

BTS 2011

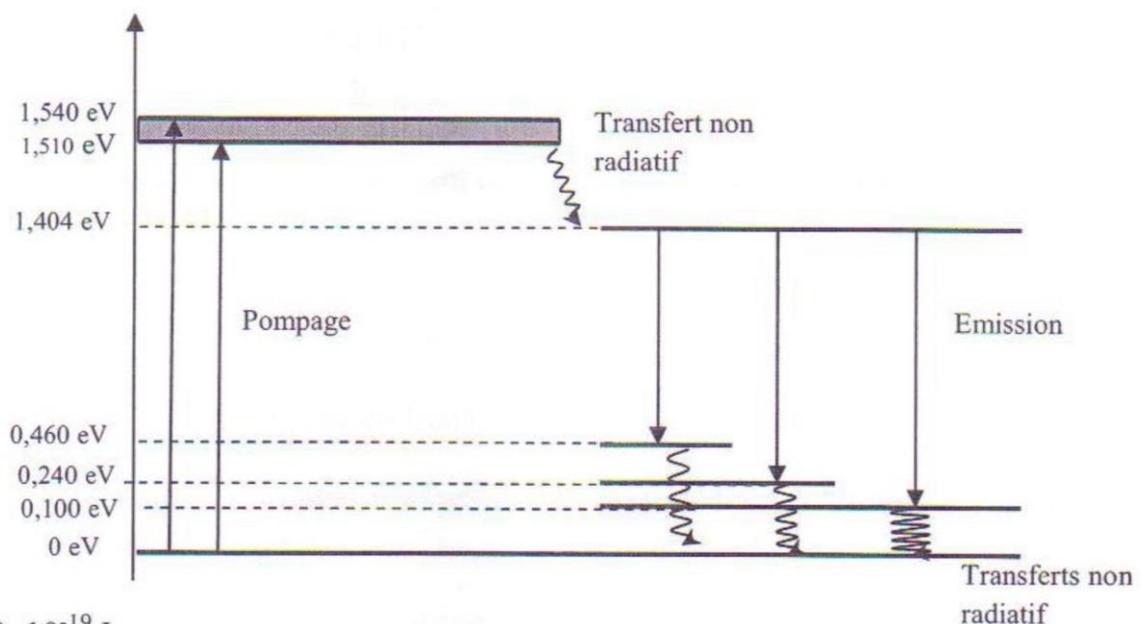
A. ETUDE DE LA SOURCE LASER ND-YAG (7 points)

Le laser Nd-YAG est un laser à solide. Le milieu actif est un Grenat d'Yttrium-Aluminium (d'où YAG) dopé avec des ions néodyme Nd³⁺. Il fonctionne avec un pompage optique.

1. Longueurs d'onde émises et absorbées

Données :

Diagramme d'énergie simplifié de l'ion néodyme Nd³⁺



1 eV = 1,60. 10⁻¹⁹ J

- Constante de Planck : $h = 6,62.10^{-34}$ J.s

- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00.10^8$ m.s⁻¹

On rappelle que la longueur d'onde λ caractéristique entre deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 est

donnée par : $\lambda = \frac{hc}{|E_1 - E_2|}$

La radiation est émise si la variation d'énergie $E_1 - E_2$ est positive et absorbée si la variation d'énergie $E_1 - E_2$ est négative.

1.1 Déterminer les deux longueurs d'onde extrêmes λ_{min} et λ_{max} de la bande d'absorption du pompage.

1.2 Déterminer les trois longueurs d'onde susceptibles d'être émises par émission stimulée.

Un capteur à fibre optique : le thermomètre réparti à effet Raman

Après l'incendie de 1999, le tunnel du Mont Blanc a été équipé de capteurs à fibre optique permettant de mesurer en continu le profil de température dans des endroits difficiles d'accès, en particulier dans les endroits dits « chauds » (centrales nucléaires, puits de pétrole...). Ce capteur est un thermomètre réparti à effet Raman.

Dans ce problème, on se propose d'étudier l'effet Raman en partie I, la fibre optique en partie II, la rétro diffusion en partie III, le thermomètre global en partie IV.

Ces parties sont indépendantes.

