

CHAPITRE 3

La lumière, onde et corpuscule

I. Aspect ondulatoire de la lumière

La description ondulatoire de la lumière est due en premier lieu au Hollandais Huygens (Traité de la lumière, 1690). Cependant, c'est le Français Fresnel qui apporte la pierre décisive en fournissant une théorie complète (La diffraction de la lumière, 1818), validée par l'expérience et encore en vigueur aujourd'hui.

1) Une onde électromagnétique

Propriété

Le phénomène de diffraction est spécifique aux ondes.

La lumière peut être diffractée (cf. TP). C'est donc une onde.

La forme des ombres a longtemps fait croire que la lumière n'était pas une onde, puisque la lumière ne semblait pas contourner les obstacles (c'est-à-dire ne se diffractait pas). En fait, elle le fait bien, mais de manière extrêmement peu prononcée.

Cependant, elle se propage dans le vide, ce n'est donc pas une onde mécanique.

Définition de la lumière

La lumière est une onde électromagnétique progressive détectable par l'œil humain.

Les ondes électromagnétiques correspondent à la propagation d'une perturbation du champ électromagnétique. Leur comportement diffère en partie des ondes mécaniques.

Propriété

Les ondes électromagnétiques progressives se propagent d'autant plus vite que le milieu de propagation est vide.

2) Décomposition d'une onde électromagnétique

Une onde électromagnétique progressive sinusoïdale possède une périodicité temporelle, donc une période et une fréquence.

La fréquence étant imposée par sa source, une onde électromagnétique progressive sinusoïdale conserve sa fréquence toute au long de sa propagation.

Propriété

Une onde électromagnétique progressive sinusoïdale est caractérisée par sa fréquence, notée usuellement ν .

Le cerveau traduit chaque fréquence de la lumière reçue par une couleur. Comme une onde lumineuse sinusoïdale possède une seule fréquence, donc une seule couleur, elle est dite **monochromatique** (« d'une seule couleur » en grec).

Chapitre 3 : La lumière, onde et corpuscule

Ex : la lumière d'un LASER est considérée comme monochromatique (rigoureusement, aucune lumière réelle n'est monochromatique).

Propriété

Toute onde électromagnétique est un ensemble d'ondes électromagnétiques monochromatiques.

Ainsi, toute onde électromagnétique est décrite par les fréquences des ondes électromagnétiques monochromatiques qui la constituent.

Cette description s'appelle un **spectre**.

Une onde électromagnétique non monochromatique est appelée onde électromagnétique **polychromatique**.

Ex : la lumière blanche est polychromatique.

3) Propagation d'une onde électromagnétique dans le vide

Propriété

Toutes les ondes électromagnétiques progressives ont la même célérité dans le vide. Cette célérité est notée c et vaut :

$$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Le vide est donc non **dispersif**.

4) Propagation de la lumière

Définition de l'indice optique

Pour une onde lumineuse monochromatique donnée, on appelle indice optique (ou indice de réfraction) d'un milieu homogène le rapport entre la célérité c de cette onde dans le vide et la célérité v de cette même onde dans le milieu considéré :

$$n = \frac{c}{v}$$

Remarques :

- L'indice optique du vide est 1 pour toutes les ondes lumineuses.
- L'indice optique d'un milieu dépend de la fréquence de l'onde si ce dernier est **dispersif**. Par exemple, l'air est peu dispersif.

Lois de Descartes :

1^{ère} loi : les rayons réfracté et réfléchi appartiennent au plan d'incidence.

2^{ème} loi : l'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux : $i_1 = r$

3^{ème} loi : Pour le dioptré milieu 1/milieu 2, la relation entre angle d'incidence i_1 et angle réfracté i_2 est : $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$

Démonstration des 2^{ème} et 3^{ème} lois

On représentera la lumière par la propagation d'une perturbation que l'on assimilera à une crête de vague : les phénomènes de réflexion et de réfraction concernent en effet toutes les ondes. On ignorera tout phénomène d'atténuation au cours de la propagation.

Chapitre 3 : La lumière, onde et corpuscule

Tant qu'elle reste dans le même milieu, la vague avance droit devant en restant identique à elle-même. Ainsi, dans un milieu donné, la trajectoire d'un point quelconque de la perturbation est rectiligne et perpendiculaire à la crête de la vague. Cette trajectoire correspond en fait au rayon lumineux.

