

1. Interaction d'un atome avec un rayonnement

1.1 Absorption et émission

1.1.1

Lors du phénomène d'**absorption**, un atome dans un niveau d'énergie quantifié \mathcal{E}_1 absorbe un photon lui permettant d'accéder à un niveau d'énergie quantifié \mathcal{E}_2 plus élevé.

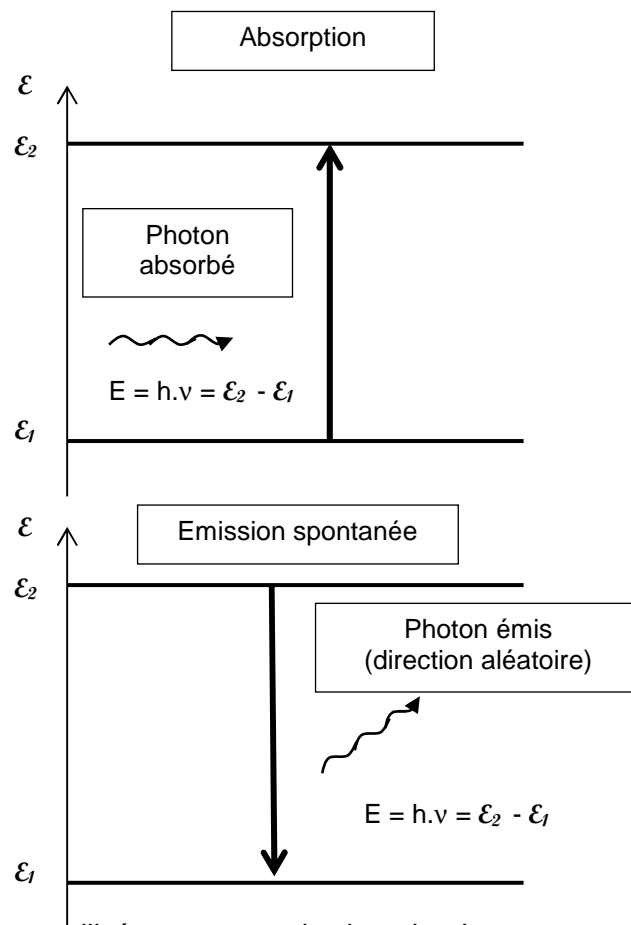
L'énergie du photon absorbé doit être égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux : $E = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$

Animation à voir : <http://toutestquantique.fr/laser/>

Lors du phénomène d'**émission spontanée**, un atome dans un niveau d'énergie quantifié \mathcal{E}_2 émet spontanément un photon lui permettant d'accéder à un niveau d'énergie quantifié \mathcal{E}_1 plus faible (et donc plus stable).

L'énergie du photon émis doit être égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux : $E = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$

Ce photon est émis dans une direction aléatoire de l'espace (*contrairement à l'émission stimulée*).



1.1.2 On peut également rencontrer l'**émission stimulée** qui est utilisée par exemple dans les Lasers (*les photons ont alors tous la même direction, le même sens, la même fréquence et sont en phase*).

1.2 Il s'agit de la relation de de Broglie qui fait référence à la **dualité onde-particule** de la lumière.

Animation à voir : <http://toutestquantique.fr/dualite/>

1.3 Cas de l'isotope 87 du rubidium

1.3.1 Vu que la quantité de mouvement du système {atome de rubidium + photon} se conserve d'après

l'énoncé : $\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}}$

L'atome de rubidium est initialement immobile (*d'après l'énoncé, situation simplifiée pour expliquer la notion de vitesse de recul*) et le photon en mouvement donc $\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{photon}}$.

