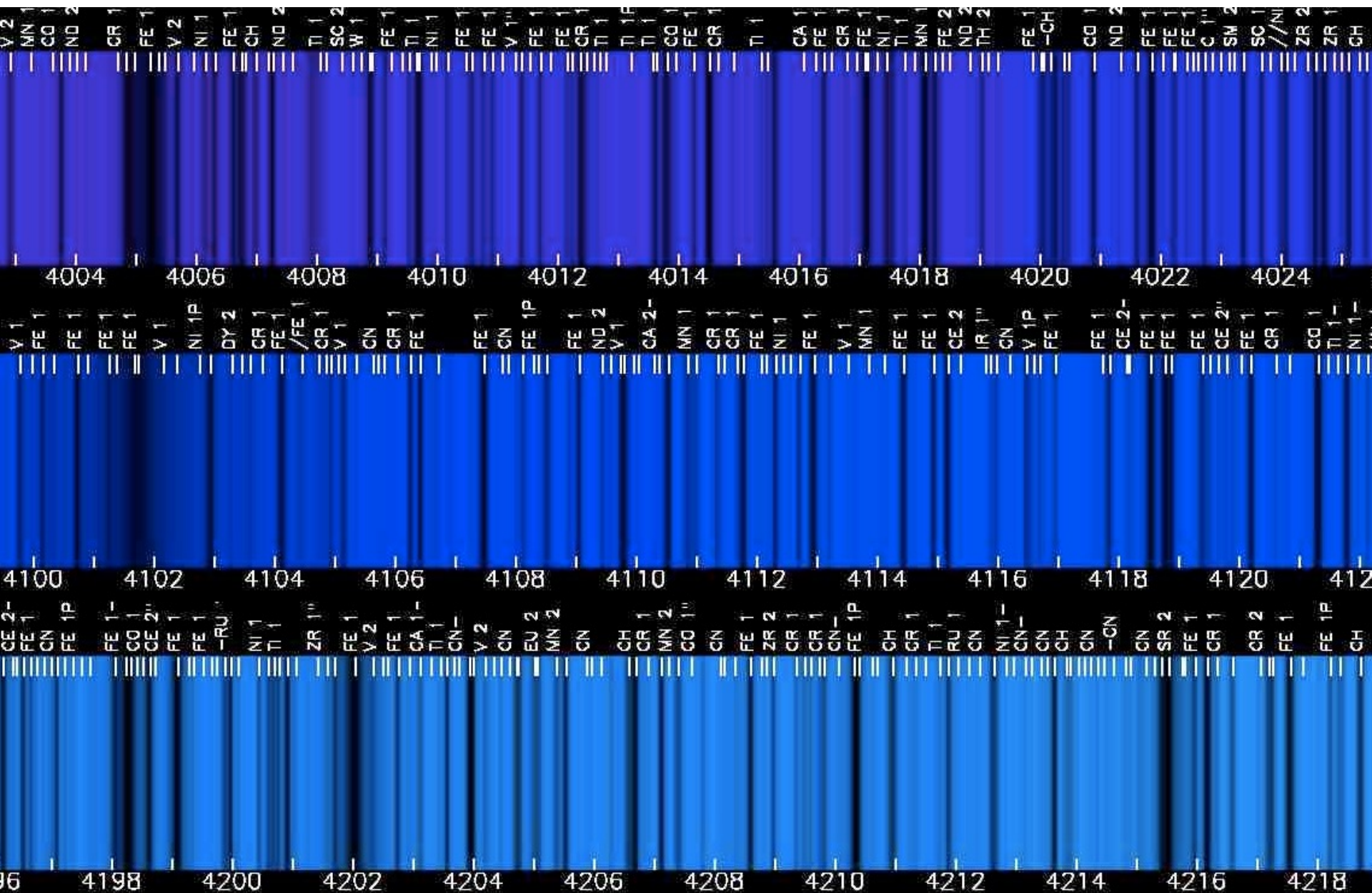
Exemple de spectre (lumière solaire)

