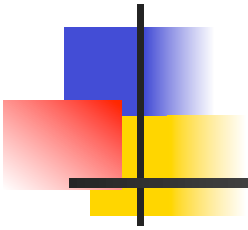


Astrophysique

2 – La lumière



Alain Bouquet

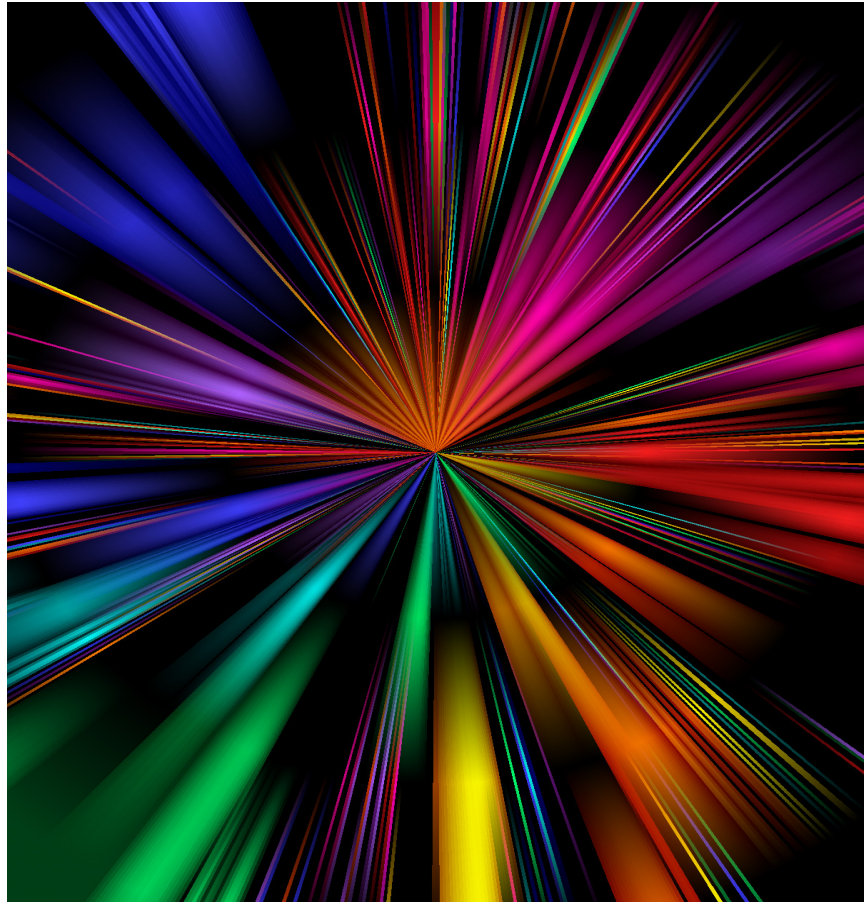
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA





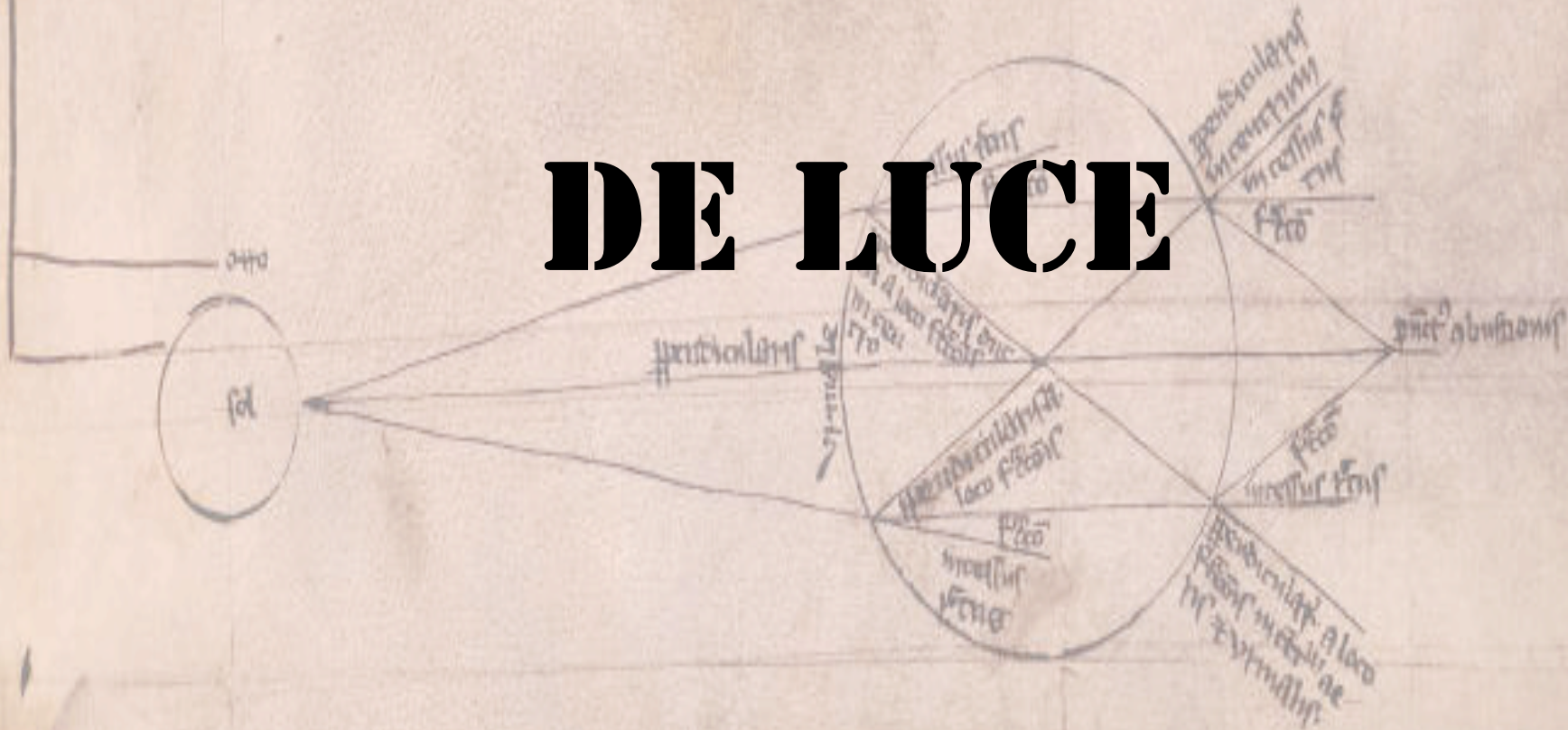
De quoi parlerons-nous aujourd'hui ?

- Brève histoire des idées sur la lumière
- Corpuscules ou ondes ?
- Spectroscopie
- Planck, Einstein et le photon
- La vie d'un photon
- Spectroscopie (encore !)



con. Et q̄to mag' app̄t̄e quida. h̄ic n̄q̄t̄e t̄ed̄na com̄ ad. p̄t̄onē. Q̄id̄i
 hic n̄q̄t̄e d̄ist̄a d̄. Āc̄o n̄q̄t̄e p̄la t̄e n̄q̄t̄e n̄q̄t̄e ī n̄q̄t̄e n̄q̄t̄e. l̄inea
 n̄q̄t̄e n̄q̄t̄e. Si. n̄q̄t̄e ī l̄inea n̄q̄t̄e. n̄q̄t̄e d̄. Et. p̄t̄onē p̄t̄o. d̄. est
 sup̄. cap̄t̄e n̄q̄t̄e. Sic. ī q̄t̄e l̄ea d̄. n̄q̄t̄e n̄q̄t̄e. ēq̄. n̄q̄t̄e n̄q̄t̄e. ī p̄t̄o. n̄q̄t̄e
 l̄ea n̄q̄t̄e. q̄. n̄q̄t̄e p̄t̄o. n̄q̄t̄e n̄q̄t̄e. n̄q̄t̄e n̄q̄t̄e. q̄. d̄. n̄q̄t̄e n̄q̄t̄e. n̄q̄t̄e

DE LUCE



Platon ou Aristote ?

- *Timée, Parménide*
- La lumière vient de l'œil (cf. un regard *perçant*), interagit avec les objets qui émettent un « feu » et rapporte l'information
- *De l'âme, De la sensation, Météorologiques*
- La lumière est un « ébranlement » qui vient de l'objet vu
- Elle n'est pas un corps mais une *propriété* des corps (des corps lumineux comme des corps transparents)
- L'arc-en-ciel vient d'une décomposition de la lumière, du blanc au noir en passant par le rouge



Il est complètement absurde de soutenir que l'œil voit au moyen de quelque chose qui en sort et que le rayon visuel s'étend jusqu'aux astres, ou que, après avoir parcouru une certaine distance, il fusionne, comme des auteurs le prétendent [Empédocle et Platon], avec quelque autre chose qui sort de l'objet.
(Aristote, *De la sensation*)

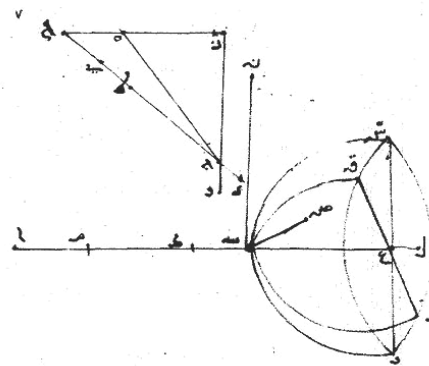
Euclide, les atomistes, le Kalām, Ibn al Haytham

- Euclide *Optique, catoptrique*
 - La lumière se propage en ligne droite
 - Les rayons partent de l'œil en cône

- Leucippe, Démocrite, Lucrèce
 - Les objets sont formés d'atomes qui se déplacent dans le vide
 - Les objets émettent des «écorces», des simulacres, qui se propagent dans l'espace, sont modifiés par les obstacles et parviennent à l'œil

- Le Kalām d'al-Ash'arī (874-936)
 - Le monde est formé d'atomes (y compris l'espace)
 - Ils sont créés et détruits selon la volonté divine

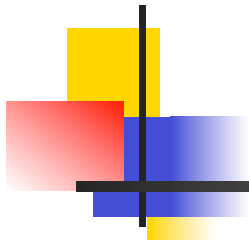
- Abū 'Alī al-Ḥasan ibn al-Ḥasan ibn al-Haytham ou Alhazen (960-1040)
 - *Traité d'optique (Kitab al-Manazir)*
 - Méthode expérimentale (chambre noire)
 - Lumière émise par une source
 - Déplacement en ligne droite



لانه ان ماتته عليها سطح مستوي غيره فلا ان هذا السطح يتقطع سطح برص
 على نقطة تب فلا بد من ان يتقطع احد خطي ب ن بص فليكن ذلك
 الخط مستويا والفصل المشرك بين هذا السطح وبين سطح قطع ق د
 خطا مستويا فلا ان هذا السطح بما تنسبط م على نقطة تب فخط
 مستوي تر قطع ق د على نقطة تب وكذلك خط مستوي م على
 فلا بما تنسبط م على نقطة تب سطح مستوي غير سطح ب ن ص

Ibn Sahl (~983)

- Lois de la réflexion
- Lois de la réfraction
- Passe inaperçu

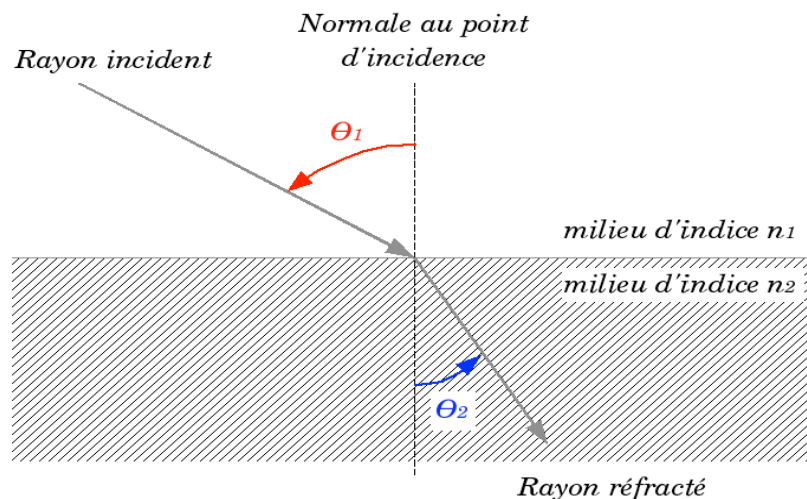


PARTICULE OU ONDE?

