

Compétences exigibles

- Interpréter les échanges d'énergie entre lumière et matière à l'aide du modèle corpusculaire de la lumière ;
- Connaître les relations $|\Delta E| = h \cdot \nu$ et $\lambda = \frac{c}{\nu}$;
- Utiliser les relations précédentes pour exploiter un diagramme de niveaux d'énergie ;
- Utiliser les relations précédentes pour exploiter un spectre de raies d'absorption ou d'émission.

Chapitre 4 – Interaction lumière-matière

1 Tester ses prérequis

Un spectre de raies d'absorption présente :

- des raies sombres sur un fond coloré ;
- des raies colorées sur un fond sombre ;
- une bande colorée unique.

Les raies du spectre d'absorption d'un gaz, associées à un même atome :

- ont les mêmes longueurs d'onde que dans le spectre d'émission ;
- sont plus nombreuses que dans le spectre d'émission ;
- changent de longueur d'onde suivant la température du gaz.

Le fond continu du spectre de la lumière d'une étoile donne des renseignements sur :

- la composition chimique de son atmosphère ;
- la température de sa surface (photosphère) ;
- la température de son atmosphère (chromosphère).

La composition chimique de l'atmosphère d'une étoile peut être déterminée à partir du spectre de sa lumière, en analysant :

- l'étendue du fond continu ;
- la radiation émise avec la plus grande intensité lumineuse ;
- les raies d'absorption.

2 Quelques énigmes de la physique

La fin de 19^e siècle voit la victoire du déterminisme : les scientifiques ont des équations qui permettent d'expliquer la mécanique et le magnétisme, et ainsi tout en Physique semble avoir été découvert. Ne subsistent que deux ou trois petites énigmes d'intérêt mineur à éclaircir.

Ces petites énigmes vont pourtant bouleverser le bel assemblage de la Physique au tout début du 20^e siècle !

2.1 L'émission thermique d'un corps nécessite un nouveau modèle pour la lumière (rien que ça !)

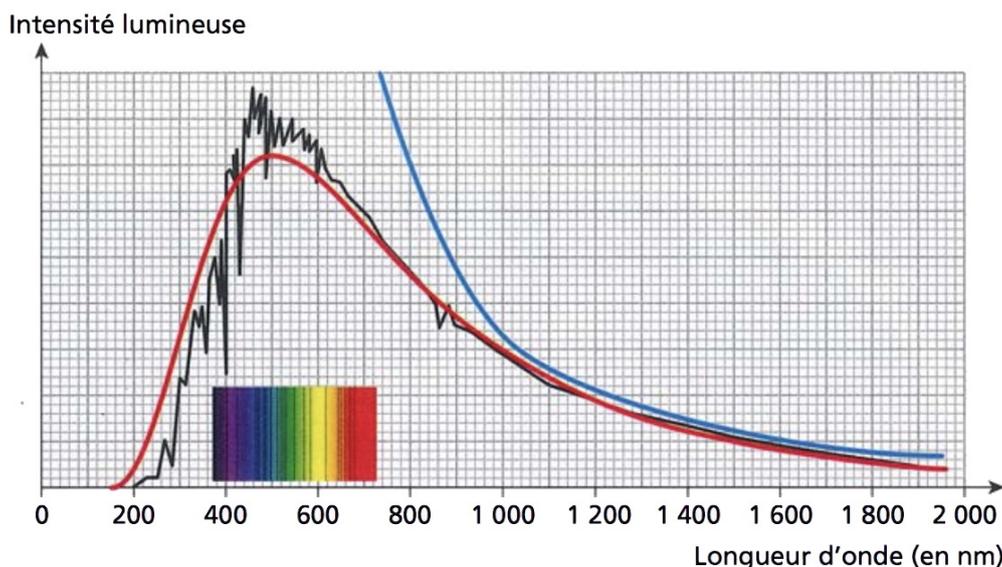


FIG. 1 – Intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde pour le Soleil (courbe noire), pour un corps de même température dans le cadre du modèle de Rayleigh-Jeans (courbe bleue), et dans le cadre du modèle de Planck (courbe rouge, reproduisant exactement l'émission thermique d'un corps noir).