Spectre continu

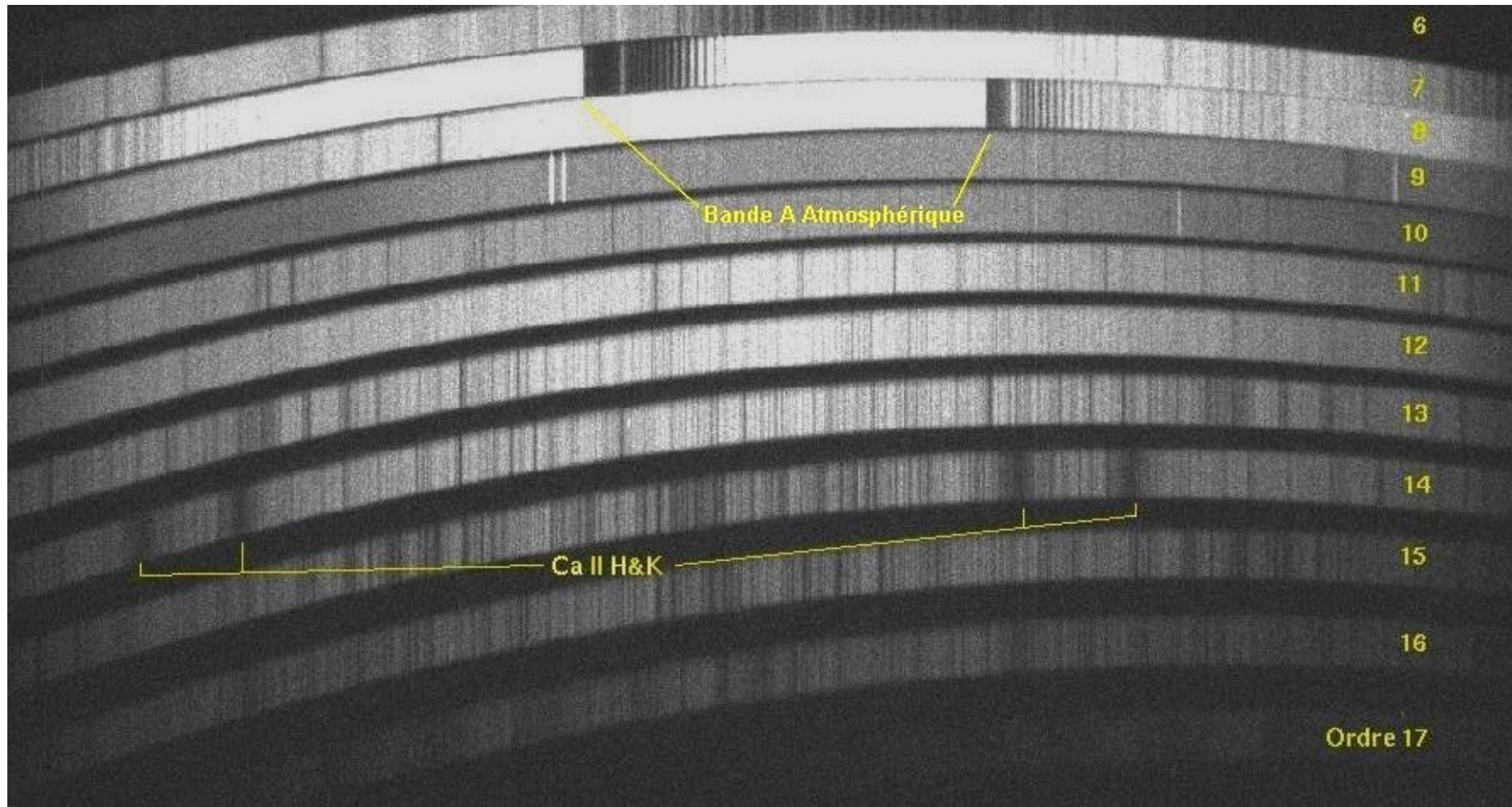
Spectre de raies (absorption
par l'atmosphère solaire)

Pic d'émission dans le jaune

Exemple de spectre (lumière solaire)



Exemple de spectre (lumière crépusculaire)



Représentation des spectres

On donne indifféremment les spectres en termes de flux par unité de longueur d'onde ou par unité de fréquence.

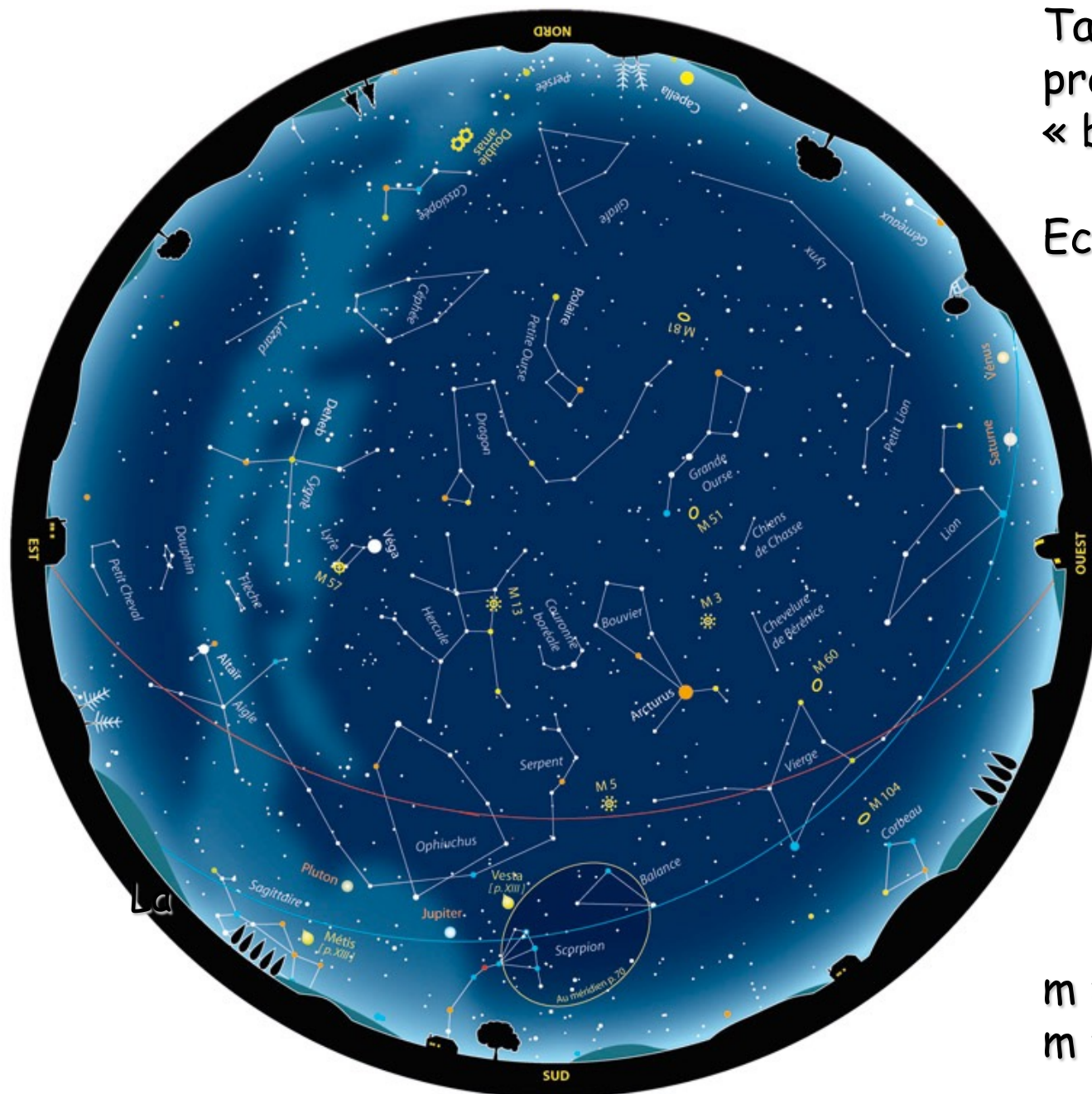
Pour passer de l'une à l'autre représentation on remarque que l'énergie intégrée dans une bande de longueur d'onde (ou de fréquence), est la même:

