

Partie Comprendre : Lois et modèles

CHAP 15-EXOS Transferts quantique d'énergie et dualité onde-particule

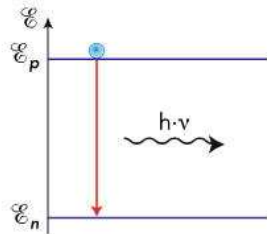
Exercices résolus p 387 à 389 N° 1 à 5

Exercices p 390 à 398 N° 11-15-18-27-28-29

+ page 402-403 exo type BAC (exo non corrigé, le corrigé vous sera envoyé par mail)

11 Utiliser un diagramme énergétique

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



1. Que représentent E_n et E_p ?

2. Que symbolise la flèche rouge ?

3. Que symbolise la flèche noire ?

4. a. Que représente l'expression $h \cdot \nu$?

b. Quelle relation existe-t-il entre $h \cdot \nu$, E_n et E_p ?

1. E_n et E_p représentent les énergies de deux niveaux d'énergie d'une entité (atome, ion ou molécule).

2. La flèche rouge indique que l'entité passe d'un niveau d'énergie à un autre niveau d'énergie. Elle représente une transition énergétique. Dans le cas du document, l'entité passe d'un niveau supérieur vers un niveau d'énergie plus faible

3. Lors de cette transition du niveau d'énergie E_p vers le niveau d'énergie E_n , un photon, représenté par la flèche noire, est émis (émission spontanée).

4 a. $h \cdot \nu$ représente l'énergie quantifiée du photon émis.

b. La relation est :

$$\Delta E = h \cdot \nu \text{ ou } : \Delta E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

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 :

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; 1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J};$$

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

1. a. Calcul de la longueur d'onde

On a :

$$\Delta E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = h \cdot \frac{c}{\Delta E} = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,24 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 124 \text{ nm}$$

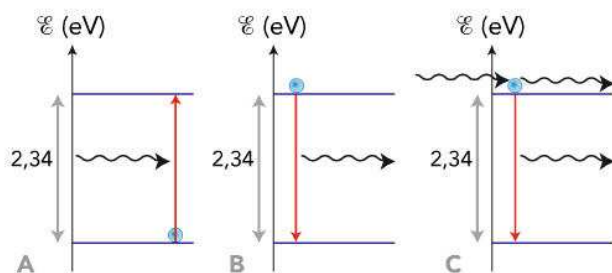
b. Cette radiation appartient au domaine des ultraviolets (caractérisé dans l'air par une longueur d'onde inférieure à 400 nm).

2. Il s'agit d'une transition entre niveaux d'énergie électronique. (cf cours)

18 Absorption ou émission

COMPÉTENCES Exploiter un graphique; raisonner.

On a représenté trois transitions électroniques :



1. Quel(s) schéma(s) représente(nt) :

- a. une absorption ?
- b. une émission stimulée ?
- c. une émission spontanée ?

2. Dans le cas de l'émission stimulée, calculer la longueur d'onde du photon incident.

3. Quelles sont les caractéristiques du photon émis par émission stimulée ?

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

- Le schéma A représente une absorption.
- Le schéma C représente une émission stimulée.
- Le schéma B représente une émission spontanée.

2. Calcul de la longueur d'onde

On a :

$$\Delta E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = h \cdot \frac{c}{\Delta E} = 6,62 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{2,34 \cdot 6 \cdot 10^{-19}} = 5,31 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 531 \text{ nm}$$

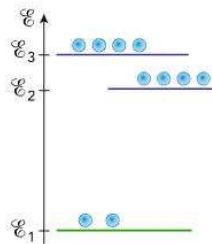
- Le photon émis par émission stimulée a la même énergie, la même direction, le même sens de propagation et il est en phase avec le photon incident.

27 Valse laser à trois ou quatre temps

COMPÉTENCES Mobiliser ses connaissances; extraire des informations; faire un schéma.

