Pharao, l'horloge atomique de l'espace

Bac S 2015 Polynésie rattrapage (ancien programme) · Exercice 3 **5 points** **Durée conseillée 50 min**

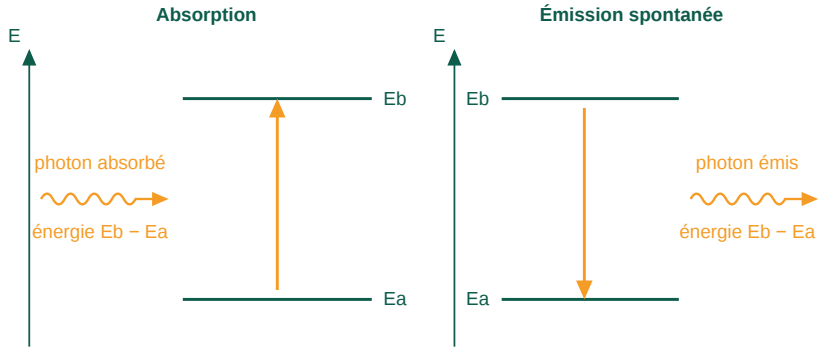
1.1.1 Illustrer à l'aide d'un diagramme de niveaux d'énergie la signification des termes « absorption » et « émission spontanée ».

Absorption : l'atome, dans l'état d'énergie E_a, capte un photon d'énergie $h\nu_0 = E_b - E_a$ et passe dans l'état d'énergie supérieure E_b.

Émission spontanée : l'atome, dans l'état excité E_b, retombe de lui-même dans l'état E_a en émettant un photon d'énergie $h\nu_0 = E_b - E_a$, dans une direction quelconque.

Flèche montante de E_a vers E_b pour l'absorption, flèche descendante de E_b vers E_a pour l'émission spontanée, avec $h\nu_0 = E_b - E_a$ dans les deux cas.

PIÈGE
Inverser le sens des flèches, ou oublier de relier l'énergie du photon à l'écart entre les deux niveaux. L'axe vertical des énergies doit être orienté vers le haut et nommé.



1.1.1 · Diagrammes de niveaux d'énergie : absorption et émission spontanée

1.1.2 Quel autre type d'émission peut-on rencontrer ? Dans quel dispositif est-il utilisé ?

Il existe aussi l'**émission stimulée** : un photon incident d'énergie $E_b - E_a$ provoque la désexcitation d'un atome excité, qui émet un second photon identique au premier (même fréquence, même direction, même phase).

Émission stimulée, utilisée dans le **laser**.

COMPRENDRE
L'émission stimulée et le fonctionnement du laser ne figurent plus au programme actuel de spécialité de Terminale. L'absorption et l'émission d'un photon par un atome, elles, restent à connaître.

1.2 La quantité de mouvement d'un photon de fréquence ν est $p = \dfrac{h\,\nu}{c}$. À quelle particularité de la lumière cette relation fait-elle référence ?

La relation associe une grandeur propre à une particule, la quantité de mouvement p, à une grandeur propre à une onde, la fréquence ν.

Avec $\lambda = \dfrac{c}{\nu}$, elle s'écrit $p = \dfrac{h}{\lambda}$: c'est la relation de de Broglie.

Elle traduit la **dualité onde-particule** de la lumière.

COMPRENDRE
La relation de de Broglie n'est plus au programme actuel de spécialité. Le modèle du photon, d'énergie $E = h\nu$, y figure toujours.

1.3.1 Le système {atome de rubidium + photon} étant isolé, utiliser la conservation de la quantité de mouvement pour retrouver l'expression de la vitesse de recul V et l'ordre de grandeur de sa valeur.

Données utiles $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}$; $m = 1{,}45 \times 10^{-25}\ \text{kg}$; $\lambda = 0{,}78\ \mu\text{m}$

Référentiel du laboratoire, supposé galiléen. Le système est isolé : sa quantité de mouvement totale se conserve, $\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}}$.

Avant l'absorption, l'atome est immobile : seul le photon compte, $p_{\text{avant}} = \dfrac{h\,\nu_0}{c}$.

Après l'absorption, le photon a disparu et l'atome, de masse m, a la vitesse V dans le sens de propagation du photon : $p_{\text{après}} = m\,V$.

En projetant sur la direction du faisceau : $m\,V = \dfrac{h\,\nu_0}{c}$, donc $V = \dfrac{h\,\nu_0}{m\,c}$.

Avec $\nu_0 = \dfrac{c}{\lambda}$: $V = \dfrac{h}{m\,\lambda}$

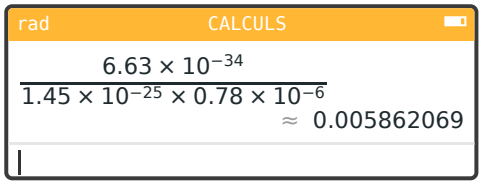
$$V = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{1{,}45 \times 10^{-25} \times 0{,}78 \times 10^{-6}} = 5{,}9 \times 10^{-3}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$V = \dfrac{h\,\nu_0}{m\,c} = 5{,}9 \times 10^{-3}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, soit environ $6\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ comme l'annonce le texte.