On se propose de suivre le mouvement des deux points extrêmes A et B de la perturbation au cours du temps ; on considère 4 instants t_1, t_2, t_3 et t_4 , les points A_i et B_i désignant la position de A et B à l'instant t_i . Autrement dit, on va étudier la marche de deux rayons lumineux (l'un dessiné en trait plein et l'autre en pointillés sur le schéma situé ci-dessous).

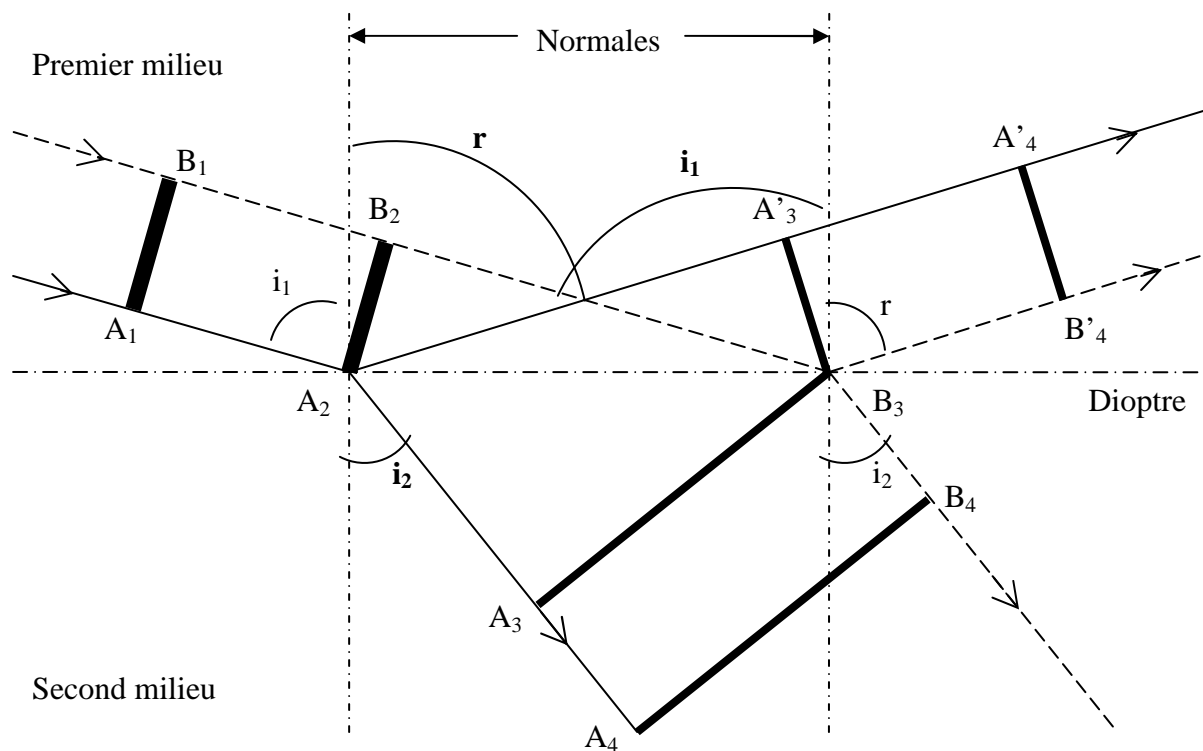
Au temps t_2 , la crête de la vague commence à toucher le dioptre par son extrémité A. Au temps t_3 , l'autre extrémité B parvient enfin au dioptre. Autrement dit, le rayon lumineux en trait plein touche le dioptre en t_2 et le rayon lumineux en pointillés en t_3 .

A partir du temps t_3 , on observe, dans chacun des deux milieux, la formation d'une perturbation qui va se déplacer droit devant, identique à elle-même. Il s'agit :

- de l'onde réfractée dans le second milieu
- de l'onde réfléchie dans le premier milieu (on écrira A' et B' au lieu de A et B pour distinguer la partie réfléchie de la partie réfractée)

On note v_1 la célérité de l'onde dans le premier milieu et v_2 la célérité de l'onde dans le second milieu. c désigne la célérité de la lumière dans le vide.

On cherche une relation entre les angles d'incidence i_1 , de réfraction i_2 et de réflexion r .



