

## 17. Connaître la directivité d'un faisceau laser

- a. Soit  $L$  la distance et  $D$  le diamètre de la tache. L'angle  $\alpha$  étant petit, on peut faire l'approximation  $\tan \alpha = \alpha$ . On a donc:  $D = L\alpha = 200 \times 2,0 \times 10^{-3} = 0,40 \text{ m}$
- b. Le diamètre du faisceau à la sortie du laser est négligeable devant le diamètre de la tache. Ce dernier est connu au cm près, alors que le diamètre du faisceau ne mesure que 1 mm. Si on avait tenu compte du diamètre du faisceau, le résultat aurait été le même.

## 18. Utiliser une propriété du laser

- a. Puissance lors d'une impulsion:

$$\mathcal{P} = \frac{\mathcal{E}}{\Delta t} = \frac{3,0 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-15}} = 30 \times 10^6 \text{ W} = 30 \text{ MW}$$

La puissance moyenne est 100 000 fois plus faible que la puissance lors d'une impulsion si on néglige la durée d'une impulsion devant la durée qui sépare deux impulsions consécutives (simplification légitime puisque l'énergie n'est donnée qu'avec deux chiffres significatifs):  $\mathcal{P}_{\text{moy}} = 300 \text{ W}$ .

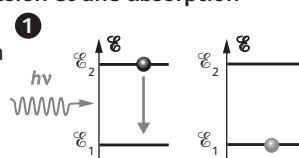
b. La puissance lors d'une impulsion est considérable. Le faisceau laser étant très fin, l'énergie du laser est transférée sous forme thermique à une toute petite surface de métal et dans une durée trop petite pour que cette énergie puisse, par conduction, être répartie sur un volume plus grand. Le métal est sublimé instantanément.

## EXERCICES Appliquer le cours

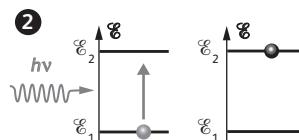
### I Absorption et émissions quantiques (§1 du cours)

#### 15. Reconnaître une émission et une absorption

- a. Le schéma du bas ② représente une absorption (l'atome est initialement dans l'état fondamental) et le schéma du haut ① une émission (atome initialement dans l'état excité).



- b. Voir schéma ci-contre (flèches).

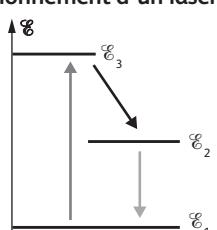


- c. Il s'agit d'une émission stimulée, l'atome est désexcité par le photon incident.

### I Application au laser (§2 du cours)

#### 16. Connaître le principe de fonctionnement d'un laser

- a. Le pompage permet de faire passer les atomes du niveau fondamental au niveau excité  $E_3$  (flèche à gauche sur le schéma). L'émission stimulée qui constitue la lumière émise par le laser correspond à la transition du niveau  $E_2$  vers le niveau  $E_1$  (flèche à droite).



- b. Il peut y avoir émission spontanée mais elle est peu probable:

- entre les niveaux  $E_3$  et  $E_1$  car le niveau  $E_3$  se désexcite très vite vers le niveau  $E_2$  pour réaliser l'inversion de population ;
- entre les niveaux  $E_2$  et  $E_1$  car le niveau  $E_2$  a été choisi de telle sorte que sa durée de vie soit grande (durée de vie = temps moyen de désexcitation spontanée).

### I Domaine spectral et transitions quantiques (§3 du cours)

#### 19. Associer une transition à un domaine spectral

L'énergie du photon est liée à la fréquence de la radiation associée par la relation  $|\Delta E| = h\nu$ .

$$\nu = \frac{|\Delta E|}{h} = \frac{5,67 \times 10^{-19}}{6,63 \times 10^{-34}} = 8,55 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3,00 \times 10^8}{8,55 \times 10^{14}} = 3,51 \times 10^{-7} \text{ m ou } 351 \text{ nm.}$$

Il s'agit d'une radiation ultraviolette.

#### 20. Associer un domaine spectral à une énergie

- a. La longueur d'onde est de l'ordre du micromètre. Elle appartient au domaine des infrarouges.

- b. Calculons l'énergie transportée par le photon associé à cette radiation :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{1,6 \times 10^{-6}} = 1,24 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Convertissons cette énergie en eV :

$$E = \frac{1,24 \times 10^{-19}}{1,60 \times 10^{-19}} = 0,78 \text{ eV}$$

Cette énergie permet des transitions entre des niveaux d'énergie rotationnelle et entre des niveaux d'énergie vibrationnelle mais elle est insuffisante pour permettre des transitions électroniques.

## 21. Exercice résolu dans le manuel

### 22 Application de l'exercice résolu

1. Calculons l'énergie du photon émis lors de la transition :

$$\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{330,3 \times 10^{-9} \times 1,60 \times 10^{-19}} = 3,76 \text{ eV}$$

L'atome a perdu cette énergie pour revenir à l'état fondamental  $\mathcal{E}_n = 3,76 = -5,14$   $\mathcal{E}_n = -1,38 \text{ eV}$  (niveau 5). 2. Pour désexciter l'atome dans le premier état excité, il faut un photon d'énergie  $\mathcal{E} = 5,14 - 3,03 = 2,11 \text{ eV}$  (le photon doit avoir l'énergie qui correspond à la transition entre les deux niveaux).

$$\mathcal{E} = 2,11 \times 1,60 \times 10^{-19} = 3,38 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

3. Fréquence de la radiation associée :

$$\nu = \frac{\mathcal{E}}{h} = \frac{3,38 \times 10^{-19}}{6,63 \times 10^{-34}} = 5,09 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

## 23. Exercice résolu dans le manuel

### 24. Application de l'exercice résolu

1.  $\lambda = 650 \text{ nm}$  correspond à une radiation rouge.