$$F_{\lambda} d\lambda = -F_{\nu} d\nu$$

Et donc

$$F_{\nu} = \frac{c}{\nu^2} F_{\lambda} = \frac{\lambda^2}{c} F_{\lambda}$$

Le système des magnitudes

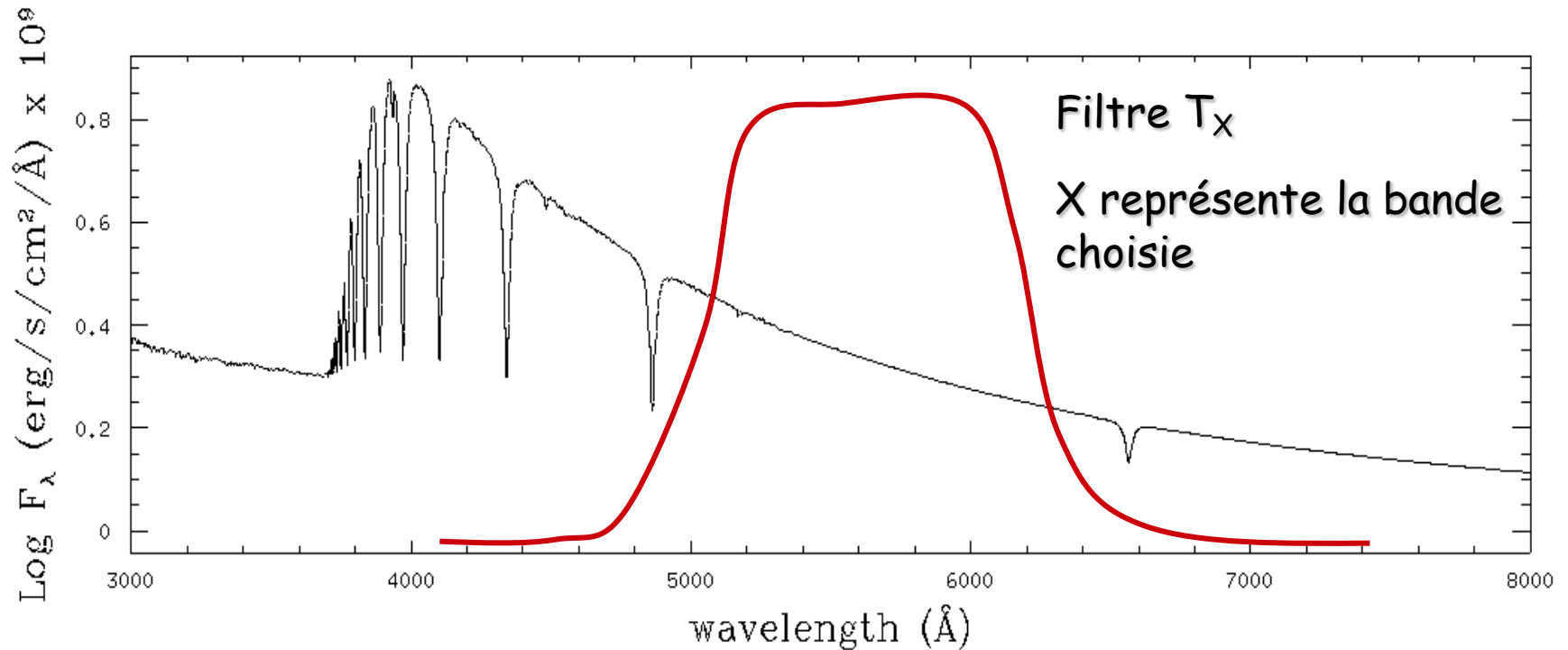


Taille des étoiles
proportionnelle à leur
« brillance »