Chapitre 3 : La lumière, onde et corpuscule

Vu la position de l'angle i_1 indiqué en gras, on en déduit que l'angle $B_2B_3A_2$ est son angle complémentaire. Considérant le triangle $B_2B_3A_2$ rectangle en B_2 , on en déduit que l'angle $B_2A_2B_3$ vaut i_1 . Ainsi, en travaillant dans ce même triangle, on peut écrire que :

$$\sin(i_1) = \frac{B_2B_3}{A_2B_3}$$

Vu la position de l'angle i_2 indiqué en gras, on en déduit que l'angle $A_3A_2B_3$ est son angle complémentaire. Considérant le triangle $A_3A_2B_3$ rectangle en A_3 , on en déduit que l'angle $A_3B_3A_2$ vaut i_2 . Ainsi, en travaillant dans ce même triangle, on peut écrire que :

$$\sin(i_2) = \frac{A_2A_3}{A_2B_3}$$

Vu la position de l'angle r indiqué en gras, on en déduit que l'angle $A'_3A_2B_3$ est son angle complémentaire. Considérant le triangle $A'_3A_2B_3$ rectangle en A'_3 , on en déduit que l'angle $A'_3B_3A_2$ vaut r . Ainsi, en travaillant dans ce même triangle, on peut écrire que :

$$\sin(r) = \frac{A_2A'_3}{A_2B_3}$$

On en déduit la relation suivante en isolant A_2B_3 dans chacune des 3 relations précédentes :

$$\frac{1}{A_2B_3} = \frac{\sin(i_1)}{B_2B_3} = \frac{\sin(i_2)}{A_2A_3} = \frac{\sin(r)}{A_2A'_3}$$

Ces trois dernières distances sont parcourues par les points A, B et A' sur une durée $\Delta t = t_3 - t_2$, d'où :

$$B_2B_3 = v_1 \Delta t$$

$$A_2A_3 = v_2 \Delta t$$

$$A_2A'_3 = v_1 \Delta t$$

En substituant dans la relation précédente ces trois relations, on obtient :

$$\frac{\sin(i_1)}{v_1 \Delta t} = \frac{\sin(i_2)}{v_2 \Delta t} = \frac{\sin(r)}{v_1 \Delta t}$$

On obtient alors les deux relations suivantes :

$$\frac{\sin(i_1)}{v_1} = \frac{\sin(i_2)}{v_2} \text{ et } \sin(i_1) = \sin(r)$$

Si on multiplie les deux membres de la première relation par c , on obtient la 3^{ème} loi de Descartes.

De la deuxième relation, on déduit que $i_1 \equiv r(2\pi)$ ou $i_1 \equiv \pi - r(2\pi)$. Cependant, par leur définition, les angles i_1 et r sont aigus, donc $i_1 = r$, c'est-à-dire la 2^{ème} loi de Descartes.

Remarque

Le phénomène de réfraction dans un milieu dispersif permet de décomposer la lumière, ce qui permet d'obtenir son spectre.

Ex : dispersion de la lumière par un prisme

5) Longueur d'onde

Une onde électromagnétique progressive sinusoïdale possède une périodicité spatiale, donc une longueur d'onde.

Propriété

La longueur d'onde d'une onde électromagnétique progressive monochromatique est reliée à sa célérité et à sa fréquence. Elle dépend donc du milieu traversé via la célérité.

$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

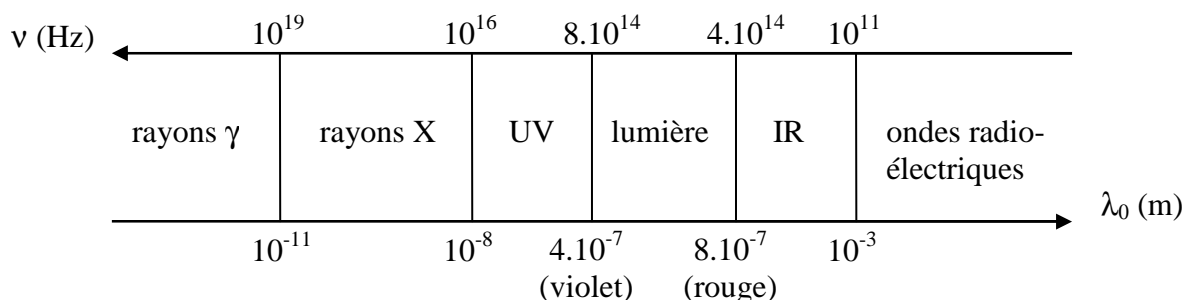
La longueur d'onde dans le vide d'une onde électromagnétique monochromatique est :

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$$

Remarque :

Usuellement, on utilise souvent la longueur d'onde dans le vide, au lieu de la fréquence, pour décrire une onde électromagnétique monochromatique. Il faut bien noter que la longueur d'onde dans le vide n'a rien à voir avec la longueur d'onde réelle, à moins d'être dans le vide.

