

Interactions lumière-matière

La lumière est une source immédiate de connaissance du monde qui nous entoure. Pourtant, c'est un « objet » physique particulièrement complexe que les physiciens n'ont eu de cesse de vouloir modéliser. La compréhension de ses interactions avec la matière sont cruciales pour sonder l'intimité de cette dernière ou encore pour obtenir des informations sur les objets cosmiques, puisque leur lumière en est à peu près le seul messageur à nous parvenir...

1 – La dualité onde-corpuscule de la lumière

Pour décrire le comportement de la lumière, le physicien dispose de plusieurs modèles.

- La lumière peut être décrite comme une onde caractérisée par sa fréquence, sa célérité ou encore sa longueur d'onde.
- La lumière peut être décrite par le biais de rayons lumineux, qui en modélisent la marche dans les systèmes optiques et permettent d'expliquer la vision.
- La lumière peut également être décrite comme un ensemble de corpuscules immatériels, les photons... comme nous allons le voir ici.

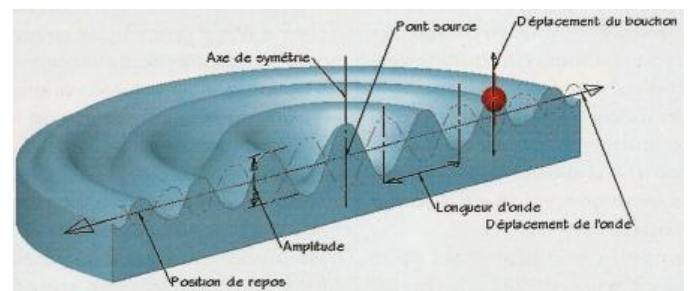
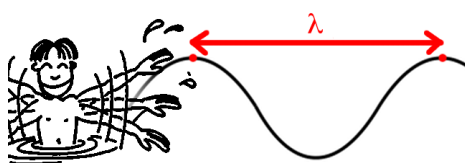
Pour émettre de la lumière, la matière doit recevoir de l'énergie (pile dans une lampe de poche) ; inversement, de l'énergie est récupérée lorsque la lumière est absorbée par la matière (objet sombre au Soleil, photovoltaïque, photosynthèse chlorophyllienne).

De l'énergie est donc associée à la lumière.

1.1 – Le modèle ondulatoire

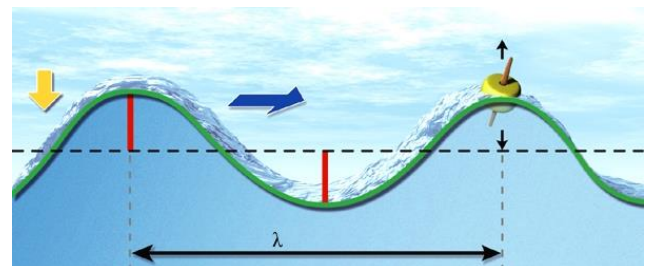
La lumière n'est pas une onde mécanique (le son, qui ne se propage pas dans le vide, en est une) mais appartient à la famille des ondes électromagnétiques : elle tire son origine de perturbations microscopiques des propriétés de la matière.

Une onde – mécanique comme électromagnétique – est un concept physique associé à la **propagation d'une perturbation**, comme les vagues provoquées par un caillou lancé dans l'eau. Gardons cet exemple pour aller plus loin.



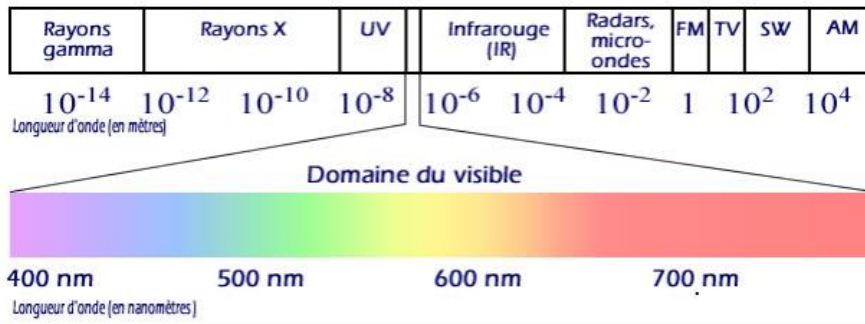
La distance qui sépare deux vagues successives est appelée **longueur d'onde** et notée λ .