Echelle logarithmique

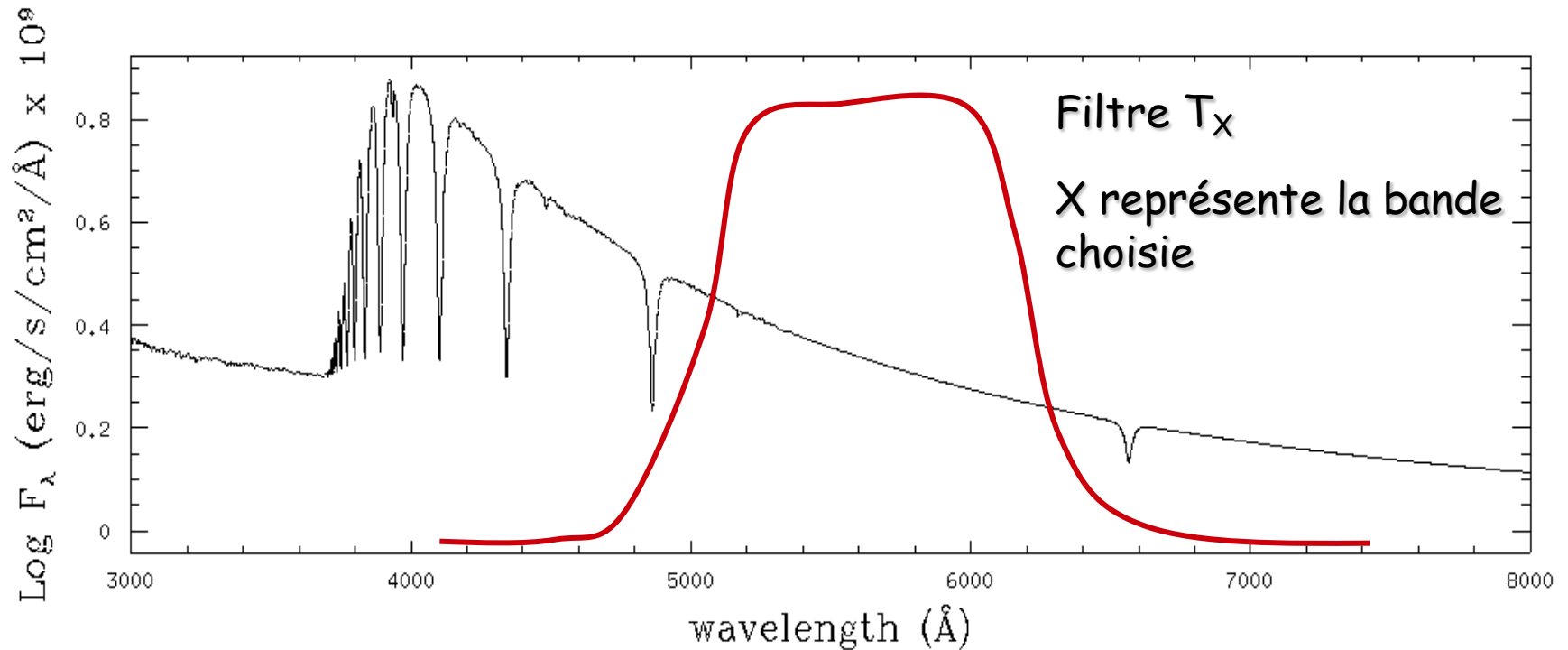
$m = 0 \rightarrow$ brillant (Véga)
 $m = 6 \rightarrow$ limite à l'œil nu

Spectroscopie et photométrie



La **spectroscopie** décrit l'intensité du rayonnement en fonction de la longueur d'onde. La **photométrie** donne le rayonnement intégré dans une « **bande passante** » choisie. Dans les longueurs d'ondes visibles cette bande passante est donnée par des **filtres** de verre.

Spectroscopie et photométrie



Les magnitudes sont une échelle logarithmique pour mesurer les flux lumineux

$$m = -2.5 \log(F_X)$$

avec

$$F_X = \frac{\int T_X(\nu) F_\nu d\nu}{\int T_X(\nu) d\nu}$$

Les magnitudes « Vega » et les magnitudes « AB »

Les flux lumineux reçus sur Terre sont absorbés par l'atmosphère. On rapporte donc les flux à un **astre de référence**: l'étoile Véga

$$m_X(obj) = -2.5 \log \left[\frac{F_X(obj)}{F_X(Vega)} \right]$$

où X est la longueur d'onde centrale du filtre choisi

Par **définition** Véga a la magnitude zéro dans le filtre V, c'est-à-dire pour le domaine des longueurs d'ondes "visibles" (~5500 Å)

On peut aussi définir un système de magnitudes, où l'objet de référence aurait un spectre "plat". Un tel objet aurait la magnitude zéro dans tous les filtres.



Les magnitudes absolues

Depuis la Terre nous mesurons des flux lumineux. L'étude des phénomènes physiques produisant le rayonnement nécessite la connaissance des distances.

La quantité physique intéressante est la luminosité L_X d'un objet:

$$L_X = F_X \times 4\pi d^2$$

L_X est la luminosité dans une bande passante donnée.

Elle se mesure en erg s^{-1} . Il s'agit donc d'une puissance plutôt que d'une énergie.

Pour pouvoir comparer la luminosité d'astres différents on les rapporte à une distance commune, fixée par définition à 10 pc. La magnitude d'un astre situé à cette distance est sa **magnitude absolue**.



Les magnitudes absolues

On a donc

$$m_X - M_X = -2.5 \log \left[\frac{L_X}{4\pi d^2} \times \frac{4\pi (10)^2}{L_X} \right]$$

$$m_X - M_X = 5 \log d - 5$$

m_X : magnitude apparente

M_X : magnitude absolue -> c'est la magnitude apparente d'un astre vu d'une distance de 10 pc.

$m_X - M_X$: module de distance

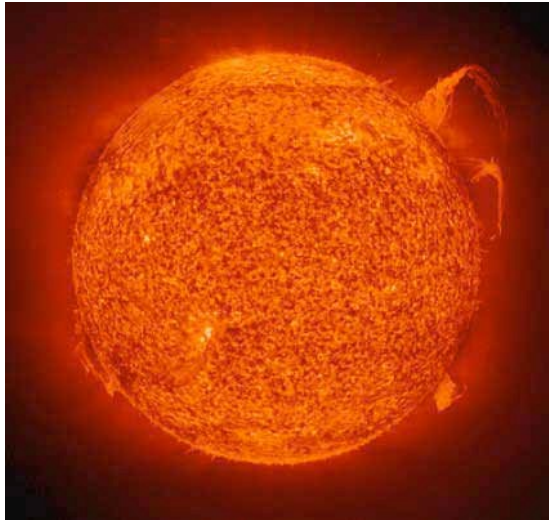
Ordres de grandeur

Objet	m	M
Soleil	-26,8	+4.8
Pleine Lune	-12	invisible
Vénus (étoile du Berger)	-4	invisible
Bételgeuse (supergéante)	+0,5	-5,6
Etoile la plus faible visible à l'œil nu	+6	
Galaxie d'Andromède	+3,4	-20.7
Quasar très lointain	+28	-30

Le rayonnement de corps noir

Rayonnement de « corps noir »

Corps qui émet autant de rayonnement qu'il en absorbe.