Descartes et Newton

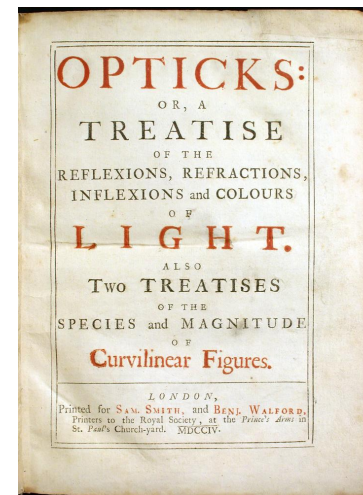


- Lois de la réflexion et réfraction
 - Plus ou moins connues des Arabes et des scolastiques
 - (Re)découvertes par Snell en 1625 et Descartes (publiées en 1637 dans la *Dioptrique*)



- Fermat: la lumière suit le chemin le plus rapide

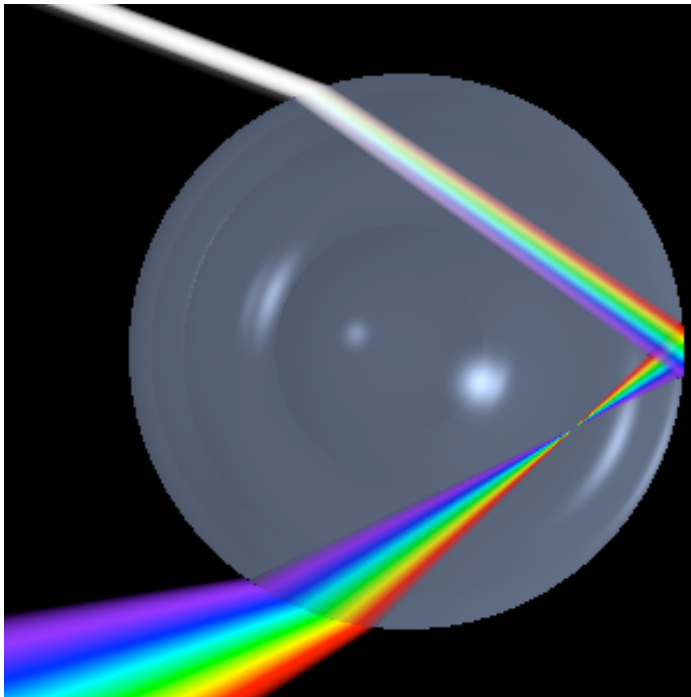
- *Opticks* (1704) sur la réflexion, la réfraction et la couleur de la lumière



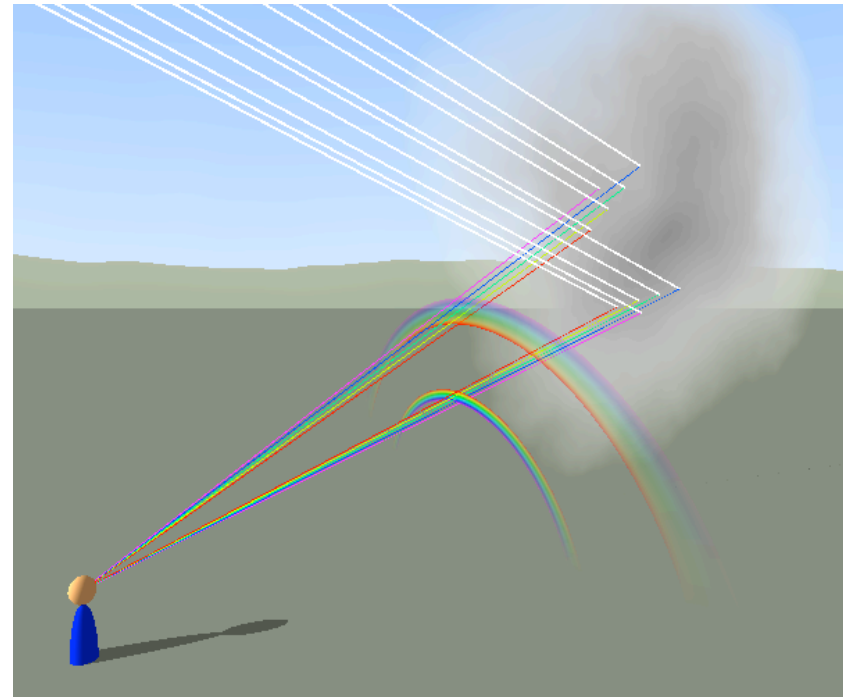
- La lumière contient en elle-même la couleur
- La lumière est formée de **corpuscules**
- Rømer (1676) : la lumière a une vitesse finie

Arc en ciel

- La lumière est réfractée, réfléchi et réfractée à nouveau dans une goutte d'eau quasi-sphérique
 - Double réflexion : arc secondaire

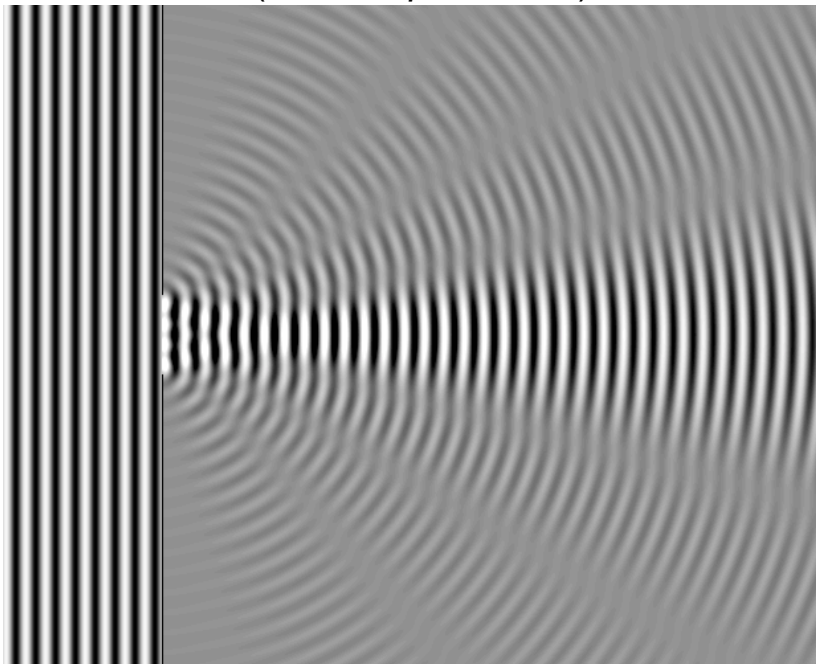


- Angle de sortie
 - 40° pour le bleu
 - 42° pour le rouge
 - Indépendant de la taille de la goutte



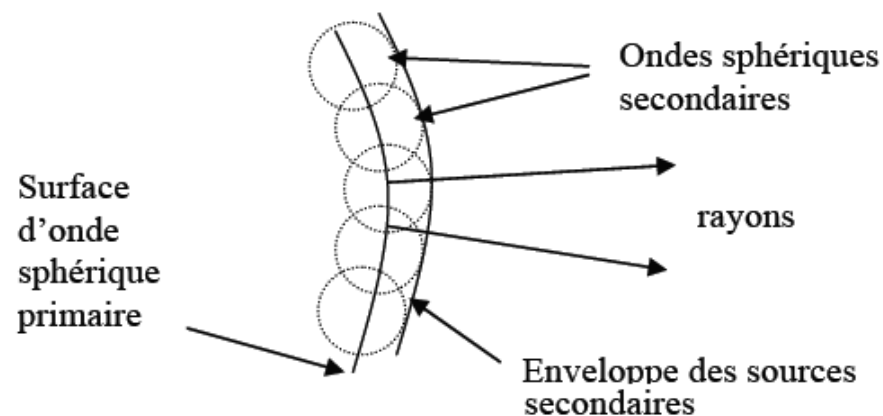
Diffraction et ondes

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



- Plus des effets colorés inexplicés

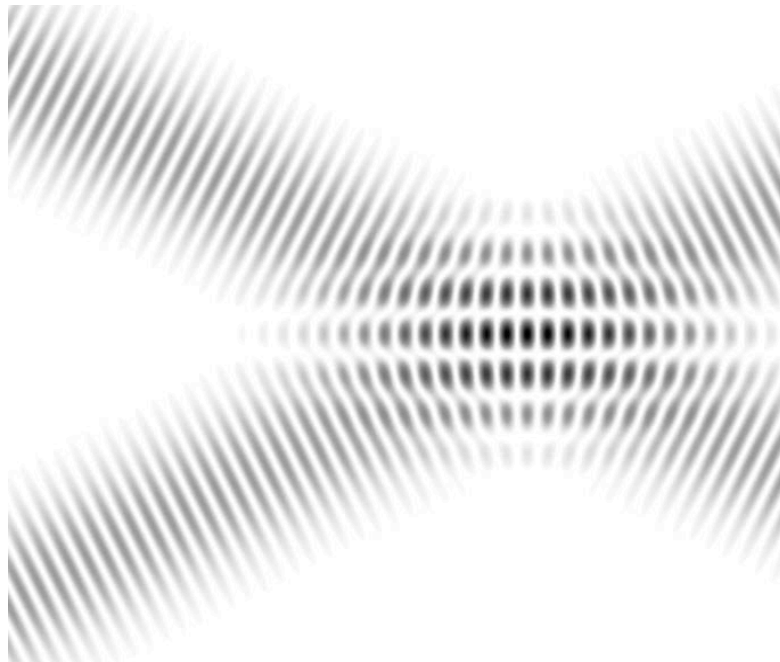
- Fronts d'onde (Christiaan Huyghens 1629-1695)



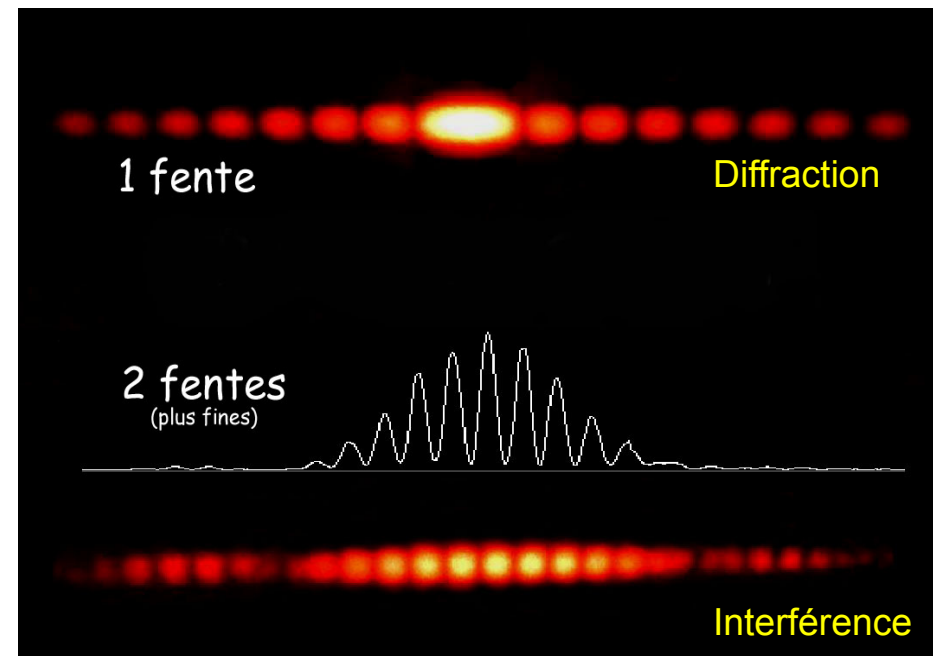
- Mais le prestige de Newton est immense

Interférences et ondes

- Thomas Young (1773-1829)



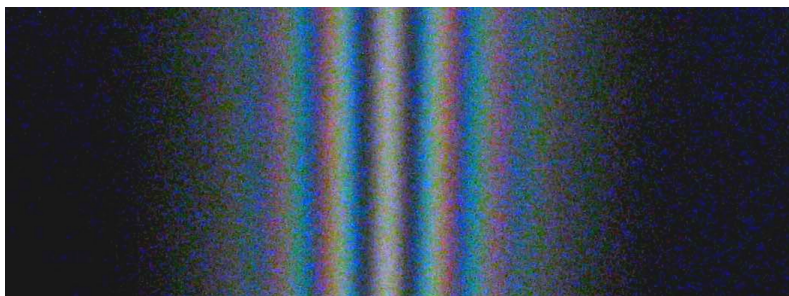
- Interférence de deux ondes (1801)



- La couleur est liée à la longueur d'onde λ (ou plus exactement à la fréquence $f = v/\lambda$)

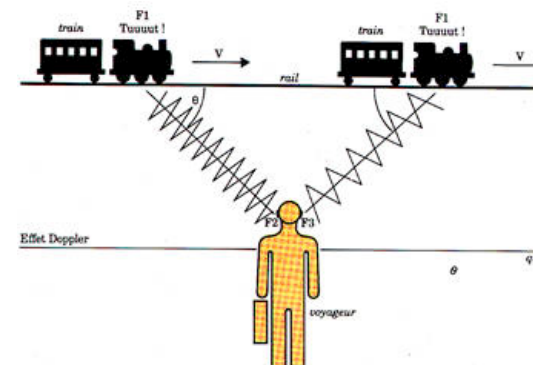
Triomphe de la théorie ondulatoire de la lumière

- Augustin Fresnel (1788-1827) explique [indépendamment de Young] par une théorie ondulatoire de la lumière
 - La réflexion et la réfraction
 - Les interférences
 - La diffraction
 - Les couleurs
- Pour expliquer la réfraction, la lumière dans un milieu plus dense doit aller
 - plus vite dans la théorie corpusculaire
 - moins vite dans la théorie ondulatoire
- Mesures
 - Fizeau (1849) 310 000 km/s dans l'air
 - Foucault (1850) 298 000 km/s dans l'eau



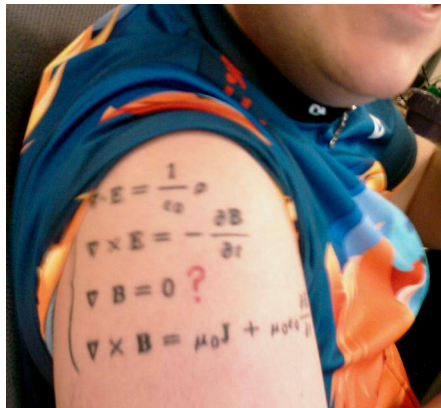
Fentes de Young en lumière blanche

- Effet Doppler-Fizeau



James Clerk Maxwell (1831-1879)

- Équations de l'électromagnétisme 1861



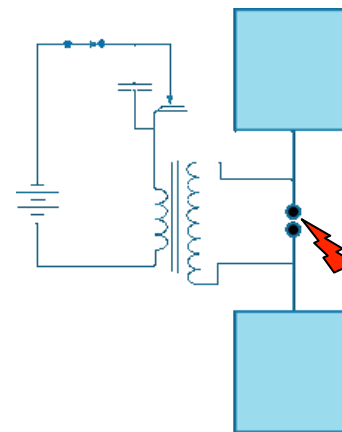
$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \frac{\vec{J}}{\epsilon_0 c^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

- Permettent de décrire tous les phénomènes électriques et magnétiques alors connus
- Prévoient des ondes électromagnétiques
- Font apparaître la vitesse de la lumière comme vitesse de ces ondes