2. Calculons l'énergie en joule :

$$\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{650 \times 10^{-9}} = 3,06 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

3. Chaque seconde, le faisceau transporte une énergie

$$\mathcal{E}_f = \mathcal{P} \times \Delta t = 1,00 \times 10^{-3} \times 1,0 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ J.}$$

Il y a donc chaque seconde émission de :

$$n = \frac{1,0 \times 10^{-3}}{3,06 \times 10^{-19}} = 3,3 \times 10^{15} \text{ photons.}$$

## 25. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : S'approprier, analyser, réaliser.

a. Le domaine des ondes électromagnétiques infrarouges s'étend de  $800 \text{ nm}$  à  $1 \text{ mm}$  ( $8 \times 10^{-7} \text{ m}$  –  $10^{-3} \text{ m}$ )

Le nombre d'onde est l'inverse de la longueur d'onde. Les longueurs d'onde de la bande  $4\ 000 \text{ cm}^{-1}$  –  $2\ 000 \text{ cm}^{-1}$

sont donc comprises entre  $\frac{1}{4\ 000} \text{ cm}$  et  $\frac{1}{2\ 000} \text{ cm}$  soit  $2,5 \times 10^{-4} \text{ m}$  et  $5 \times 10^{-4} \text{ m}$ . Elles sont donc bien situées dans le domaine infrarouge.

b. Les échanges d'énergie entre matière et rayonnement se font par quanta.

Un rayonnement permet aux atomes de la molécule d'hexan-1-ol de changer de niveau d'énergie électronique si les photons associés à ce rayonnement transportent une énergie suffisante. Le photon qui transporte la plus grande énergie dans le domaine considéré est celui associé à la radiation de plus petite longueur d'onde. Calculons l'énergie transportée :

$$\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{2,5 \times 10^{-4}} = 8,0 \times 10^{-22} \text{ J}$$

soit  $5,0 \times 10^{-3} \text{ eV.}$

L'énergie nécessaire pour réaliser des transitions électroniques est de l'ordre de l'eV. Dans le domaine considéré, le rayonnement infrarouge ne permet pas de changer de niveau électronique.

c. Une molécule possède également de l'énergie rotationnelle et de l'énergie vibrationnelle dont les ordres de grandeurs sont  $10^{-1} \text{ eV}$  pour l'énergie vibrationnelle et  $10^{-3} \text{ eV}$  pour l'énergie rotationnelle. Dans le domaine représenté sur le schéma, seuls des changements de niveaux rotationnels sont possibles. Si on s'intéresse à l'ensemble du domaine IR, des transitions entre niveaux vibrationnels sont également possibles.

d. La transition entre deux niveaux rotationnels est environ 1 000 fois plus faible que la transition entre deux niveaux vibrationnels. Il y a donc un très grand nombre de niveaux d'énergie rotationnelle pour chaque niveau d'énergie vibrationnelle. Lors du passage d'un niveau d'énergie vibrationnelle à un autre, il y a un très grand nombre de transitions possibles. Les raies d'absorption ont des fréquences trop voisines pour pouvoir être discernées. On observe des bandes d'absorption.

## 26. Laser médical

> COMPÉTENCES : Connaître, analyser, réaliser.

a. Cette radiation appartient au domaine des infrarouges.

b. Le faisceau est de couleur rouge.

c. Pour que le chirurgien puisse balayer la tumeur avec le faisceau laser, il faut que Celui-ci soit visible. Le laser utilisé étant dans le domaine de l'infrarouge, la lumière émise n'est pas visible c'est pourquoi on utilise un laser auxiliaire.

d. Chaque photon transporte une énergie

$$|\Delta \mathcal{E}| = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{10,6 \times 10^{-6}} = 1,88 \times 10^{-20} \text{ J.}$$

Chaque seconde, le faisceau transporte une énergie  $\mathcal{E} = 2,7 \times 10^{21} \times 1,88 \times 10^{-20} = 51 \text{ J.}$

Il a donc une puissance de 51 W.

## 27. Célérité de la lumière

> COMPÉTENCES : Analyser, réaliser.

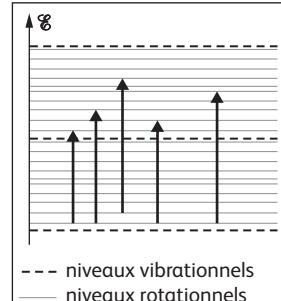
$$\lambda = \frac{c}{v}$$

$$c = \lambda v = 3,392231400 \times 10^{-6} \times 88376181,627 \times 10^6 = 299\ 792\ 458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

## 28. In English Please

> COMPÉTENCES : Connaître, analyser, réaliser, communiquer.