Un bouchon qui flotte à la surface de l'eau va monter et descendre au passage de l'onde : on appelle **fréquence** (notée f) le nombre d'aller-retours qu'il fait pendant une seconde. On exprime ce nombre en hertz : $1 \text{ Hz} = 1 \text{ fois par seconde (s}^{-1}\text{)}$. La **période**, notée T , est la durée de l'aller-retour.



Pour le son et la lumière, qui sont également des ondes, on retrouve ces deux grandeurs. La fréquence décrit la façon dont la perturbation génère l'onde et donne un nombre de motifs par seconde ; pour le son, elle fixe la hauteur (note – le La₃ à 440 Hz) tandis que pour la lumière, dans le vide, elle fixe la couleur.

La longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde pendant sa période : $\lambda = v \times T$, si v est la vitesse de propagation de l'onde.



La lumière visible appartient à la grande famille des ondes électromagnétiques dont le spectre ci-contre est décomposé en différents domaines, des rayons gamma aux ondes radio.

Exercice : quel est l'ordre de grandeur de la fréquence et de la période des ondes lumineuses ?

1.2 – Le modèle corpusculaire

Le modèle ondulatoire est indispensable pour étudier la propagation de la lumière mais reste insuffisant pour décrire les échanges entre la lumière et la matière. En effet, les physiciens se sont aperçu que les lois de l'électromagnétisme conduisent à des prévisions aberrantes (dont la célèbre « catastrophe ultraviolette »). Pour éviter ces écueils, les physiciens ont été amenés à faire l'hypothèse que les énergies échangées entre matière et lumière ne peuvent pas prendre des valeurs quelconques : les transferts énergétiques sont discontinus ou **quantifiés** : ils ne peuvent se faire que par paquets ou quanta d'énergie bien déterminée. Ce postulat implique l'existence d'une particule de lumière appelée **photon** et dotée des propriétés suivantes,

- le photon n'a ni masse ni charge électrique
- le photon se déplace à la célérité de la lumière dans le milieu considéré, soit à la célérité $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le vide.

Le photon véhicule une quantité d'énergie E (en joules J) proportionnelle à la fréquence (en hertz Hz) de l'onde associée, d'après la **loi de Planck**

$$E = h \times \nu$$

où h désigne la constante de Planck, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$.

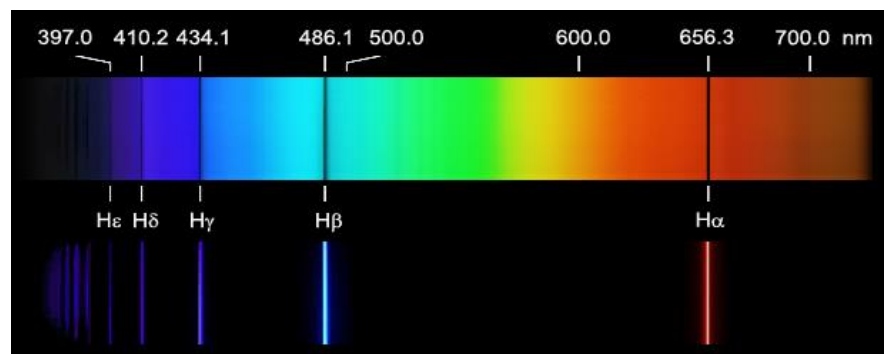
Nous allons voir qu'un photon est absorbé (et détruit) lorsque la radiation est absorbée ; il est créé lorsque la radiation est émise. Une radiation est constituée d'un nombre entier de quanta d'énergie, tous identiques s'il s'agit d'une radiation monochromatique.