Ondes électromagnétiques :



6) Diffraction d'une onde lumineuse

Une onde lumineuse monochromatique possède une très petite longueur d'onde, c'est pourquoi elle est très peu diffractée par un obstacle. Néanmoins, le phénomène reste observable.

Propriété

Au passage d'une fente, une onde lumineuse monochromatique est diffractée, et d'autant plus que sa longueur d'onde est grande devant la largeur de la fente.

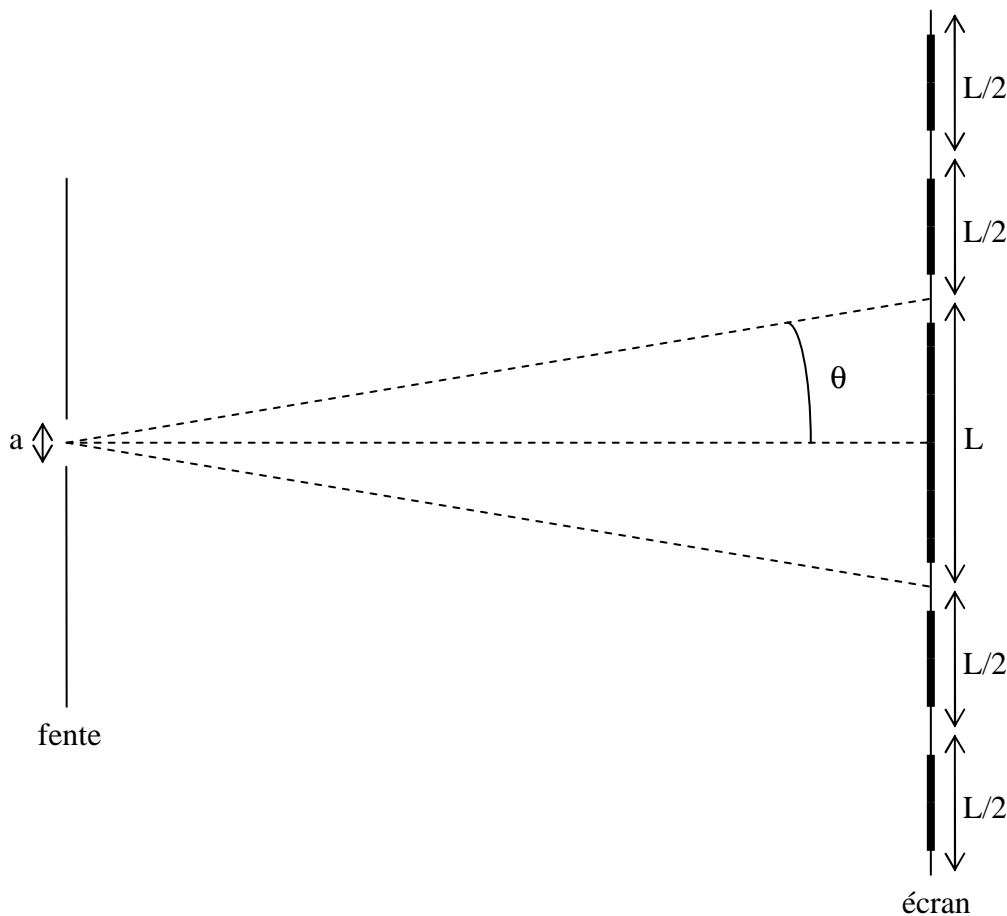
On appelle figure de diffraction l'image obtenue sur un écran placé sur le chemin du faisceau diffracté.

Principe de Babinet

La figure de diffraction obtenue avec un fil est la même que celle obtenue avec une fente de largeur égale au diamètre du fil.

Dans toute cette partie, on ne s'occupe que de la diffraction par une fente, mais il va donc de soi qu'on obtiendrait la même chose avec un fil.

Figure de diffraction obtenue avec un LASER éclairant une fente (cas $\lambda \ll a$) :



La tache centrale est de loin la plus lumineuse et elle est deux fois plus large que les autres. C'est pourquoi on s'intéresse principalement à sa taille, à travers la valeur de l'angle θ , pour caractériser l'importance de la diffraction.