Après l'absorption du photon : $\vec{p}_{\text{après}} = \vec{p}_{\text{atome}}$ (le photon n'existe plus).

$$\text{Ainsi, } \vec{p}_{\text{atome}} = \vec{p}_{\text{photon}}$$

$$\text{donc } p_{\text{atome}} = p_{\text{photon}}$$

$$\text{alors } m_{\text{atome}} \cdot v_{\text{atome}} = \frac{h \cdot \nu}{c}$$

$$\text{finalement } v_{\text{atome}} = \frac{h \cdot \nu}{m_{\text{atome}} \cdot c}, \text{ on retrouve l'expression proposée pour la vitesse de recul}$$

On cherche maintenant l'ordre de grandeur de la valeur de cette vitesse de recul. L'énoncé ne nous donne pas la fréquence ν mais la longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{\nu}$, alors $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

$$\text{On obtient } v_{\text{atome}} = \frac{h \cdot \frac{c}{\lambda}}{m_{\text{atome}} \cdot c} = \frac{h}{m_{\text{atome}} \cdot \lambda}$$

$$v_{\text{atome}} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{1,45 \times 10^{-25} \times 0,78 \times 10^{-6}} = 5,9 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}, \text{ soit un ordre de grandeur de } 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}.$$

Ce résultat est bien cohérent avec la vitesse de recul de 6 mm.s^{-1} indiquée dans l'énoncé.

1.3.2 Le mouvement de l'atome étant rectiligne uniformément accéléré, on pourra définir son accélération comme sa variation de vitesse par unité de temps : $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ (*cela ne serait pas vrai pour un mouvement circulaire par exemple*).

La variation de vitesse est égale à la vitesse de l'atome après émission vu que l'atome était initialement immobile : $\Delta v = v_{\text{atome}}$.

En admettant que la durée du processus d'absorption soit de l'ordre de la période du cycle « absorption-désexcitation » : $\Delta t = T_{\text{cycle}} = \frac{1}{f_{\text{cycle}}}$ avec $f_{\text{cycle}} = 10^8 \text{ Hz}$

(*rappel : la fréquence d'un phénomène périodique est le nombre de fois où le phénomène se reproduit par seconde*).

$$\text{Ainsi : } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_{\text{atome}}}{T_{\text{cycle}}} = v_{\text{atome}} \cdot f_{\text{cycle}}$$

$a = 5,9 \times 10^{-3} \times 10^8 = 5,9 \times 10^5 \text{ m.s}^{-2}$, soit un ordre de grandeur de 10^6 m.s^{-2} égal à celui indiqué dans l'énoncé.

1.4 L'effet sur la vitesse de l'émission spontanée est en moyenne nul car l'émission spontanée du photon se fait dans une direction aléatoire donc l'effet de recul moyen sur un très grand nombre d'émissions (10^8 par seconde) est nul.

Analogie : dans un morceau de métal non soumis à une tension électrique, les électrons libres se déplacent en permanence dans des directions aléatoires : la moyenne de tous ces déplacements est nulle et il n'y a pas de courant électrique.

2. Principe du refroidissement Doppler

2.1 L'effet Doppler consiste en une modification de la fréquence perçue par un récepteur quand la distance émetteur-récepteur varie.

2.2 L'atome 1 se déplace vers le « laser de gauche » : à cause de l'effet Doppler, il perçoit la fréquence des photons provenant de ce laser comme supérieure à ν .

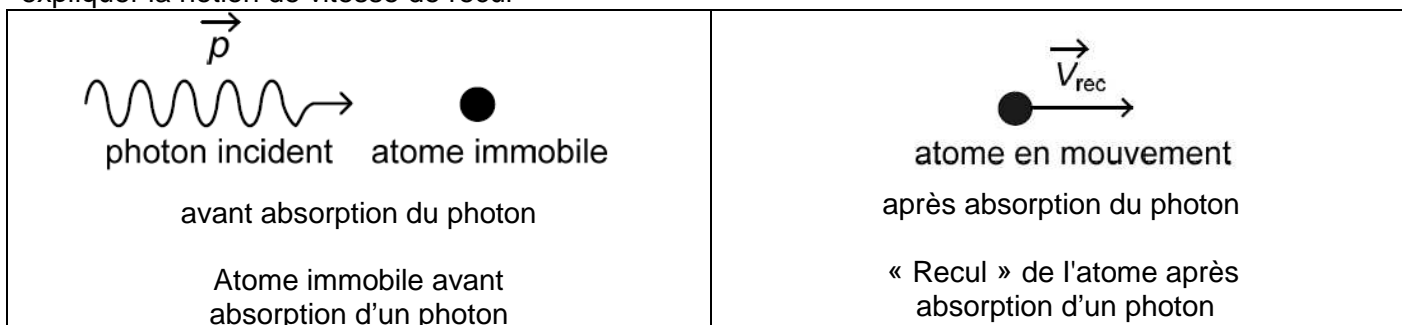
Mais comme ν est légèrement inférieure à ν_0 , l'atome 1 va percevoir le photon comme ayant une fréquence égale à ν_0 et donc l'absorber, ce qui va le ralentir à cause de la vitesse de recul que l'absorption du photon va entraîner (voir partie 1 de l'exercice).