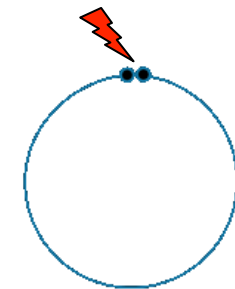
- La lumière **est** une onde électromagnétique

- Heinrich Hertz (1857-1894)

- Les ondes électromagnétiques existent bien (1888)



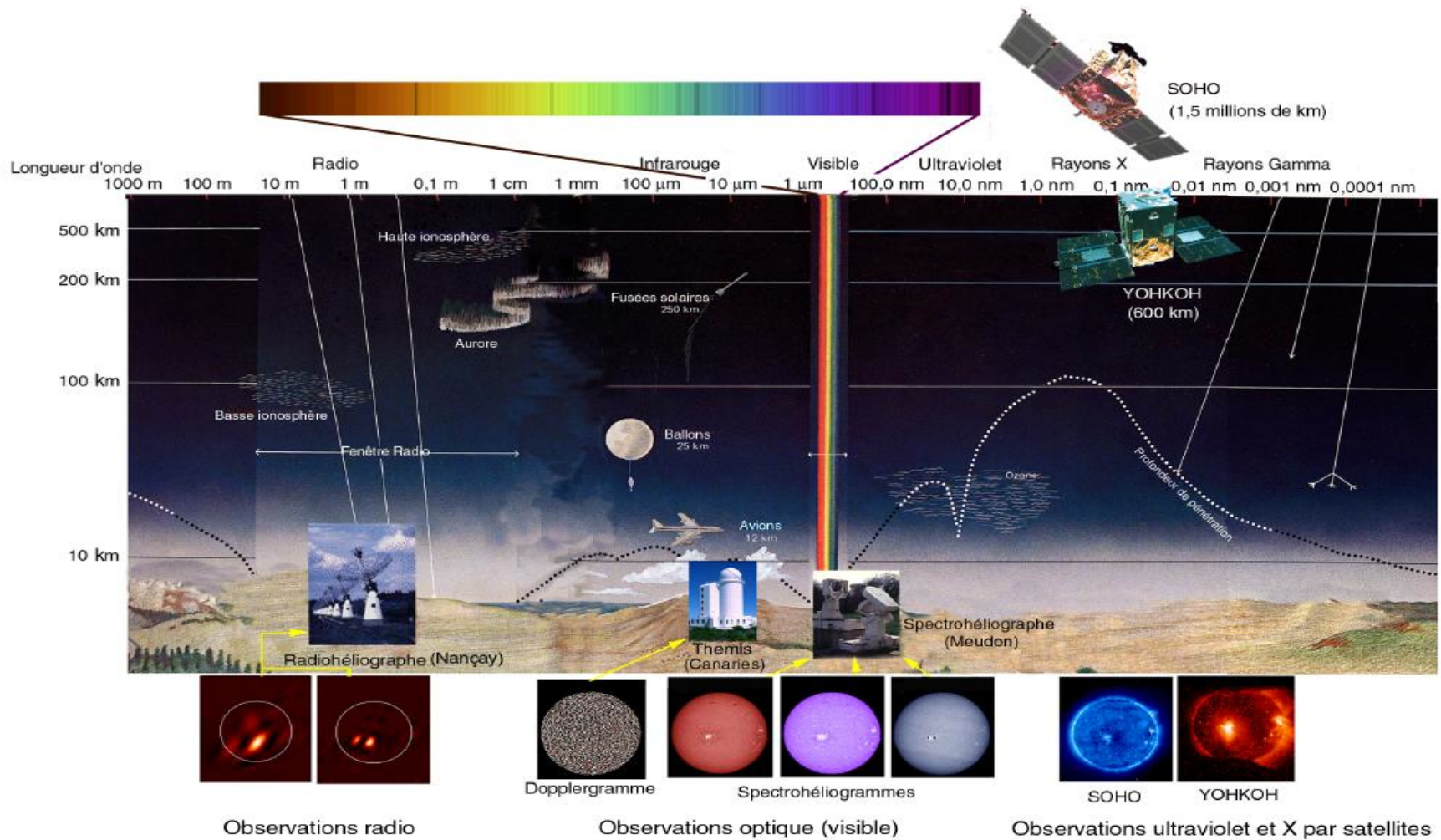
Émetteur

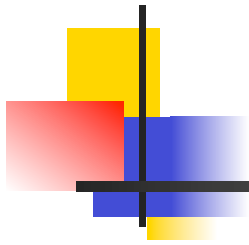


Récepteur

- Elles se réfléchissent, se diffractent et interfèrent comme la lumière

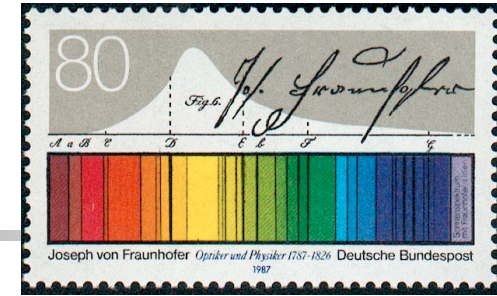
Le spectre électromagnétique





SPECTRES

Fraunhofer



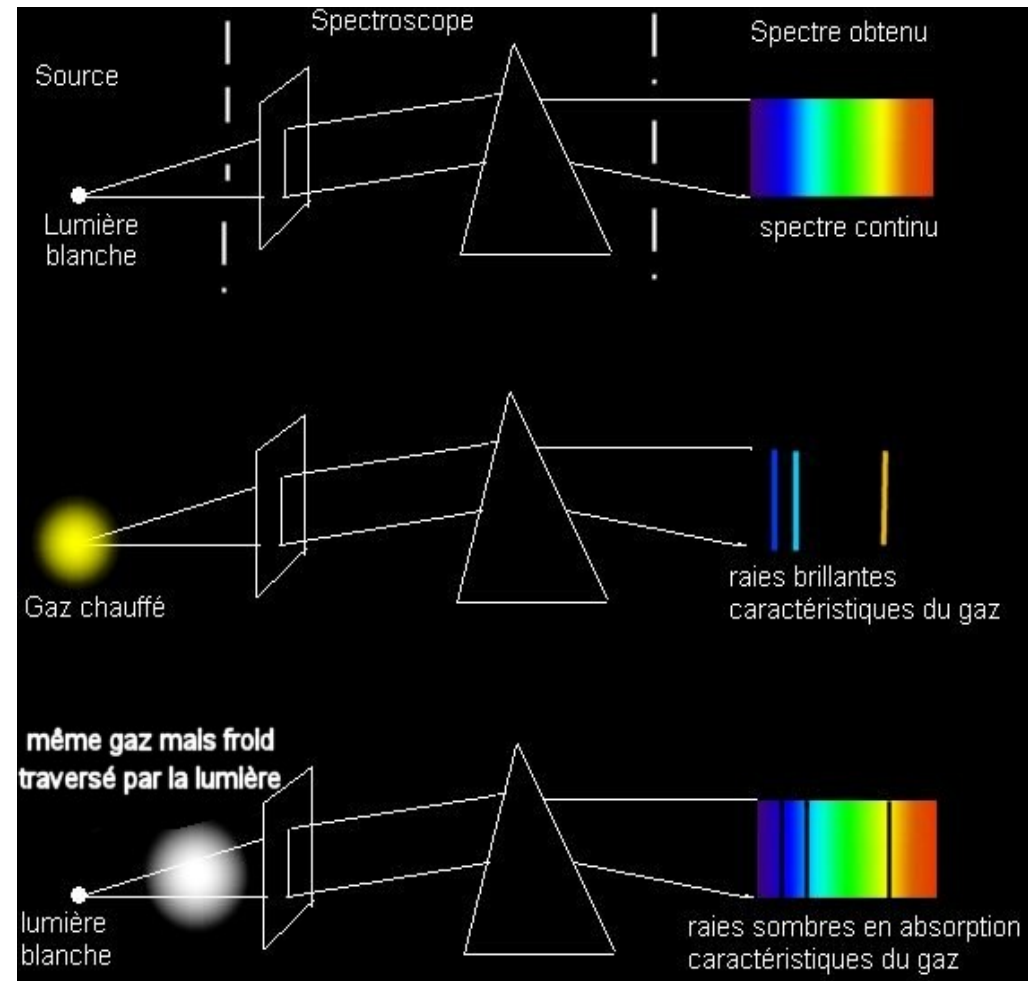
- Joseph Fraunhofer (1787-1826)
 - Découvre en 1814 les raies du spectre solaire (parallèlement à Wollaston)
 - Invente le premier spectroscope en 1815
 - Étudie la diffraction par des réseaux



Kirchhoff

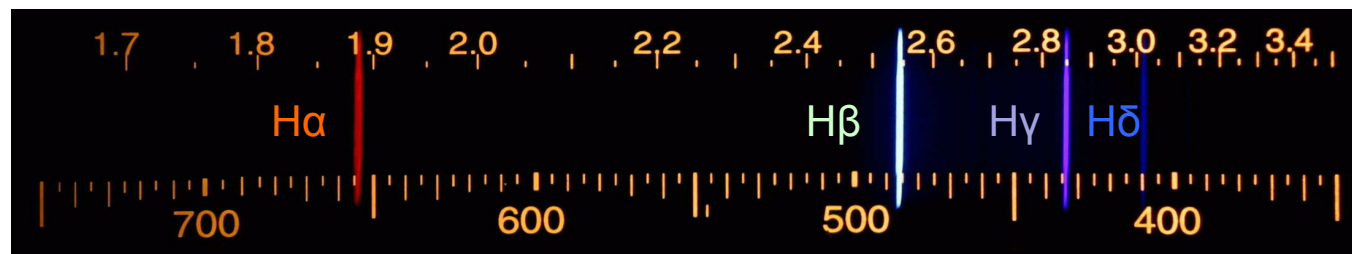
- Gustav Kirchhoff (1824-1887)

- Les 3 lois de la spectroscopie
- Objet chaud = spectre continu
- Gaz excité = spectre de raies
- Objet froid = raies en absorption

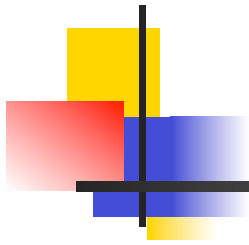


Régularités parmi les raies

- Efforts infructueux pour déduire la position de modèles de la matière, qu'ils soient électriques (charges en interaction) ou mécaniques (ressorts, vortex, etc.)
- En 1885 Ångström identifia 4 raies de l'hydrogène à $\lambda=656, 486, 434$ et 410 nm



- Balmer découvrit que cela suivait une loi empirique
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$
- Rydberg et Ritz découvrirent une forme plus générale
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$
- Les séries de Lyman ($p=1$) vers l'UV et Paschen ($p=3$) vers l'IR furent ensuite découvertes

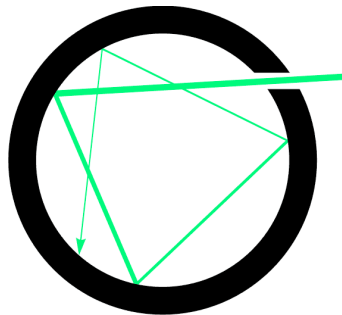


PHOTONS

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

- Notion plutôt théorique



- Exemples

- Un four de potier
- Une ampoule à *incandescence*
- Une étoile
- Le fond micro-ondes



Les lois empiriques du « corps noir »

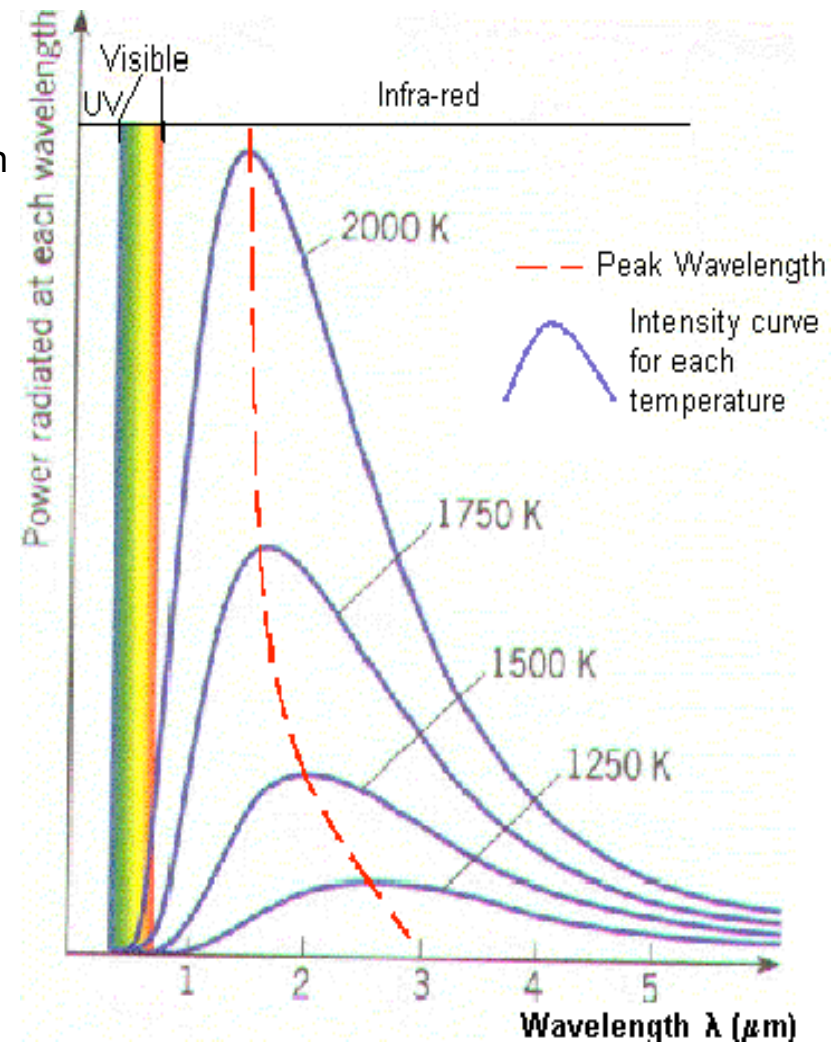
- Loi de Wien
 - La longueur d'onde du maximum d'émission varie en raison inverse de la température