Propriété

Si $\lambda \ll a$, la demi-largeur apparente θ de la tache centrale de la figure de diffraction vue de la fente est donnée par :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Remarques :

- Cette formule n'est en fait valable que lorsque la diffraction n'est pas très marquée !
- Sa formulation exacte est $\tan(\theta) = \frac{\lambda}{a}$, mais comme $\tan(\theta) \approx \theta$ si θ est petit et en radians (ce qui est le cas puisque $\lambda \ll a$), les deux formes sont équivalentes.
- Si on note D la distance entre l'écran et la fente, on a : $\tan(\theta) = \frac{L/2}{D} = \frac{\lambda}{a}$.

Autrement dit, la largeur de la tache centrale vaut : $L = \frac{\lambda D}{2a}$

Pour la lumière blanche, la figure de diffraction présentera une **irisation**, due au fait que les angles θ seront différents pour chacune des radiations monochromatiques.

II. Aspect corpusculaire de la lumière

1) L'effet photoélectrique (1887)

En 1887, Hertz a fait une découverte majeure : les ultraviolets sont capables de créer un courant électrique dans le métal qu'ils éclairent : c'est l'effet photoélectrique. Dans les quinze années qui suivent, ce phénomène sera étudié en détail.

Au début du XX^e siècle, on constate que l'effet photoélectrique présente les propriétés suivantes (on considère que le métal est éclairé par une onde électromagnétique monochromatique de fréquence ν et d'une intensité I) :

- le courant électrique est dû à des électrons arrachés de leurs atomes (1)
- l'arrachage des électrons est extrêmement rapide : moins d'une nanoseconde (2)
- le nombre d'électrons arrachés est proportionnel à I (3)
- l'énergie des électrons arrachés dépend de ν , mais pas de I (4)
- le phénomène a lieu pour toute valeur de I , mais n'a pas lieu si $\nu < \nu_0$. (5)

Pour arracher un électron de son atome, il faut lui donner un minimum d'énergie : E_0 .

Comme, d'après la physique des ondes, une onde électromagnétique transporte de l'énergie, il semble logique qu'elle puisse arracher des électrons.

Puisque le phénomène est très rapide, une onde électromagnétique qui ne serait pas assez intense serait incapable de fournir l'énergie nécessaire dans le temps requis. Ainsi, l'effet photoélectrique n'existerait pas si I n'est pas assez grand. La physique des ondes n'arrive donc pas à expliquer la propriété (5).

2) La quantification de Planck (1900)

En 1900, Planck démontre que l'énergie échangée par un atome avec une onde électromagnétique monochromatique de fréquence ν ne peut s'échanger que par multiples de $h\nu$, où h est la constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s.

Propriété

L'énergie échangée entre un atome et une onde électromagnétique monochromatique de fréquence ν ne peut prendre que des valeurs discrètes : elle est un multiple de la quantité $h\nu$, appelée quantum d'énergie. On dit que les échanges d'énergie entre les ondes électromagnétiques et la matière sont quantifiés.

3) L'explication d'Einstein sur l'effet photoélectrique (1905)

Si on se réfère à la quantification des échanges d'énergie de Planck, la propriété (5) indique que $E_0 = h\nu_0$ est l'énergie minimale qu'il faut fournir pour arracher un électron et qu'un électron ne peut absorber qu'un seul quantum d'énergie, qu'Einstein suppose être une particule : le photon. Le fait qu'un électron n'absorbe qu'un photon est cohérent avec la propriété (2). L'intensité I devient alors proportionnelle au nombre de photons frappant le métal chaque seconde, et les propriétés liées à I deviennent compréhensibles (3 à 5).

Modèle du photon (Einstein, 1905)

Un rayonnement électromagnétique monochromatique est constituée de particules : les photons. Chaque photon transporte un seul quantum d'énergie. On dit que l'énergie transportée par un rayonnement électromagnétique est quantifiée.

Un électron qui absorbe un photon de fréquence ν voit son énergie augmenter de $h\nu$.

Un électron qui émet un photon de fréquence ν voit son énergie diminuer de $h\nu$.

4) Dualité onde-corpuscule

Propriété

La lumière a un comportement double : selon les circonstances, elle se comporte comme une onde (diffraction) ou comme un faisceau de particules (effet photo-électrique). On parle de dualité onde-corpuscule.

