

# Chapitre 12

## Physique quantique

### Table des matières

<b>1 Les niveaux d'énergie</b>	<b>2</b>
1.1 Une énergie quantifiée . . . . .	2
1.2 Énergie de rayonnement émis ou absorbé . . . . .	2
1.3 Application . . . . .	3
1.4 L'atome de Rutherford et de Bohr . . . . .	4
<b>2 Dualité onde-matière</b>	<b>5</b>
<b>3 Le laser</b>	<b>6</b>
3.1 Le principe . . . . .	6
3.2 Émission stimulée . . . . .	6
3.3 Inversion de population . . . . .	6
3.4 Amplification . . . . .	7
3.5 Propriétés du laser . . . . .	8

# 1 Les niveaux d'énergie

## 1.1 Une énergie quantifiée

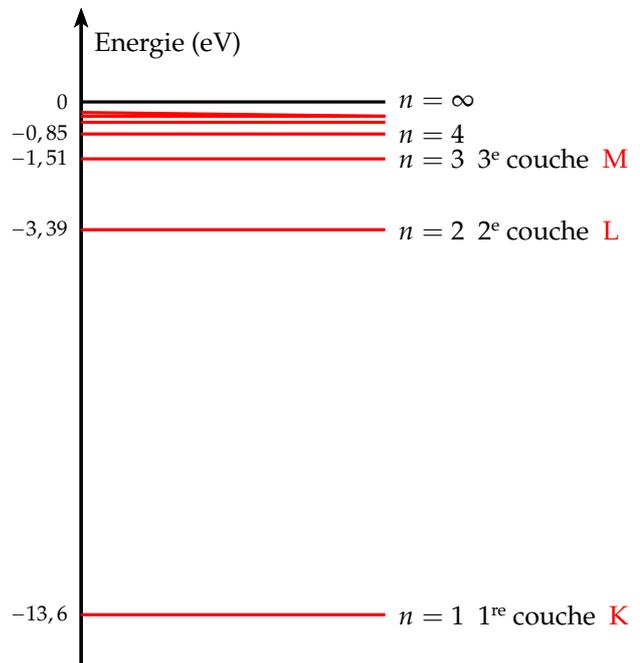
Les électrons d'un atome, n'existent que sur certaines orbites autour du noyau. L'état de la plus basse énergie est l'état fondamental.

Chaque atome possède donc des niveaux d'énergie quantifiés. Chaque niveau a une énergie déterminée qui dépend de son rang  $n$ , et de la nature de l'atome.

$n$  est appelé nombre quantique principal.

Notons que si  $n$  augmente, l'orbite de l'électron augmente comme  $n^2$

Ci-contre les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène.



Pour l'atome d'hydrogène, l'énergie  $E_n$  (en eV) de chaque niveau est donné par :

$$E_n = \frac{-13,6}{n^2} \quad \text{avec} \quad 1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- Pour  $n = 1$ , état fondamental :  $E_1 = -13,6 \text{ eV}$
- Pour  $n = 2$ , 1<sup>er</sup> état existé :  $E_2 = -3,39 \text{ eV}$

## 1.2 Énergie de rayonnement émis ou absorbé

Un électron peut absorber un photon (quanta d'énergie) pour passer de l'état  $i$  à un état supérieur  $j$ . Réciproquement un atome peut émettre un photon pour passer de l'état  $j$  à un état inférieur  $i$ . Cette énergie, absorbée ou émise, peut être reliée à une onde électromagnétique de fréquence  $\nu$ . En appelant  $T$  la période et  $\lambda$  la longueur d'onde, on a :

$$E = h\nu = \frac{h}{T} = \frac{hc}{\lambda}$$

$h$  étant la constante de Planck :  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

**Exemple :** Pour l'atome d'hydrogène, pour passer de l'état fondamental  $n = 1$  au premier état existé  $n = 2$ , l'énergie nécessaire est :

$$E = E_2 - E_1 = -3,39 + 13,6 = 10,21 \text{ eV}$$

Un photon dans le visible, de longueur d'onde comprise entre 400 et 800 nm, a une énergie variant de 3,0 à 1,5 eV. Ce photon ne peut donc pas exciter un atome d'hydrogène dans son état fondamental. L'hydrogène est donc transparent à la lumière. Pour exciter un atome d'hydrogène, il est nécessaire d'avoir un photon dans l'UV.

