Ch.15 TRANSFERTS QUANTIQUES D'ENERGIE ET DUALITE ONDE-PARTICULE

Notions et contenus	Compétences exigibles
Dualité onde-particule Photon et onde lumineuse.	Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et particulaire.
Particule matérielle et onde de matière ; relation de de Broglie.	Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et sur la dualité onde-particule. Connaître et utiliser la relation **p = h / λ** Identifier des situations physiques où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.
Interférences photon par photon, particule de matière par particule de matière.	Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste.
Transferts quantiques d'énergie Émission et absorption quantiques. Émission stimulée et amplification d'une onde lumineuse. Oscillateur optique : principe du laser.	Connaître le principe de l'émission stimulée et les principales propriétés du laser (directivité, monochromaticité, concentration spatiale et temporelle de l'énergie). Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un laser comme outil d'investigation ou pour transmettre de l'information.
Transitions d'énergie : électroniques, vibratoires.	Associer un domaine spectral à la nature de la transition mise en jeu.

I. TRANSITIONS ENERGETIQUES DANS LES ATOMES :

1) Emission et absorption spontanées

Introduction : Dans les atomes, les électrons sont répartis dans des niveaux d'énergie bien déterminés. On dit que l'énergie dans un atome est quantifiée. Ces états sont numérotés par ordre croissant d'énergie avec un nombre entier, pouvant prendre les valeurs 1,2,3 , ...
L'état n = 1 est l'état de plus basse énergie, cet état correspondant à un électron sur l'orbitale la plus proche du noyau. C'est l'état le plus stable de l'atome état fondamental. Les autres états d'énergie sont dits « états excités ».

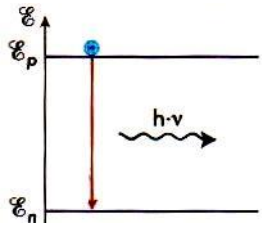
• **Un atome peut émettre ou absorber de l'énergie**.

En 1900, Max Planck (prix Nobel 1918) émet l'hypothèse que les ondes électromagnétiques transportent de l'énergie par paquets, appelé quanta d'énergie. Les échanges d'énergie se font par quantités finies d'énergie. En 1905, Albert Einstein (prix Nobel 1921) assimile ces quanta à des particules de masse et de charge nulle appelées photons qui se propagent à la vitesse de la lumière**. L'onde électromagnétique émise ou absorbée peut être considérée comme un faisceau de photons, chaque photon transporte un quantum d'énergie E = h.ν = h.$\frac{c}{\lambda}$**, avec ν : fréquence de l'onde associée au photon (en Hz) et h : la constante de Planck qui vaut environ h = 6,63 x 10^{-34}J .s
c :célérité de la lumière dans le vide c = 3,00x10^{8} m.s^{-1}, λ : longueur d'onde de la lumière (m)

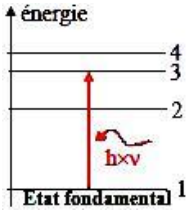
Les échanges d'énergie avec la matière sont quantifiés et se font sous forme d'émission ou d'absorption de photons.

• **Lorsqu'un atome est dans un état excité** $E_2 > E_1$, il **peut redescendre à un état d'énergie plus stable** E_1 en émettant un photon d'énergie $\Delta E = E_2 - E_1 = h.\nu$. C'est le processus **d'émission spontané d'énergie.**

• En revanche, **si un atome est éclairé par un rayonnement électromagnétique, il peut absorber un photon d'énergie** $\Delta E = Ep - En$, le faisant **passer d'un état d'énergie inférieur En à un état d'énergie supérieur moins stable Ep.** C'est le processus **d'absorption spontané d'énergie.**



Transition énergétique d'un atome (représenté symboliquement par une sphère) avec **émission spontanée** d'un photon d'énergie ΔE = Ep-En = h.ν



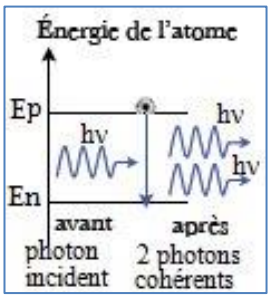
Exemple de transition énergétique d'un atome avec **absorption spontanée** d'un photon d'énergie ΔE = E_3-E_1 = h.ν

Dans les 2 cas, il n'est pas possible de déterminer la date et la direction dans lequel le photon sera émis ou absorbé, l'émission ou l'absorption a lieu de manière aléatoire. On parle d'émission et d'absorption spontanées.

2) Émission stimulée

En 1917, Albert EINSTEIN propose un autre mode d'émission : **l'émission stimulée.**

Émission stimulée : Lorsqu'un atome se trouve dans un état quantique excité, un photon incident d'énergie bien choisie E = h.ν = Ep – En peut forcer l'atome, à passer dans un niveau d'énergie inférieur. Cette désexcitation de l'atome s'accompagne de l'émission d'un second photon de même énergie que le photon incident. L'onde incidente a donc été amplifiée.
Contrairement à l'émission spontanée qui émet des photons dans des directions aléatoires, les 2 photons obtenus : photon incident et photon sont en phase : ils ont même direction, même sens de propagation, même fréquence (donc même énergie), pas de décalage. La lumière produite par une émission stimulée est cohérente.



Transition énergétique d'un atome (représenté symboliquement par une sphère) avec émission stimulée.
Le photon incident possède une énergie E = Ep-En = h.ν. Les 2 photons obtenus sont cohérents.

II. PRINCIPE DU LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Le mot laser est l'acronyme de Light **Amplification** by **Stimulated Emission** of Radiation : « **amplification** lumineuse par **émission** stimulée de rayonnement ».