PIÈGE
Laisser λ en micromètres : il faut $0{,}78 \times 10^{-6}$ m. Ne pas oublier non plus que le photon n'existe plus après l'absorption.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme λ, la donnée la moins précise. La quantité de mouvement et sa conservation ne sont plus au programme actuel de spécialité.

À LA CALCULATRICE



1.3.2 Définir l'accélération de l'atome et retrouver l'ordre de grandeur de sa valeur, en admettant que la durée de l'absorption est de l'ordre de la période du cycle « absorption-désexcitation ».

Données utiles $V = 5{,}9 \times 10^{-3}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1.3.1) ; 10^8 cycles par seconde

Le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps : $\vec{a} = \dfrac{\text{d}\vec{v}}{\text{d}t}$. Sa valeur moyenne sur une durée Δt est $a = \dfrac{\Delta v}{\Delta t}$.

L'atome effectue 10^8 cycles par seconde : la période d'un cycle est $T = \dfrac{1}{10^8} = 10^{-8}\ \text{s}$.

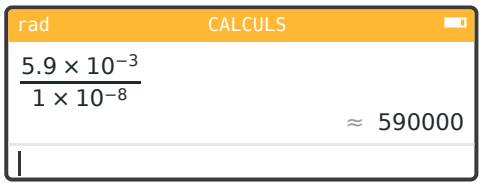
À chaque absorption, de durée $\Delta t \approx T$, la vitesse de l'atome varie de $\Delta v = V$:

$$a = \frac{V}{T} = \frac{5{,}9 \times 10^{-3}}{10^{-8}} = 5{,}9 \times 10^{5}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$a \approx 6 \times 10^{5}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, d'ordre de grandeur $10^{6}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$: c'est la valeur du texte.

COMPRENDRE
L'ordre de grandeur est la puissance de dix la plus proche : $5{,}9 \times 10^5$ est plus près de 10^6 que de 10^5.

À LA CALCULATRICE



1.4 Expliquer qualitativement pourquoi l'effet de l'émission spontanée sur la vitesse est en moyenne nul.

Chaque émission spontanée fait reculer l'atome de V, à l'opposé du photon émis. Or ce photon part dans une direction aléatoire, différente d'un cycle à l'autre.

Sur un très grand nombre d'émissions (10^8 par seconde), toutes les directions sont également représentées : les reculs successifs se compensent.

La variation de vitesse due à l'émission spontanée est nulle en moyenne ; seule l'absorption, toujours dans le même sens, agit durablement.

2.1 Expliquer qualitativement le principe physique de l'effet Doppler.

Lorsqu'un émetteur d'ondes et un récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, la fréquence de l'onde reçue diffère de la fréquence de l'onde émise.

La fréquence perçue est plus grande que la fréquence émise si émetteur et récepteur se rapprochent, plus petite s'ils s'éloignent.

PIÈGE
Parler seulement de « changement de fréquence » sans préciser le mouvement relatif de l'émetteur et du récepteur, ni le sens du décalage.

2.2 L'atome 1 se déplace vers le « laser de gauche ». Justifier pourquoi l'effet Doppler permet d'expliquer que cet atome est ralenti.

L'atome 1 se rapproche du laser de gauche : par effet Doppler, il perçoit les photons de ce laser avec une fréquence supérieure à ν. Comme ν est légèrement inférieure à ν_0, la fréquence perçue devient voisine de ν_0 : ces photons sont absorbés.

Chaque absorption communique à l'atome une vitesse de recul dans le sens de propagation du photon, donc vers la droite, à l'opposé de son mouvement.

À l'inverse, l'atome s'éloigne du laser de droite : il perçoit ses photons avec une fréquence encore plus faible que ν, plus éloignée de ν_0, et ne les absorbe presque pas.

L'atome 1 absorbe surtout les photons qui viennent à sa rencontre : sa vitesse diminue.

PIÈGE
Oublier le laser de droite : sans expliquer pourquoi ses photons ne sont pas absorbés, on ne justifie pas que l'atome est freiné plutôt que poussé.

MÉTHODE
Raisonner en trois temps : sens du décalage Doppler, comparaison de la fréquence perçue à ν_0 (absorption ou non), puis sens du recul par rapport à la vitesse.

2.3 Le schéma de la fontaine atomique fait apparaître six flèches représentant chacune un laser. Justifier la position de ces six lasers.

Une paire de lasers de même direction et de sens opposés ralentit les atomes selon une seule direction, quel que soit leur sens de déplacement.

Or l'agitation des atomes se fait dans les trois dimensions de l'espace : il faut une paire de lasers pour chacune des trois directions perpendiculaires.

Trois paires de lasers opposés, suivant trois directions perpendiculaires, soit six lasers qui freinent les atomes dans toutes les directions.

2.4 Expliquer simplement en quoi le système étudié permet effectivement de refroidir des atomes.

La température mesure l'agitation thermique : plus les atomes se déplacent vite, plus elle est élevée.

Les lasers ne chauffent pas les atomes ici : ils réduisent leur vitesse dans toutes les directions.

Diminuer la vitesse des atomes, c'est diminuer leur agitation thermique, donc abaisser la température : les atomes sont refroidis.

COMPRENDRE
À l'échelle microscopique, la température d'un gaz est liée à l'énergie cinétique moyenne de ses atomes. Des atomes presque immobiles correspondent à une température proche du zéro absolu.