### 1.3 Application

Les différents niveaux d'énergie  $E_n$  de l'atome d'hydrogène sont donnés par l'expression suivante :

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2}, \quad \text{avec} \quad E_0 = 13.6 \text{ eV}$$

$n$  est le numéro du niveau d'énergie électronique considéré.

- 1) Calculer l'énergie, en électrovolt (eV), qu'il faut fournir à un atome d'hydrogène pour le passer de son état fondamental à l'état excité caractérisé par  $n = 3$
- 2) a) Donner l'expression littérale de la longueur d'onde  $\lambda_{m,p}$  de la radiation émise lors de la transition électronique du niveau  $n = m$  au niveau  $n = p$ , en expliquant pourquoi on a  $m > p$ .  
b) Application numérique :  $m = 3$  et  $p = 2$  ; on donnera le résultat en nanomètre (nm) ; on rappelle que :  
 $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ,  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  et  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ .
- 3) En justifiant la réponse, calculer l'énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène :
  - en électrovolt (eV)
  - en joule (J)



- 1) L'énergie absorbée  $E$  pour passer de  $n = 1$  à  $n = 3$  est donnée par :

$$E = E_3 - E_1 = -\frac{E_0}{3^2} + \frac{E_0}{1^2} = \frac{8E_0}{9} = \frac{8 \times 13,6}{9} = 12,09 \text{ eV}$$

- 2) a) Pour émettre un photon, l'atome d'hydrogène doit passer d'un niveau d'énergie supérieur  $m$  à un niveau inférieur  $p$ . On a donc  $m > p$

L'énergie  $E$  émise est alors :

$$E = -\frac{E_0}{m^2} + \frac{E_0}{p^2} = E_0 \left( \frac{1}{p^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Or l'énergie  $E$  est de la forme  $E = \frac{hc}{\lambda_{m,p}}$ , on a donc :

$$E_0 \left( \frac{1}{p^2} - \frac{1}{m^2} \right) = \frac{hc}{\lambda_{m,p}} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda_{m,p} = \frac{hc}{E_0 \left( \frac{1}{p^2} - \frac{1}{m^2} \right)}$$

$$\text{b) } \lambda_{3,2} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{13,6 \times 1,6 \times 10^{19} \times \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{9} \right)} = 6,58 \times 10^{-7} \text{ m} = 658 \text{ nm}$$

Cela correspond à une couleur rouge.

- c) Pour que l'atome d'hydrogène soit ionisé, il faut qu'il perde son électron. Cela correspond à  $n = \infty$  c'est à dire une énergie nulle. L'énergie d'ionisation  $E_{\text{ionisation}}$  vaut donc :
  - $E_{\text{ionisation}} = E_{\infty} - E_1 = 0 - (-13,6) = 13,6 \text{ eV}$
  - $E_{\text{ionisation}} = 13,6 \times 1,6 \times 10^{-19} = 2,18 \times 10^{-18} \text{ J}$

## 1.4 L'atome de Rutherford et de Bohr

$$\text{Données électron : } \begin{cases} \text{masse } m = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} \\ \text{charge } e = -1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \end{cases}$$

$$k = 8,988 \times 10^9 \text{ S.I.}$$

L'électron n'est pas relativiste

1) Rutherford a décrit l'atome d'hydrogène par un modèle planétaire : l'électron a un mouvement circulaire, de rayon  $r$ , autour du noyau constitué d'un proton. La force électrostatique subie par l'électron est dirigée selon la droite proton-électron, attractive, de valeur  $f = k \frac{e^2}{r^2}$ . La force gravitationnelle est négligeable devant cette force électrostatique.

- Démontrer que le mouvement de l'électron est uniforme.
- Établir l'expression de sa vitesse  $v$  en fonction de  $k$ ,  $e$ ,  $r$  et  $m$ .
- Exprimer son énergie cinétique en fonction des mêmes paramètres.
- Exprimer son énergie mécanique  $E$  en fonction de  $k$ ,  $e$ ,  $r$ , sachant que son énergie potentielle est  $E = -\frac{ke^2}{r}$ .

Quelle est sa limite quand  $r$  tend vers l'infini ?

2) Différents faits expérimentaux, ont conduit Niels Bohr à formuler l'hypothèse suivante : l'électron ne peut se déplacer que sur certains cercles dont les rayons  $r_n$  obéissent à la loi :

$$v_n \times r_n = n \times \frac{K}{m}$$

$K$  constante universelle  $K = 1,054 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

$n \in \mathbb{N}^*$  et  $v_n$  : vitesse de l'électron sur le cercle de rayon  $r_n$ .