Le phénomène observé est dû à la grande cohérence de la lumière émise par le laser. Les ondes diffusées dans toutes les directions par la surface du verre dépoli interfèrent entre elles. En certains points de la surface, ces interférences sont destructives ce qui fait apparaître de petites taches noires.



## 29. ★ Photons émis par un laser

> COMPÉTENCES : Analyser, réaliser.

Un laser de 2mW rayonne chaque seconde une énergie  $\mathcal{E} = 2\text{mJ}$  ( $\mathcal{E} = \mathcal{P} \Delta t$ ).

Calculons l'énergie transportée par un photon.

$$|\Delta\mathcal{E}| = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{632,8 \times 10^{-9}} = 3,14 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

Nombre de photons émis chaque seconde :

$$n = \frac{\mathcal{E}}{|\Delta\mathcal{E}|} = \frac{2 \times 10^{-3}}{3,14 \times 10^{-19}} = 6 \times 10^{15}.$$

L'ordre de grandeur du nombre de photons est donc  $10^{16}$ .

## 30. ★ S'auto-évaluer

Énergie transportée dans une impulsion :

$$\mathcal{E}_{\text{imp}} = \mathcal{P} \Delta t = 30 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-15} = 3,0 \times 10^{-6} \text{ J.}$$

Énergie d'un photon :

$$\mathcal{E}_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{532 \times 10^{-9}} = 3,74 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

Nombre de photons par impulsion :

$$N = \frac{\mathcal{E}_{\text{imp}}}{\mathcal{E}_{\text{photon}}} = \frac{3,0 \times 10^{-6}}{3,74 \times 10^{-19}} = 8,0 \times 10^{12} \text{ photons.}$$

Distance parcourue par la lumière en 100 fs :

$$L = v \times \Delta t = 3,00 \times 10^8 \times 100 \times 10^{-15}$$

$$= 3,00 \times 10^{-5} \text{ m} = 3,00 \times 10^{-2} \text{ mm.}$$

La section du faisceau étant de  $1,0 \text{ mm}^2$ , les photons sont contenus dans un volume :

$$V = 1,0 \times 3,00 \times 10^{-2} = 3,0 \times 10^{-2} \text{ mm}^3.$$

On en déduit le nombre de photons par  $\text{mm}^3$  à la sortie du laser :

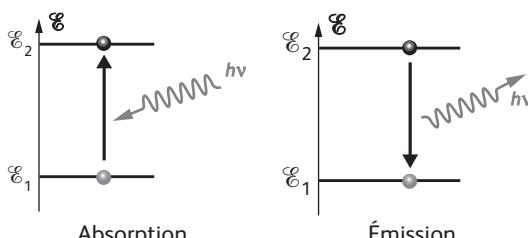
$$n = \frac{N}{V} = \frac{8,0 \times 10^{12}}{3,0 \times 10^{-2}} = 2,7 \times 10^{14} \text{ photons/mm}^3$$

## 31. ★ Variation d'énergie d'un atome

> COMPÉTENCES : Connaître, analyser, réaliser.

a. L'atome passe du niveau fondamental  $\mathcal{E}_1$  qui constitue donc l'état initial au niveau excité  $\mathcal{E}_2$  qui constitue l'état final.

On a donc  $|\Delta\mathcal{E}| = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 > 0$  car  $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$ .



b. L'énergie du photon a pour expression  $\mathcal{E}_{\text{photon}} = h\nu$ . C'est une grandeur toujours positive. D'autre part, il n'y a absorption du photon que si la transition est possible c'est-à-dire si l'énergie apportée par le photon correspond au passage du niveau fondamental au niveau excité.

On a donc  $|\Delta\mathcal{E}| = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 = h\nu$ .

c. L'énergie du photon est la même. Elle est toujours positive et a comme valeur  $\mathcal{E}_{\text{photon}} = h\nu$ .

d. Pour l'émission, l'état excité  $\mathcal{E}_2$  est l'état initial et l'état fondamental  $\mathcal{E}_1$  est l'état final.

On a donc  $|\Delta\mathcal{E}| = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 < 0$  car  $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$ .

e. Puisque l'énergie du photon  $h\nu$  est toujours positive, on peut écrire :  $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = -h\nu$  ou encore  $-\Delta\mathcal{E} = h\nu$ .

La relation  $|\Delta\mathcal{E}| = h\nu$  est donc vraie à l'émission comme à l'absorption d'un photon.

## 32. ★★ Ralentissement d'un jet d'atomes

> COMPÉTENCES : Connaître, s'approprier, analyser, réaliser.