■ ⇔ lien entre température et couleur

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

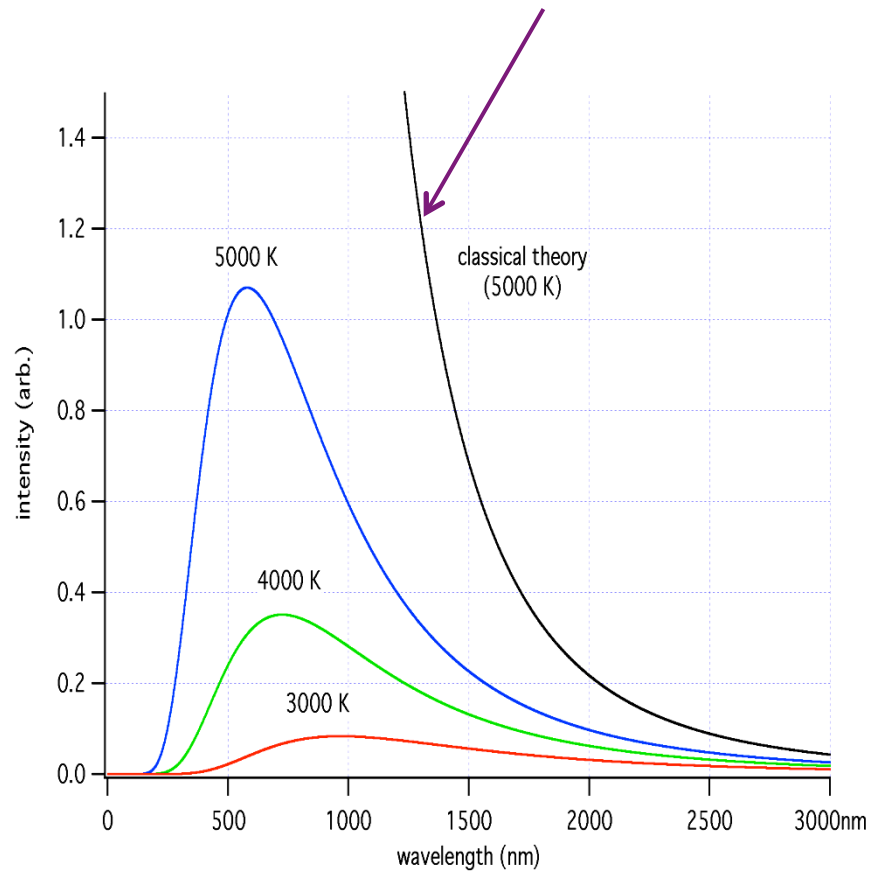
$$E = \sigma T^4$$

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



Loi de Planck

■ Catastrophe ultraviolette



■ Quantification

- Artifice de calcul: l'énergie ne peut être échangée entre rayonnement et corps noir que par quantités finies (non-nulles)
- Quantité proportionnelle à la fréquence f

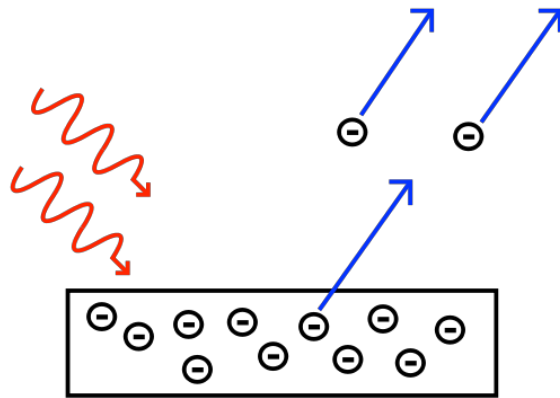
$$\partial E = h f$$

- Constante de Planck h
- Redonne parfaitement la courbe expérimentale
- Mais pourquoi cela marche-t-il?

Le photon

■ Effet photoélectrique

- La lumière peut arracher des électrons à certains matériaux

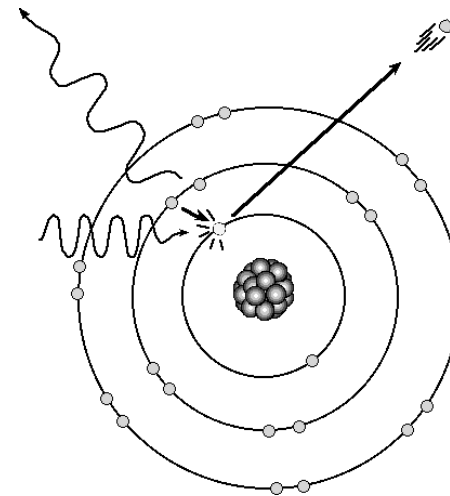


■ Mais l'effet n'apparaît qu'au-delà d'une longueur d'onde minimale

- Optique pour les métaux alcalins comme le césium
- UV pour les autres métaux
- UV lointain pour les autres matériaux

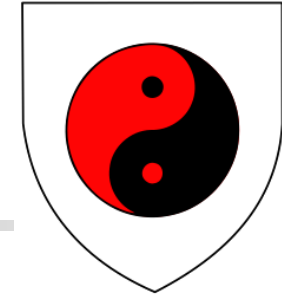
■ Einstein 1905

- Les photons existent
- Seul un photon ayant une énergie minimale peut arracher un électron
- $E = h f \Leftrightarrow$ Seuil en fréquence

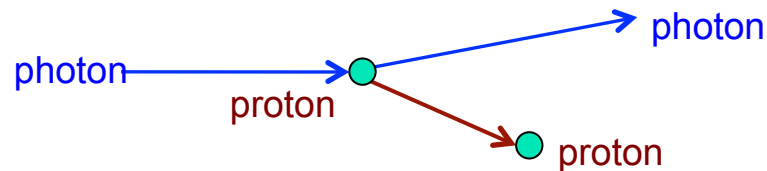


- Augmenter l'intensité du rayonnement augmente le *nombre* d'électrons, pas leur *énergie*

Dualité onde-corpuscule



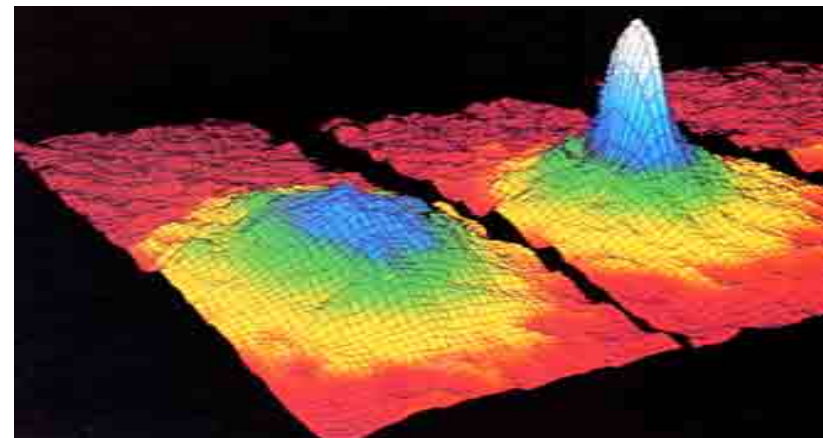
- La lumière est une onde
 - Diffraction
 - Interférences
- La lumière est faite de particules
 - Effet photo-électrique
 - Diffusion Compton



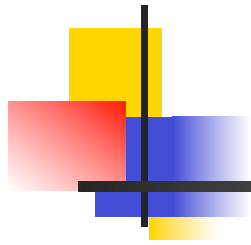
- **Elle est les deux à la fois**
- Il en est de même de toutes les particules: *Contraria sunt complementa*

■ Mécanique quantique (TQC)

- Les **photons** comme les **électrons** sont décrits par un *champ* qui recouvre tout l'espace
 - Champ **électromagnétique**
 - Champ **électronique**
- Les *excitations localisées* (les quanta) de ce champ sont identifiées comme *un photon* ou *un électron*



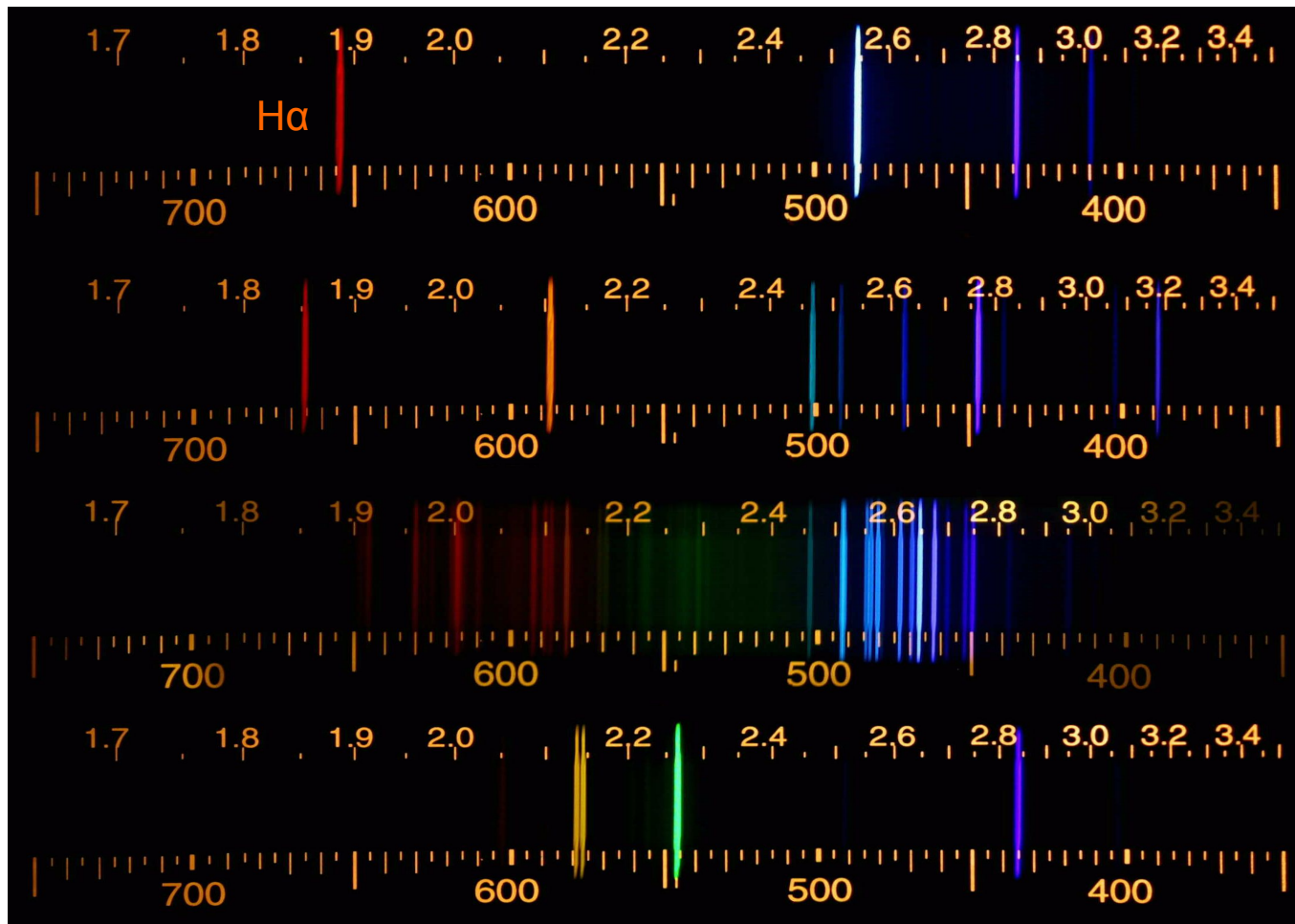
- ⇔ tous les photons comme tous les électrons sont rigoureusement identiques