1) Propriétés du laser

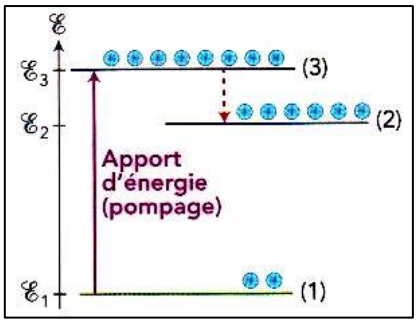
- **Monochromaticité** : l'analyse spectale d'un laser montre un spectre comportant une seule raie correspondant à une seule longueur d'onde. **:** tous les photons émis par le laser ont la même fréquence. Laser He-Ne du lycée : λ = 633 nm.
- Un laser produit un faisceau lumineux **cohérent :** Tous les photons émis sont en phase.
- **La lumière laser est directive :** elle se propage dans une direction privilégiée (celle de la propagation). Le faisceau laser est très peu diffracté.
- **Puissance surfacique, intensité lumineuse ou éclairement** : le laser peut transporter une intensité lumineuse très importante. Celui utilisé en TP a une intensité lumineuse 4 fois plus importante que celle des rayons provenant du Soleil.

Laser à gaz hélium-néon de Lycée.

Avec des **puissances allant du milliwatt au térawatt**, le champ d'application des lasers est très vaste : relevé topographique, soudure, gravure, visée. On les utilise pour la lecture des codes-barres ou des disques optiques (CD, DVD et Blu-ray Disc), le transport des informations par fibre optiques, la détermination de distances, le nettoyage de surfaces, la microchirurgie, etc. Chaque laser se caractérise par une longueur d'onde. Ainsi, le laser de nettoyage des sculptures émet dans le domaine du proche infrarouge au-delà du spectre des ondes visibles, exactement à la longueur d'onde de 1064 nm. D'autres lasers destinés à d'autres applications émettent dans le domaine des U.V. ou des rayonnements visibles.

2) Emission stimulée et amplification d'une onde lumineuse

Le laser émet des photons produits par émission stimulée, ce qui a pour effet d'amplifier l'onde lumineuse incidente. Pour que cette émission stimulée ait lieu, il faut avoir un maximum d'entités dans l'état excité (alors qu'elles sont plutôt naturellement dans l'état fondamental), on réalise **ainsi une inversion de population** par apport d'énergie grâce à **des flashs de lumière, appelé pompage optique.**



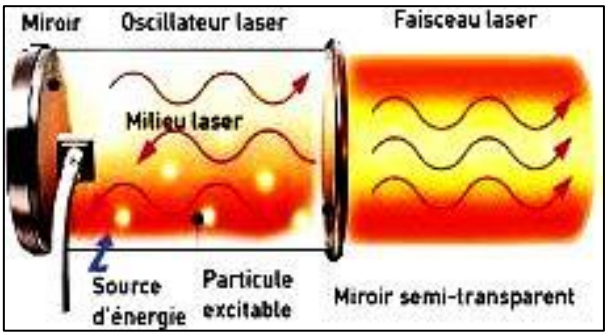
L'apport d'énergie permet aux atomes de passer du niveau fondamental (1) à un niveau excité **(3).** Les atomes ne restent pas sur ce niveau, mais redescendent spontanément et très rapidement au niveau **(2)** où ils s'accumulent.
La transition du niveau (2) au niveau (1) pourra alors se produire lors d'une émission spontanée ou stimulée.

L'émission stimulée est favorisée par l'inversion de population qui consiste à maintenir plus d'atomes dans un état excité que dans l'état fondamental. Cette situation est obtenue grâce à un apport d'énergie.

Répartition des atomes dans les niveaux d'énergie avec inversion de population.

3) Un oscillateur optique : le laser

Un laser est un **amplificateur de lumière fonctionnant grâce à l'émission stimulée.** Un ensemble d'atomes, placé dans une cavité entre deux miroirs (dont un semi-transparent) disposés face à face imposent des allers-retours aux photons. Cela permet d'augmenter le nombre d'interactions photon-atome et donc le nombre de photons produits par émission stimulée. **Une source d'énergie crée et entretient l'inversion de population dans le milieu laser.**
On obtient un nombre important d'émissions stimulées de photons de même direction, de même sens et de même fréquence, c'est l'amplification par laser.



2 miroirs parallèles permettent les allers-retours de photons. Cela amplifie le faisceau laser. Un des miroirs est semi-transparent, pour permettre la transmission du rayonnement laser. Ainsi une partie du rayonnement peut sortir de l'oscillateur. On obtient ainsi un faisceau laser qui, selon les modèles, est émis en continu ou par impulsions.

Dans l'oscillateur laser, limité par deux miroirs, les émissions stimulées successives font augmenter le nombre de photons qui ont même fréquence, mêmes direction et sens de propagation et qui sont en phase. C'est l'amplification par effet laser.

Consignes de sécurité relative à l'utilisation de sources laser en TP : Ne jamais regarder le faisceau laser directement, ni par réflexion sur une surface métallique (faisceau non dirigé vers les yeux d'une personne).

III. TRANSITIONS D'ENERGIE ET DOMAINE SPECTRAL

1) Transitions d'énergie électroniques :

Lorsque qu'un atome gagne ou cède de l'énergie, un de ses électrons passe d'un niveau d'énergie à un autre : c'est une transition électronique d'énergie.

Les transitions d'énergie électronique dans les atomes mettent en jeu des photons se situant dans le domaine du visible ou de l'UV (spectroscopie UV-visible).