Les physiciens du 19^e siècle ont beaucoup travaillé pour trouver un modèle de la lumière et en particulier un modèle du Soleil qui permettent d'interpréter la courbe de l'intensité lumineuse du Soleil en fonction de la longueur d'onde, vue au chapitre précédent (émission thermique dite « du corps noir »). Différents modèles ont été proposés pour expliquer l'allure de cette courbe obtenue pour un corps chauffé à une certaine température. Les britanniques RAYLEIGH et JEANS ont conçu en 1900 un modèle, représenté en figure 1 par la courbe bleue, reposant sur des bases simples et bien étayées quant au comportement des atomes. Hélas, si ce modèle explique bien l'émission thermique d'un corps noir dans les grandes longueurs d'onde, il bute dans les courtes longueurs d'onde sur ce que les deux britanniques ont nommé la « catastrophe de l'ultraviolet ».

a. Quelle est la valeur de l'énergie prévue par le modèle de RAYLEIGH et JEANS dans les courtes longueurs d'onde ? Pourquoi est-ce une « catastrophe » ?

Un autre modèle, conduisant à la courbe rouge, fut proposé par PLANCK un peu plus tard la même année (1900). PLANCK a proposé ce modèle sans le faire reposer sur aucune base simple ou plausible quant au comportement des atomes, car il ne s'agit alors que d'une simple astuce mathématique permettant d'interpréter les résultats expérimentaux. C'est donc une courbe mathématique « ad-hoc », pour coller aux résultats expérimentaux. PLANCK a tenté de trouver une interprétation plausible

à son modèle, sans succès. Le modèle (tel que proposé par EINSTEIN en 1905) impose de faire l'hypothèse que l'énergie E d'une radiation de fréquence ν (*), émise par un atome, ne peut être qu'un multiple d'une quantité que PLANCK a appelé « quantum » d'énergie, et qui a pour valeur $E = h \cdot \nu$, où h est une constante (appelée par la suite « constante de Planck », en hommage). En d'autres termes, $E = h \cdot \nu$ est la plus petite unité d'énergie qui puisse être échangée lors d'émission ou d'absorption d'une radiation. Pour PLANCK, ce modèle des énergies *discontinues* n'a aucun sens, et il l'a présenté à son corps défendant. Mais en réalité, l'hypothèse de PLANCK est révolutionnaire, car elle ne correspond pas seulement à un modèle mathématique acceptable, mais bien à la description de la réalité du comportement *microscopique* !

(*) Note : la fréquence est noté ν et non pas f lorsque l'on s'occupe des atomes. Considérez cela comme un *snobisme*.

b. Rappeler l'unité dans le système international de l'énergie et de la fréquence. En déduire l'unité de la constante de Planck h .

c. Calculer l'énergie d'un quantum pour une radiation rouge de fréquence $\nu = 5,0 \times 10^{14}$ Hz. Comparer avec l'énergie délivrée par seconde par une lampe dont la puissance est de 40 W ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s).

d. Quelle interprétation moderne peut-on faire de cette émission du corps noir ?