Le fonctionnement d'un laser à trois niveaux peut être illustré par le diagramme énergétique ci-contre où la transition du niveau \mathcal{E}_3 au niveau \mathcal{E}_2 est spontanée et rapide.

- Repérer les états fondamentaux et excités de cette population d'atomes.



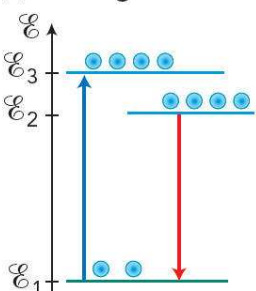
- L'état fondamental (de plus basse énergie) est l'état (1), les états excités sont les états (2) et (3).

2. a. Le pompage optique permet de réaliser la transition

(1) → (3);

l'émission stimulée correspond à la transition (2) → (1).

- On représente la transition (1) → (3) en bleu et la transition (2) → (1) en rouge :



- À quelles transitions sont associées l'étape de pompage optique pour l'inversion de population et l'étape d'émission stimulée ?

- Recopier le schéma et représenter ces transitions par des flèches.

- L'inconvénient de ce type de laser est l'entretien permanent de l'inversion de population : un grand nombre d'atomes doit être excité afin que le niveau (2) reste plus peuplé que le niveau (1). Il peut y avoir surchauffe lors du fonctionnement continu d'un tel laser.

Dans un laser à quatre niveaux, l'émission stimulée ramène les atomes dans un état intermédiaire (1'), initialement non peuplé.

Puis spontanément et rapidement a lieu une transition (1') → (1) si bien que ce niveau (1') reste quasiment toujours non peuplé. Ainsi, toute population de l'état (2) correspondra à une inversion de population de l'état (1') sans que l'on soit en permanence obligé de dépeupler le niveau (1).

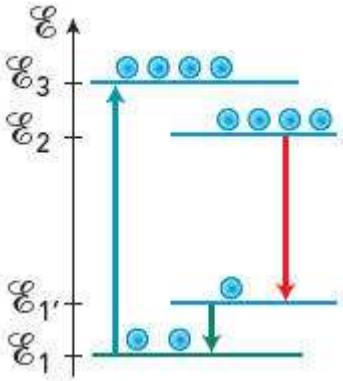
Représenter le diagramme énergétique correspondant à ce type de laser.

- Symboliser par des flèches la transition laser et la transition permettant de maintenir l'inversion de population autrement que par pompage optique.

- Quel avantage offre ce fonctionnement à quatre niveaux par rapport au fonctionnement à trois niveaux ?

3. et 4. Le niveau (1') est intermédiaire des niveaux (1) et (2). Il est peu peuplé. La transition laser, (2) → (1'), est représentée à nouveau en rouge.

Celle maintenant l'inversion de population autrement que par pompage, (1') → (1), est représentée en vert.



5. L'excitation permettant le pompage, (1) → (3), peut se faire de manière intermittente (par impulsions), ce qui laisse du temps au système de se refroidir en cas de surchauffe.

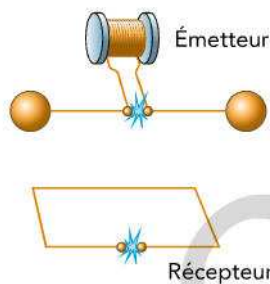
28 Effet photoélectrique



COMPÉTENCES Extraire des informations ; mobiliser ses connaissances ; calculer.

En 1887, le physicien allemand H. HERTZ met au point un oscillateur hautes fréquences. Grâce à des étincelles produites entre deux petites sphères en laiton très proches, le dispositif émet des ondes électromagnétiques.