LA VIE D'UN PHOTON

ÉMISSION-TRANSMISSION-ABSORPTION

Spectres de raies



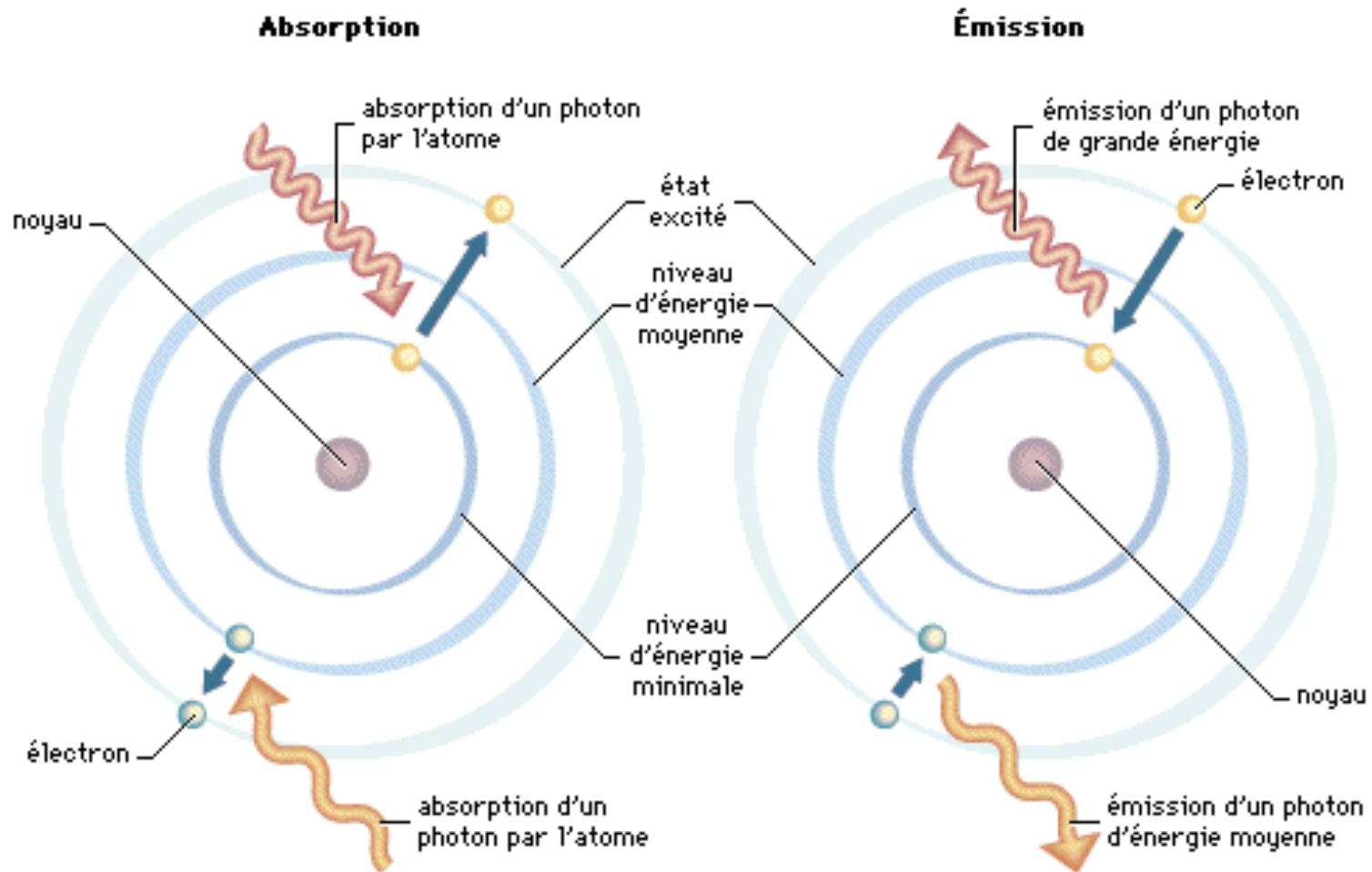
Hydrogène

Hélium

Krypton

Mercure

Électrons atomiques: raies caractéristiques





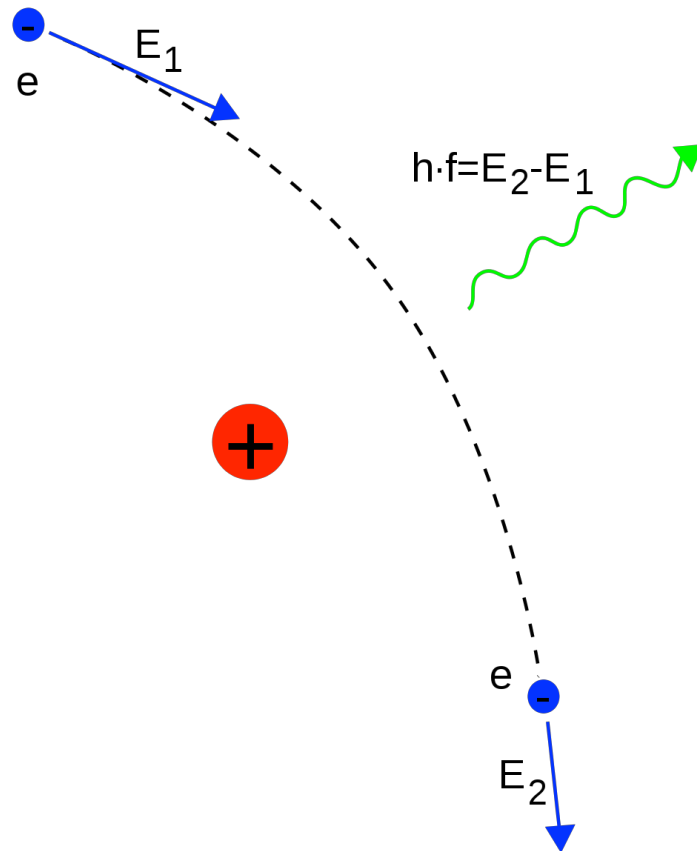
Émission thermique

- 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

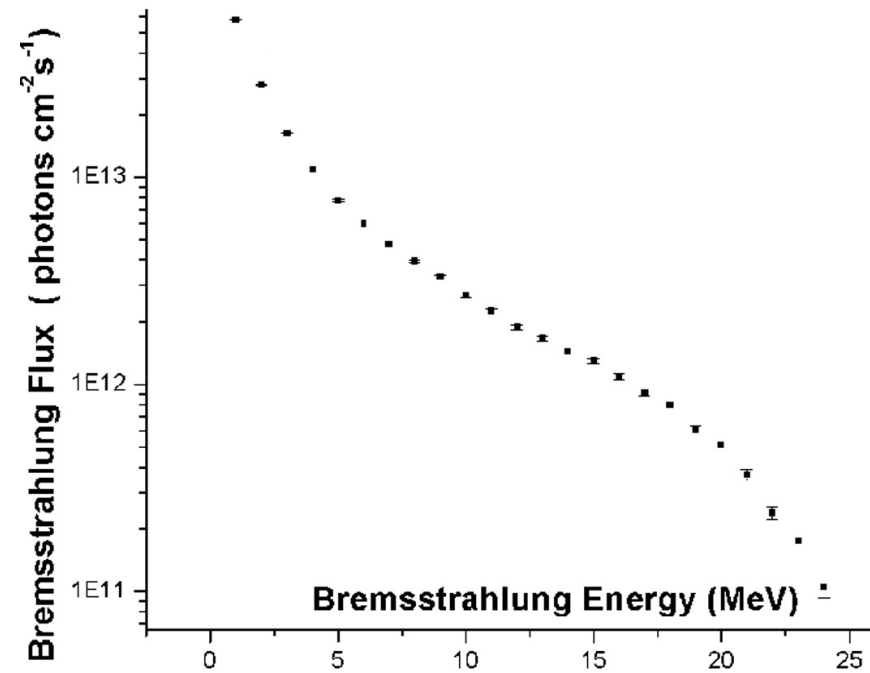


Bremsstrahlung, synchrotron, *free-free*

■ Rayonnement de freinage



■ Spectre continu

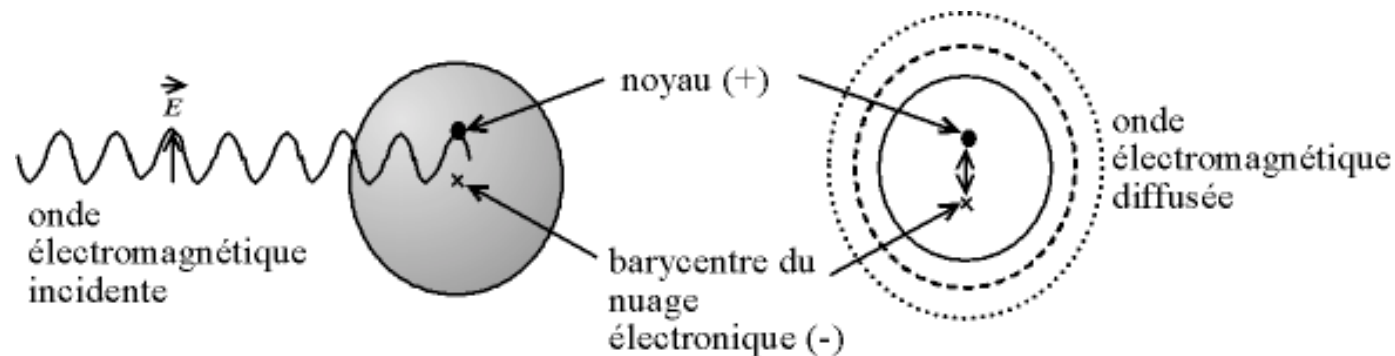


- L'immense majorité des photons a une faible énergie
- Il existe une énergie maximale: celle de l'électron

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

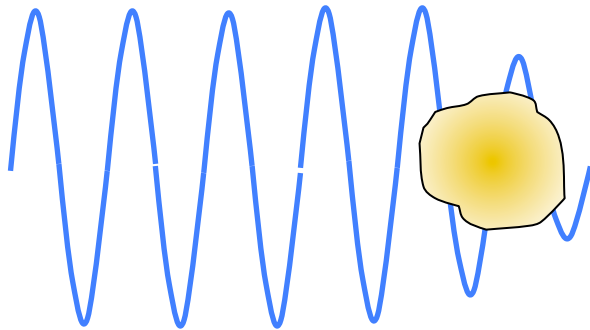
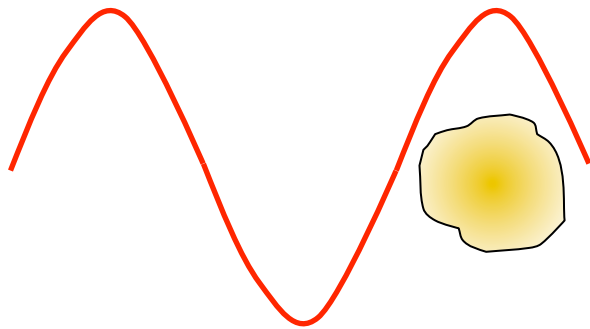
Diffusion de la lumière

- 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

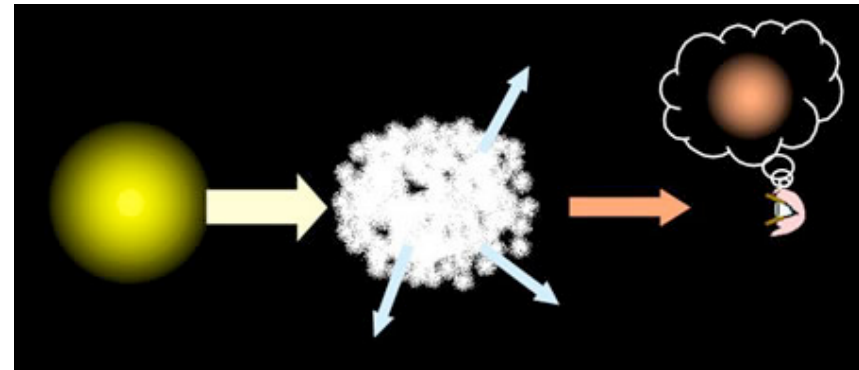


Absorption dépendant de la longueur d'onde

- 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

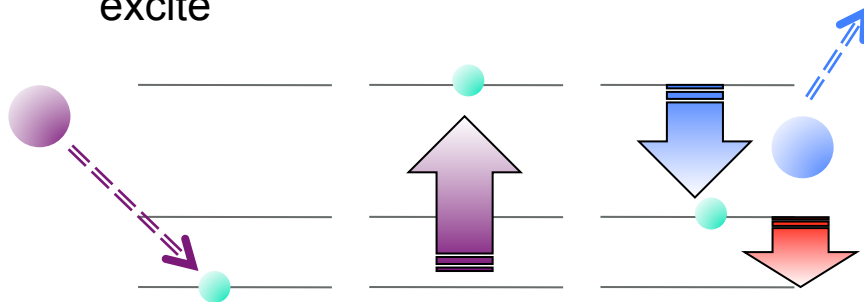
Le nuage noir Barnard 86 et l'amas ouvert NGC 6520



Un peu plus compliqué

- La lumière réémise par un atome n'est pas nécessairement à la même longueur d'onde que la lumière incidente
- Nébuleuse planétaire NGC6751
 - L'étoile chaude centrale irradie l'enveloppe de gaz en UV
 - Celle-ci réémet de la lumière visible

- Un photon de haute énergie (UV p.e.) porte un atome dans un état très excité

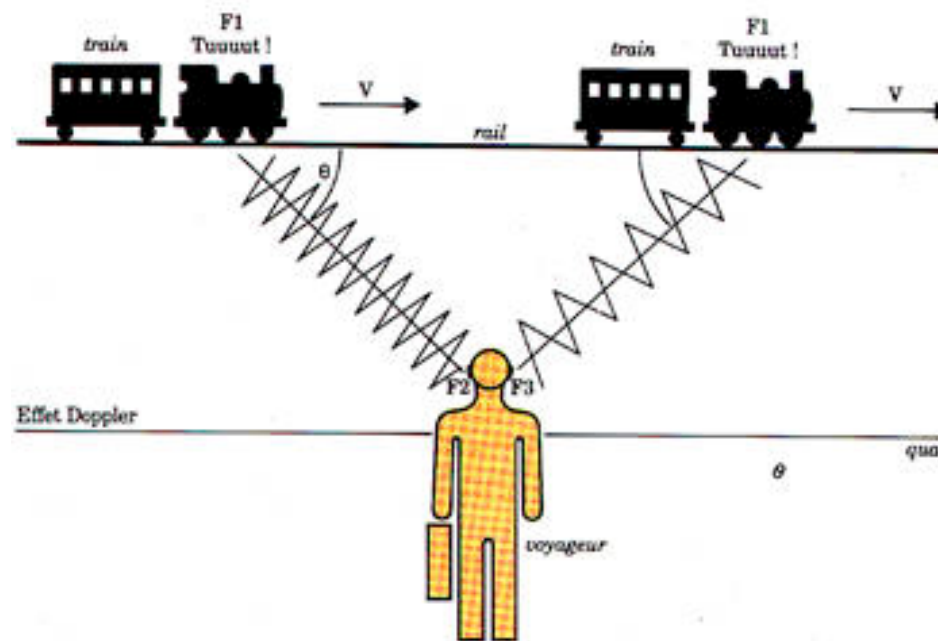
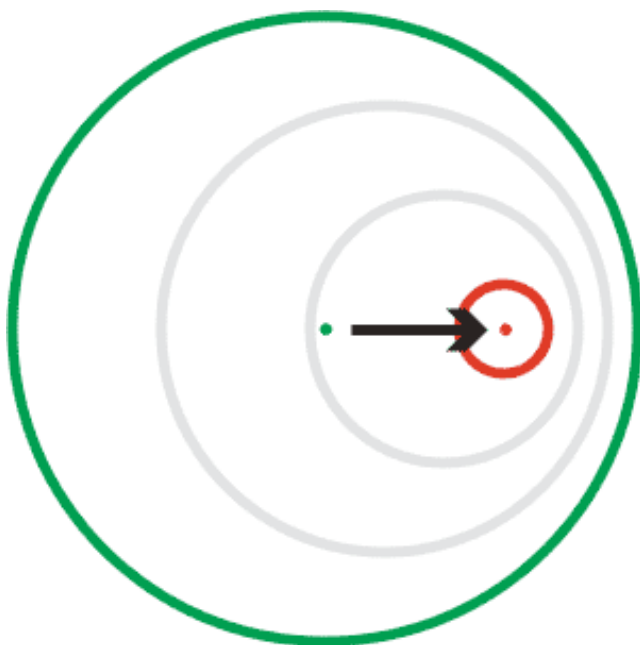