2.2 Dans l'effet photoélectrique, on constate un effet de seuil totalement incompréhensible à l'époque

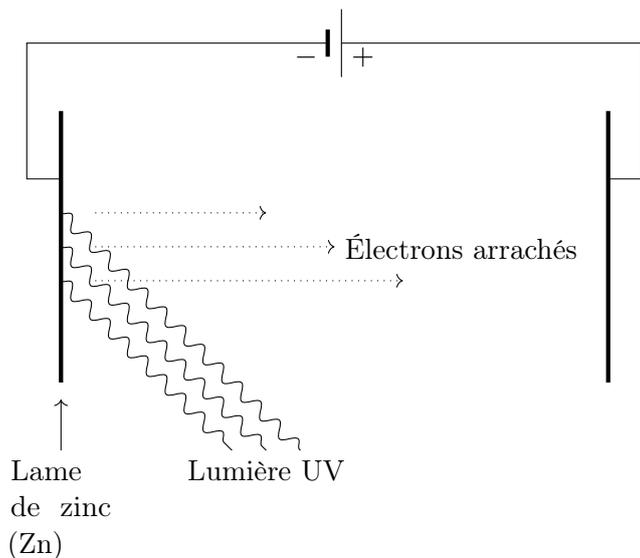


FIG. 2 – Effet photoélectrique.

On éclaire une lame de zinc avec de la lumière UV. Des électrons sont arrachés à la lame de zinc, électrons qui

sont ensuite accélérés en direction d'une anode collectrice placée en vis-à-vis.

Sans lumière UV, on ne constate aucune sortie d'électron de la lame de zinc. Cela montre que la lumière UV communique une énergie suffisante aux électrons afin de leur faire vaincre le travail d'extraction du métal, travail noté W_0 (exprimé en joule, symbole J). C'est l'effet photoélectrique.

Un petit détail étrange subsiste néanmoins : cet effet dépend de la longueur d'onde de la lumière. L'effet apparaît brusquement dès que la longueur d'onde des UV est assez courte. On ne peut pas utiliser des UV deux fois moins énergétiques, par exemple en « compensant » par une intensité lumineuse double. L'expérience n'a pas un comportement « continu », un net effet de seuil sans explication est présent.

e. À nouveau, pour cette deuxième énigme, proposez une interprétation moderne.

2.3 Les spectres d'émission des atomes est une preuve indirecte d'une structure interne de l'atome

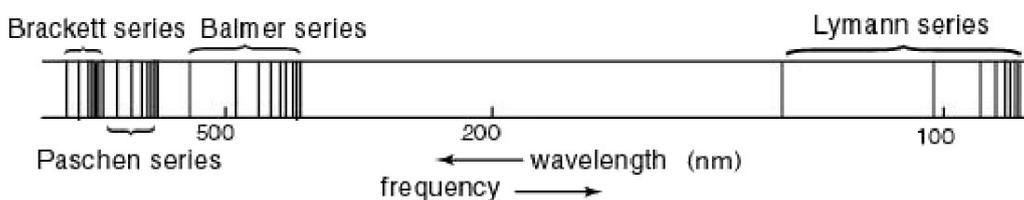


FIG. 3 – Spectre de raies d'émission de l'atome d'hydrogène.

Les spectres de raies des atomes étaient bien connus à la fin du 19^e et au début de 20^e siècle. Les physiciens qui avaient travaillé sur ces spectres avaient trouvé une relation mathématique relativement simple permettant de grouper les raies en « séries », séries qui portent les noms de leurs découvreurs respectifs (BALMER, LYMAN, PASCHEN et BRACKETT), tel qu'indiqués en figure 3 ci-

dessus pour le spectre de l'atome d'hydrogène.

Cependant, le fait que l'on observe ainsi des spectres de raies et non des spectres continus montre qu'une structure interne à l'atome se devait d'être découverte.

f. Donnez une interprétation moderne.

2.4 Les mesures de célérité de la lumière sont en contradiction avec les plus élémentaires principes de la mécanique

Une dernière « petite énigme » de la physique classique du 19^e siècle a conduit à refonder la totalité de la physique au 20^e siècle : il s'agit du fait très étonnant selon lequel la célérité de la lumière ne dépend pas du mouvement de

la source. Cette dernière énigme, résolue par EINSTEIN en 1905 (en même temps que les précédentes!), dépasse le cadre de ce chapitre.