Rayonnement de « corps noir »

Un corps noir n'est forcément pas noir ! Son spectre est décrit par la fonction de Planck

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$[B_\nu] = \text{W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$$[B_\lambda] = \text{W m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

Où h est la constante de Planck et où T est la température du corps noir.

Les corps noirs sont le plus souvent soit des corps chauffés, soit des corps illuminés à une certaine fréquence et qui ré-émettent à une autre fréquence (plus petite, car moins énergétique).

Rayonnement de « corps noir »

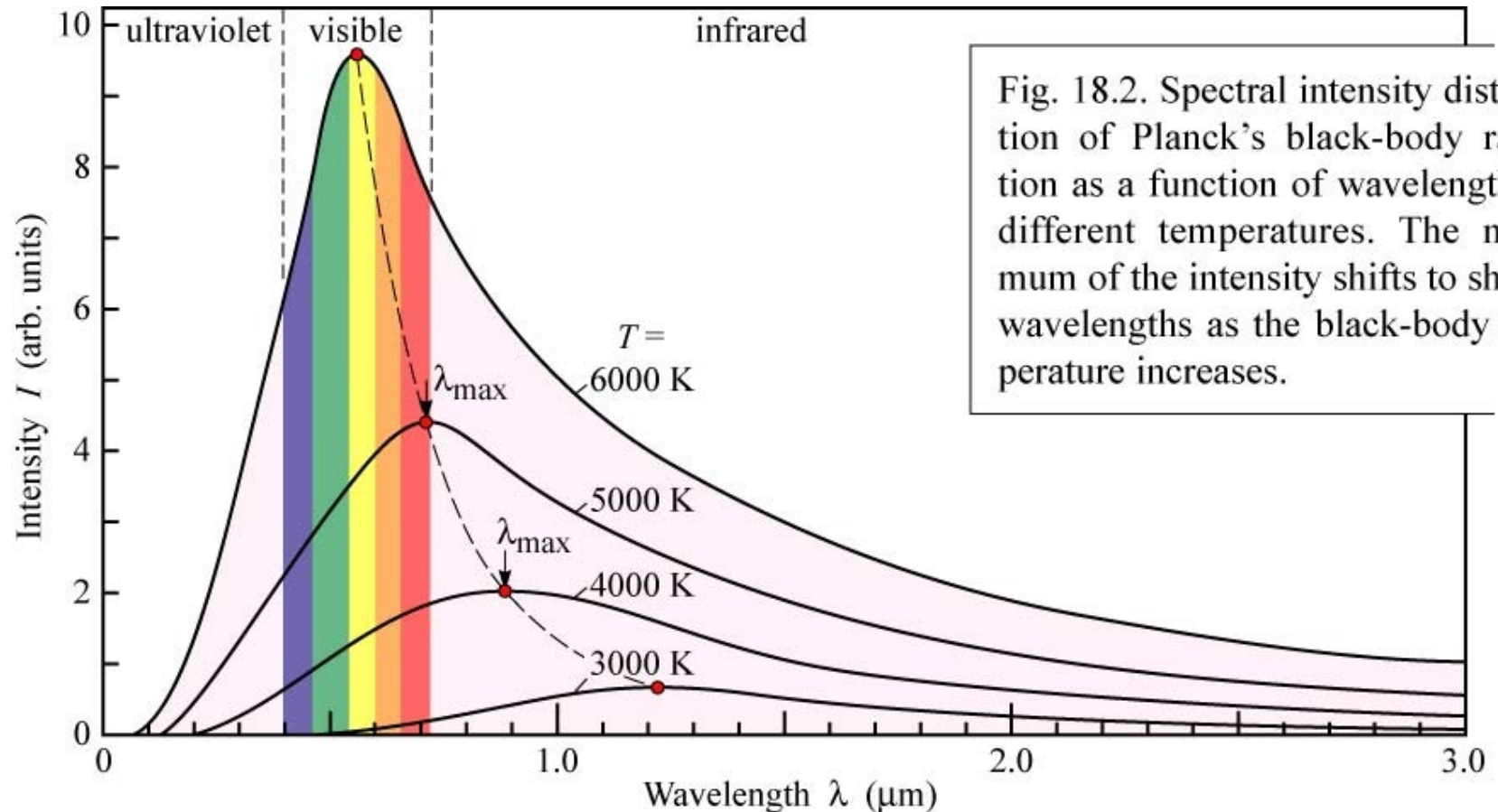
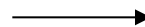