2) Transitions d'énergie dans les molécules :

L'énergie propre d'une molécule peut en 1ère approximation être décomposée en 3 termes :

$$\mathbf{E = E_{el} + E_V + E_{rot}} \quad \text{avec}$$

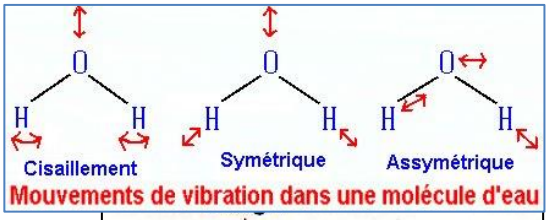
- E_{el} : énergie électronique due à la répartition des électrons dans la molécule
- E_v : **énergie vibrationnelle, associée aux mouvements des atomes** autour de leur position d'équilibre sans mouvement d'ensemble.

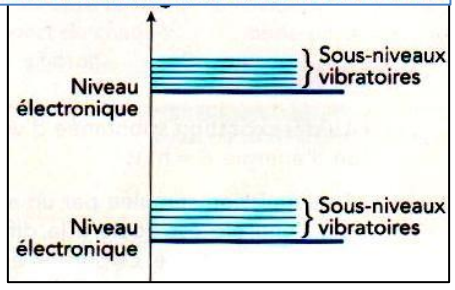
À chaque niveau d'énergie électronique correspondent des sous-niveaux d'énergie vibratoire.

- E_{tot} : énergie rotationnelle, associée aux mouvements de rotation de la molécule autour d'un axe passant par le centre d'inertie.

Les transitions d'énergie vibratoire dans les molécules mettent en jeu des photons moins énergétiques que les transitions d'énergie électronique dans les atomes, l'émission ou l'absorption se situe dans le domaine infrarouge.

- E_{tot} : énergie rotationnelle, associée aux mouvements de rotation de la molécule autour d'un axe passant par le centre d'inertie.





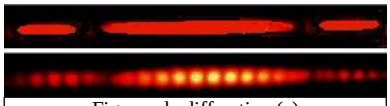
Deux niveaux d'énergie électroniques d'une molécule et leurs sous-niveaux vibratoires.

1 eV = 1,6.10 $^{-19}$ J

Énergie du photon absorbé	Domaine spectral	Nature de la transition mise en jeu	Analyse spectrale correspondante
1,5 eV - 10 eV	Visible, UV	Transition entre niveaux d'énergie électronique (atomes)	Spectroscopie UV-visible
0,003 eV - 1,5 eV	Infrarouge	Transition entre niveaux d'énergie vibratoire (molécules)	Spectroscopie IR

IV. ONDES OU PARTICULES ?

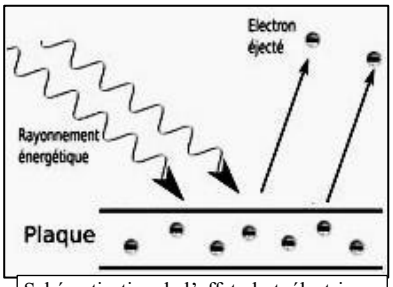
1) Aspect ondulatoire et particulaire de la lumière :



Figures de diffraction (a) et d'interférences (b) de la lumière.

• La lumière se comporte dans certains cas **comme une onde électromagnétique** (voir ch.3).
- La lumière est en général la superposition d'ondes électromagnétiques de différentes longueurs d'ondes.
- Une lumière monochromatique est une onde sinusoïdale de fréquence bien déterminée (caractérisée par la période T en s, la fréquence f = 1/T (notée aussi ν en Hz), la vitesse de propagation c en $m.s^{-1}$, la longueur d'onde $\lambda = c.T = c/\nu$ en m.
Les phénomènes de diffraction et d'interférences de la lumière s'expliquent par ses propriétés ondulatoires.

• Pourtant, en 1905, Albert EINSTEIN (1879-1955) postule que l'énergie de **la lumière est composée de corpuscules : les photons qui sont des grains d'énergie.** Il explique ainsi théoriquement l'effet photoélectrique mis en évidence en 1887 par l'expérience de l'Allemand Heinrich HERTZ (1857-1894) (ionisation d'un atome : éjection d'un électron de l'atome lors du passage d'un photon).
- Un photon est une particule de masse nulle, non chargée,
- Le photon se déplace à la vitesse de la lumière
- Le photon transporte un quantum d'énergie : E = hν. avec h : constante de Planck (h = 6,63 x 10^{-34}J .s), ν : fréquence de l'onde en Hz, λ : longueur d'onde en m et E : énergie en J.



Schématisation de l'effet photoélectrique

On parle de dualité onde-corpuscule :

La lumière (et les ondes électromagnétiques en général) est souvent décrite comme un flux de photons (particule sans charge ni masse) se déplaçant à la vitesse de la lumière. L'énergie E représente l'aspect particulaire du photon et sa fréquence ν, son caractère ondulatoire.

L'énergie transportée par un photon est : $E = h.\nu = h.\frac{c}{\lambda}$ avec h : constante de Planck (h = 6,63 x 10^{-34}J .s).

Quantum d'énergie (aspect corpusculaire) — **λ : longueur d'onde (aspect ondulatoire)**

L'énergie d'un photon est d'autant plus grande que la fréquence de l'onde électromagnétique est grande ou que sa longueur d'onde est petite.

Ex : Calculer l'énergie des rayonnements rouge et bleu, se déplaçant dans le vide, de longueur d'onde respectives λ(rouge) = 720 nm ; λ(bleu) = 450 nm. La célérité de la lumière dans le vide est c = 3,00x10^{8} $m.s^{-1}$. Réponse : E(rouge) = 2,76.10^{-19} J ; E(bleu) = 4,42.10^{-19} J.

2) La matière – Relation de De Broglie :

• A la fin du XIX^{e} siècle, le mouvement des corps était géré par la mécanique newtonnienne et les phénomène de rayonnement par la théorie de l'électromagnétisme. En 1900 , l'étude du rayonnement d'un corps a amené **Planck à émettre l'hypothèse de la quantification de l'énergie des atomes** et **Einstein a complété cette théorie par l'existence de photon** d'énergie hν : le rayonnement apparait comme constitué de corpuscules.

