

CHAPITRE 19 : TRANSFERTS QUANTIQUES D'ÉNERGIE ET DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE

Pierre-André LABOLLE

Lycée International des Pontonniers

Mai 2020

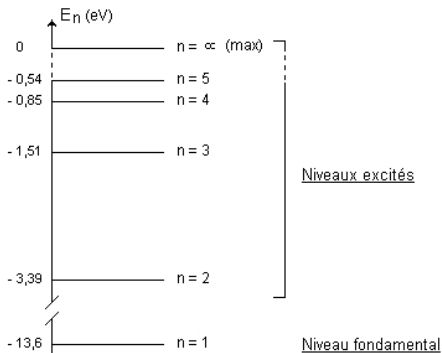
I. Transferts quantiques d'énergie

1. Rappels de 1^{re}S

- Contrairement à ce que prévoit la mécanique de Newton, l'énergie d'un atome ne varie pas de manière continue.
- L'énergie des atomes est quantifiée, c'est-à-dire qu'elle ne peut prendre que certaines valeurs bien précises (on parle de valeurs discrètes) formant une suite discontinue.
- Le niveau de plus basse énergie est appelé état fondamental alors que le niveau d'énergie le plus élevé (conventionnellement affecté d'une énergie nulle) correspond à l'état ionisé de l'atome.
- Les autres niveaux d'énergie sont appelés niveaux excités.
- Par exemple, l'énergie d'un atome d'hydrogène est donnée par la relation : $E_n = -\frac{E_0}{n^2}$ où $E_0 = 13,6 \text{ eV}$ et $n \in \mathbb{N}^*$.

I. Transferts quantiques d'énergie

1. Rappels de 1^{re}S



I. Transferts quantiques d'énergie

1. Rappels de 1^{re}S

- La lumière est constituée de photons qui sont des particules de masse nulle (ou grains de lumière) et qui portent une énergie

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

où

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

ν : fréquence de l'onde électromagnétique associée au photon en Hz

c : célérité de la lumière dans le vide $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

λ : longueur d'onde dans le vide de l'onde électromagnétique associée au photon en m

I. Transferts quantiques d'énergie

2. Absorption quantique

- Pour se trouver dans un état excité d'énergie E_m , une particule (atome, ion ou molécule) dans un état plus stable d'énergie E_n doit absorber une quantité d'énergie exactement égale à $\Delta E = E_m - E_n$.
- Une particule placée dans un état d'énergie donnée doit absorber une quantité d'énergie spécifique pour passer dans un état excité. **L'absorption d'énergie par la matière est quantifiée.**
- Pour passer dans un état excité et ainsi gagner ce quantum d'énergie plusieurs possibilités existent : absorption d'un photon d'énergie égale à ΔE , collision avec des électrons provenant de décharges électriques et ayant une énergie supérieur ou égale à ΔE , collision avec d'autres particules.

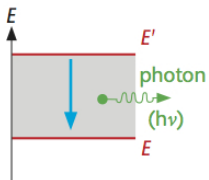
I. Transferts quantiques d'énergie

3. Émission spontanée

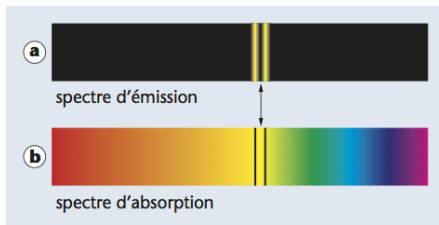
- Une particule dans un état excité peut retrouver sa stabilité en émettant spontanément un photon dont l'énergie est elle aussi quantifiée et égale à $\Delta E = E_m - E_n = h \cdot \nu$
- Ce phénomène de relaxation de la particule est appelé émission spontanée. Le photon est émis dans une direction aléatoire.
- Les niveaux d'énergie étant caractéristiques d'un atome, les raies d'émission et d'absorption d'un atome lui sont propres et constituent sa signature. Les deux spectres d'émission et d'absorption sont complémentaires, un atome ne pouvant absorber que les radiations qu'il est capable d'émettre.

I. Transferts quantiques d'énergie

3. Émission spontanée



Émission spontanée



Doc. Spectres du sodium

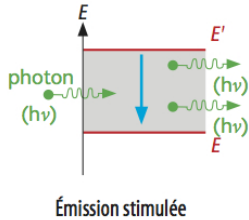
I. Transferts quantiques d'énergie

4. Émission stimulée

- En 1917, Albert EINSTEIN évoque l'idée qu'un photon d'énergie choisie peut amener une particule vers un état d'énergie plus stable. Dans ce cas, la particule va produire un photon "jumeau" du photon incident.
- En effet, si une particule peut rester suffisamment longtemps dans un état excité d'énergie E' , la désexcitation de la particule vers un état d'énergie E peut être déclenchée par un photon dont l'énergie $h \cdot \nu$ correspond à la transition d'énergie $E' - E = h \cdot \nu$.
- Cette désexcitation de la particule s'accompagne de la production d'un photon identique au photon incident : **on obtient ainsi deux photons de même fréquence ν et de même direction.** Cette émission est appelée émission stimulée.