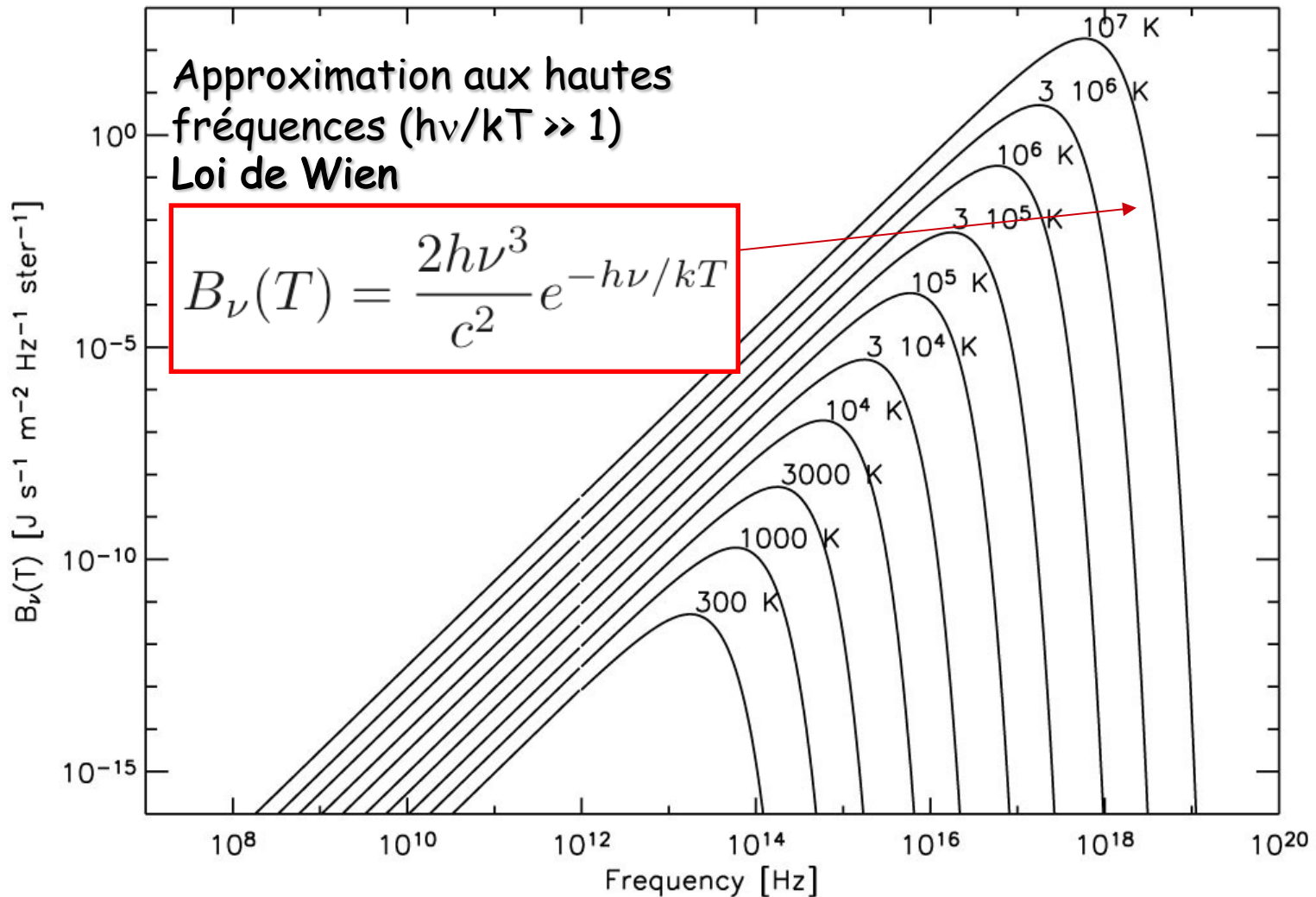
Fig. 18.2. Spectral intensity distribution of Planck's black-body radiation as a function of wavelength for different temperatures. The maximum of the intensity shifts to shorter wavelengths as the black-body temperature increases.