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

$$|\Delta v| = \frac{3,38 \times 10^{-19}}{3,82 \times 10^{-26} \times 3,00 \times 10^8} = 2,95 \times 10^{-2} \text{ m·s}^{-1}.$$

b. Cette diminution est extrêmement faible. Elle correspond à  $3/100\ 000 \times \left(\frac{2,95 \times 10^{-2}}{1,00 \times 10^3}\right)$  de la vitesse initiale.

c. Le photon absorbé provient toujours de la même direction alors que le photon est émis dans n'importe quelle direction, ce qui fait que pour un grand nombre d'émissions, les photons sont émis avec la même probabilité dans toutes les directions. La valeur de la vitesse, diminuée par l'émission d'un photon peut être augmentée par un photon émis en sens inverse. Sur un grand nombre d'émissions, les variations de vitesse se compensent.

d. Appliquons la relation donnée dans le texte :

$$a = \frac{2,95 \times 10^{-2}}{10^{-8}} = 2,95 \times 10^6 \text{ m·s}^{-2}.$$

Cette accélération est considérable : environ  $3 \times 10^5$  fois plus grande que l'accélération de la pesanteur.

e. En choisissant un axe  $Ox$  orienté dans le sens du mouvement des atomes de sodium, on a :

$$v_x = -2,95 \times 10^6 t + 1,00 \times 10^3$$

$$x = \frac{1}{2} (-2,95 \times 10^6) t^2 + 1,00 \times 10^3 t$$

La première équation permet de calculer  $t$  en écrivant que  $v = 0$ . On trouve  $t = 3,39 \times 10^{-4} \text{ s}$ .

En remplaçant dans la deuxième on trouve :  $x = 0,169 \text{ m}$ .

f. Les atomes étant en mouvement, la fréquence des photons absorbés dépend de la vitesse des atomes de sodium. Il s'agit de l'effet Doppler.

## 33. ★★ Refroidissement Doppler

> COMPÉTENCES : Analyser, réaliser, valider, communiquer.

Premier cas

a. Cette phrase signifie que l'énergie des photons associés à cette radiation correspond à une transition possible entre le niveau fondamental et un niveau excité de l'atome. Le photon peut donc être absorbé.

b. Non puisque l'atome est immobile. Il « voit » donc les radiations avec la même fréquence. Celle-ci étant inférieure à la fréquence pour laquelle l'atome absorbe les

photons, la probabilité que l'atome absorbe un photon est faible et identique pour les deux faisceaux.

c. Pour que l'atome se mette en mouvement, il faudrait qu'il absorbe les photons provenant d'un seul faisceau, ce qui n'est pas possible puisque la probabilité d'absorber est la même.

#### Deuxième cas

a. Non, pour l'atome, les deux sources sont en mouvement. La source de gauche s'approche et celle de droite s'éloigne. Il y a donc un effet Doppler.

b. Plus la fréquence de la radiation est proche de la fréquence d'absorption, plus la probabilité d'absorber un photon augmente. Comme au départ,  $v < v_0$ , la probabilité va augmenter du côté où la fréquence vue par l'atome augmente c'est-à-dire du côté où la source s'approche. Il y aura donc augmentation de la probabilité d'absorber un photon venant de la gauche et diminution de la probabilité d'absorber un photon provenant de la droite (puisque l'écart entre  $v$  et  $v_0$  augmente de ce côté).

c. L'ensemble « photon-atome » est un système isolé. La quantité de mouvement de l'ensemble reste constante au cours de l'absorption. La quantité de mouvement du photon étant de sens opposé à celle de l'atome, la quantité de mouvement de l'atome après absorption sera plus petite.

$$mv + p_{\text{photon}} = mv \rightarrow mv - p_{\text{photon}} = mv' \rightarrow v' < v$$

On peut également raisonner sur la force que subit l'atome lorsqu'il rencontre le photon.

d. Il se passe le phénomène inverse, l'atome va absorber les photons venant de la droite ce qui va diminuer sa vitesse.

e. Refroidir un gaz, c'est diminuer l'agitation thermique, c'est-à-dire les mouvements désordonnés des atomes. Ces mouvements étant de directions quelconques, il faut pouvoir les ralentir dans les trois dimensions, d'où le dispositif.

### 34. ★★ Monochromatique du laser

> COMPÉTENCES : Analyser, réaliser, communiquer.

a. L'énergie transportée par le faisceau laser provient du générateur qui produit la décharge électrique dans le gaz.

b. La décharge électrique apporte l'énergie nécessaire aux atomes pour passer de l'état fondamental à l'état excité dans lequel ils se trouvent au moment de l'émission stimulée.

c. La dernière phrase du document peut se mettre sous la forme mathématique :  $2L = k\lambda$ .

d. En exprimant  $\lambda$  en fonction de la fréquence, cette

expression devient :  $2L = \frac{kc}{v_k}$  en appelant  $n_k$  la fréquence

correspondant à  $k$ .  $\Rightarrow v_k = \frac{kc}{2L}$

Pour obtenir la plus petite différence entre deux fréquences, il faut donner à  $k$  deux valeurs consécutives :

$$v_{k+1} - v_k = \frac{(k+1)c}{2L} - \frac{kc}{2L} = \frac{c}{2L}$$

$$\text{A. N. : } v_{k+1} - v_k = \frac{3,00 \times 10^8}{2 \times 0,300} = 500 \times 10^8 \text{ Hz} = 500 \text{ MHz}$$

e. Le mélange est tel que  $\Delta v = 1400 \text{ MHz} > n_{k+1} - n_k$  : il peut donc y avoir plusieurs fréquences émises.

Remarque : En supposant que ce laser est le laser hélium néon utilisé dans les lycées, on peut considérer qu'il est

$$\text{monochromatique car } v = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8}{632,8 \times 10^{-9}} = 4,74 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\text{et } \frac{\Delta v}{v} = \frac{5,00 \times 10^8}{4,74 \times 10^{14}} = 10^{-6}.$$

### 35. Intérêt du laser femtoseconde

> COMPÉTENCES : S'approprier, analyser, communiquer.