•En 1924, le physicien **français Louis DE BROGLIE généralise la dualité onde-particule** admise pour la lumière, **à tous les objets microscopiques** (électrons, neutrons, protons ...). **De Broglie introduit la notion d'onde de matière.**

Rappel : À toute particule matérielle, c'est-à-dire ayant une masse m, animée d'une vitesse de valeur v très inférieure à la célérité c de la lumière, on associe une grandeur appelée quantité de mouvement**,** dont la valeur notée p, est définie par : **$p = m.v$ avec** p en kg .m. s^{-1}, m en kg et v en $m.s^{-1}$.

Relation de De Broglie : à chaque particule en mouvement, on associe une onde de matière de longueur d'onde λ liée à la quantité de mouvement p de la particule par la relation : $p = \frac{h}{\lambda}$. Dans cette relation, p = m.v s'exprime en kg .m. s^{-1} , h en J.s et λ en m.

La relation de Louis DE BROGLIE $p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v}$ montre que la longueur d'onde λ est d'autant plus grande que la masse m et la vitesse v de la particule considérée sont faibles. Dans le domaine macroscopique, les propriétés ondulatoires sont donc plus difficiles à mettre en évidence.

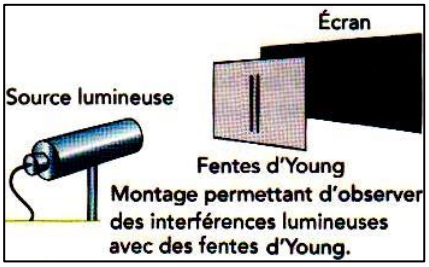
Le comportement ondulatoire des objets microscopiques est significatif lorsque la dimension 'a' **de l'obstacle ou de l'ouverture est du** même ordre de grandeur **que leur** longueur d'onde de matière λ.

C'est le cas pour les particules microscopiques comme l'électron, le proton et le neutron.

Ex : Déterminer la longueur d'onde de l'onde de matière associée à un électron de masse m = 9,11x10^{-31} kg et de vitesse v = 400 $m.s^{-1}$. Quelle est la taille de l'ouverture permettant d'observer la diffraction d'un faisceau d'électrons possédant ces caractéristiques ?

$p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v}$. A.N. : $\lambda = \frac{6,34\ x\ 10^{-34}}{9,11\ x\ 10^{-31}\ x\ 400}$ = 1,82 x 10^{-6} m. Pour observer la diffraction de ce faisceau d'électron il faut une ouverture a ≈ λ ≈ 10^{-6} m.

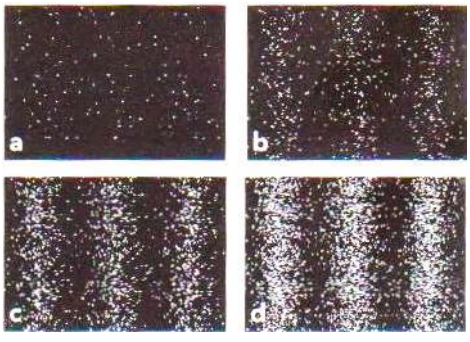
3) Interprétation de l'interférence particule par particule



On éclaire des fentes d'Young avec une source lumineuse. Un écran placé derrière les fentes repère l'impact des photons. Quand on diminue suffisamment l'intensité de la lumière, les photons arrivent un par un sur les fentes. En raison de cette discontinuité, on parle de **phénomène quantique.**

On ne peut pas prévoir le lieu d'impact des photons sur l'écran (doc. a, b et c). Cependant, pour un très grand nombre d'impacts (doc. d), on distingue des zones sombres (faible probabilité d'impact) et des zones claires (forte probabilité d'impact). L'aspect probabiliste du phénomène est ainsi mis en évidence.

Aspect probabiliste des phénomènes quantiques :
Les particules du monde microscopique sont soumises à des lois probabilistes. C'est un phénomène quantique. Seule l'étude d'un grand nombre de particules permet d'établir leur comportement.

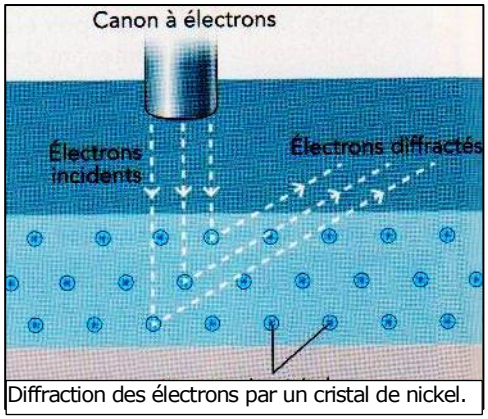


Impacts, en blanc, des photons après traversée des fentes d'Young. De a à d, la durée de l'expérience et donc le nombre de photons sont croissants.

Exercice résolu Interpréter l'expérience de Davisson et Germer.

Compétences : Extraire des informations ; raisonner,

En 1926, les physiciens américains C. DAVISSON (1881-1958) et L. GERMER (1896-1971) dirigent un canon à électrons en direction d'un cristal de nickel. Ils constatent que les électrons sont diffractés par le cristal dans des directions bien précises. Ils observent une figure de diffraction lorsque les électrons ont une **énergie cinétique comprise entre 60 eV et 80 eV.**



Diffraction des électrons par un cristal de nickel.

1. Quelle observation faite par C. DAVISSON et L. GERMER permet d'associer à l'électron un caractère ondulatoire ?
2. Rappeler la relation de de Broglie qui illustre le caractère ondulatoire de la matière.
3. a. Exprimer la longueur d'onde λ des ondes associées aux électrons utilisés par C. DAVISSON et L. GERMER en fonction de h, m_e et de leur énergie cinétique Ec.
   b. Entre quelles valeurs sont comprises les longueurs d'onde de ces ondes de matière?