Déterminer l'expression de  $r_n$  en fonction des constantes  $k$ ,  $m$ ,  $e$  et  $n$ .

Exprimer  $r_n$  en fonction de  $r_1$ . Calculer  $r_1$ .



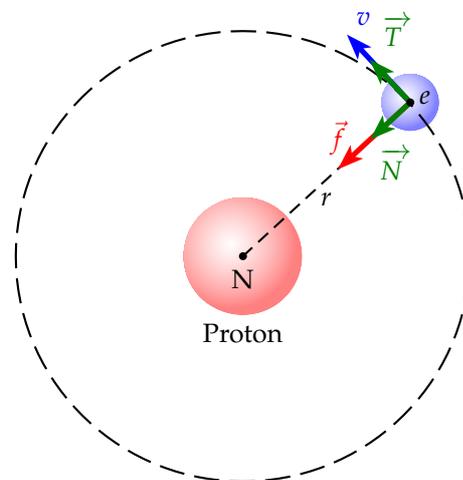
1) a) Pour l'électron :

$$\text{D'après le PFD, on a : } \sum \vec{F} = m\vec{a}$$

Comme la force gravitationnelle est négligeable, la seule force en présence est la force électrostatique  $\vec{f}$  qui est dirigée de l'électron vers le proton (force attractive), l'accélération  $\vec{a}$  est alors normale à la trajectoire, l'accélération tangentielle est donc nulle, donc :

$$\frac{dv}{dt} = 0$$

La vitesse est constante, le mouvement de l'électron est donc un mouvement circulaire uniforme.



- b) D'après le PFD :  $f = ma \Leftrightarrow a = \frac{f}{m}$   
 or l'accélération normale vérifie :  $a = \frac{v^2}{r}$ , en identifiant, on a :

$$\frac{v^2}{r} = \frac{f}{m} \Leftrightarrow v^2 = \frac{fr}{m} = \frac{ke^2}{mr}$$

On en déduit donc :  $v = e\sqrt{\frac{k}{mr}}$

- c) L'énergie cinétique  $E_c$  vaut alors :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \frac{mke^2}{mr} = \frac{ke^2}{2r}$$

- d) L'énergie mécanique  $E_m$  est la somme de l'énergie cinétique  $E_c$  et de l'énergie potentielle  $E$ , soit :

$$E_m = E_c + E = \frac{ke^2}{2r} - \frac{ke^2}{r} = -\frac{ke^2}{2r}$$

Si  $r \rightarrow +\infty$  alors  $-\frac{ke^2}{2r} \rightarrow 0$  donc  $E_m \rightarrow 0$

Lorsque l'électron quitte l'orbite du noyau (ion  $H^+$ ), son énergie mécanique est nulle.

- 2) D'après 1)b), on a :  $v = e\sqrt{\frac{k}{mr}}$  donc  $v_n = e\sqrt{\frac{k}{mr_n}}$

D'après la loi donnée, on a alors :

$$e\sqrt{\frac{k}{mr_n}} \times r_n = n\frac{K}{m} \Leftrightarrow \frac{ke^2}{mr_n} \times r_n^2 = n^2 \times \frac{K^2}{m^2} \Leftrightarrow r_n = \frac{n^2 K^2 m}{e^2 k m^2} = \frac{n^2 K^2}{e^2 k m}$$

On a alors  $r_1 = \frac{K^2}{e^2 k m}$  donc  $r_n = n^2 r_1$

$$r_1 = \frac{(1,054 \times 10^{-34})^2}{(1,602 \times 10^{-19})^2 \times 8,988 \times 10^9 \times 9,109 \times 10^{-31}} = 5,287 \times 10^{-11} \text{ m}$$

## 2 Dualité onde-matière

- Nous avons vu dans le paragraphe précédent, qu'une onde électromagnétique peut être considérée comme une succession de paquets énergétiques ou corpusculaires (quanta d'énergie) de masse nulle et d'énergie  $E$  telle que :  $E = hv$ . Ces corpuscules (de masse nulle) sont alors appelés **photon**.
- Réciproquement, Louis De Broglie, eu l'idée d'associer à tout mouvement d'une particule de masse  $m$  et de vitesse  $v$ , caractérisé par la quantité de mouvement  $p$  une onde de longueur d'onde  $\lambda$ . On a alors :  $p = mv = \frac{h}{\lambda}$