H. Hertz réceptionne à quelques mètres de là ces ondes à l'aide d'un fil conducteur en forme de boucle ou de rectangle ouvert avec également deux boules en laiton à chacune de ses extrémités. Il observe des étincelles de faible intensité lumineuse entre les boules de laiton du récepteur. Cette expérience couronne la théorie de l'Écossais J. C. MAXWELL établie en 1865 sur le comportement ondulatoire des ondes électromagnétiques. Afin de mieux voir les étincelles au niveau du récepteur, H. HERTZ place le récepteur dans l'obscurité. Il constate alors que l'intensité lumineuse des étincelles est encore plus faible. Il en déduit que la lumière émise par les étincelles de l'émetteur, plus précisément les rayonnements ultraviolets, a un impact sur les étincelles du récepteur. H. HERTZ vient de mettre en évidence l'effet photoélectrique.



Dans les années qui suivent l'expérience de H. HERTZ, différents travaux consistent à éclairer un métal par un rayonnement ultraviolet. On obtient les résultats suivants :

- les rayonnements ultraviolets arrachent des particules négatives que l'on appellera des électrons ;
- le nombre d'électrons arrachés est proportionnel à l'intensité lumineuse du rayonnement ;
- l'énergie cinétique des électrons arrachés est indépendante de l'intensité lumineuse du rayonnement ;
- leur énergie cinétique augmente lorsque la fréquence de la lumière incidente augmente.

En 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique, A. EINSTEIN propose un aspect particulière pour la lumière.

Chaque particule possède une énergie $\mathcal{E} = h \cdot \nu$. Cette particule sera appelée photon quelques années plus tard. *A. EINSTEIN explique que l'énergie du photon sert en partie à arracher l'électron de l'atome, le reste étant emporté par l'électron sous forme d'énergie cinétique.* Ce résultat sera démontré expérimentalement par le physicien américain R. MILLIKAN (1868-1953) onze ans plus tard et la communauté scientifique mettra quelques années de plus à accepter la notion d'aspect particulière de la lumière. En 1921, A. EINSTEIN obtiendra le prix Nobel de physique pour cette découverte.

1. En quoi la formule $\mathcal{E} = h \cdot \nu$ illustre les aspects ondulatoire et particulaire de la lumière ?
2. Traduire, par une formule mathématique, la phrase écrite en italique. On appellera \mathcal{E}_1 l'énergie nécessaire pour arracher un électron. Pour un métal donné, cette énergie est constante.
3. Pourquoi l'énergie cinétique d'un électron augmente-t-elle lorsque la fréquence de la lumière incidente augmente ?
4. L'énergie \mathcal{E}_1 permettant d'arracher un électron d'un atome de cuivre vaut $\mathcal{E}_1(\text{Cu}) = 4,70 \text{ eV}$.

Quelle est la longueur d'onde de la radiation permettant d'arracher un électron d'un atome de cuivre avec une valeur de vitesse nulle ?

Mettre en relation ce résultat et les observations expérimentales décrites dans le texte.

5. On observe que l'effet photoélectrique ne se produit pas pour des radiations incidentes situées dans le visible et dans les infrarouges quelles que soient l'intensité du rayonnement et la durée d'exposition. Pourquoi ce résultat met-il en défaut la théorie ondulatoire ?

1. À la fréquence ν , on associe l'aspect ondulatoire de la lumière.

À une valeur précise et quantifiée de l'énergie E , on associe l'aspect particulaire de la lumière.

2. Relation :

$$E = E_1 + E_c.$$

ou E_c désigne l'énergie cinétique de l'électron.

3. Si la fréquence de la lumière incidente, c'est-à-dire la fréquence associée aux photons qui la constituent, augmente, alors l'énergie de chaque photon $E = h \cdot \nu$ augmente.

L'énergie E_1 nécessaire pour arracher un électron d'un atome étant constante (d'après l'énoncé), l'énergie cinétique des électrons arrachés des atomes augmente.

4. Calcul de λ .

On a

$$E = E_{1(\text{Cu})} + E_c$$

$$E = E_{1(\text{Cu})} + 0$$

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = E_{1(\text{Cu})}$$

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_1} = \frac{6,64 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{4,70 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,65 \cdot 10^{-7} \text{ m} = \mathbf{265 \text{ nm}}$$

Un tel résultat confirme qu'un rayonnement ultraviolet (la longueur d'onde dans l'air est $\lambda < 400 \text{ nm}$) permet d'observer l'effet photoélectrique.