Position du maximum pour une
température donnée
Loi de déplacement de Wien

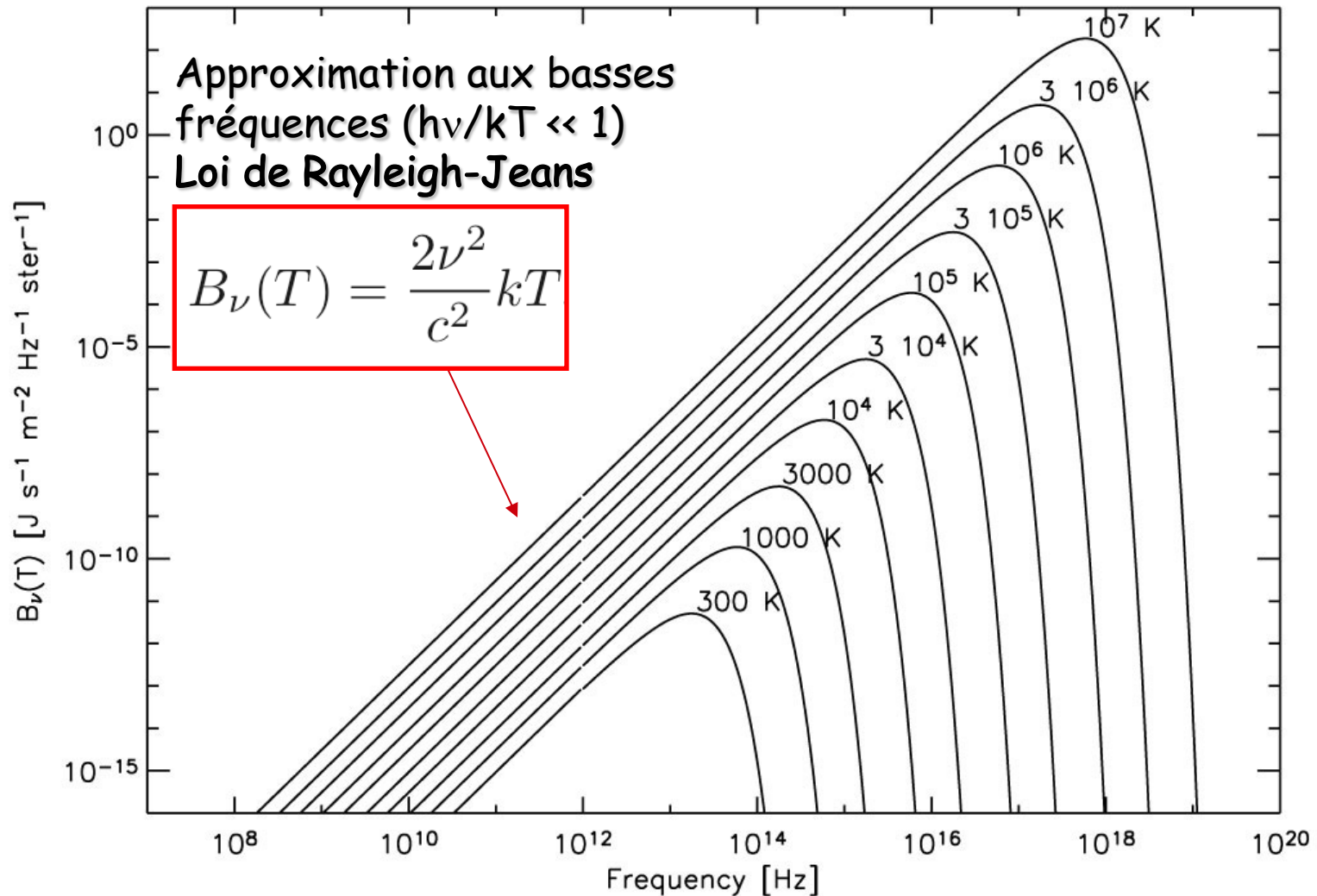


$$\begin{aligned}\frac{\nu_{\text{max}}}{T} &= 5,90 \times 10^{10} \text{ Hz K}^{-1} \\ \lambda_{\text{max}} T &= 2,90 \times 10^{-3} \text{ m K}\end{aligned}$$

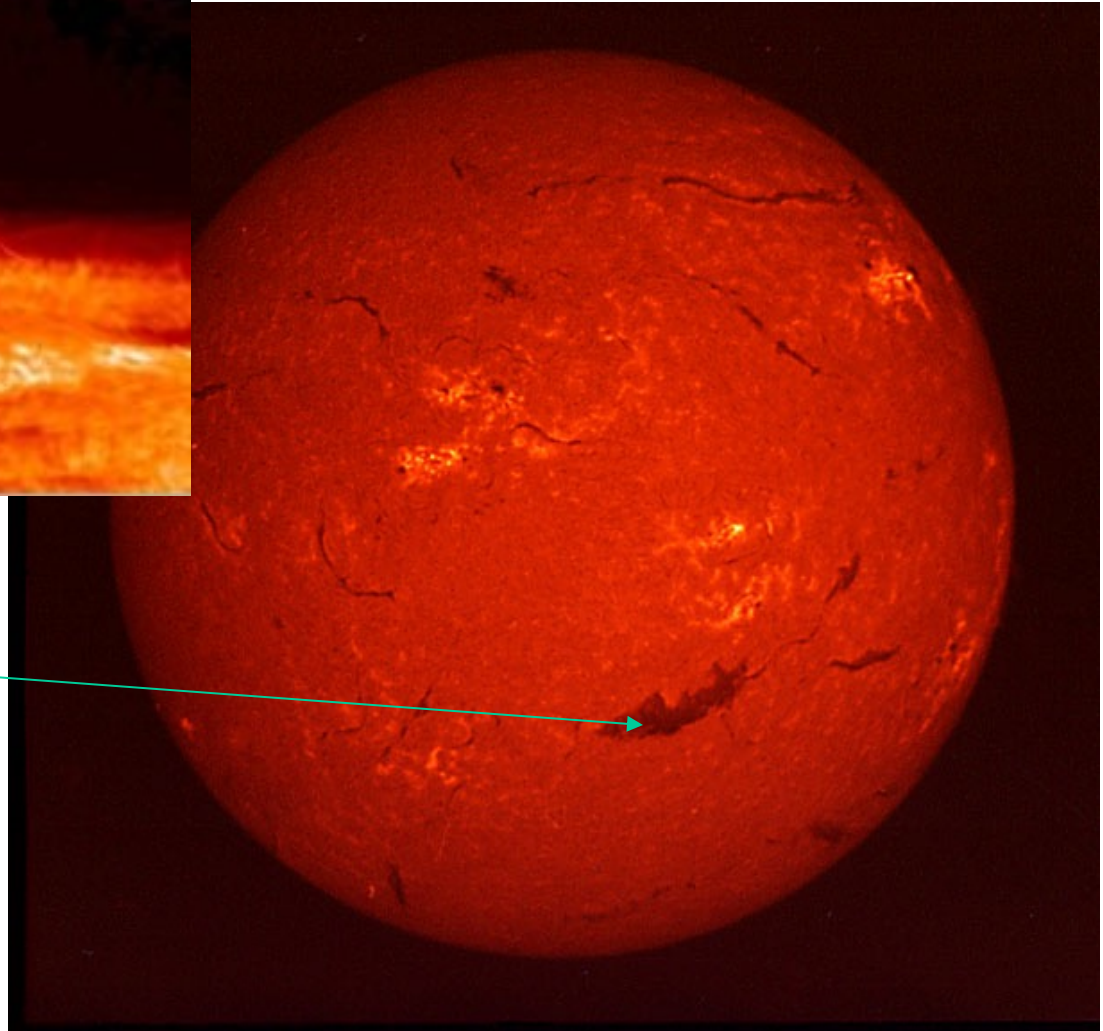
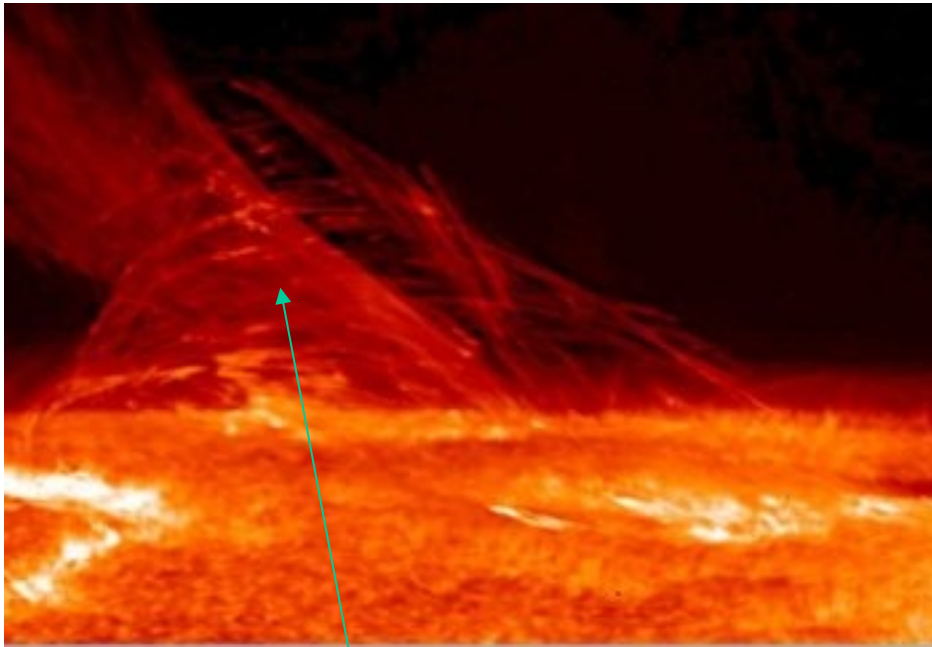
Rayonnement de « corps noir » (échelle log-log)