I. Transferts quantiques d'énergie

4. Émission stimulée



II. Le LASER

1. Principe de fonctionnement

a. Pompage optique

- Le principe du LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) repose sur l'émission stimulée.
- Comme on souhaite produire un grand nombre de photons par émission stimulée, il faut disposer d'un milieu, dit **milieu actif**, dans lequel les particules vont être placées dans un état excité d'énergie E_2 grâce à des décharges électriques ou un faisceau lumineux (pompage optique) qui vont exciter les particules du milieu actif.
- Un photon d'énergie $E = h \cdot \nu = E_2 - E_1$ traversant ce milieu va provoquer la désexcitation simultanée, par émission stimulée, de toutes les particules excitées du milieu actif. Il en résulte la production d'un grand nombre de photons, de même fréquence, de même direction et émis en phase.

II. Le LASER

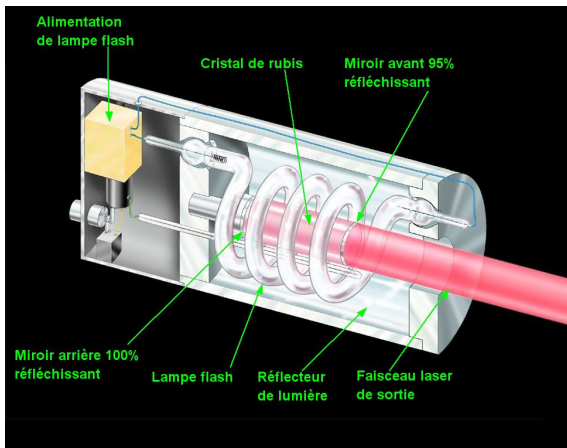
1. Principe de fonctionnement

b. Cavité résonante

- Pour amplifier encore davantage l'onde produite, on lui fait parcourir un grand nombre d'aller-retours à travers le milieu actif, au sein d'un cylindre appelé cavité résonante.
- Afin que les interférences soient constructives dans cette cavité, sa longueur L doit vérifier la relation $2L = k\lambda$.
- Les particules du milieu actif passent du niveau d'énergie E_2 à celui d'énergie E_1 lors de l'émission stimulée, puis du niveau E_1 au niveau E_2 lors du pompage optique et ainsi de suite. Le LASER constitue donc à cet égard un oscillateur.

II. Le LASER

1. Principe de fonctionnement



II. Le LASER

2. Propriétés du LASER

a. Directivité du faisceau

- Le faisceau d'un LASER est très directif : il est quasiment cylindrique et peut se propager sur de très grandes distances (Terre-Lune par exemple).
- Cette directivité est toutefois limitée par la diffraction (très faible) à la sortie du système optique.

II. Le LASER

2. Propriétés du LASER

b. Monochromaticité

- Seules les radiations de longueur d'onde $\lambda = \frac{2L}{k}$ sont amplifiées et sélectionnées par la cavité résonante.
- La lumière est donc monochromatique avec une excellente approximation.

II. Le LASER

2. Propriétés du LASER

c. Cohérence

- La lumière laser étant produite par émission stimulée, les atomes se comportent comme des sources cohérentes de lumière, ce qui confère à la lumière laser une grande cohérence.
- Cela explique pourquoi il est aisé d'étudier, par exemple, les interférences en lumière laser.

II. Le LASER

2. Propriétés du LASER

d. Concentration de l'énergie du faisceau

- L'énergie du laser est concentrée dans un pinceau de lumière très étroit, ce qui permet de concentrer l'énergie en une zone quasi ponctuelle.
- Applications en médecine : chirurgie de l'œil au laser excimer, dermoabrasion de tissus, ...
- On distingue deux types de LASER : les lasers à excitation continue (DEC : décharge électrique continue) et les lasers impulsionnels (DEI : décharge électrique impulsionnelle) qui concentrent davantage l'énergie dans le temps.