Données : célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
 constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
 valeur de l'électron-volt : $1 \text{ eV} = 1,61 \times 10^{-19} \text{ J}$
 constante de Boltzmann : $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
 correspondance degré Celsius/ Kelvin : $0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$

I. L'effet Raman (4 points)

Les fibres optiques sont constituées de molécules de silice. A la température absolue T , celles-ci peuvent être dans leur niveau fondamental d'énergie E_0 ou dans un état excité d'énergie $E > E_0$. On notera par la suite ΔE la différence d'énergie $E - E_0$.

Le rapport de la population N de molécules situées dans le niveau d'énergie E à la population N_0 de molécules situées dans le niveau d'énergie E_0 est donné par la loi de Boltzmann :

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

Un photon incident, de fréquence ν_0 et d'énergie $h\nu_0$, peut être diffusé de trois façons différentes par une molécule de silice (voir le schéma n°1 qui suit):

- le photon incident et le photon diffusé sont tous les deux d'énergie $h\nu_0$, la molécule ne change pas de niveau d'énergie : c'est la diffusion Rayleigh.
- la molécule passe du niveau d'énergie E_0 au niveau d'énergie E tandis qu'elle diffuse un photon d'énergie :

$$h\nu_1 = h\nu_0 - \Delta E.$$

- La molécule passe du niveau d'énergie E au niveau d'énergie E_0 tandis qu'elle diffuse un photon d'énergie :

$$h\nu_2 = h\nu_0 + \Delta E.$$

Ces deux derniers cas correspondent à la diffusion Raman.

Si on analyse la lumière diffusée avec un spectromètre, on obtient le spectre représenté au schéma n°2 qui suit, sur lequel on a porté en abscisse la longueur d'onde dans le vide des radiations lumineuses et en ordonnée la puissance relative en décibels.

1. Interpréter l'allure de ce spectre et identifier la longueur d'onde λ_0 des photons incidents ainsi que les longueurs d'onde λ_1 et λ_2 correspondant respectivement aux deux possibilités de diffusion Raman. Justifier vos affirmations.
- 2.a. En déduire les valeurs des fréquences ν_0 , ν_1 et ν_2 des diffusions considérées.
- 2.b. Montrer que les différences $\nu_2 - \nu_0$ et $\nu_0 - \nu_1$ sont égales, de valeur $\Delta\nu = 13,2 \times 10^{12} \text{ Hz}$ aux erreurs de mesure près.
3. Calculer la valeur de la différence d'énergie ΔE en joule et en électron-volt.
4. Quelle est la valeur du rapport N/N_0 à la température de 300 K ?