5. La théorie ondulatoire prévoit que des rayonnements, en augmentant leur intensité et/ou la durée d'exposition, vont apporter l'énergie nécessaire pour arracher un électron, ($E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$) même si un rayonnement visible est moins énergétique qu'un rayonnement UV. Le résultat expérimental ne le confirme pas.

Le texte ci-dessous est extrait d'une revue scientifique.

N'en déplaise aux « mordus » de la guerre des étoiles, le laser n'est pas seulement une arme redoutable qui brûle tout sur son passage : il peut aussi jouer le rôle de simple refroidisseur d'atomes. L'immense énergie développée par un faisceau laser va empêcher les atomes de vibrer à leur rythme propre... Un second faisceau laser, qui fait face au premier, vient figer définitivement les atomes, pris entre les deux bras de lumière, comme s'ils étaient bloqués entre deux murs. Ce dispositif de faisceaux lasers croisés est monté dans les trois directions spatiales : le groupe d'atomes cible se trouve donc à l'intersection de six faisceaux lasers. Les voilà coincés dans toutes les directions : ils ne peuvent plus ni s'échapper ni vibrer ! Ils deviennent lents, c'est-à-dire froids : les scientifiques appellent cette boule d'atomes refroidis une « mélasse optique ».

La description est cependant quelque peu réductionniste au regard de ce qui se passe « réellement » à l'échelle atomique, car, entre le faisceau laser et l'atome, un incessant échange d'énergie s'instaure. L'atome absorbe un photon du laser, ce qui le freine. Après un laps de temps infime, il émet à son tour un autre photon, ce qui le fait « reculer », à l'image d'une arme à feu qui vient de tirer son projectile. C'est ce qu'on appelle l'effet de recul.

Pour qu'il puisse être absorbé, le photon doit être « au goût » de l'atome, car tous les photons n'ont pas la même « saveur » : certains sont rouges, d'autres bleus, jaunes, etc. Leur couleur dépend de leur énergie. Plus le photon est énergétique, plus sa couleur tendra vers l'ultra-violet. Ainsi, pour un type d'atomes (par exemple le césium ou l'hélium), il faudra utiliser un laser d'une couleur bien déterminée pour que les photons puissent être absorbés.

Piégée entre six rayons lasers, la mélasse optique voit sa température tomber à un millième de degré au dessus du zéro absolu (qui se situe à $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$). Les atomes n'en continuent pas moins de vibrer quelque peu ! En 1988, une équipe de l'ENS, notamment composée de Claude COHEN-TANNOUJDI et d'Alain ASPECT, triompha du défi en faisant passer la température d'une mélasse optique dans le domaine des millièmes de degré au-dessus du zéro absolu.

Et, en juin 1995, l'équipe d'Éric CORNELL et Carl WIEMAN franchit un nouveau pas : elle atteint 20 milliardièmes de degré au-dessus du zéro absolu.

Or, à cette température, les atomes ont tendance à abandonner leurs oripeaux de matière pour devenir des ondes comme la lumière !

1. Expliquer la phrase « plus le photon est énergétique, plus sa couleur tend vers l'ultraviolet ».

2. Soient \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 , etc. les niveaux d'énergie de l'atome « à refroidir ».

a. Quelle relation doit vérifier la longueur d'onde λ d'un photon pour qu'il soit « au goût » de l'atome et donc absorbé ?

b. Quelle propriété du laser est mise en avant dans la phrase : « il faudra utiliser un laser d'une couleur bien déterminée » ?

c. Quelle propriété du laser est nécessaire pour piéger les atomes au milieu des six faisceaux lasers ?