Après avoir rappelé ce qu'est un laser femtoseconde, l'élève doit mettre en avant les caractéristiques principales de ce laser, à savoir sa grande puissance et la durée très brève des impulsions. Le principal intérêt du laser femtoseconde, quel que soit le domaine d'application, réside justement dans la durée des impulsions qui évite par sa brièveté les effets thermiques. L'énergie thermique n'a pas le temps de se propager par conduction autour de l'endroit touché par le faisceau. Cela permet de vaporiser la matière touchée par le faisceau sans chauffer la matière environnante. On trouve ainsi des lasers femtoseconde dans l'industrie (micro-usinage) et en ophtalmologie (découpe de la cornée)

Un autre intérêt de la durée des impulsions est l'utilisation du laser comme flash pour prendre des photos avec un temps d'exposition très court. On peut ainsi photographier la rupture ou la formation de liaisons chimiques.

Intérêts liés à la puissance des impulsions	L'énergie apportée permet de sublimer en surface le matériau éclairé. Applications : gravure, découpe de la rétine.
Intérêts liés à la durée des impulsions	Les impulsions très courtes limitent les effets thermiques. La matière environnante n'est pas chauffée. Chronophotographie sur une échelle de temps très brève.

## EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : [sirius.nathan.fr/sirius2017](http://sirius.nathan.fr/sirius2017)

### 36. CHEMCAM

> COMPÉTENCES : Connaître, s'approprier, analyser, réaliser, valider.

1. a. On peut citer la monochromatique, la directivité du faisceau et une grande puissance surfacique (concentration spatiale de l'énergie). Dans le cas d'un laser pulsé, il y a aussi une concentration temporelle de l'énergie.

b. Non, il émet de la lumière infrarouge (1067 nm > 800 nm).

c. L'irradiance est la puissance par unité de surface :

$$I = \frac{\mathcal{P}}{S} = \frac{\mathcal{P}}{\pi R^2}.$$

On peut calculer la puissance à partir de l'énergie délivrée pendant la durée  $\Delta t$  :

$$\mathcal{P} = \frac{\mathcal{E}}{\Delta t} \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E}}{\pi R^2 \Delta t}$$

A. N. : il faut exprimer le rayon en cm pour obtenir l'irradiance en  $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

$$I = \frac{15 \times 10^{-3}}{\pi \times (175 \times 10^{-4})^2 \times 5 \times 10^{-9}} \\ = 3 \times 10^9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2} \\ = 3 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2} > 1 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}.$$

L'irradiance est suffisante pour créer le plasma.

2. a. Chaque atome possède des niveaux d'énergie bien déterminés, différents d'un atome à l'autre. (C'est la quantification.)

L'énergie  $\Delta\mathcal{E}$  échangée lors des différentes transitions est donc quantifiée et les longueurs d'onde correspondantes  $\lambda = \frac{hc}{\Delta\mathcal{E}}$  sont caractéristiques des niveaux

d'énergie de l'atome. Le spectre est donc différent d'un atome à l'autre.

Remarque : on lit souvent dans les manuels ou les corrigés d'exercices que le spectre est caractéristique de l'élément chimique qui émet la lumière ce qui est complètement faux : un atome et un ion du même élément chimique n'ont pas le même spectre.

Le spectre de l'ion hélium  $\text{He}^+$  est plus proche du spectre de l'hydrogène que du spectre de l'hélium non ionisé.

$$\mathbf{b.} \Delta\mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{423 \times 10^{-9} \times 1,60 \times 10^{-19}} = 2,94 \text{ eV}$$

Il s'agit du retour au niveau fondamental à partir du deuxième état excité.

c. Si l'analyseur spectral fonctionne correctement, on doit retrouver dans le spectre les raies de l'ion calcium, ce qui est le cas.

Longueur d'onde des raies d'émission de l'ion $\text{Ca}^+$ (nm)	394	397	423	443	444	446
Correspondance avec le spectre de la roche témoin (doc. 3)	C	D	F	J	K	L

## 37. RÉSOLUTION DE PROBLÈME

### Micro-texturation de surface par un laser femtoseconde

> COMPÉTENCES : Connaître, s'approprier, analyser, réaliser, communiquer.

Pour déterminer la durée  $\Delta t$  nécessaire à la gravure d'une cavité, il faut déterminer le nombre d'impulsions  $n$ . La durée entre deux impulsions consécutives  $\Delta t_I$  étant connue puisqu'on connaît la fréquence  $f$  des impulsions, on peut déduire la durée de la gravure par la relation :

$$\Delta t = n \Delta t_I \quad \text{ou} \quad \Delta t = \frac{n}{f}$$

Le nombre d'impulsions dépend du taux d'ablation par impulsion. Celui-ci est donné par le graphique du document 3 si on connaît la fluence du laser.