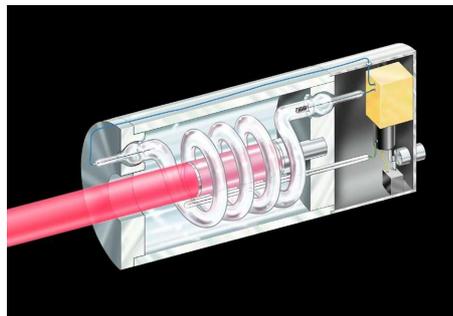
La longueur d'onde  $\lambda$  est donc caractérisée par :  $\lambda = \frac{h}{mv}$

➡ Pour en savoir plus (vidéo)

## 3 Le laser

### 3.1 Le principe

**laser** : *light amplification by stimulated emission of radiation*, en français : amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement.



Ci-contre un laser à rubis

Un laser fonctionne en trois étapes :

- émission des photons stimulés ;
- inversion de population d'atomes (pompage optique) ;
- amplification du rayonnement émis.

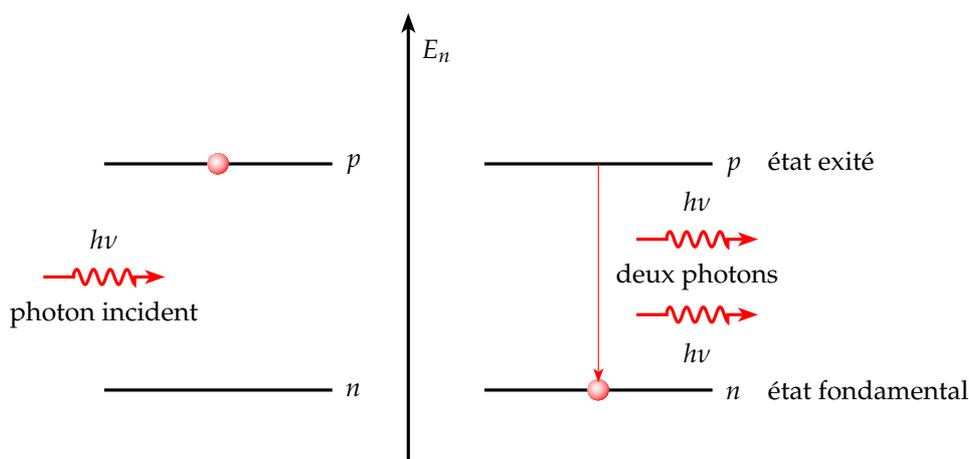
### 3.2 Émission stimulée

#### Émission stimulée

Quand un photon, de fréquence  $\nu$ , ayant exactement la différence d'énergie entre un état excité et un état fondamental, passe à proximité d'un atome excité, il facilite la transition de l'électron vers l'état fondamental. Il y a alors émission d'un nouveau photon de même fréquence  $\nu$  et de même phase (lumière cohérente).

Ce phénomène porte le nom d'**émission stimulée**. Le but est d'obtenir **deux photons identiques** à partir d'un seul photon incident.

L'énergie des photons  $h\nu$  est égale à  $\Delta E$  :  $h\nu = \Delta E_{p-n}$

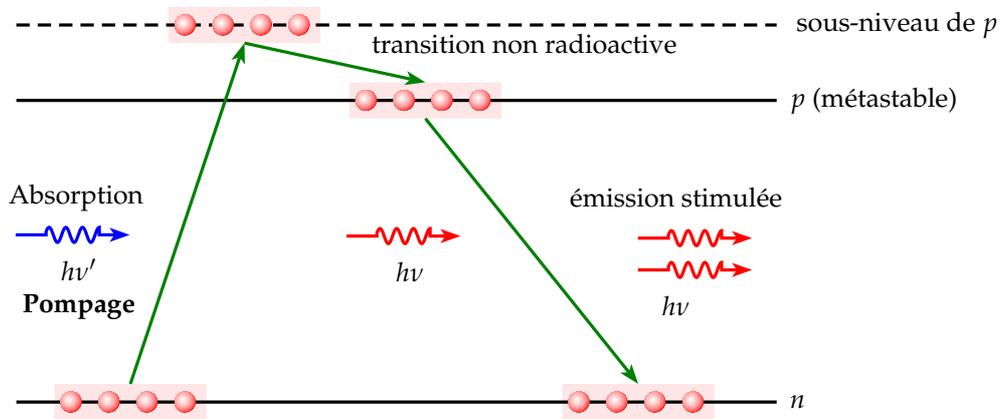


### 3.3 Inversion de population

Pour avoir une émission stimulée, les atomes doivent être dans un état excité. On oblige alors un grand nombre d'atomes à passer de l'état fondamental à un état excité en absorbant des photons d'une certaine fréquence  $\nu'$ .