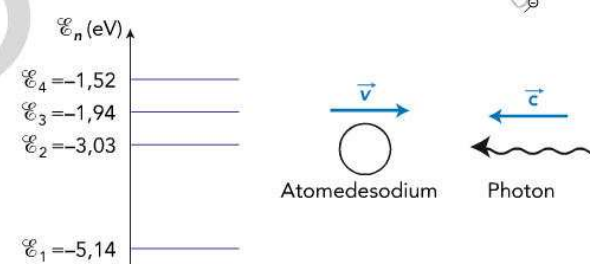
3. À une température proche du zéro absolu, l'aspect ondulatoire de l'atome prédomine sur son aspect particulaire. La lumière possède aussi ces deux aspects.

Comment, expérimentalement, mettre en évidence chacun de ces deux aspects ?

4. Quelques niveaux d'énergie de l'atome de sodium sont représentés sur le diagramme ci-contre.

Un jet d'atomes de sodium, dans l'état fondamental \mathcal{E}_1 , se déplaçant à la vitesse de valeur $v = 3,0 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ est stoppé par un faisceau laser à la suite de plusieurs chocs successifs.

a. Les photons jaunes émis par le laser utilisé ont pour longueur d'onde $\lambda = 589 \text{ nm}$ et percutent les atomes de sodium.



Pourquoi peut-on dire que ces photons sont « au goût » de l'atome ?

Quelle est l'énergie d'un atome de sodium juste après l'absorption d'un photon ?

b. La valeur de la vitesse de l'atome est alors diminuée de $\frac{h}{\lambda \cdot m}$, où m représente la masse de l'atome de sodium.

Vérifier par une analyse dimensionnelle que cette expression a la dimension d'une vitesse (voir **fiche n° 5**, p. 588).

c. Calculer le nombre de chocs identiques que doit subir l'atome pour s'arrêter.

d. Pourquoi ne peut-on pas utiliser un laser bleu (laser émettant une lumière de longueur d'onde 488 nm) pour stopper le jet d'atomes de sodium ?

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

$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$; masse d'un atome de sodium : $m = 3,82 \times 10^{-26} \text{ kg}$.

1. Le quantum d'énergie d'un photon s'exprime par :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$= h \cdot \frac{c}{E}$$

Si E augmente, λ diminue,

En partant d'une radiation IR ou visible, la couleur tend vers le violet, voire l'ultraviolet.

2. a. Relation :

$$|E_1 - E_2| = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

b. Il s'agit de la propriété de monochromaticité.

c. Les six lasers doivent atteindre l'atome cible. Cela est possible grâce à la directivité d'un faisceau laser.

3. L'aspect ondulatoire de la lumière est mis en évidence par l'observation de figures d'interférences ou de diffraction.

L'aspect particulaire de la lumière est mis en évidence par la quantification de l'énergie ou par l'observation de l'effet photoélectrique.

4. a. Calcul de ΔE pour le sodium :

$$|\Delta E| = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$|\Delta E| = 6,64 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{589 \cdot 10^{-9}} = 3,38 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \frac{3,38 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,11 \text{ eV}$$

- Trouvons si $|\Delta E|$ existe dans le graphique :

Pour le passage de E_1 à E_2 :

$$|\Delta E| = |E_1 - E_2| = |-5,14 - (-3,03)| = 2,11 \text{ eV}$$

Bingo !!

Cette énergie correspond à l'écart énergétique entre l'état fondamental de l'atome de sodium et le premier état excité. Un tel photon peut être absorbé par cet atome. Ces photons sont donc « au goût de l'atome ».