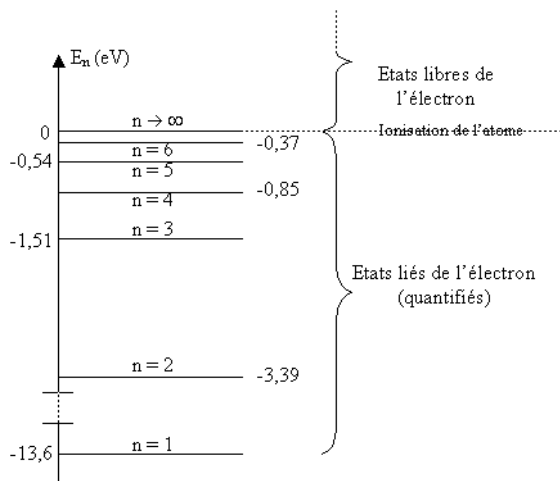
2 – Quantification de l'énergie d'un atome

La découverte du photon et l'étude des spectres de raies atomiques ont permis aux physiciens de comprendre la structure de l'atome.

2.1 – Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène

L'idée des couches énergétiques K, L, M... dans lesquelles se répartissent les électrons de l'atome n'est pas venue de nulle part : l'existence de ces niveaux énergétiques a été suggérée par l'existence de raies dans les spectres atomiques. Ci-contre, spectres de raies de l'hydrogène en absorption (haut) et en émission (bas) dans le domaine visible (série de Balmer).





A chaque couche correspond une énergie bien déterminée et identique pour tous les atomes d'hydrogène. Le **diagramme énergétique** donne ces différents niveaux.

Le niveau $n = 1$ d'énergie la plus basse est appelée **niveau fondamental** ; les autres niveaux sont dits excités.

Un atome d'hydrogène qui reçoit de l'énergie lumineuse voit son électron passer de la couche K à une de ses couches L, M, etc. Le changement de couche ou **transition électronique** n'a lieu que si un photon d'énergie $E = h \times \nu$ exactement égale à la différence d'énergie ΔE entre deux couches interagit avec l'atome : le photon est absorbé. Une telle transition est possible si l'atome reçoit l'énergie par rayonnement, mais aussi par décharge électrique (tube néon) ou par transfert thermique (étoiles).

De même, l'électron peut passer d'un niveau excité E_i à un niveau d'énergie E_f inférieure par émission d'un photon dont l'énergie respecte la relation de Planck,

$$E_i - E_f = h \times \nu$$

Où ν représente la fréquence de la radiation associée au photon émis.

Exemple : reprenons le spectre visible de l'atome d'hydrogène et essayons d'associer la raie $H\alpha$ à une transition entre niveaux d'énergie. Si $\lambda(H\alpha) = 656,3 \text{ nm}$, alors

$$\Delta E = h \times \nu = h \times \frac{c}{\lambda} = 6,626 \cdot 10^{-34} \times \frac{3,00 \cdot 10^8}{656,3 \cdot 10^{-9}} = 3,03 \cdot 10^{-19} \text{ J} \text{ soit } 1,89 \text{ eV.}$$

Ce gap d'énergie est celui existant entre les niveaux $n = 3$ et $n = 2$.

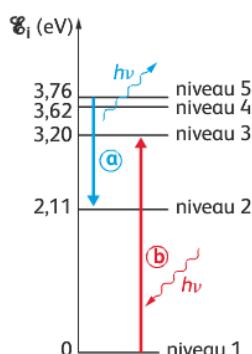
2.2 – Généralisation aux autres atomes

L'existence des niveaux d'énergie vue pour l'hydrogène se généralise à tous les autres atomes, à la différence que ceux-ci possèdent généralement bien plus de niveaux d'énergie que de couches (il existe des sous-couches électroniques).

Toutefois, l'émission ou l'absorption d'un photon suit toujours la loi de Planck et correspond à une transition entre deux niveaux électroniques.

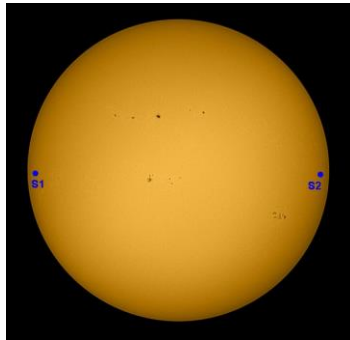
- Lorsqu'un atome absorbe un photon de fréquence ν , un de ses électrons d'énergie E_i peut effectuer une transition vers un niveau d'énergie supérieure E_f telle que $E_f - E_i = h \times \nu$
- Lorsqu'un atome effectue la transition inverse, un photon de même énergie est créé.

