

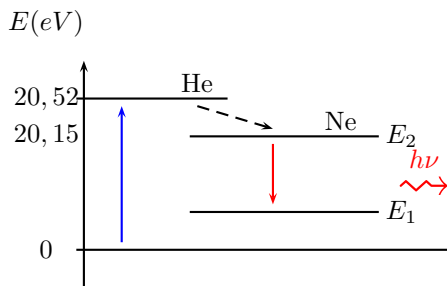
TD5 : Optique & Lasers

1. Diffraction par un cheveu. À quelle distance d'un cheveu de $0,16 \text{ mm}$ d'épaisseur, faut-il placer un écran, pour observer une tache centrale de diffraction de largeur 22 mm lorsqu'on utilise une lumière laser de longueur d'onde égale à 630 nm ?

2. Les lasers à impulsions ultracourtes sont utilisés dans l'industrie pour usiner, découper, percer ou souder des pièces métalliques. Dans les lasers les plus courants, les impulsions ont une durée de 100 fs et transportent une énergie de $3,0 \mu\text{J}$. Le délai entre deux impulsions est 10^5 fois plus long que chaque impulsion.

- a) Calculez la puissance maximale lors d'une impulsion et la puissance moyenne du faisceau laser.
- b) Expliquez pourquoi ces lasers peuvent être utilisés pour percer ou usiner des métaux.

3. Laser He-Ne.



Le laser He-Ne est réalisé à partir d'une cavité optique contenant un mélange gazeux essentiellement constitué de néon (15%) et d'hélium (85%). L'émission laser de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ résulte de la transition entre deux niveaux d'énergie du néon E_2 et E_1 .

Par des décharges électriques, on amène les atomes d'hélium à un niveau d'énergie E_3 très proche du niveau E_2 du néon. Les collisions entre atomes de néon et d'hélium permettent le transfert d'énergie et donc le maintien d'une population constante d'atomes de néon dans l'état E_2 .

- a) Déterminez la couleur, la fréquence et l'énergie des photons émis par la transition entre les niveaux E_2 et E_1 . Déduisez-en la valeur, en électronvolts, du niveau d'énergie E_1 .
- b) La puissance typique de ce laser est $P = 1,0 \text{ mW}$. Déduisez-en le nombre de photons émis par ce laser à chaque seconde.
- c) L'un des miroirs de la cavité n'étant pas totalement réfléchissant, une partie de la lumière peut sortir par cette "fenêtre" circulaire de diamètre $d = 0,6 \text{ mm}$. Il se forme alors le faisceau lumineux divergent dont l'angle au sommet vaut 2θ . Quel phénomène physique peut être à l'origine de la légère divergence du faisceau laser ? Déduisez-en un ordre de grandeur du demi-angle au sommet θ .
- d) L'œil humain risque des lésions irréversibles si la puissance lumineuse par unité de surface est supérieure à $\Pi_S = 170 \text{ mW.m}^{-2}$. Déterminez la distance minimale de sécurité permettant une vision directe du faisceau laser.

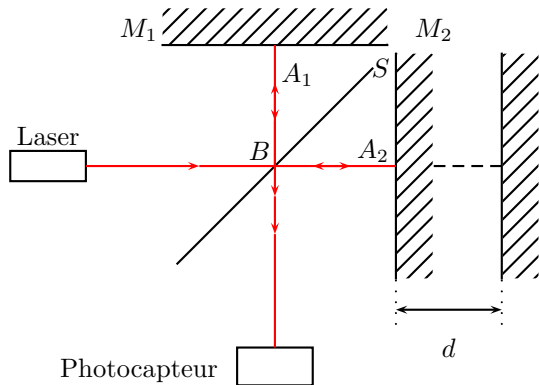
4. Laser médical.

En chirurgie, pour l'ablation des tumeurs, on utilise un laser à dioxyde de carbone de longueur d'onde $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$.

- a) À quel domaine spectral appartient cette radiation ?
- b) Pour que le chirurgien puisse diriger correctement le faisceau sur la tumeur, on utilise un laser He-Ne auxiliaire, de longueur d'onde $\lambda_{aux} = 632,8 \text{ nm}$. Quelle est la couleur de ce faisceau ?
- c) Justifiez l'utilisation du laser auxiliaire.
- d) Le laser à CO_2 émet chaque seconde $2,7 \cdot 10^{21}$ photon. Calculez l'énergie transportée par chaque photon et déduisez-en la puissance du faisceau.

5. Mesure d'une distance.

Pour mesurer précisément la longueur d'un déplacement, on utilise un interféromètre de Michelson. Cet appareil comporte deux miroirs plans M_1 et M_2 , perpendiculaires entre eux, et une lame séparatrice semi-réfléchissante S inclinée à 45° par-rapport à M_1 et M_2 .