- Energie de l'atome :

Il est dans l'état E_2 donc -3,03 eV

b. Analyse dimensionnelle.

$$\left[\frac{h}{\lambda.m}\right] = \text{m.s}^{-1} ?$$

$$\left[\frac{h}{\lambda.m}\right] = \frac{[h]}{[\lambda].[m]} = \frac{[h]}{\text{m.kg}}$$

or

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

(relation de Broglie)

$$[p] = \frac{[h]}{[\lambda]}$$

$$[p].[\lambda] = [h]$$

$$\text{kg.m.s}^{-1} . \text{m} = [h]$$

D'où :

$$\left[\frac{h}{\lambda.m}\right] = \frac{[h]}{\text{m.kg}} = \frac{\text{kg.m.s}^{-1} . \text{m}}{\text{m.kg}} = \text{m.s}^{-1}$$

CQFD

c. Calcul du nombre de chocs :Au départ la vitesse est de $v = 3.10^3 \text{ m.s}^{-1}$ 1 choc fait diminuer la vitesse de $\frac{h}{\lambda.m}$

N choc font diminuer la vitesse de v

$$N = \frac{v}{\frac{h}{\lambda.m}} = \frac{v.\lambda.m}{h}$$

$$\frac{3.10^3 . 589.10^{-9} . 3,82.10^{-26}}{6,64.10^{-34}} \approx \mathbf{1.10^5 \text{ chocs}}$$

L'atome devra subir environ 100 000 collisions pour être stoppé

d. Calcul de ΔE pour $\lambda = 488.10^{-9} \text{ m}$:

$$|\Delta E| = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$|\Delta E| = 6,64.10^{-34} \cdot \frac{3.10^8}{488.10^{-9} . 1,6.10^{-19}} = \mathbf{2,55 \text{ eV}}$$

- Trouvons si $|\Delta E|$ existe dans le graphique :**Pour le passage de E_1 à E_2 :**

$$|\Delta E| = |E_1 - E_2| = |-5,14 - (-3,03)| = \mathbf{2,11 \text{ eV}}$$

non**Pour le passage de E_1 à E_3 :**

$$|\Delta E| = |E_1 - E_3| = |-5,14 - (-1,94)| = \mathbf{3,20 \text{ eV}}$$

non

Pour le passage de E_1 à E_4 :

$$|\Delta E| = |E_1 - E_4| = |-5,14 - (-1,52)| = 3,62 \text{ eV}$$

non

2,55 eV ne correspond à aucun écart énergétique pouvant être lu sur le diagramme énergétique de l'atome de sodium. Un tel photon ne pourra pas être absorbé par l'atome de sodium, il n'est pas « au goût de l'atome ».

2 Refroidissement d'atomes par laser (p. 402-403)

1. a. Le refroidissement de molécules d'eau chaude par de l'eau froide est dû à des collisions. Les molécules d'eau chaude, plus agitées que celles de l'eau froide, leur communiquent de l'agitation tandis qu'elles sont ralenties à chaque collision. Le système évolue ainsi jusqu'à ce que toutes les molécules aient la même énergie cinétique moyenne, donc la même température. Le corps le plus froid s'est réchauffé, mais le plus chaud s'est refroidi : il y a eu échange d'énergie thermique contrairement à ce qui se passe lors du processus de refroidissement des atomes par les photons. Il y a cependant, dans les deux cas, transfert de quantité de mouvement (entre molécules d'eau, d'une part, et entre un atome et un photon, d'autre part).

b. On ne peut pas atteindre le zéro absolu avec la technique de refroidissement des atomes par laser, car il est impossible d'immobiliser complètement les atomes. La désexcitation spontanée (par émission de photon) de l'atome fait qu'il subit un effet de recul dans une direction aléatoire. Il est donc toujours en mouvement. Or, le zéro absolu correspond à l'absence totale de mouvement.

2. a. Un photon peut être modélisé comme une particule associée aux ondes lumineuses. C'est la dualité onde-particule : la lumière peut être considérée comme l'une ou l'autre. C'est la raison pour laquelle on associe une fréquence au photon : c'est la fréquence de l'onde associée.

b. D'après la relation de de Broglie, $p = \frac{h}{\lambda}$.

Or, $\lambda = \frac{c}{f}$, donc $p = \frac{h \cdot f}{c}$.

c. Par application numérique de la relation de de Broglie :

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{780 \times 10^{-9}} = 8,50 \times 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

d. La lumière laser est très directive, le faisceau laser permet de privilégier une direction précise. La lumière laser est aussi monochromatique ; tous les photons émis par le laser ont la même longueur d'onde dans le vide.

e. Sur le schéma de l'article scientifique, c'est le laser de gauche (le n° 2), celui vers lequel se dirige l'atome, qui permet de ralentir l'atome.