Dans l'entre-deux-guerres, des scientifiques comme de Broglie vont émettre l'hypothèse que toutes les particules présentent cette dualité. Il va alors se développer autour de cette idée une toute nouvelle physique : la mécanique quantique, la seule aujourd'hui capable d'expliquer l'intégralité des phénomènes atomiques et subatomiques observés, avec une précision remarquable.

III. Interprétation quantique des spectres électromagnétiques

1) Spectroscopie de l'atome d'hydrogène

En seconde, on a vu que le spectre d'émission d'un atome était constitué de raies, chacune correspondant à une longueur d'onde dans le vide (donc à une fréquence), et que ces raies se retrouvaient dans son spectre d'absorption.

Les fréquences de ces raies sont spécifiques d'un atome : un atome n'est capable d'absorber ou d'émettre que des photons ayant l'une de ces fréquences. Elles constituent donc sa carte d'identité.

Définition du spectre d'un atome

On appelle spectre d'un atome l'ensemble des fréquences présentes dans le rayonnement électromagnétique qu'il est capable d'émettre.

Propriété

Un atome ne peut absorber que ce qu'il est capable d'émettre.

Au début du XX^e siècle, on connaissait bien certains spectres d'atomes, comme celui de l'atome d'hydrogène. Rydberg a trouvé une formule décrivant l'ensemble des longueurs d'onde dans le vide du spectre de l'hydrogène :

$$\frac{1}{\lambda_{n_1, n_2}} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \text{ avec } n_1 \text{ et } n_2 \text{ entiers naturels non nuls tels que } n_1 < n_2.$$

$R_H = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ est la constante de Rydberg.

Autrement dit, le spectre de l'hydrogène est constitué des fréquences suivantes :

$$\nu_{n_1, n_2} = \frac{c}{\lambda_{n_1, n_2}} = R_H c \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

2) Quantification de l'énergie d'un atome

Notons qu'un photon de fréquence ν_{n_1, n_2} transporte le quantum d'énergie suivant :

$$E_{n_1, n_2} = h\nu_{n_1, n_2} = hR_H c \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = \frac{E_0}{n_2^2} - \frac{E_0}{n_1^2}, \text{ avec } E_0 = -hR_H c = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Définition de l'électronvolt

L'énergie d'un photon est souvent exprimée en électronvolt (eV) :

$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Ainsi $E_0 = -13,6 \text{ eV}$

Réécrivons l'énergie du photon de fréquence ν_{n_1, n_2} :

$$E_{n_1, n_2} = h\nu_{n_1, n_2} = E_{n_2} - E_{n_1}, \text{ avec } E_n = \frac{E_0}{n^2}$$

Ainsi l'énergie des photons émis ou absorbés par l'atome d'hydrogène correspond toujours à une différence entre deux énergies toutes deux de la forme $\frac{E_0}{n^2}$, où $n \in \mathbb{N}^*$.

Interprétation de Bohr (1913)

A chaque état de l'atome correspond une valeur d'énergie, appelée niveau d'énergie.

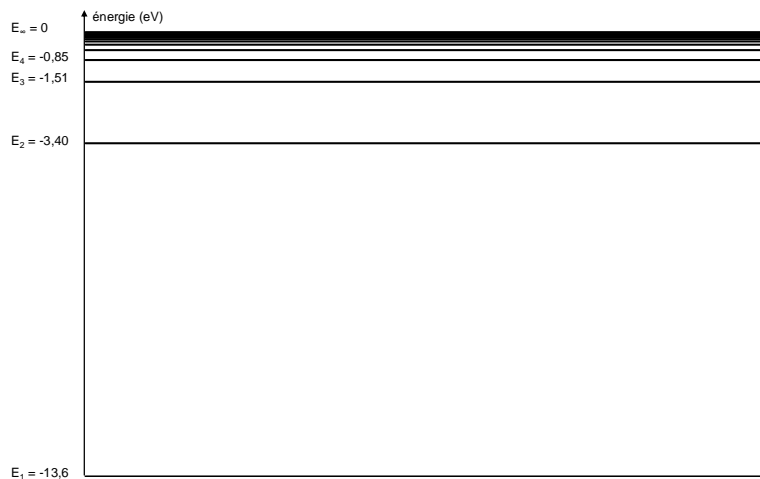
Les niveaux d'énergie d'un atome sont quantifiés et lui sont spécifiques.