- Le retour à l'état de plus basse énergie peut se faire par émission de 2 (ou plus) photons d'énergie plus faible



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)



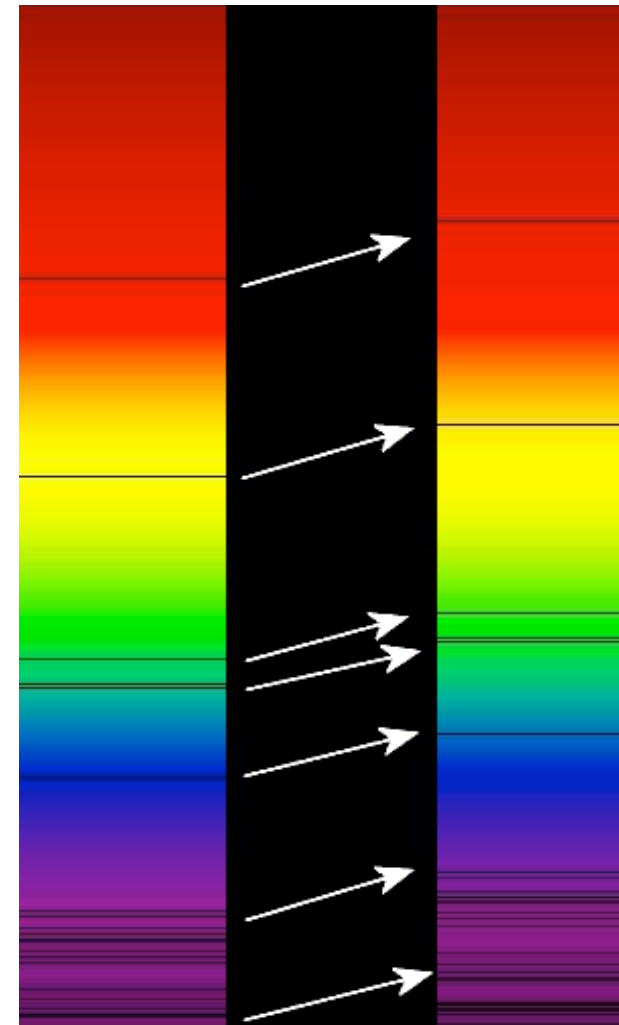
Effet Doppler

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

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

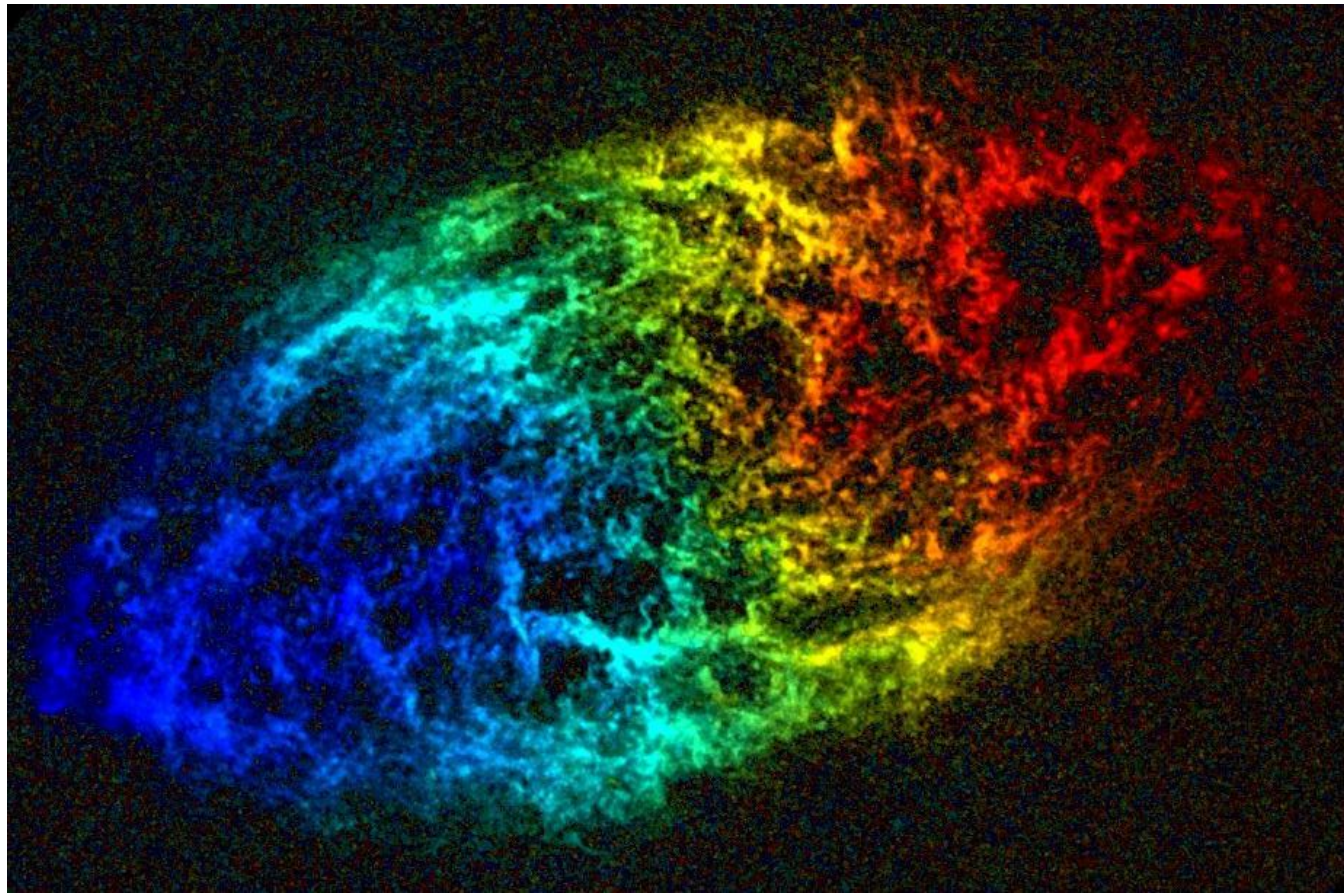
où $\beta = v/c$

- 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.)



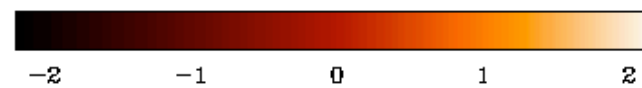
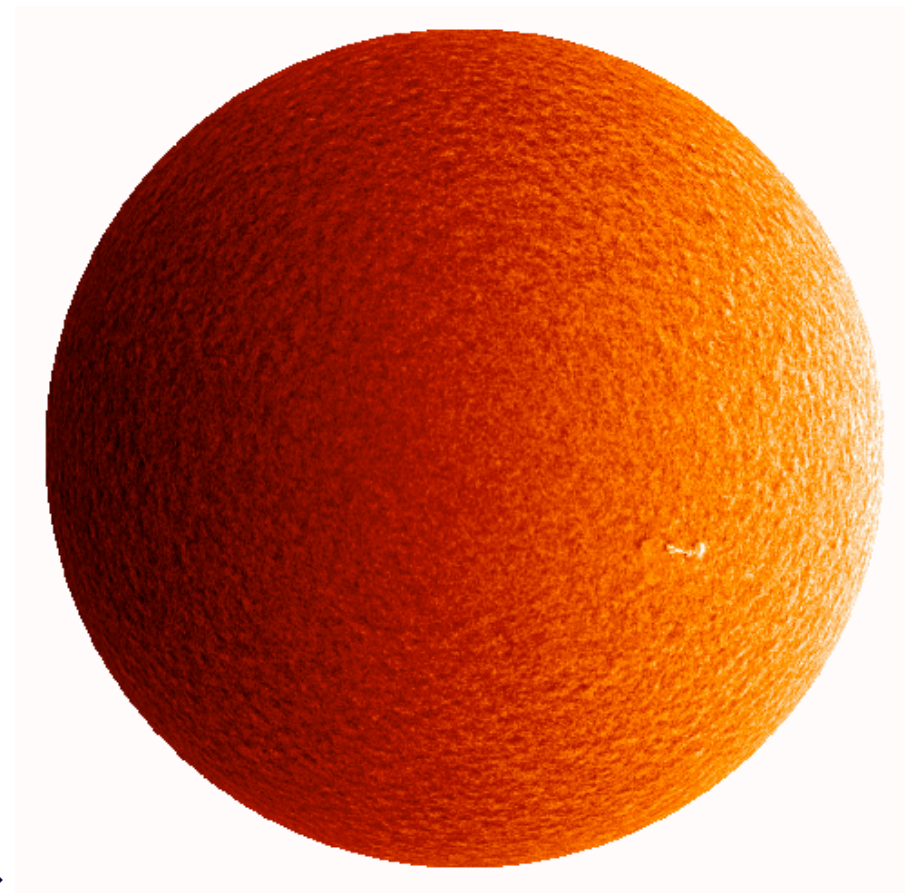
Galaxie M33

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



Dopplergramme du Soleil

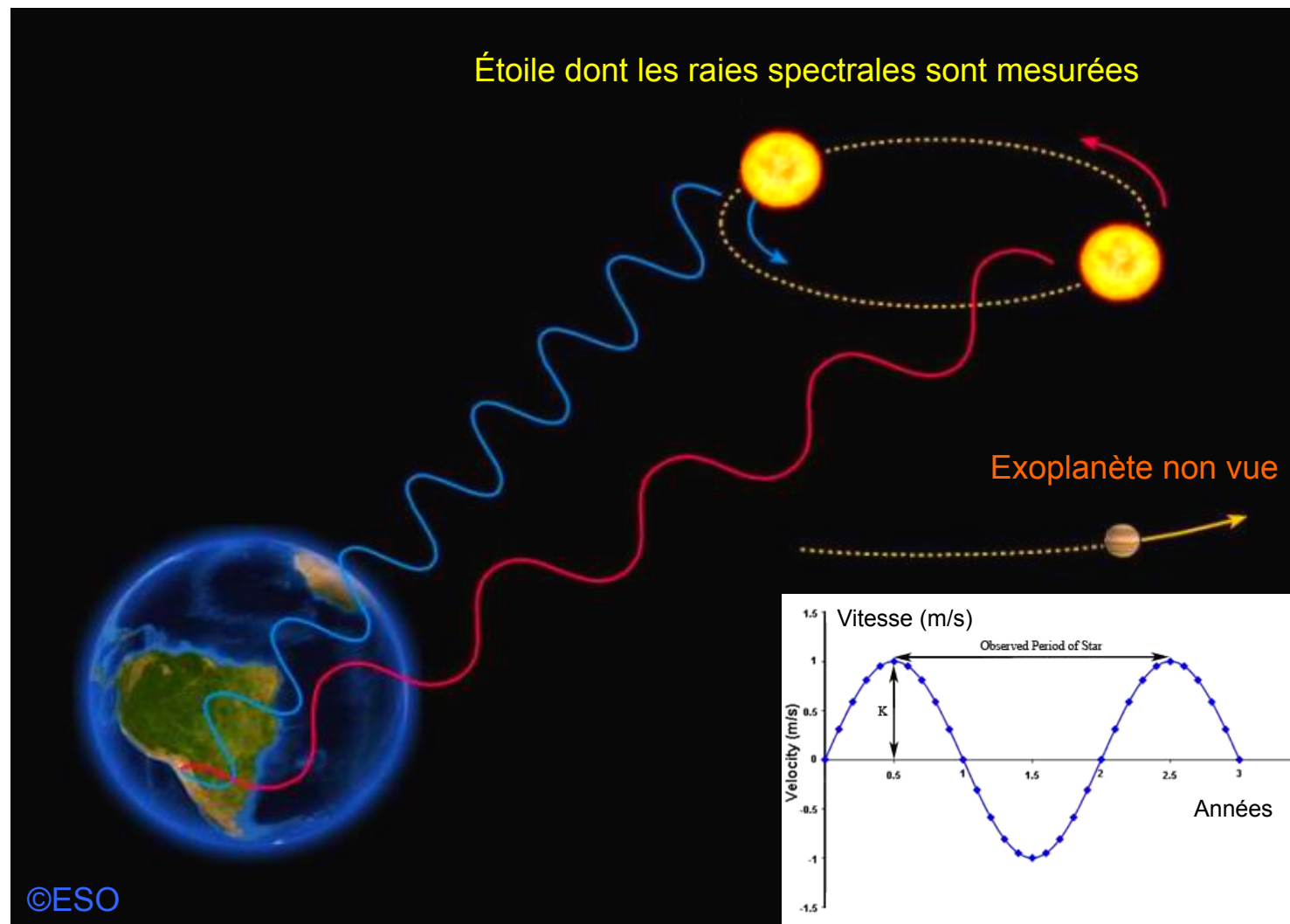
- Rotation d'ensemble du Soleil
- Granulation = turbulences de l'atmosphère du Soleil
- Région active sur la droite au sud de l'équateur



Velocity (km/s)