La première grandeur à calculer est donc la fluence du laser dont la définition est donnée dans le document 3. Pour cela, il faut l'énergie transportée par une impulsion. Il faut donc connaître la relation entre puissance et énergie  $\mathcal{E} = \mathcal{P} \times \tau$  :

$$F = \frac{\mathcal{E}}{S} = \frac{\mathcal{P} \times \tau}{\pi R^2} = \frac{4\mathcal{P} \times \tau}{\pi D^2}$$

Le diamètre doit être exprimé en cm :

$$F = \frac{4 \times 1,0 \times 10^9 \times 150 \times 10^{-15}}{\pi \times (98 \times 10^{-4})^2} = 2,0 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$$

Le graphique du document 3 nous indique que pour cette fluence, le taux d'ablation est de 100 nm par impulsion. Pour une profondeur de 6  $\mu\text{m}$ , il faut donc :

$$\frac{6 \times 10^3}{100} = 60 \text{ impulsions.}$$

On ne s'intéresse pas au diamètre de la cavité puisqu'il est égal à celui du faisceau.

$$\Delta t = \frac{n}{f} = \frac{60}{1,0 \times 10^3} = 0,06 \text{ s} \quad \text{ou} \quad 60 \text{ ms.}$$

## I Onde électromagnétique et photon (§1 du cours)

### 16. Formuler l'hypothèse d'Einstein

Einstein postule que la lumière est formée de quanta d'énergie. Il leur attribue une énergie  $|\Delta E| = h\nu$  et une quantité de mouvement  $p = \frac{h\nu}{c}$ .

### 17. Connaître la quantité de mouvement d'un photon

a. L'énergie du photon étant  $|\Delta E| = h\nu$ , la fréquence est :

$$\nu = \frac{|\Delta E|}{h}$$

$$\text{A.N. : } \nu = \frac{2,0 \times 10^{-15}}{6,63 \times 10^{-34}} = 3,0 \times 10^{18} \text{ Hz.}$$

La longueur d'onde est :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$\text{A.N. : } \lambda = \frac{3,00 \times 10^8}{3,0 \times 10^{18}} = 1,0 \times 10^{-10} \text{ m} = 0,10 \text{ nm.}$$

Ce photon n'appartient pas au domaine du visible (400 à 800 nm).

b. La valeur de la quantité de mouvement est donnée par la relation :

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{|\Delta E|}{h \times \nu} = \frac{|\Delta E|}{c}$$

$$\text{A.N. : } p = \frac{2,0 \times 10^{-15}}{3,0 \times 10^8} = 6,7 \times 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}.$$

### 18. Utiliser la relation entre énergie et fréquence

a. Longueur d'onde dans le vide :

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$\text{A. N. : } \lambda = \frac{3,0 \times 10^8}{2,4 \times 10^9} = 1,25 \times 10^{-1} \text{ m arrondi à } 0,13 \text{ m.}$$

Énergie des photons :

$$|\Delta E| = h\nu$$

$$\text{A.N. : } |\Delta E| = 6,63 \times 10^{-34} \times 2,4 \times 10^9 = 1,6 \times 10^{-24} \text{ J;}$$

On divise par  $1,60 \times 10^{-19}$  pour obtenir cette énergie en eV.

$$|\Delta E| = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 2,4 \times 10^9}{1,60 \times 10^{-19}} = 9,95 \times 10^{-6} \text{ eV.}$$

b. Pour un photon de longueur d'onde  $\lambda = 600 \text{ nm}$ , son énergie est donnée par la relation :

$$|\Delta E| = \frac{hc}{\lambda}$$

$$|\Delta E| = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{600 \times 10^{-9} \times 1,60 \times 10^{-19}}$$

$$|\Delta E| = h\nu = 2,1 \text{ eV.}$$

L'énergie d'un photon visible est beaucoup plus grande que celle d'un photon utilisé en Wi-Fi.

### 19. Interpréter l'effet Compton

- Les rayons X sont des ondes électromagnétiques comme la lumière visible; leurs longueurs d'onde sont plus petites que les longueurs d'onde de la lumière visible et des rayons ultraviolets.
- Les particules mises en jeu sont d'une part un photon et d'autre part un électron de la cible.
- Les rayons X se comportent comme des particules ayant une énergie et une quantité de mouvement.

## I Particules et ondes de matière (§2 du cours)

### 20. Connaître la dualité onde-particule

Une particule matérielle, par exemple un électron, présente des propriétés apparemment inconciliables. Il serait à première vue incongru d'affirmer qu'un électron a à la fois les propriétés d'une particule et celles d'une onde.

Pourtant, lors d'une expérience d'interférence, c'est ce que fait un électron: l'impact d'un électron est localisé sur un écran et confirme son caractère particulaire mais, l'impact d'un grand nombre d'électrons sur ce même écran fait apparaître la figure d'interférence, confirmant son caractère ondulatoire.

### 21. Appliquer la relation de Louis de Broglie

a. Pour l'électron, la longueur d'onde est :

$$\frac{h}{p_e} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 3,00 \times 10^5} = 2,43 \times 10^{-9} \text{ m.}$$

Pour le proton, la longueur d'onde est :

$$\frac{h}{p_p} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{1,67 \times 10^{-27} \times 1,64 \times 10^3} = 2,42 \times 10^{-10} \text{ m.}$$

b. Pour des ondes électromagnétiques, les longueurs d'onde correspondent au domaine des rayons X.

## I Dualité onde-particule (§3 du cours)

### 22. Citer une preuve expérimentale

Le caractère ondulatoire de la matière est significatif lorsqu'un faisceau d'électrons donne une figure de diffraction quand il est envoyé sur un cristal (expérience réalisée par Davisson et Germer en 1927). La diffraction par un cristal est observée avec d'autres particules matérielles: neutrons, atomes, molécules. On peut citer également l'obtention d'interférence avec des électrons, des atomes, etc.