L'état stable d'un atome est appelé état fondamental. Il correspond au niveau d'énergie le plus faible. Tous les autres états sont dits excités.

Ainsi, les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène sont l'ensemble des niveaux de la suite

$$\left(E_n = \frac{E_0}{n^2} \right)_{n \in \mathbb{N}^*} \text{ avec } E_0 = -13,6 \text{ eV}$$

On peut donc tracer le diagramme d'énergie de l'atome d'hydrogène :



Remarques :

- Comme d'habitude, les énergies sont données à une constante près, ce qui n'a aucune importance, puisque ce sont les échanges d'énergie que l'on étudie. La constante est fixée pour que la limite E_∞ de la suite (correspondant à l'ion H^+) fasse 0 eV.
- L'état fondamental correspond au niveau d'énergie minimal, donc à l'énergie $E_1 = E_0 = -13,6 \text{ eV}$.
- Les niveaux d'énergie se resserrent de plus en plus au fur et à mesure que l'on s'approche de la limite de la suite.

- Pour ioniser l'atome d'hydrogène, il faut passer de E_1 à E_∞ , donc lui fournir une énergie minimale de 13,6 eV (le surplus étant converti en énergie cinétique et emporté par l'électron).

Propriété

Un état excité est éphémère : un atome excité cherche à revenir à son état fondamental par émission d'un ou plusieurs photons.

3) Transitions atomiques

Propriété

Pour passer d'un niveau d'énergie E_{n_2} à un niveau d'énergie inférieur E_{n_1} , un atome émet un photon d'énergie $E_{n_2} - E_{n_1}$, donc un photon de fréquence :

$$\nu = \frac{E_{n_2} - E_{n_1}}{h}$$

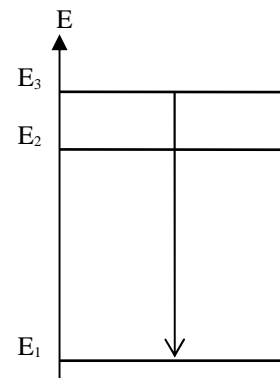
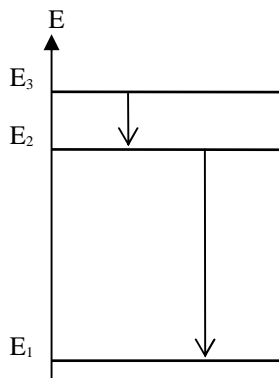
On considère un atome d'hydrogène au niveau d'énergie E_3 . C'est donc un atome excité. Pour se désexciter, c'est-à-dire pour revenir à son état fondamental (niveau d'énergie E_1), il devra perdre une énergie égale à $E_3 - E_1$. Il existe deux possibilités :

- Il passe par le niveau d'énergie intermédiaire E_2 . Dans ce cas, il va émettre successivement deux photons de fréquences respectives ν' et ν'' :

$$\nu' = \frac{E_3 - E_2}{h} \quad \text{et} \quad \nu'' = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

- Il ne passe pas par le niveau d'énergie intermédiaire E_2 . Dans ce cas, il va émettre un seul photon de fréquence ν et :

$$\nu = \frac{E_3 - E_1}{h}$$

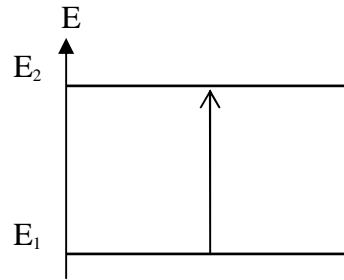


Propriété

Pour passer d'un niveau d'énergie E_{n_1} à un niveau d'énergie supérieur E_{n_2} , un atome doit absorber un photon d'énergie $E_{n_2} - E_{n_1}$, donc un photon de fréquence :

$$\nu = \frac{E_{n_2} - E_{n_1}}{h}$$

On considère un atome d'hydrogène dans son état fondamental (niveau d'énergie E_1). Pour passer au niveau d'énergie E_2 , il doit gagner une énergie égale à $E_2 - E_1$, donc absorber un photon de fréquence ν .



Définition d'une transition

On appelle transition le passage d'un état à un autre.

Propriété

Un spectre atomique correspond aux transitions possibles d'un atome, appelée transitions atomiques.