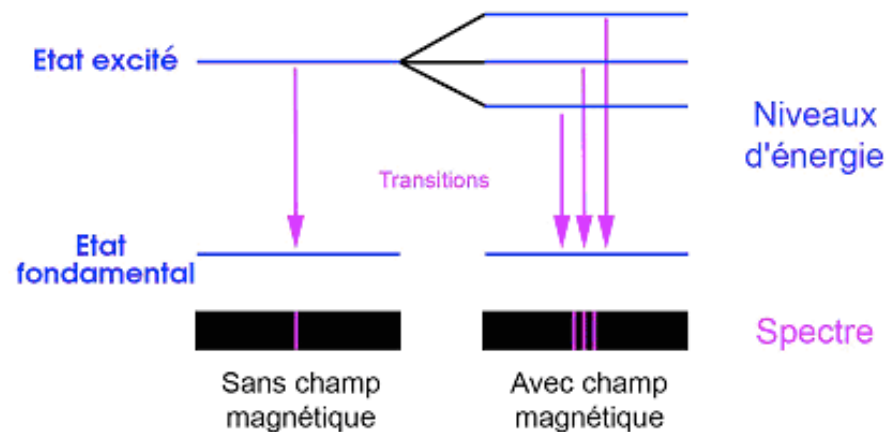


Détection d'une exoplanète par effet Doppler

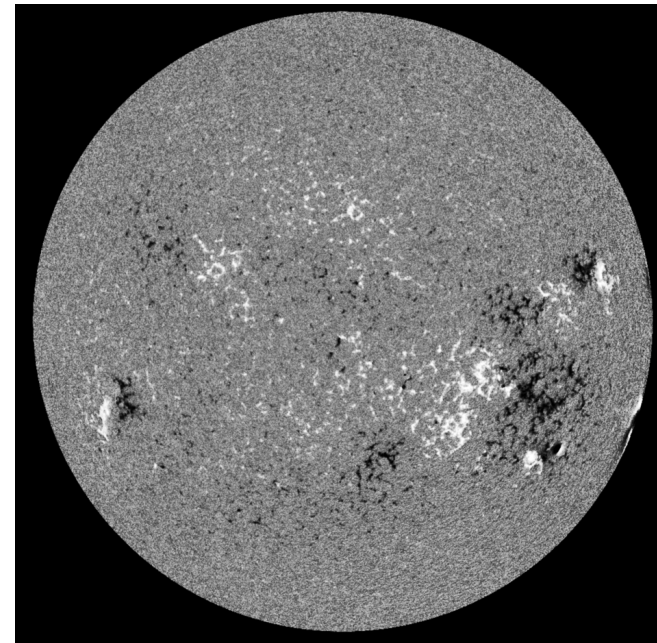


Effet Zeeman

- 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)

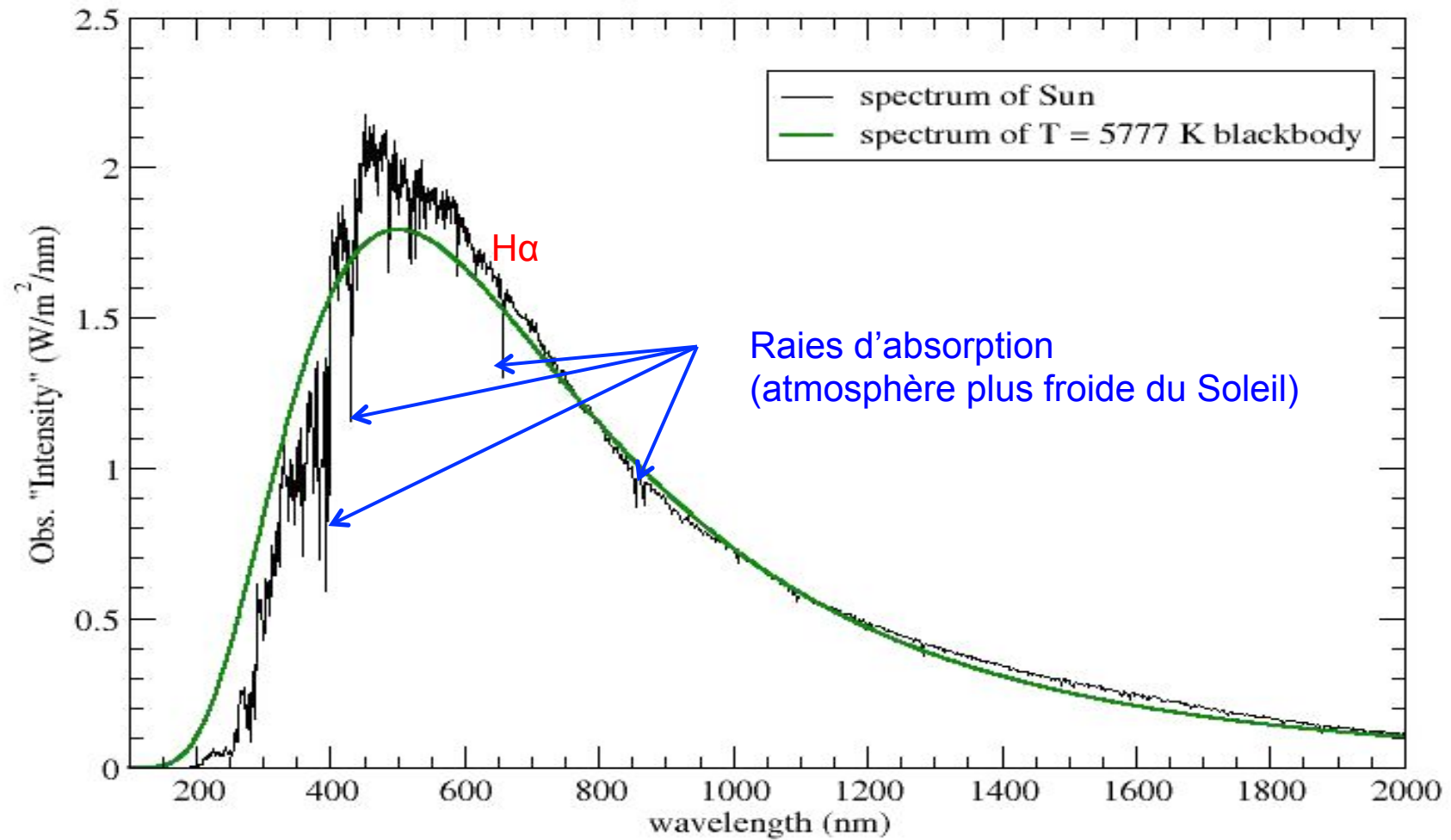


- Magnétogramme du Soleil



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

Le Soleil de plus près



Anatomie d'une raie spectrale

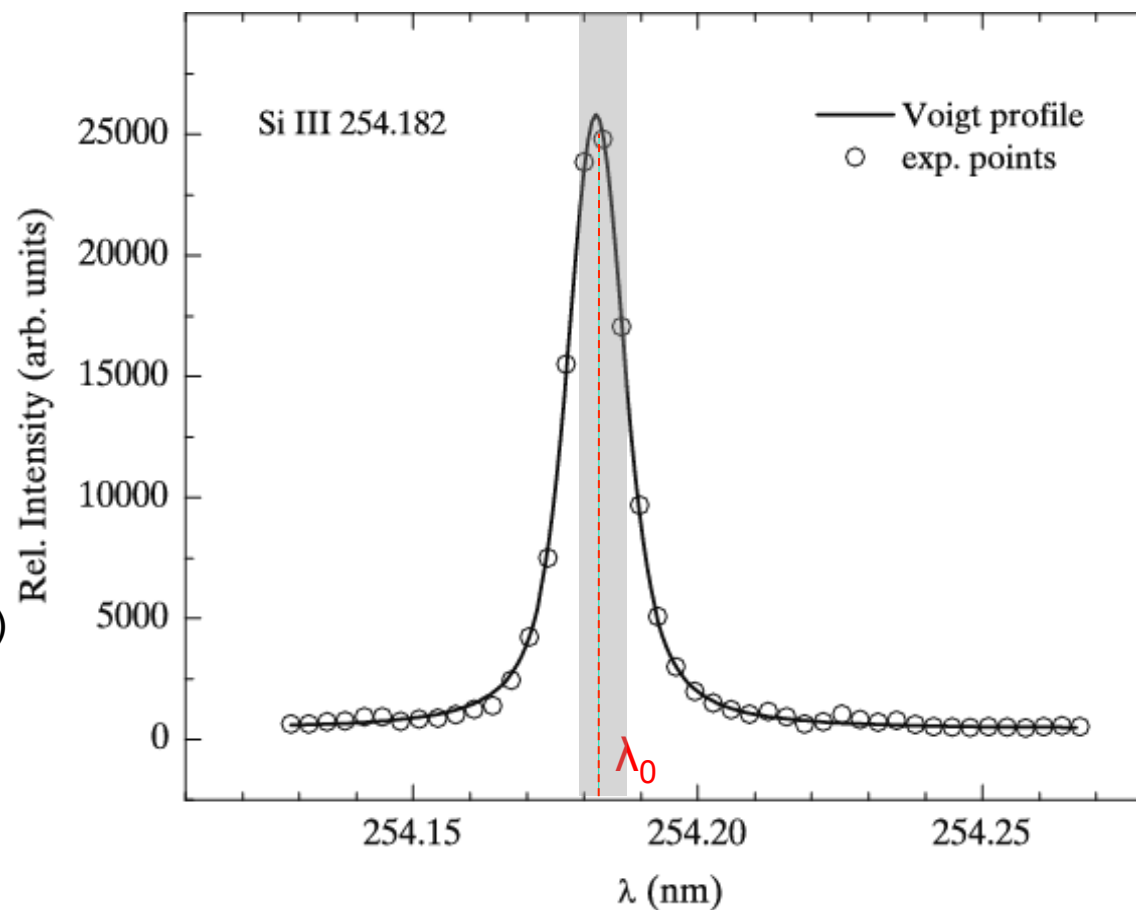
- Une raie n'est jamais infiniment étroite

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

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

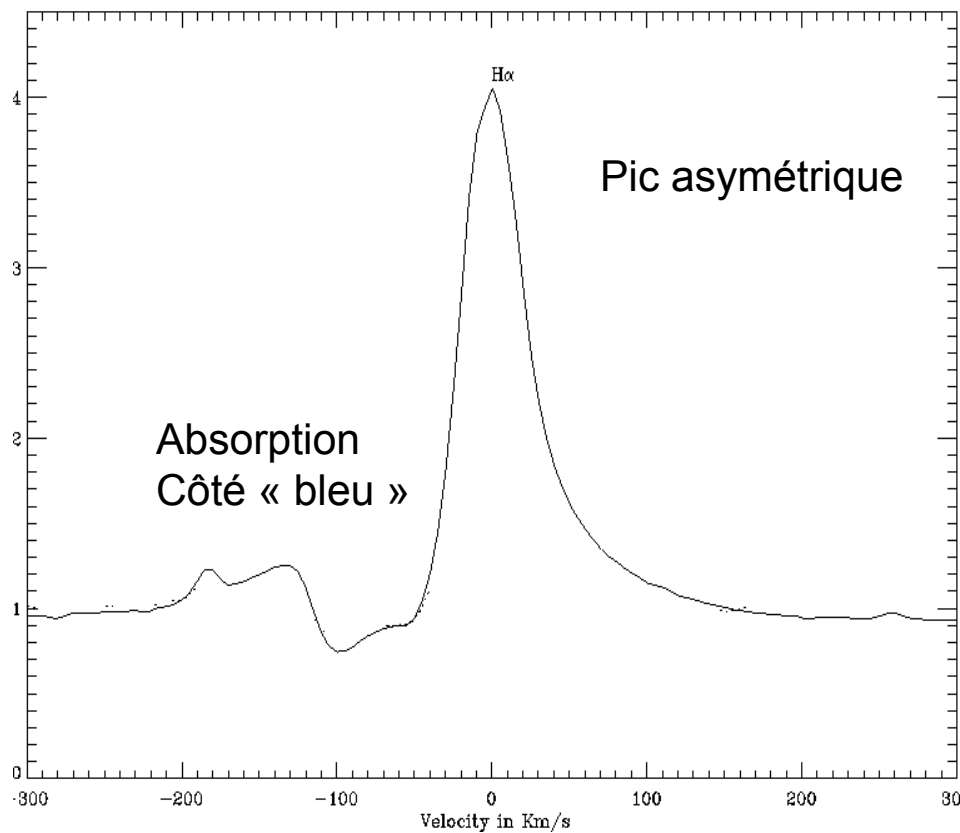
- du nombre d'atomes
- de la probabilité d'émission de cette raie (% aux autres)

Largeur équivalente W



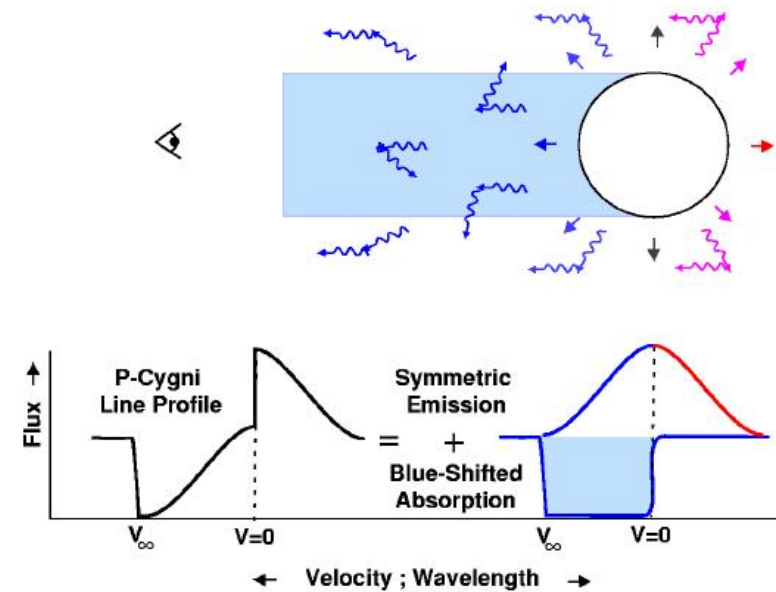
Profils P Cygni

- P Cyg est une étoile brillante dont les raies ont un profil « intéressant »



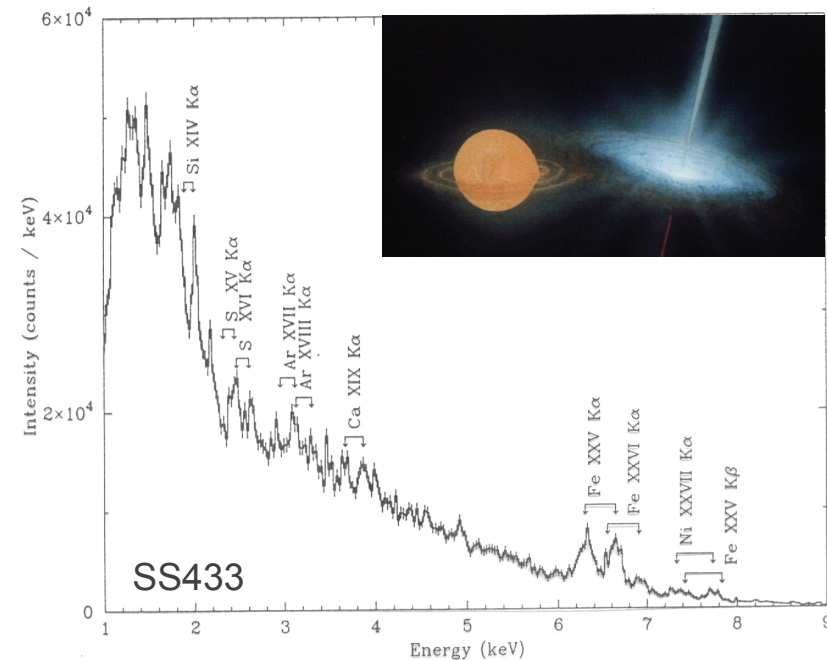
- Interprétation

- Une étoile source
- Une enveloppe gazeuse en expansion
- qui absorbe une partie de la lumière mais décalée vers le bleu



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
- 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



En général, il y a un peu de tout...