Données : 1 eV = 1,60 x 10^{-19} J ; m_e = 9,11 x 10^{-31} kg ; h = 6,63 x 10^{-34} J .s ; on considère que la valeur de la vitesse des électrons est très inférieure à celle de la lumière dans le vide.

Solution.

1. C. DAVISSON et L. GERMER observent une **figure de diffraction,** qui est caractéristique d'un comportement ondulatoire.
2. La relation de de Broglie est **p = h / λ.** p est la valeur de la quantité de mouvement de la particule de masse *m*, h est la constante de Planck et λ la longueur d'onde de l'onde de matière associée.
3.a. De la relation de de Broglie, on tire λ = h / p (1) avec p = m_e.v. (la vitesse des électrons est très inférieure à celle de la lumière dans le vide : (particule non relativiste)..

Energie cinétique de l'électron : $E_c = \frac{1}{2} m_e.v^2$ soit $v = \sqrt{\frac{2.E_c}{m_e}}$.

En remplaçant, on obtient : $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e\ v} = \frac{h}{m_e\sqrt{\frac{2.E_C}{m_e}}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e.E_C}}$ avec E_C en Joule : E_c = 60 eV = 60 x 1,60 x 10^{-19} J.

b. Pour un électron d'énergie cinétique **E_c = 60 eV** = 60 x 1,60 x 10^{-19} J, on a : $\lambda_1 = \frac{6{,}63\ x\ 10^{-34}}{\sqrt{2\ x\ 9{,}11\ x\ 10^{-31}\ x\ 60\ x\ 1{,}60\ x\ 10^{-19}}}$ = 1,6 x 10^{-10} m = **0,16 nm**

Si Ec = 80 eV = 80 x 1,60 x 10^{-19} J, on a : λ_2 = 1,4 x 10^{-10} m. = **0,14 nm.**

Les ondes associées aux électrons utilisés par C. DAVISSON et L. GERMER ont **une longueur d'onde comprise entre 0,14 nm et 0,16 nm.**

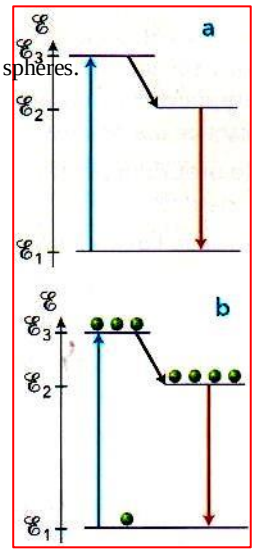
Application immédiate Interpréter l'expérience de Davisson et Germer. *p : 388 n°4 (à faire)*

La valeur de la vitesse d'un électron est égale à 2,4.10^6 m.s^{-1}. Calculer la longueur d'onde de l'onde de matière associée à cet électron.

Exercice résolu. P : 389 Schématiser l'effet laser

Compétences : Exploiter des informations ; faire un schéma ; calculer.

En 1960, T. **MAIMAN** met au point le premier laser, un laser à rubis, c'est-à-dire à oxyde d'aluminium contenant des ions chrome (III) Cr^{3+}.
Son principe de fonctionnement est illustré à l'aide d'un diagramme énergétique à trois niveaux.
Par pompage optique, la majorité des ions Cr^{3+} initialement à l'état fondamental E_1 sont excités vers le niveau d'énergie E_3. Une transition rapide vers le niveau de moindre énergie E_2 a alors lieu spontanément. Les ions Cr^{3+} s'accumulent dans cet état énergétique. Enfin, un photon stimule la transition de cet état excité vers l'état fondamental, 1,79 eV plus bas.



1 .Représenter le diagramme énergétique des ions Cr^{3+} et y faire apparaître les transitions citées dans le texte.
2. Compléter le diagramme de manière à illustrer l'inversion de population des ions Cr^{3+} que l'on pourra représenter par de petites sphères.
3. Quelle est la longueur d'onde dans le vide des photons émis par le laser à rubis ?
   Dans quel domaine du spectre électromagnétique se situe-t-elle ?
4. Un laser de ce type, de puissance 20 kW, émet des impulsions brèves de durée Δt = 0,5 ms.
   Calculer l'énergie E_e émise lors d'une impulsion.

Données : 1 eV = 1,60 x 10^{-19} J ; h = 6,63 x 10^{-34}J .s ; c = 3,00 x 10^8 m.s^{-1}.

Solution

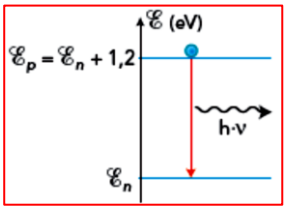
1. Avec les notations de l'énoncé, on peut construire le diagramme a. ci-contre. L'émission stimulée correspond à la transition depuis le niveau d'énergie 2 vers le niveau d'énergie 1 représentée en rouge ci-contre.
2. L'inversion de population se traduit par un niveau d'énergie E_2 plus peuplé que le niveau d'énergie E_1.
   On complète le diagramme précédent et on obtient le diagramme b ci-contre.
3. L'énergie du photon émis est égale à l'écart entre les énergies des deux niveaux concernés par la transition :

   $\Delta E = E_2 - E_1 = h.\nu = \frac{h.c}{\lambda}$ d'où $\lambda = \frac{h.c}{\Delta E}$ A.N. : $\lambda = \frac{6{,}63.10^{-34} * 3{,}00.10^8}{1{,}79.1{,}6.10^{-19}}$ = 6,95 x 10^{-7} m = 695 nm

   Avec ΔE = $E_2 - E_1$ = 1,79 eV = 1,79*1,60.10^{-19}J.
   Cette longueur d'onde égale à **695 nm** correspond à des ondes du domaine du visible (rouge).
4. La relation entre puissance, énergie et durée de fonctionnement s'écrit : E_e = P. Δt = 20 x 10^3 x 0,5 x 10^{-3} = **10 J.**

Application immédiate. Schématiser l'effet laser. *p : 389 n°5 (à faire)*

Un laser titane-saphir émet des photons de longueur d'onde dans le vide 1,06 µm.
1. Dans quel domaine du spectre électromagnétique ce laser émet-il ?
2. Représenter sur un diagramme énergétique la transition en précisant l'écart énergétique (en eV) entre les 2 niveaux mis en jeu.