Les transitions atomiques sont dues aux électrons qui gagnent ou perdent de l'énergie. L'énergie nécessaire à une transition atomique est de l'ordre de l'électronvolt, ce qui met en jeu un photon du domaine ultraviolet, visible ou infrarouge.

4) Transitions moléculaires et nucléaires

Une molécule est un ensemble d'atomes. On s'attend donc au même phénomène : une quantification de l'énergie. Néanmoins, les niveaux d'énergie sont très nombreux par rapport à ceux des atomes, ce qui est dû à la possibilité de mouvements des atomes les uns par rapport aux autres (vibration et rotation).

Les spectres d'absorption moléculaires présentent des bandes d'absorption, qui ne sont en fait que des raies extrêmement rapprochées qu'un spectroscopie ordinaire n'arrive pas à différencier.

Propriété

Les bandes d'absorption que présente le spectre d'absorption d'une molécule ne sont en fait qu'une succession de raies très rapprochées. L'énergie d'une molécule est donc quantifiée.

De la même façon que les atomes, l'énergie d'un noyau est quantifiée. Cependant, les énergies mises en jeu lors des transitions sont considérablement plus grandes.

Propriété

L'énergie d'un noyau est quantifiée. L'énergie nécessaire à une transition nucléaire est de l'ordre du mégaélectronvolt (MeV), ce qui met en jeu un photon du domaine des rayons γ .

5) Limites de la mécanique de Newton

On se propose de comparer le système solaire (planètes tournant autour du Soleil) et l'atome (électrons tournant autour d'un noyau) du point de vue de la mécanique newtonienne.

Dans le système solaire, c'est l'interaction gravitationnelle entre le Soleil et chaque planète qui gouverne le mouvement des planètes, alors que dans l'atome, c'est l'interaction électrique entre le noyau et chaque électron qui gouverne le mouvement des électrons, la gravitation étant négligeable dans ce cas (cf. cours de 1^{ère} S).

Une planète de centre P et de masse m subit une force gravitationnelle due au Soleil, astre de centre O et de masse M. Cette force s'écrit :

$$\vec{F}_g = -\frac{GmM}{OP^3}\vec{OP} = -a\frac{\vec{OP}}{OP^3}$$

avec $a = GmM$, constante positive.

Un électron de centre P et de charge q subit une force électrique due au noyau, de centre O et de charge Q. Cette force s'écrit :

$$\vec{F}_e = \frac{k_0qQ}{OP^3}\vec{OP} = \frac{k_0(-e)(Ze)}{OP^3}\vec{OP} = -\frac{k_0Ze^2}{OP^3}\vec{OP} = -b\frac{\vec{OP}}{OP^3}$$

avec $b = k_0Ze^2$, constante positive.

Ces deux forces sont donc extrêmement semblables :

- même direction
- même sens (attractives)
- une intensité dépendant de la même variable (la distance OP) et ayant la même dépendance (inversement proportionnelles au carré de la distance OP)

La seule chose qui change est la valeur de la constante de proportionnalité.

Cependant, pour chaque planète, la constante prend une valeur différente alors que toutes les planètes ont le même comportement (orbite quasi-circulaire dont le Soleil occupe l'un des foyers). On observe exactement le même comportement pour tous les astres ayant des satellites (Terre, Jupiter...): chaque satellite décrit une ellipse dont l'astre occupe l'un des foyers.

Autrement dit, la valeur de la constante ne change pas la structure du système : les électrons vont aussi décrire une ellipse dont le noyau occupe l'un des foyers.

Dans ce cadre, on peut aussi démontrer que l'énergie de l'ensemble (planètes et Soleil, électrons et noyau) peut prendre n'importe quelle valeur.

Propriété

Selon la mécanique newtonienne, les atomes ont la même structure que les systèmes planétaires : chaque électron se déplace sur une ellipse dont le noyau occupe l'un des foyers. Dans cette situation, l'énergie de l'atome peut prendre n'importe quelle valeur.

La mécanique newtonienne n'explique donc pas la quantification de l'énergie d'un atome. Alors qu'elle parvient à bien expliquer le monde macroscopique*, elle se montre incapable d'expliquer le monde microscopique.

** tant que les vitesses sont très petites devant la célérité de la lumière dans le vide. Sinon, il faut faire appel à la théorie de la relativité.*

La mécanique quantique est venue remplacer la mécanique newtonienne. Dans le domaine macroscopique, elle redonne les résultats de la mécanique newtonienne.