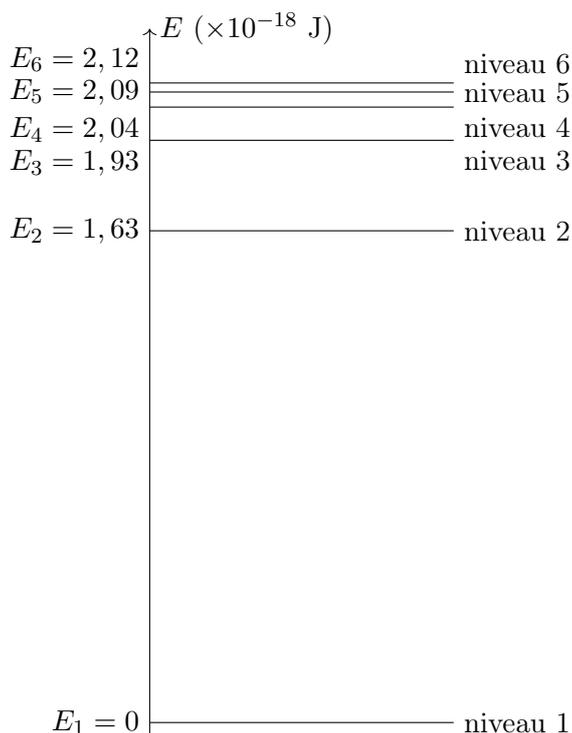
3 Atomes et photons

Pour expliquer le spectre de l'atome d'hydrogène, Niels BOHR s'inspire de l'idée d'Albert EINSTEIN concernant la quantification de l'énergie de la lumière, en supposant que l'énergie des atomes est elle aussi quantifiée.

Doc. 1 – Les hypothèses de Niels BOHR

Pour interpréter le spectre de l'atome d'hydrogène, le physicien suédois Niels BOHR a émis, en 1913, les hypothèses suivantes :

- Dans un atome d'hydrogène, l'électron ne peut accéder qu'à certaines couches électroniques. À chaque couche correspond une énergie déterminée pour l'atome, appelée niveau d'énergie. Par exemple, le diagramme ci-dessous représente les premiers niveaux d'énergie accessibles à l'atome d'hydrogène (le niveau 1, de plus basse énergie, est le plus stable).
- Pour changer de niveau d'énergie, l'atome doit gagner ou perdre en un seul paquet l'énergie strictement égale à l'écart entre le niveau initial et le niveau final.
- Un atome peut changer de niveau en émettant ou en absorbant de la lumière. Au cours de cette transition d'énergie, il libère ou absorbe alors un seul photon.



Doc. 2 – Spectres de l'atome d'hydrogène

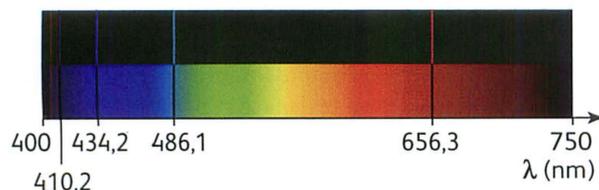


FIG. 4 – Spectres d'émission (en haut) et d'absorption (en bas) d'un gaz formé d'atomes d'hydrogène.

Doc. 3 – Énergie d'un photon

L'énergie $|\Delta E|$ d'un photon dépend de la longueur d'onde dans le vide λ de la radiation associée selon l'expression suivante :

$$|\Delta E| = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$|\Delta E|$ en joule (J)

$h = 6,63 \times 10^{-34}$ J·s

$c = 3,00 \times 10^8$ m·s⁻¹

λ en mètre (m)

g. D'après le document 3, les longueurs d'onde dans le vide des radiations émises par l'atome d'hydrogène sont-elles distribuées de façon continue ou de façon discrète (discontinue) ?

h. Dans le cas d'une émission de lumière, l'atome reçoit-il ou libère-t-il de l'énergie ? L'énergie de l'atome augmente-t-elle ou diminue-t-elle ?

i. Calculer l'énergie des photons associés à la radiation de longueur d'onde dans le vide 656,3 nm.

j. Sur le diagramme du document 1, identifier le changement de niveaux d'énergie, appelé transition énergétique, responsable de l'émission de cette radiation à 656,3 nm.

k. En quoi les hypothèses formulées par BOHR sont-elles en accord avec la réponse à la question **g.** ?