### 23. Connaître la dualité de la lumière

- À la date  $t = 10 \text{ s}$ , la position de l'impact d'un photon semble aléatoire.
- À la date  $t = 500 \text{ s}$ , la figure qui apparaît est celle des interférences: des franges apparaissent.
- Les zones les plus claires correspondent à une probabilité de présence maximale des photons alors que les plus sombres correspondent à une probabilité de présence minimale.

**d.** Dans cette expérience, le caractère ondulatoire des photons se manifeste lorsqu'ils sont en nombre suffisant, ce qui est réalisé à la date  $t = 500$  s.

## EXERCICES S'entraîner

### 24. Exercice résolu dans le manuel

### 25. Application de l'exercice résolu

$$1. \lambda'_1 - \lambda_1 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta_1).$$

$$A. N.: \lambda'_1 - \lambda_1 = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,109 \times 10^{-31} \times 3,00 \times 10^8} (1 - \cos 60)$$

$$\lambda'_1 - \lambda_1 = 1,21 \times 10^{-12} \text{ m.}$$

2. Si  $\lambda'_2 - \lambda_2 = 2 \times (\lambda'_1 - \lambda_1)$  alors :

$$1 - \cos\theta_2 = 2 \times (1 - \cos\theta_1)$$

soit:  $\cos\theta_2 = 2\cos\theta_1 - 1$  avec  $\theta_1 = 60,0^\circ$ ;

on obtient  $\cos\theta_2 = 0$  et par suite  $\theta_2 = 90,0^\circ$ .

3. Avec le même raisonnement que dans la question 2:

$$1 - \cos\theta_3 = 0,5 \times (1 - \cos\theta_1) \text{ soit :}$$

$$\cos\theta_3 = 0,5 + 0,5 \times \cos\theta_1$$

$$A. N.: \cos\theta_3 = 0,5 + 0,5 \times \cos 60 = 0,750 \text{ et donc } \theta_3 = 41,1^\circ.$$

### 26. Exercice résolu dans le manuel

### 27. Application de l'exercice résolu

$$1. |\Delta E| = \frac{hc}{\lambda}.$$

$$A. N.: |\Delta E| = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{0,78 \times 10^{-6} \times 1,60 \times 10^{-19}} = 1,6 \text{ eV.}$$

$$2. \Delta E \times \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \text{ soit } \Delta E \geq \frac{h}{4\pi \Delta t} \text{ avec :}$$

$$\frac{h}{4\pi \Delta t} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{4\pi \times 2,7 \times 10^8} = 1,955 \times 10^{-27} \text{ J} = 1,2 \times 10^{-8} \text{ eV.}$$

3. L'énergie du niveau excité est égale à l'énergie du niveau fondamental plus l'énergie du photon émis; elle est donnée avec la précision:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1,2 \times 10^{-8}}{1,6} = 7,6 \times 10^{-9} \cong 10^{-8}.$$

L'énergie du niveau excité est donc définie avec une très grande précision.

### 28. Apprendre à rédiger

> COMPÉTENCES : Connaitre, analyser, réaliser, communiquer.

a. La longueur d'onde associée à une particule matérielle est donnée par la relation:

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

$h$  est la constante de Planck et  $p$  la quantité de mouvement de la particule de masse  $m$  animée de la vitesse  $v$ .

$$p = mv \text{ et } E_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m} \text{ soit } p = \sqrt{2m E_c}.$$

Soit:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m E_c}}.$$

b. Les unités à employer sont les unités SI: l'énergie doit être en joule.

$$E_c = 5,0 \times 10^{-2} \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 1,67 \times 10^{-27} \times 5,0 \times 10^{-2} \times 1,60 \times 10^{-19}}} \text{ m.}$$

$$\lambda = 1,3 \times 10^{-10} \text{ m} = 0,13 \text{ nm.}$$

$$c. \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e E_{ce}}} = \frac{h}{\sqrt{2m_n E_{cn}}} \text{ d'où } E_{ce} = \frac{m_n}{m_e} E_{cn}.$$

$$A. N.: E_{ce} = \frac{1,67 \times 10^{-27}}{9,11 \times 10^{-31}} \times 5,0 \times 10^{-2} = 92 \text{ eV.}$$

### 29. Relation de de Broglie pour un ion

> COMPÉTENCES : Connaitre, analyser, réaliser.

$$a. \lambda = \frac{h}{p}. \text{ De la relation de de Broglie, on déduit :} \\ \dim h = \dim (\text{énergie}) \times T.$$

D'après la définition de l'énergie cinétique  $E = \frac{1}{2} mv^2$ :

$$\dim (mc) = \dim \left( \frac{\frac{1}{2} mc^2}{c} \right)$$

$$\dim (mc) = \dim (p) = \frac{\dim (\text{énergie})}{L \times T^{-1}}.$$

Donc :

$$\dim \left( \frac{h}{p} \right) = \frac{\dim (\text{énergie}) \times T \times L \times T^{-1}}{\dim (\text{énergie})} = L.$$