II. Le LASER

2. Propriétés du LASER

| Gaz | Excitation | Longueur d'onde (nm) | Puissance (W) | |
|---------------|------------|----------------------|----------------|-------------|
| H_2 | DEI | 116,1 | 5 000 (crête) | ULTRAVIOLET |
| | | 160,0 | 10^6 (crête) | |
| N_2 | DEI | 337,1 | 10^6 (crête) | |
| He-Cd | DEC | 325,0 | 0,05 | VISIBLE |
| | | 441,6 | 0,03 | |
| Ar (Ar^+) | DEC | 488,0 | 10 | |
| | | 514,5 | 10 | |
| He-Ne | DEC | 632,8 | 0,01 | |
| | | 3 390 | 0,02 | |
| H_2O | DEC | 28 000 | 0,01 | INFRAROUGE |
| HCN | DEC | 336 000 | 0,1 | |

III. Transitions d'énergie et domaines spectraux

- À l'échelle des noyaux atomiques, les énergies mises en jeu au cours des transitions énergétiques sont de l'ordre du MeV.
- À l'échelle des atomes, les énergies mises en jeu au cours des transitions énergétiques sont de l'ordre de l'eV (keV pour les couches électroniques internes).
- À l'échelle des molécules, les énergies mises en jeu au cours des transitions énergétiques sont de l'ordre de 10^{-1} eV pour les énergies vibrationnelles et de l'ordre de 10^{-3} eV pour les énergies rotationnelles.

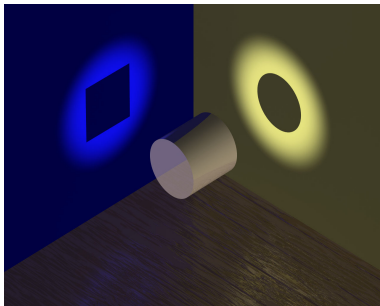
IV. Dualité onde-corpuscule (ou onde-particule)

1. Cas de la lumière

- Nous avons déjà vu que la lumière peut être considérée comme une onde dans la mesure où elle peut subir la diffraction, propriété caractéristique des ondes.
- Des expériences comme celles relatives à l'effet Compton (choc élastique entre un photon et un électron) où à l'effet photoélectrique (expliqué par Albert EINSTEIN en 1905) ont montré que la lumière était constituée de particules, les photons.
- La lumière possède donc à la fois un caractère ondulatoire et un caractère corpusculaire. On parle de **dualité onde-particule**.

IV. Dualité onde-corpuscule (ou onde-particule)

1. Cas de la lumière



Métaphore du cylindre

IV. Dualité onde-corpuscule (ou onde-particule)

2. Ondes de matière

- La physique moderne (et notamment Louis DE BROGLIE en 1924) a montré que toutes les particules microscopiques (électrons, protons, neutrons, etc) présentent cette dualité onde-corpuscule.
- À chaque particule de masse m en mouvement à la vitesse v est associée une longueur d'onde λ , dite longueur d'onde de DE BROGLIE,

selon la relation de DE BROGLIE : $p = m \cdot v = \frac{h}{\lambda}$ où

p : quantité de mouvement en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

m : masse de la particule en kg

v : vitesse de la particule en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

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

λ : longueur d'onde de DE BROGLIE en m

IV. Dualité onde-corpuscule (ou onde-particule)

3. Phénomènes quantiques et aspect probabiliste

- Les phénomènes quantiques sont les phénomènes où interviennent des objets microscopiques de la matière et qui ne peuvent être expliqués par les lois classiques de la physique (comme la dualité onde-particule par exemple).
- Dès 1927, DAVISSON et GERMER réalisent une expérience d'interférences avec des électrons.
- La microscopie à effet tunnel utilise cet effet quantique pour visualiser de très petites entités (atomes par exemple).

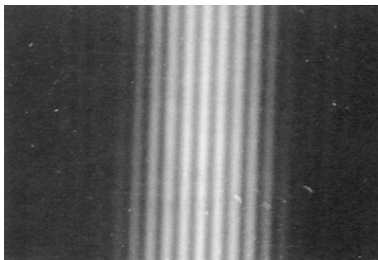
IV. Dualité onde-corpuscule (ou onde-particule)

3. Phénomènes quantiques et aspect probabiliste

- Des expériences d'interférences avec un unique photon ont aussi été réalisées et des expériences sont en cours pour faire de même avec un unique électron.
- Ces expériences montrent que le déterminisme newtonien ne s'applique plus mais qu'il faut considérer la probabilité de présence d'une particule en un endroit donné à une date donnée plutôt que la position de cette particule.
- Le principe d'incertitude d'HEISENBERG indique en outre qu'il est impossible de connaître précisément à la fois la position et l'énergie d'une particule.

IV. Dualité onde-corpuscule (ou onde-particule)

3. Phénomènes quantiques et aspect probabiliste



Diffraction d'un faisceau d'électrons

IV. Dualité onde-corpuscule (ou onde-particule)

3. Phénomènes quantiques et aspect probabiliste

<http://youtu.be/ZJ-0PBRuthc>
Diffraction d'un seul électron

EXERCICES

TRANSFERTS QUANTIQUES : PP416-425 n°17, 18, 33 et 34

DUALITÉ : P436-447 n°36, 38 et 40