Correction :

1. Ce laser émet dans le domaine des infrarouges (caractérisés dans l'air par une longueur d'onde > à 800 nm).

2. L'écart énergétique se calcule par : Δ E = Ep - En = $\frac{h.c}{\lambda} = \frac{6{,}63.10^{-34} * 3{,}00.10^8}{1{,}06.\ 10^{-6}}$ = 1,9 x 10^{-19} J soit environ :

$\frac{1{,}9.10^{-19}}{1{,}60.10^{-19}}$ eV soit 1,2 eV. On en déduit le diagramme énergétique et la schématisation de l'émission stimulée.

EXERCICES p : 390. Ch.15. TRANSFERTS QUANTIQUES D'ENERGIE ET DUALITE ONDE-PARTICULE

Ondes ou particules ?

p : 390 N°6 : Connaître les aspects de la lumière

Quels sont les deux aspects de la lumière?

p : 390 N°7 : Mettre en évidence une onde de matière

En 1926, C. DAVISSON et L. GERMER ont envoyé un faisceau d'électrons sur un cristal de nickel. Ils ont alors observé une figure de diffraction similaire à celle que l'on obtient en éclairant ce même cristal avec des rayons X.

1. Quelle propriété physique est caractérisée par le phénomène de diffraction?
2. Que prouve l'expérience de Davisson et Germer?

p : 390 N°8 : Créer une onde de matière avec un électron

Un électron animé d'une vitesse de valeur v très inférieure à celle de la vitesse de la lumière dans le vide possède une quantité de mouvement de valeur notée p.

1 .Quelle est la relation entre p et v ? Indiquer les unités des différentes grandeurs.

2. Une particule matérielle en mouvement a des propriétés ondulatoires. On note λ la longueur d'onde associée à cette onde de matière.
   Quelle est la relation entre p et λ?
   Indiquer les unités des différentes grandeurs.

p : 390 N°9 : Calculer la longueur d'onde d'une onde de matière

Un électron a une vitesse de valeur $v = 3{,}00 \times 10^{4}$ m .s^{-1} à la sortie d'un canon à électrons.

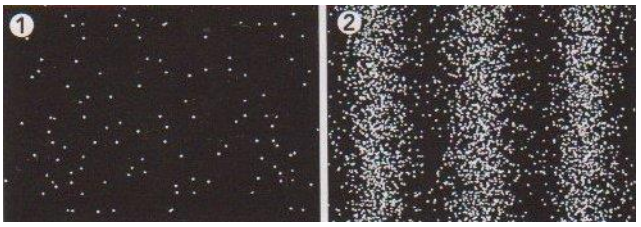
1.Calculer de manière approchée la valeur p de la quantité de mouvement de cet électron.

2.Estimer la longueur d'onde λ de l'onde de matière associée à cette particule en mouvement.

Données : $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg ; $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J . s.

p : 390 N°10 : Connaître l'aspect probabiliste

On fait passer des photons un par un à travers des fentes d'Young verticales. Une cellule photosensible placée à la sortie des fentes repère l'impact de chaque photon. La **figure 1** est le résultat de l'impact (en blanc) de quelques photons. La **figure 2** est obtenue pour un très grand nombre d'impacts.



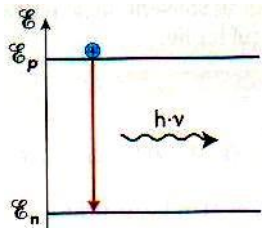
1. Peut-on prévoir le lieu de l'impact d'un photon d'après la **figure 1 ?**
2. Quels sont les endroits où l'impact d'un photon a le plus de chance de se produire d'après la **figure 2 ?**

3 .Que peut-on alors dire de ce phénomène quantique?

Comment fonctionne un laser ?

p : 390 N°11 : Utiliser un diagramme énergétique

Le schéma ci-contre représente l'émission spontanée d'un photon.



1. Que représentent En et Ep **?**
2. Que symbolise la flèche rouge ?
3. Que symbolise la flèche noire ?
4. a. Que représente l'expression h .ν ?
   b. Quelle relation existe-t-il entre h .ν, En et Ep **?**

p : 391 N°12 : Décrire une émission stimulée

1.Dans quelles conditions y a-t-il émission stimulée de photons?

2.Sur un diagramme énergétique annoté, représenter émission stimulée d'un photon.

p : 391 N°13 : Connaître quelques propriétés d'un laser

Quelles sont, parmi les expressions suivantes, celles qui qualifient un laser?

- source monochromatique;
- source polychromatique;
- faisceau peu divergent;
- faisceau divergent;
- source cohérente;
- source dont l'énergie est concentrée dans l'espace;
- source dont l'énergie est dispersée dans tout l'espace;
- source dont l'énergie est concentrée dans le temps.

Quel domaine spectral pour quelle transition d'énergie ?

p : 391 N°14 : Associer transition et radiation

1. Citer deux types de transitions énergétiques existant dans une molécule.
2. Un photon est émis lors d'une transition. La radiation associée à ce photon se situe dans l'infrarouge.
   À quel type de transition est associée cette émission?

p : 391 N°15 : Étudier une transition

Un photon d'énergie 10,0 eV est émis, dans l'air, lors d'une transition entre deux niveaux énergétiques d'une molécule.