3. a. Pour cet atome non relativiste ($v \ll c$), la valeur de sa quantité de mouvement s'exprime par $p = m \cdot v$, soit $p = 1,44 \times 10^{-25} \times 150 = 2,16 \times 10^{-23} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

b. L'atome est ralenti en absorbant les photons du laser vers lequel il se dirige. La longueur d'onde des photons qu'il perçoit, $\lambda_{\text{perçue}}$, doit être égale à $\lambda_0 = 780 \text{ nm}$.

Si l'atome s'approche du laser émettant des photons de fréquence, la fréquence qu'il perçoit est donnée

$$\text{par } f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \cdot \frac{\sqrt{c+v}}{\sqrt{c-v}}$$

$$\text{d'où : } f_{\text{émise}} = f_{\text{perçue}} \cdot \frac{\sqrt{c-v}}{\sqrt{c+v}}$$

$$\text{Or, } \frac{\sqrt{c-v}}{\sqrt{c+v}} < 1 \text{ donc } f_{\text{émise}} < f_{\text{perçue}}.$$

Cette information est conforme à l'article scientifique : « On utilise deux faisceaux lasers de même direction, de sens opposés et de même fréquence f fixée précisément à une valeur légèrement inférieure à la fréquence f_0 d'absorption/émission de l'atome ».

Comme $f = \frac{c}{\lambda}$, on a $\lambda_{\text{émise}} > \lambda_{\text{perçue}}$. Ainsi, $\lambda_{\text{émise}} > \lambda_0$.

c. Lorsque l'atome émet un photon, il subit un mouvement de recul, comme une arme à feu qui lance un projectile. L'atome est donc freiné.

4. a. La somme $(c+v)$ a la dimension d'une valeur de vitesse, $\frac{c+v}{c}$ est donc sans dimension.

L'expression $f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \cdot \frac{c+v}{c}$ est donc homogène.

b. En utilisant la relation simplifiée proposée :

$$f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \times \frac{3 \times 10^8 + 150}{3 \times 10^8} = f_{\text{émise}}$$

Si l'atome se rapproche de la source, on a, d'après le

$$\text{document 5 : } f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \cdot \frac{\sqrt{c+v}}{\sqrt{c-v}}$$

$$f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \times \sqrt{\frac{3 \times 10^8 + 150}{3 \times 10^8 - 150}} = f_{\text{émise}}$$

Les deux expressions conduisent au même résultat.

5. a. La valeur de la vitesse de la lumière dans le vide n'est pas donnée dans un référentiel particulier, car elle est la même dans tous les référentiels galiléens.

b. À partir de la relation $T_{\text{perçue}} = T_{\text{émise}} \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right)$, on déduit :

$$\begin{aligned} T_{\text{perçue}} &= T_{\text{émise}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v}{c}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v}{c}}} \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right) \\ &= T_{\text{émise}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v}{c}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v}{c}}} \cdot \left(\sqrt{1 - \frac{v}{c}}\right)^2 \\ &= T_{\text{émise}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{v}{c}}}{\sqrt{1 + \frac{v}{c}}} \end{aligned}$$

$$\text{soit } T_{\text{perçue}} = T_{\text{émise}} \cdot \frac{\sqrt{c-v}}{\sqrt{c+v}}$$

$$\text{et } \frac{1}{f_{\text{perçue}}} = \frac{1}{f_{\text{émise}}} \cdot \frac{\sqrt{c-v}}{\sqrt{c+v}}$$

$$f_{\text{perçue}} = f_{\text{émise}} \cdot \frac{\sqrt{c+v}}{\sqrt{c-v}}$$

On retrouve bien la relation du document 5 lorsqu'un atome s'approche de la source laser.