Rayonnement de « corps noir » (échelle log-log)



Le Soleil

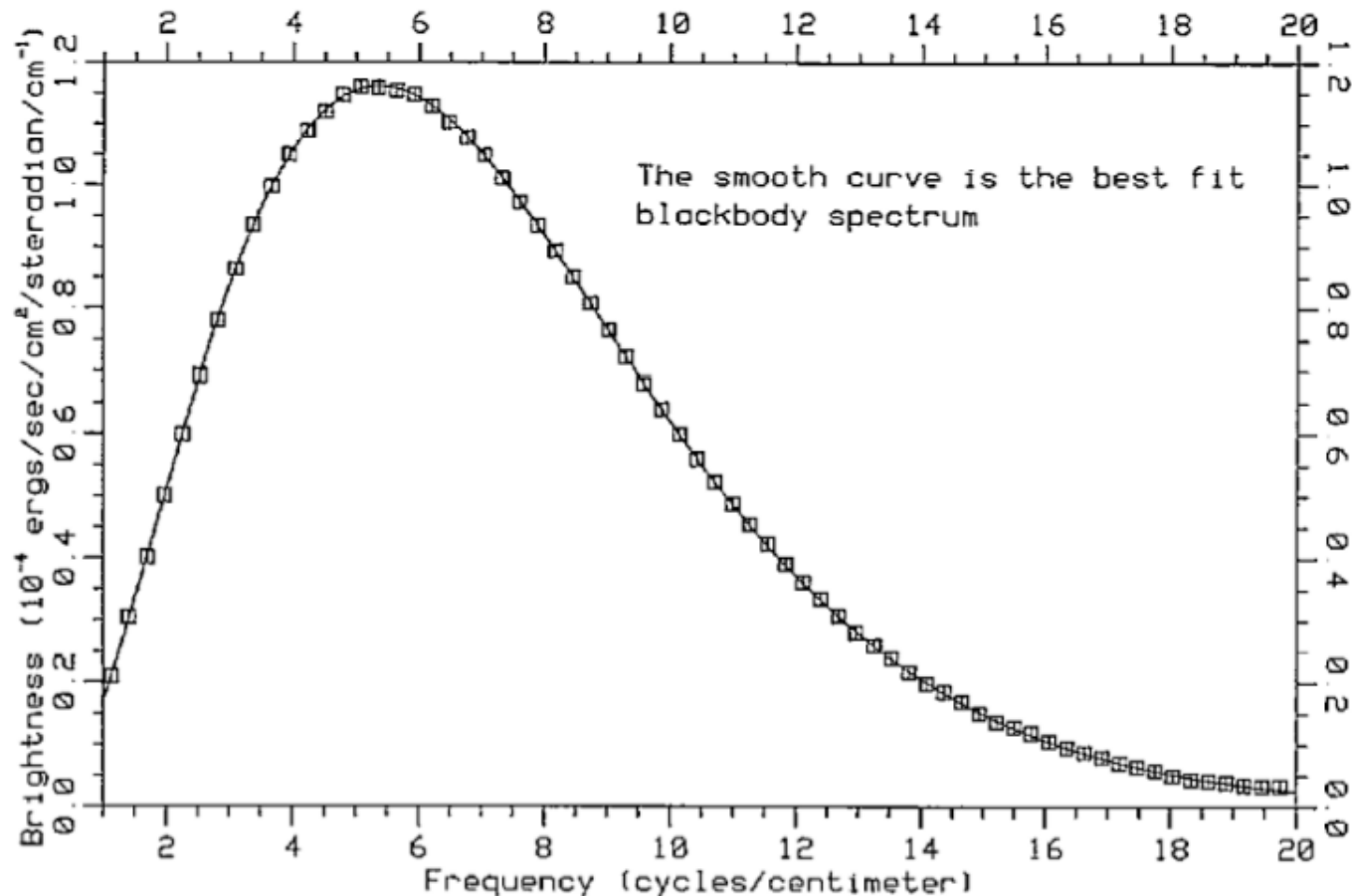


Gaz absorbant dans
l'atmosphère solaire

Les étoiles en général



L'un des plus beaux corps noirs: le rayonnement cosmologique fossile



Accord parfait entre la théorie et l'expérience ! ($T=2.735$ K)