Prenons l'exemple de l'atome de sodium.



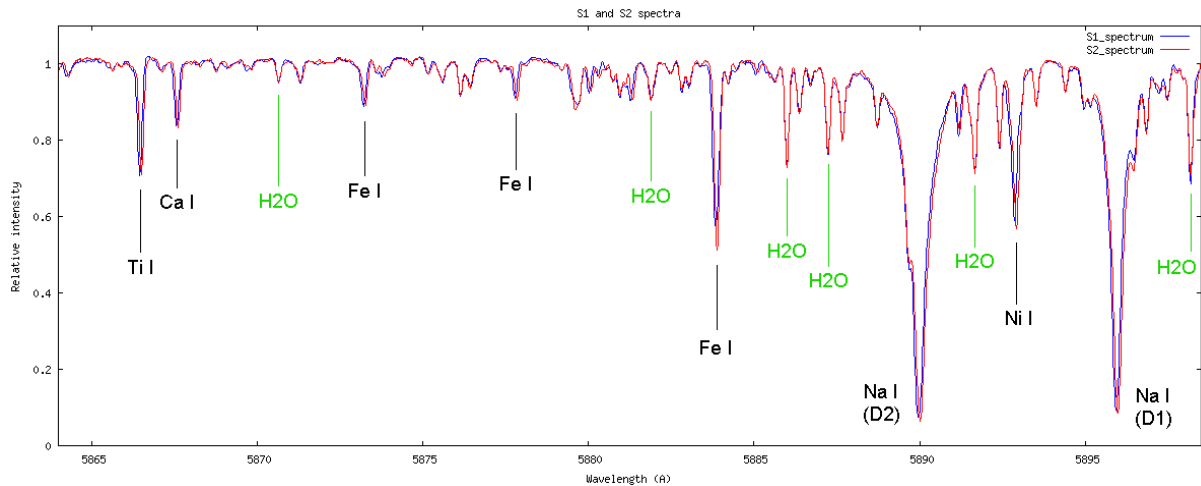
- L'atome cède l'énergie $E_i - E_f$ lors d'une transition d'un niveau supérieur E_i à un niveau inférieur E_f . Cette transition est représentée par une flèche droite, de haut en bas ; elle s'accompagne de l'émission d'un photon associé à un rayonnement représenté par une flèche ondulée sortante.
- L'atome reçoit l'énergie $E_f - E_i$ lors d'une transition d'un niveau inférieur E_i à un niveau supérieur E_f . Cette transition est représentée par une flèche droite, de bas en haut ; elle peut être provoquée par l'absorption d'un photon associé à un rayonnement représenté par une flèche ondulée entrante.

Remarque : observé depuis la Terre, le spectre solaire contient en outre des raies telluriques dues à l'atmosphère terrestre. Ces raies doivent être identifiées et sont précieuses car leur position est connue avec précision (ce qui permet l'étalonnage rapide des spectres obtenus).



Prise de deux spectres aux positions "S1" et "S2", proches des limbes est et ouest du disque.
Les petits disques de couleur bleu marquent la position de la fibre optique qui capte la lumière solaire pour être ensuite conduite dans le spectrographe.

Superposition des spectres "S1" et "S2" dans la partie jaune du spectre (filtre à 589 nm). Quelques raies de l'atmosphère solaire sont identifiées (en noir).



Noter le doublet du sodium (D1-D2) vers la droite. Les raies telluriques (venant de notre propre atmosphère, ici par la vapeur d'eau H₂O) sont indiquées en vert.

Le décalage Doppler entre les deux bords solaire est très évident sur les raies solaires, trahissant la rotation du disque. Le 'shift' spectral relatif est ici mesuré de 2,4 km/s (0,047 angströms). Noter que les raies telluriques ne bougent pas, ce qui permet au passage de bien les identifier.

De manière générale, l'étude détaillée du spectre des étoiles fournit de précieuses informations sur ces astres extrêmement éloignés de nous : température, composition chimique, mais aussi pression, vitesse, propriétés magnétiques, etc.

Ci-contre, le spectre IR de la compagne naine de l'étoile Sirius (rouge) et le profil théorique calculé après simulation de l'atmosphère stellaire.