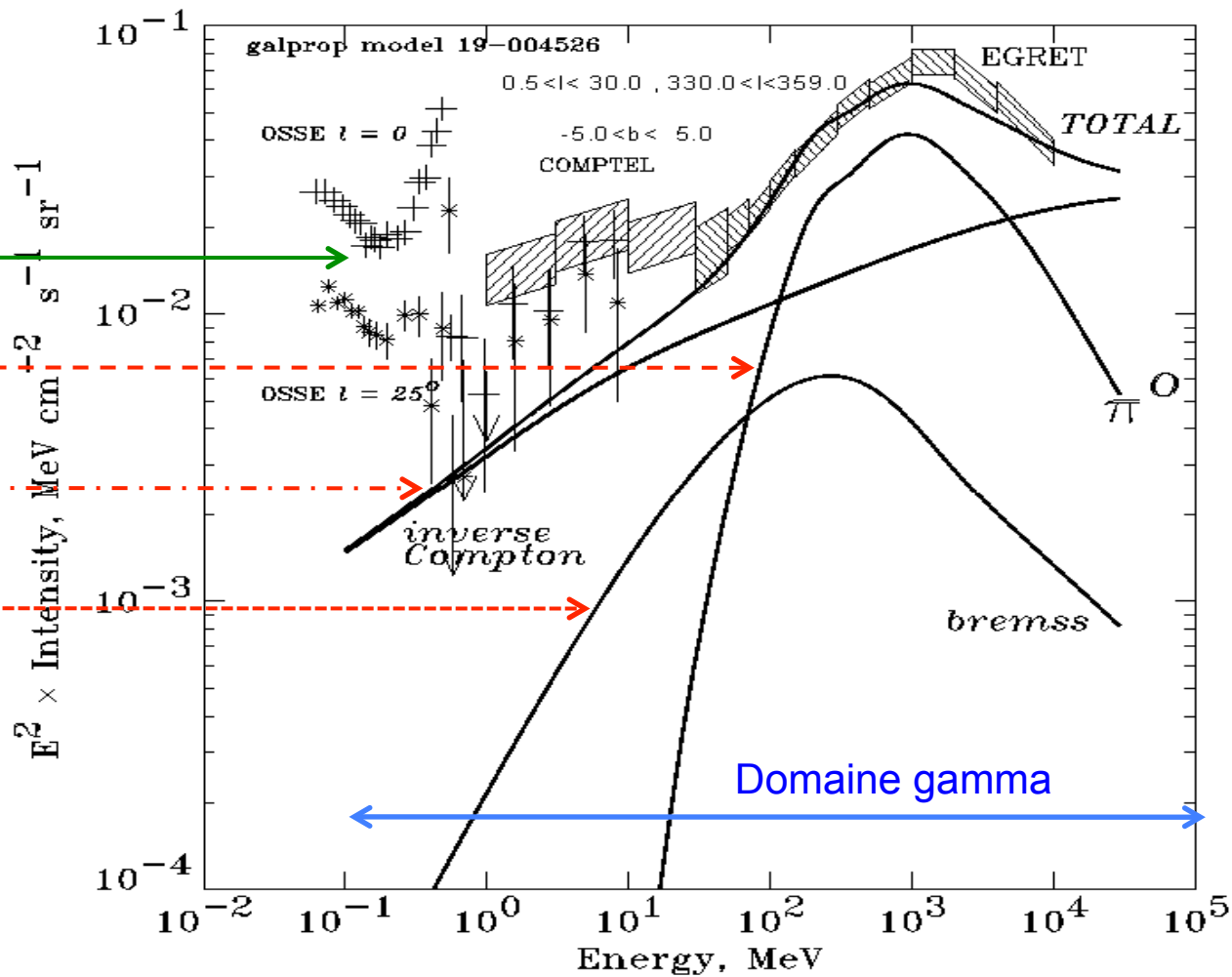
- Spectre γ diffus

- Observations

- Annihilation π^0

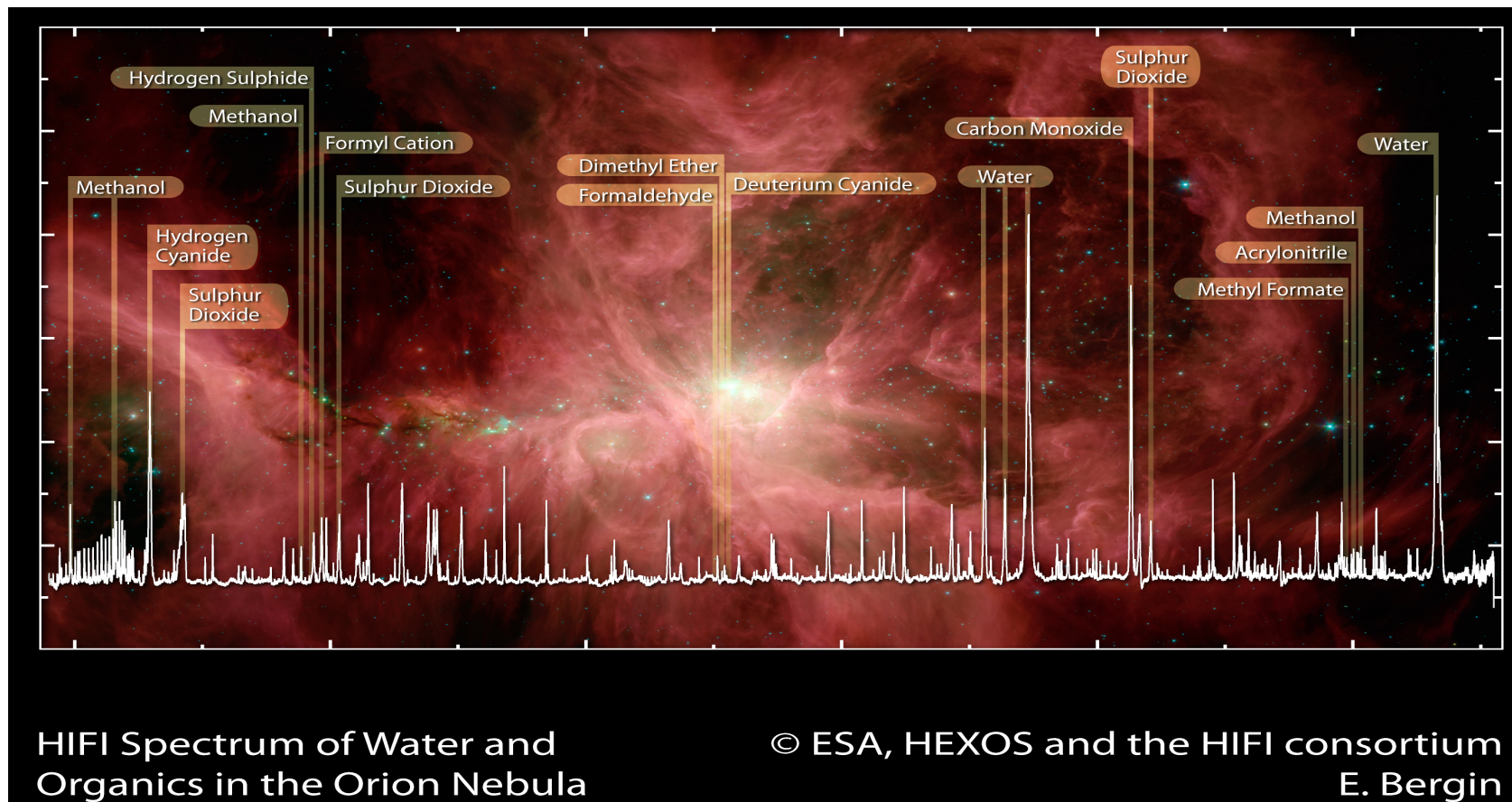
- Compton inverse

- Bremsstrahlung



Informations sur les sources : nébuleuses

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

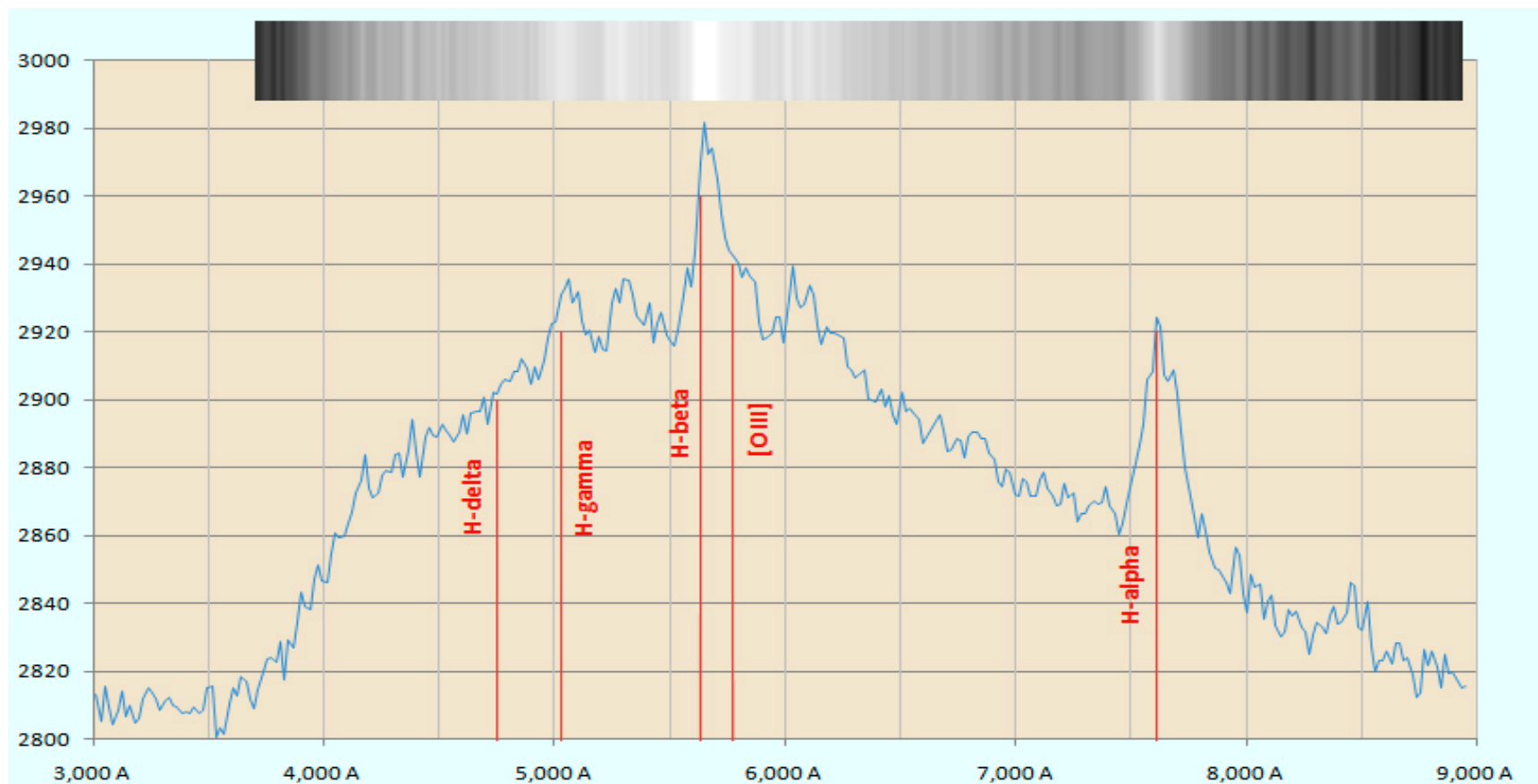


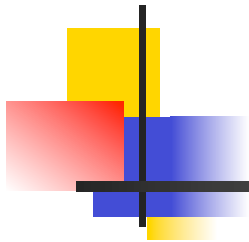
Informations sur les sources : quasars

- Quasar 3C273

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

↔ H α est à 6563 Å z = 0.158





Merci de votre attention !