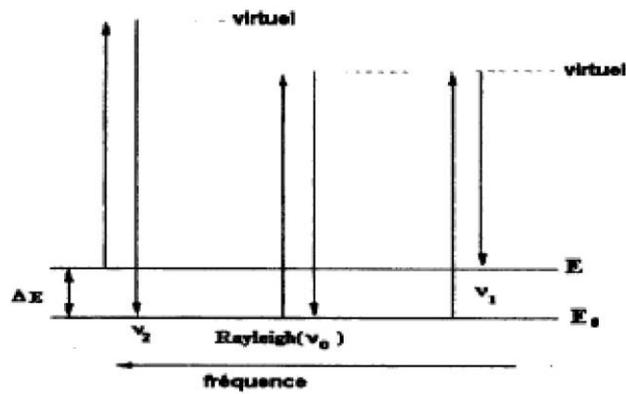


Schéma n°1

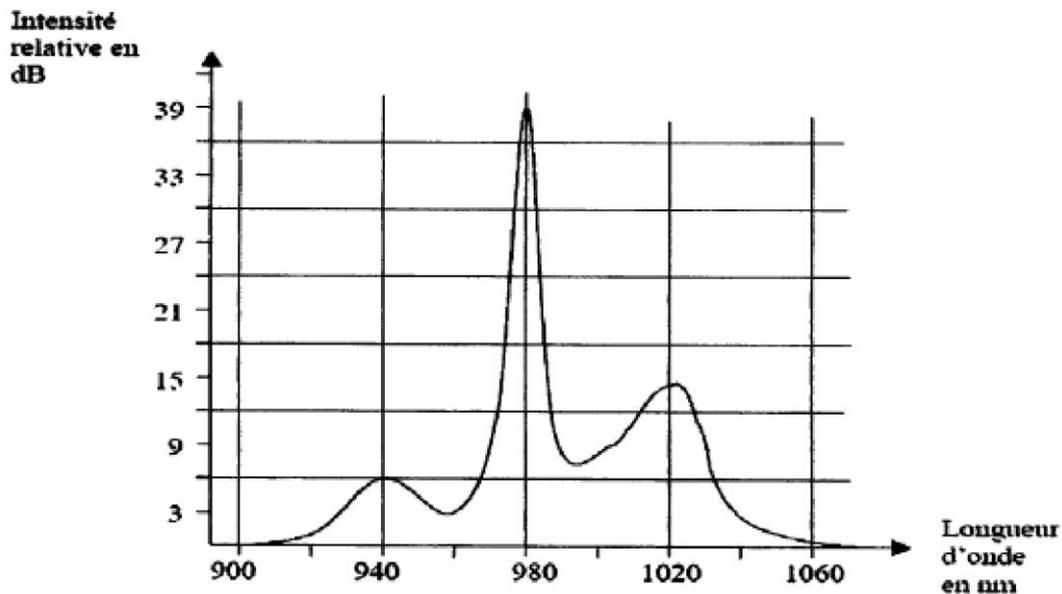


Schéma n°2

Exercice 1 : Energie d'un photon, nombre de photons dans un faisceau lumineux

On considère un faisceau lumineux issu d'un laser He-Ne rouge à $\lambda = 633 \text{ nm}$, de puissance 15,0 mW.

- 1) Déterminer l'énergie E en J et en eV d'un photon de faisceau lumineux. On donne la constante de Planck $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ et la vitesse de la lumière $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.
- 2) Déterminer l'énergie lumineuse émise par le faisceau laser pendant une seconde.
- 3) En déduire le nombre N de photons émis par seconde par ce laser.

Exercice 2 : Largeur spectrale des raies

1) Largeur naturelle

La relation d'incertitude d'Heisenberg pour la quantité de mouvement d'un photon suivant la direction Ox s'exprime par $\Delta p_x \cdot \Delta x = h/(2\pi)$: les incertitudes sur la quantité de mouvement et sur la position sont reliées entre-elles. La quantité de mouvement d'un photon de fréquence ν a pour valeur $p_x = h\nu/c$. Donner l'expression de la relation d'incertitude contenant l'énergie et le temps. Déterminer la relation entre la durée de vie $\tau = 1/A$ d'un niveau excité et la largeur spectrale de la raie émise. Calculer $\Delta\nu$ pour $\tau = 10^{-8}$ s.

2) Largeur Doppler

Considérons un atome immobile émettant à la fréquence ν_0 dans une direction Ox donnée. Lorsque l'atome est animé d'un mouvement, la fréquence de la lumière observée est $\nu = \nu_0(1 + V_x/c)$ avec V_x composante de la vitesse de l'atome selon Ox et c vitesse de la lumière dans le vide.

Le spectre de la lumière observée est décrit par la densité spectrale d'intensité $I(\nu)d\nu$ représentant la fraction de rayonnement comprise entre ν et $\nu + d\nu$.

Le milieu, constitué d'atomes de masse m , est à la température absolue T (en Kelvin (K)). On suppose qu'il

s'agit d'un gaz parfait. Dans ce cas, l'énergie cinétique moyenne d'un atome par degré de liberté est $\langle E_c \rangle = kT/2 = m \langle V_x^2 \rangle / 2$

La largeur de la raie est définie par $\Delta\nu_D = 2 \langle (v - \nu_0)^2 \rangle^{1/2}$ où $\langle \rangle$ désigne la valeur moyenne. Exprimer $\Delta\nu_D$ en fonction de k , T , m , c et ν_0 .

Application numérique dans le cas du néon dans un laser He-Ne : température de 120°C , $\nu_0 = 4,74 \cdot 10^{14}$ Hz, $m = 3,34 \cdot 10^{-26}$ kg, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K et $0^\circ\text{C} = 273$ K.

Exercice 3 : loi de Beer-Lambert

1. Rappeler la loi de Beer-Lambert en précisant les unités.

2. On introduit une cuve de longueur $l = 1,0$ cm dans un spectrophotomètre contenant une solution de permanganate de potassium à la concentration $2,2 \cdot 10^{-4}$ mol. L⁻¹. À la longueur d'onde 540 nm, on mesure $A = 0,40$.

Une autre solution de permanganate de potassium est introduite dans l'appareil. Dans les mêmes conditions expérimentales, son absorbance vaut $A' = 0,9$. Évaluer la concentration C' de cette deuxième solution.