1.a. Calculer la longueur d'onde de la radiation associée.
   b. À quel domaine spectral appartient cette radiation?

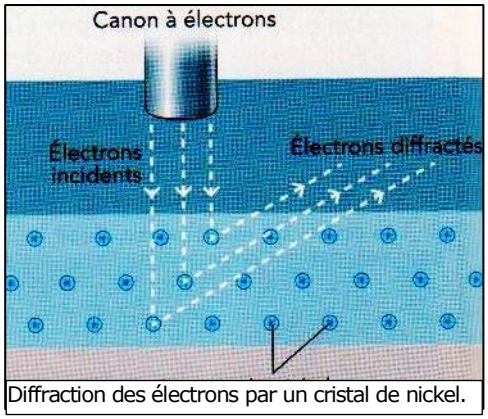
2. Quel est le type de transition mis en jeu?

Données : $c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m .s^{-1}; 1 eV = $1{,}60 \times 10^{-19}$ J ; $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J . s.

Exercice résolu Interpréter l'expérience de Davisson et Germer.

Compétences : Extraire des informations ; raisonner,

En 1926, les physiciens américains C. DAVISSON (1881-1958) et L. GERMER (1896-1971) dirigent un canon à électrons en direction d'un cristal de nickel. Ils constatent que les électrons sont diffractés par le cristal dans des directions bien précises. Ils observent une figure de diffraction lorsque les électrons ont une **énergie cinétique comprise entre 60 eV et 80 eV.**



Diffraction des électrons par un cristal de nickel.

1. Quelle observation faite par C. DAVISSON et L. GERMER permet d'associer à l'électron un caractère ondulatoire ?
2. Rappeler la relation de de Broglie qui illustre le caractère ondulatoire de la matière.
3. a. Exprimer la longueur d'onde λ des ondes associées aux électrons utilisés par C. DAVISSON et L. GERMER en fonction de h, m_e et de leur énergie cinétique Ec.
   b. Entre quelles valeurs sont comprises les longueurs d'onde de ces ondes de matière?

Données : 1 eV = 1,60 x 10^{-19} J ; m_e = 9,11 x 10^{-31} kg ; h = 6,63 x 10^{-34} J .s ; on considère que la valeur de la vitesse des électrons est très inférieure à celle de la lumière dans le vide.

Solution.

1. C. DAVISSON et L. GERMER observent une **figure de diffraction,** qui est caractéristique d'un comportement ondulatoire.
2. La relation de de Broglie est **p = h / λ.** p est la valeur de la quantité de mouvement de la particule de masse *m*, h est la constante de Planck et λ la longueur d'onde de l'onde de matière associée.
3.a. De la relation de de Broglie, on tire λ = h / p (1) avec p = m_e.v. (la vitesse des électrons est très inférieure à celle de la lumière dans le vide : (particule non relativiste)..

Energie cinétique de l'électron : $E_c = \frac{1}{2} m_e.v^2$ soit $v = \sqrt{\frac{2.E_c}{m_e}}$.

En remplaçant, on obtient : $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e\, v} = \frac{h}{m_e \sqrt{\frac{2.E_C}{m_e}}} = \frac{h}{\sqrt{2 m_e.E_C}}$ avec E_C en Joule : E_c = 60 eV = 60 x 1,60 x 10^{-19} J.

b. Pour un électron d'énergie cinétique **E_c = 60 eV** = 60 x 1,60 x 10^{-19} J, on a : $\lambda_1 = \frac{6{,}63\ x\ 10^{-34}}{\sqrt{2\ x\ 9{,}11\ x\ 10^{-31}\ x\ 60\ x\ 1{,}60\ x\ 10^{-19}}}$ = 1,6 x 10^{-10} m = **0,16 nm**

Si Ec = 80 eV = 80 x 1,60 x 10^{-19} J, on a : λ_2 = 1,4 x 10^{-10} m. = **0,14 nm.**

Les ondes associées aux électrons utilisés par C. DAVISSON et L. GERMER ont **une longueur d'onde comprise entre 0,14 nm et 0,16 nm.**

Application immédiate Interpréter l'expérience de Davisson et Germer. *p : 388 n°4 (à faire)*

La valeur de la vitesse d'un électron est égale à 2,4.10^6 m.s^{-1}. Calculer la longueur d'onde de l'onde de matière associée à cet électron.

Solution : La valeur de la quantité de mouvement de cet électron (non relativiste, $v \ll c$) s'exprime par : p = $m_e \cdot v$

La relation de de Broglie permet de calculer la longueur d'onde de l'onde de matière associée : $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e\, v}$.

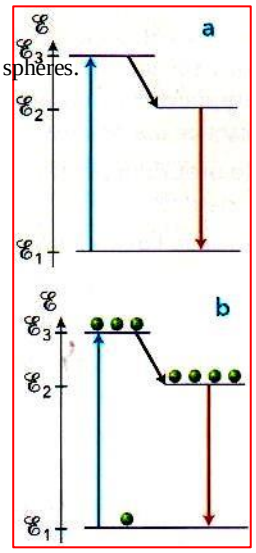
A.N. : $\lambda = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{9{,}11 \times 10^{-31} \times 2{,}4 \times 10^{6}} = 3{,}0 \times 10^{-10}$ m

---

Exercice résolu. P : 389 Schématiser l'effet laser

Compétences : Exploiter des informations ; faire un schéma ; calculer.