Remarque : on pourrait croire que, par symétrie, le laser de droite « pousse » l'atome vers la gauche mais ce n'est pas le cas car la fréquence des photons venant de droite est encore plus inférieure à ν_0 à cause de l'effet Doppler et ceux-ci ne sont pas absorbés par l'atome.

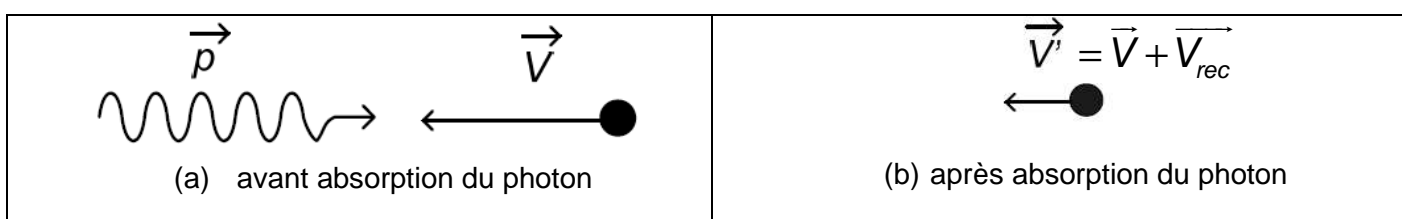
2.3 Ces six lasers sont disposés en couple de même direction mais de sens opposés afin de contrôler la position des atomes selon un axe par couple. Les 3 couples de lasers permettent donc d'immobiliser quasiment les atomes en jouant sur 3 directions de l'espace formant un repère orthogonal en 3D.

2.4 Le système étudié permet effectivement de refroidir des atomes car il diminue leur vitesse : à l'échelle microscopique, l'agitation thermique diminue ce qui a pour conséquence à l'échelle macroscopique une diminution de la température.

Compléments : dans la partie 1 de cet exercice, on considère l'atome initialement immobile pour expliquer la notion de vitesse de recul



Dans la partie 2, l'atome en mouvement est ralenti grâce à cet effet de recul :



Absorption d'un photon par un atome en mouvement

Voir <http://labolycee.org/menugeo.php?s=1&annee=2015&pays=Metropole&rattrap=1#geo>

Exercice 2 : Des atomes froids pour mesurer le temps.

Compétences exigibles ou attendues :

En noir : officiel (Au B.O.)

En bleu : officieux (au vu des sujets de BAC depuis 2013)

- Connaître le principe de l'émission spontanée (et y associer un diagramme d'énergie représentatif du phénomène) (1^{ère} S)
- Savoir que la lumière présente des aspects ondulatoire et particulaire.
- Connaître et utiliser la relation *de de Broglie* : $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v}$
- Définir la quantité de mouvement d'un point matériel : $\vec{p} = m.\vec{v}$
- *Calculer une vitesse à l'aide d'un bilan quantitatif de quantité de mouvement (pour un système pseudo-isolé).*
- Connaître et exploiter la relation $\lambda = \frac{c}{\nu}$ (pour une OEM) (1^{ère} S).
- Définir et reconnaître des mouvements (rectiligne uniformément varié ici) et donner les caractéristiques du vecteur accélération.
- *Définir l'effet Doppler.*
- *Interpréter à l'échelle microscopique les aspects énergétiques d'une variation de température (1^{ère} S).*