Les faisceaux transmis ou réfléchis par S arrivent sur les miroirs sous incidence normale aux points notés A_1 et A_2 . Le miroir M_2 est mobile sur un axe BA_2 . À la sortie du dispositif, deux faisceaux parallèles, qui ont parcouru des trajets différents, peuvent interférer : leur état d'interférence est contrôlé par un photorécepteur relié à une chaîne électronique de comptage. On suppose que les faisceaux arrivant sur le photorécepteur ont la même intensité.

Initialement, les deux miroirs sont symétriques l'un de l'autre par-rapport à la lame semi-réfléchissante.

- Que peut-on dire de la différence de marche δ_0 entre les deux faisceaux qui interfèrent depuis leur séparation en B sur la lame S jusqu'à leur retour en ce point ?
- Dans ces conditions, le photorécepteur enregistre-t-il une plage brillante ou une plage sombre ?
- On recule le miroir M_2 d'une distance d . Exprimez la nouvelle différence de marche δ entre les deux faisceaux en fonction de d .
- Quand le miroir s'immobilise, le photorécepteur détecte une plage brillante et le compteur a enregistré le défilement de 632 plages sombres. Rappelez la relation entre la différence de marche et la longueur d'onde, dans le cas d'une interférence constructive.
- Calculez la distance d sachant que la lumière émise par le laser a une longueur d'onde $\lambda = 632 \text{ nm}$.

6. Population d'un niveau d'énergie.

On considère un nombre N d'atomes placés dans une enceinte à la température T , chaque atome possédant en plus de son état fondamental E_1 un état excité d'énergie E_2 .

En 1872, le physicien autrichien L. Boltzmann montra que le rapport des populations entre les niveaux d'énergie E_1 et E_2 ne dépend que de l'écart d'énergie entre ces deux niveaux et de la température absolue T :

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$$

où k est la constante de Boltzmann.

- L'exposant d'une exponentielle étant sans dimension, quelle est la dimension de la constante de Boltzmann ? Quelle est son unité SI ?
- La constante de Boltzmann étant positive, montrez que quelle que soit la température, il y a toujours plus d'atomes dans l'état fondamental que dans l'état excité.
- Justifiez l'expression : "dans la cavité résonnante d'un laser, le pompage optique permet de réaliser une inversion de population."
- Quand l'écart d'énergie entre les deux niveaux est plus grand, comment le rapport des populations évolue-t-il ?
- Quand la température absolue tend vers 0 K , que devient la population d'atomes dans un état excité ?
- Ce dernier résultat était-il prévisible sans formule ?

7. Ralentissement d'un jet d'atomes.

On considère un jet d'atomes de sodium sortant d'un four à une vitesse $v_0 = 1,00 \cdot 10^3 \text{ m.s}^{-1}$. Ce jet d'atomes est éclairé d'un faisceau laser choisi de telle sorte que les atomes de sodium, dans leur état fondamental, puissent absorber les photons du faisceau. Lorsqu'un atome absorbe ou émet un photon, sa vitesse est modifiée.

Dans le cas présent on montre que l'absorption d'un photon s'accompagne d'une diminution de la vitesse donnée par la relation :

$$|\Delta v| = \frac{h\nu}{mc}$$

où $h\nu$ est l'énergie du photon et m est la masse de l'atome.

- Que signifie la deuxième phrase de l'énoncé ?
- Calculez la diminution de vitesse pour un atome de sodium. Comparez cette diminution de vitesse à la vitesse initiale.
- Lorsqu'un atome de sodium absorbe un photon, il passe dans un état excité puis revient au niveau fondamental quasi-instantanément. Le cycle absorption-émission a une durée moyenne de 10^{-8} s . Dans le faisceau laser, l'atome va donc subir 10^8 cycles par seconde. Les photons émis lorsque l'atome se désexcite ont une direction aléatoire. Précisez ce que veut dire "direction aléatoire" et déduisez-en qu'en moyenne, les photons émis ne modifient pas la vitesse de l'atome.
- Calculez l'accélération moyenne $a = |\Delta v|/|\Delta t|$ due à l'absorption des photons, à laquelle est soumis l'atome de sodium. Comparez cette accélération à l'accélération de pesanteur.
- À l'accélération calculée précédemment correspond une force \vec{F} de valeur $F = ma$, opposée au mouvement de l'atome. En supposant l'atome soumis uniquement à cette force, calculez le temps qu'il faut pour l'arrêter et la distance parcourue depuis la sortie du four.
- En réalité, le problème du ralentissement est un peu plus délicat car il faut modifier la fréquence du laser au cours de l'expérience pour que les photons continuent à être absorbés. Justifiez cette nécessité en précisant le nom de l'effet mis en jeu.

Données : énergie du photon : $h\nu = 3,38 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; masse de l'atome de sodium : $3,82 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.