4 Les bases de la physique quantique

4.1 Modèle du photon

En 1900, Max PLANCK émet l'hypothèse que la lumière transporte de l'énergie « par paquets », appelés

En 1905, Albert EINSTEIN émet l'hypothèse que ces quantas d'énergie lumineuse sont portés par des particules de masse nulle, non chargés, se déplaçant à la vitesse de la lumière $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, appelés (par la suite)

4.2 Énergie du photon

Une onde électromagnétique de fréquence ν (lettre grecque « nu ») est constituée de photons d'énergie :

$$\mathcal{E} = \dots\dots\dots$$

avec h une constante fondamentale de la physique, appelée constante de Planck :

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

L'énergie \mathcal{E} est en (...);

La constante de Planck h est en (...);

La fréquence ν est en (... ou ...).

4.3 Lien entre fréquence et longueur d'onde

Suivant EINSTEIN, la vitesse d'un photon est égale par définition à $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, célérité de la lumière dans le vide.

La longueur d'onde λ d'une radiation est reliée à sa fréquence ν par la relation :

$$\lambda =$$

La longueur d'onde λ est en (...);

La fréquence ν est en (... ou ...).

4.4 Les postulats de Bohr

Les variations d'énergie de l'atome sont quantifiés.

Ainsi, ce ne sont pas seulement les échanges d'énergie de l'atome (par le biais de **photons** émis ou reçus) qui sont quantifiés, mais bien directement l'énergie de l'atome lui-même.

Autrement dit, l'atome ne peut exister que dans certains états d'énergie bien définis, états caractérisés par un **niveau d'énergie**.

Dès la découverte des niveaux d'énergie, les scientifiques les ont désignés avec un nombre entier (appelé nombre quantique principal). Vous ne devez donc pas vous étonner de voir des nombres entiers en indice des grandeurs. Ainsi, E_n désigne l'énergie du niveau n , E_p l'énergie du niveau p .

Les variations d'un état initial vers un état final sont symbolisés par un grand delta Δ en physique :

$$\Delta E = E_p - E_n$$

Les variations d'énergie de l'atome ont lieu par **absorption** ou **émission** d'un photon ; comme l'énergie d'un photon est donnée par $\mathcal{E} = h \cdot \nu$, la variation d'énergie de l'atome est donc égale à l'énergie apportée ou emportée par le photon :

$$\Delta E = h \cdot \nu$$

La même formule est utilisable autant dans le cas d'un photon reçu par l'atome, que lorsque le photon est émis par l'atome. Dans le premier cas, l'atome est excité par l'absorption du photon d'énergie bien précise. Dans le second cas, l'atome se désexcite en émettant un photon. Ainsi, l'énergie ΔE peut être perdue ou gagnée par l'atome, selon qu'il s'agit d'une absorption ou d'une émission. Afin d'éviter tout problème de signe, on utilise la valeur absolue de la variation d'énergie :

$$|\Delta E| = h \cdot \nu$$

En conclusion,

Un photon est échangé lorsque l'atome effectue une transition entre deux niveaux d'énergie E_p et E_n , tel que :

.....

4.5 Énergie du photon (2)

La fréquence ν du photon échangé est donnée par :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \Leftrightarrow \quad \nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

La variation d'énergie $|\Delta E|$ est donnée par :

$$|\Delta E| = h \cdot \nu \quad (2)$$

En regroupant ces deux équations, on aboutit à une formule qui sera utile dans les exercices pour passer du diagramme d'énergie au spectre, et vice-versa :

$$\boxed{|\Delta E| = \frac{hc}{\lambda}}$$