En 1960, T. **MAIMAN** met au point le premier laser, un laser à rubis, c'est-à-dire à oxyde d'aluminium contenant des ions chrome (III) Cr^{3+}.
Son principe de fonctionnement est illustré à l'aide d'un diagramme énergétique à trois niveaux.
Par pompage optique, la majorité des ions Cr^{3+} initialement à l'état fondamental E_1 sont excités vers le niveau d'énergie E_3. Une transition rapide vers le niveau de moindre énergie E_2 a alors lieu spontanément. Les ions Cr^{3+} s'accumulent dans cet état énergétique. Enfin, un photon stimule la transition de cet état excité vers l'état fondamental, 1,79 eV plus bas.



1 .Représenter le diagramme énergétique des ions Cr^{3+} et y faire apparaître les transitions citées dans le texte.
2. Compléter le diagramme de manière à illustrer l'inversion de population des ions Cr^{3+} que l'on pourra représenter par de petites sphères.
3. Quelle est la longueur d'onde dans le vide des photons émis par le laser à rubis ?
   Dans quel domaine du spectre électromagnétique se situe-t-elle ?
4. Un laser de ce type, de puissance 20 kW, émet des impulsions brèves de durée Δt = 0,5 ms.
   Calculer l'énergie E_e émise lors d'une impulsion.

Données : 1 eV = 1,60 x 10^{-19} J ; h = 6,63 x 10^{-34}J .s ; c = 3,00 x 10^8 m.s^{-1}.

Solution

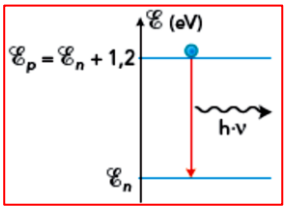
1. Avec les notations de l'énoncé, on peut construire le diagramme a. ci-contre. L'émission stimulée correspond à la transition depuis le niveau d'énergie 2 vers le niveau d'énergie 1 représentée en rouge ci-contre.
2. L'inversion de population se traduit par un niveau d'énergie E_2 plus peuplé que le niveau d'énergie E_1.
   On complète le diagramme précédent et on obtient le diagramme b ci-contre.
3. L'énergie du photon émis est égale à l'écart entre les énergies des deux niveaux concernés par la transition :

   $\Delta E = E_2 - E_1 = h.\nu = \frac{h.c}{\lambda}$ d'où $\lambda = \frac{h.c}{\Delta E}$ A.N. : $\lambda = \frac{6{,}63.10^{-34} * 3{,}00.10^{8}}{1{,}79.1{,}6.10^{-19}}$ = 6,95 x 10^{-7} m = 695 nm

   Avec $\Delta E = E_2 - E_1$ = 1,79 eV = 1,79*1,60.10^{-19}J.
   Cette longueur d'onde égale à **695 nm** correspond à des ondes du domaine du visible (rouge).
4. La relation entre puissance, énergie et durée de fonctionnement s'écrit : E_e = P. Δt = 20 x 10^3 x 0,5 x 10^{-3} = **10 J.**

Application immédiate. Schématiser l'effet laser. *p : 389 n°5 (à faire)*

Un laser titane-saphir émet des photons de longueur d'onde dans le vide 1,06 µm.
1. Dans quel domaine du spectre électromagnétique ce laser émet-il ?
2. Représenter sur un diagramme énergétique la transition en précisant l'écart énergétique (en eV) entre les 2 niveaux mis en jeu.



Correction :

1. Ce laser émet dans le domaine des infrarouges (caractérisés dans l'air par une longueur d'onde > à 800 nm).

2. L'écart énergétique se calcule par : Δ E = Ep - En = $\frac{h.c}{\lambda} = \frac{6{,}63.10^{-34} * 3{,}00.10^{8}}{1{,}06.10^{-6}}$ = 1,9 x 10^{-19} J soit environ :

$\frac{1{,}9.10^{-19}}{1{,}60.10^{-19}}$ eV soit 1,2 eV. On en déduit le diagramme énergétique et la schématisation de l'émission stimulée.

L'ESSENTIEL (RESUME DU LIVRE)

Dualité onde-particule

- L'énergie de la lumière est transportée par des photons qui présentent un aspect ondulatoire et particulaire. L'énergie d'un photon est : **$E = h.\nu$** où h est la constante de Planck ; E en joule (J) et ν en hertz (Hz).
- La dualité onde-particule conduit à associer une onde de longueur d'onde λ à toute particule, matérielle ou non, de quantité de mouvement de valeur λ et p sont liées par la relation de de Broglie : **$p = h / \lambda$** **où** h = 6,63 x 10^{-34}J .s. ;
  λ en m et p en kilogramme-mètre par seconde (kg . m .s^{-1})
- Les phénomènes quantiques présentent un aspect probabiliste : on peut au mieux établir la probabilité de présence d'une particule à un endroit donné.

Le laser

- La désexcitation spontanée d'un atome s'accompagne de l'émission d'un photon d'énergie = h. ν.
- Une émission stimulée par un atome excité est induite par un photon incident dont l'énergie est égale à la différence d'énergie entre 2 niveaux énergétiques de cet atome. Le photon émis et le photon incident ont mêmes fréquence, mêmes direction et sens de propagation et ils sont en phase.
- L'inversion de population consiste à maintenir plus d'atomes dans un état excité que dans leur état fondamental grâce à un apport d'énergie.
- Un oscillateur laser contient des atomes qui subissent une inversion de population. Dans cet oscillateur, on observe une augmentation du nombre de photons émis. Ils ont même fréquence, mêmes direction et sens de propagation et ils sont en phase.
- Un laser émet un faisceau lumineux monochromatique et très directif, ce qui permet une concentration spatiale de l'énergie. Les lasers à impulsion permettent de plus une concentration temporelle de l'énergie.

Domaine spectral et transition d'énergie

La nature de la transition est différente suivant l'ordre de grandeur du quantum d'énergie transféré.

Domaine spectral	Nature de la transition mise en jeu
Visible, ultraviolet	Transition entre niveaux d'énergie électronique
Infrarouge	Transition entre niveaux d'énergie vibratoire