En réalité, les atomes se trouvent à des sous-états énergétiques dans un premier temps pour passer dans la suite à l'état excité  $p$ .

Lors de l'émission stimulée, un grand nombre d'atomes parmi cette population va passer à l'état fondamental  $n$  en émettant un rayonnement de fréquence  $\nu$

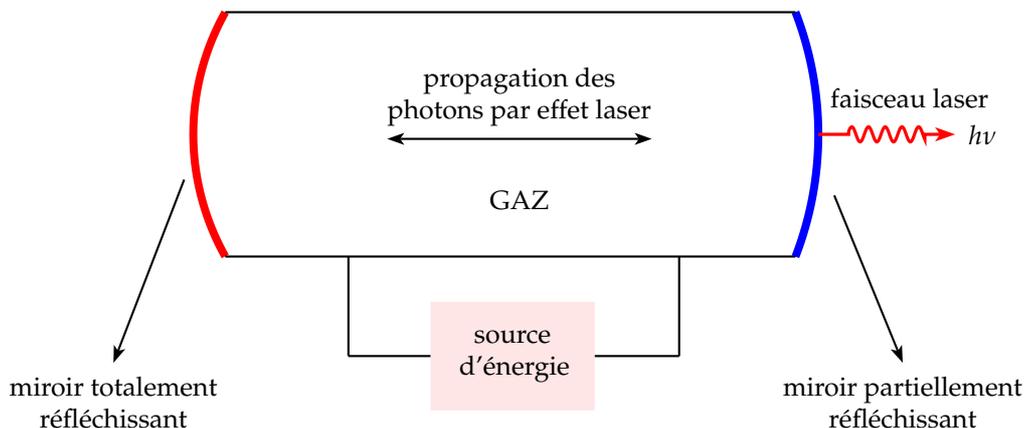


**Remarque :** Tous les atomes ne possèdent pas d'état métastable qui évite les émissions spontanées. C'est par exemple le cas avec le laser à rubis.

### 3.4 Amplification

Les atomes des gaz enfermés dans une enceinte sont déexcités à l'aide des photons de fréquence  $\nu$ . Ces photons sont soumis à des réflexions successives par un dispositif à deux miroirs dont l'un est entièrement réfléchissant et l'autre partiellement réfléchissant. La distance entre les deux miroirs est un multiple de la longueur d'onde des photons. Le miroir partiellement réfléchissant laisse sortir le rayonnement laser.

**Remarque :** On peut comparer ce processus à l'effet *Larsen*, qui se produit lorsqu'un amplificateur (une chaîne HiFi) voit sa sortie (le haut-parleur) « branchée » sur l'entrée (le micro). Le moindre bruit capté par le micro est amplifié, émis par le haut-parleur, capté par le micro, ré-amplifié jusqu'à la saturation du système (quand celui-ci fournit l'énergie maximale possible de par sa conception). Dans un laser, cette énergie maximale est limitée par la puissance de la source de pompage, et par le nombre d'atomes qui peuvent être simultanément excités.



### 3.5 Propriétés du laser

- 1) Un faisceau laser est un rayonnement **monochromatique**. En effet un laser possède une fréquence très précise.
- 2) Un faisceau laser est un rayonnement **unidirectionnelle**. En effet le faisceau émis est très peu divergent (quelques milliradians)
- 3) Un faisceau laser est un **rayonnement cohérent**. Tous les photons sont en phase.
- 4) Un faisceau laser possède une **grande puissance lumineuse** car très concentré. En effet un faisceau de petit laser hélium néon d'une puissance de quelques milliwatts a une luminance, dans le rouge, mille fois supérieure à celle du Soleil.

Le laser a de multiples utilisations : dans l'industrie mais aussi pour la lecture de CD, la chirurgie ophtamologique, l'épilation ...