Le rapport  $\frac{h}{p}$  a la dimension d'une longueur tout comme la longueur d'onde, la relation de de Broglie est cohérente au niveau dimensionnel.

$$b. \text{ Par définition: } p = mv \text{ et } E_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m}. \\ \text{ Soit } p = \sqrt{2m E_c}.$$

La longueur d'onde associée est :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m E_c}}.$$

A. N.:

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 50 \times 1,66 \times 10^{-27} \times 5,0 \times 10^{-2} \times 1,60 \times 10^{-19}}} \\ = 1,8 \times 10^{-11} \text{ m.}$$

### 30. Extraire et exploiter des informations

> COMPÉTENCES : S'approprier, analyser.

a. Le point de coordonnées ( $E_c = 100 \text{ keV}$ ,  $Z = 50$ ) est dans le domaine de l'effet photoélectrique: on observe l'effet photoélectrique lorsque les photons d'énergie 100 keV interagissent avec cette cible.

Le point de coordonnées ( $E_c = 1 \text{ MeV}$ ,  $Z = 50$ ) est dans le domaine de l'effet Compton : on observe l'effet Compton lorsque les photons d'énergie 1 MeV interagissent avec cette cible.

**b.** Il existe un point d'abscisse 500 keV situé sur la ligne d'équiprobabilité des deux effets. Il est donc possible d'obtenir avec la même probabilité l'effet Compton et l'effet photoélectrique avec des photons d'énergie 500 keV. L'ordonnée du point est  $Z = 40$  (échelle peu précise). Les deux effets peuvent être obtenus simultanément pour une cible de numéro atomique  $Z = 40$ .  
**c.** La troisième interaction est l'effet de matérialisation. Elle intervient avec des photons très énergétiques (un photon donne alors en électron et un positon).

### 31. In English Please

> COMPÉTENCES : Analyser, valider, communiquer.

**a.** « Work function » est l'énergie minimale que l'on doit fournir pour extraire un électron du métal : c'est le travail d'extraction.

**b.** La lumière est décrite sous son aspect particulaire : le photon.

**c.** Pour qu'il y ait effet photoélectrique, l'énergie du photon doit être supérieure ou égale au travail d'extraction du matériau :

$$\mathcal{E} = hv \geq \text{« work function »}$$

$$\text{A. N. : } \mathcal{E} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 1,1 \times 10^{15}}{1,60 \times 10^{-19}} = 4,56 \text{ eV.}$$

Deux valeurs du tableau sont inférieures à 4,56 eV. Elles correspondent aux deux métaux que l'on peut choisir : le baryum (Ba) et l'aluminium (Al).

### 32. Diffraction de grains de sable

> COMPÉTENCES : Analyser, réaliser, valider.

Le phénomène de diffraction fait intervenir le rapport  $\frac{\lambda}{a}$ ,  $a$  étant la taille de l'obstacle ou de l'ouverture.

La longueur d'onde associée à un grain de sable est donnée par la relation de de Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{p} \text{ avec } p = mv.$$

A. N. : pour un grain de sable de masse  $m = 1 \text{ mg}$  et de vitesse  $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  :

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{1 \times 1 \times 10^{-6}} = 7 \times 10^{-28} \text{ m.}$$

En supposant  $a \ll 100 \lambda$  pour avoir diffraction,  $a \ll 6 \times 10^{-26} \text{ m}$  soit un ordre de grandeur de  $10^{-25} \text{ m}$ . Il n'existe pas « d'objet » de cette dimension permettant de mettre en évidence par diffraction le caractère ondulatoire d'un grain de sable.

### 33. Aspect particulaire de la lumière

> COMPÉTENCES : S'approprier, analyser, valider.

**a.** L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$\mathcal{E} = hv \text{ avec } v = \frac{c}{\lambda} \text{ soit } \mathcal{E} = \frac{hc}{\lambda}.$$

On en déduit que la longueur d'onde dans le vide est :

$$\lambda = \frac{hc}{\mathcal{E}}.$$

La longueur d'onde seuil du tungstène, notée  $\lambda_0$ , est celle d'un photon d'énergie :

$$\mathcal{E}_0 = 4,49 \text{ eV.}$$

**A. N. : l'énergie est à exprimer en joule :**

$$\lambda_0 = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{4,49 \times 1,60 \times 10^{-19}}$$

$$\lambda_0 = 2,77 \times 10^{-7} \text{ m} = 277 \text{ nm.}$$

**b.** D'après le texte, le photon doit apporter une énergie supérieure au travail d'extraction :

$$\mathcal{E} \geq \mathcal{E}_0$$

$$\frac{hc}{\lambda} \geq \frac{hc}{\lambda_0} \text{ donc } \lambda \leq \lambda_0.$$

La longueur d'onde doit être inférieure à la longueur d'onde seuil.

### 34. Diffraction des molécules

> COMPÉTENCES : Analyser, réaliser.

La masse d'une molécule est calculée à partir de sa masse molaire et de la constante d'Avogadro  $N_A$  :

$$m = \frac{M(C_{60})}{N_A} = \frac{60M(C)}{N_A}.$$

Des relations  $\lambda = \frac{h}{p}$  et  $p = mv$ , on en déduit la vitesse  $v$  des molécules :

$$v = \frac{h}{m\lambda} = \frac{h}{\lambda} \times \frac{N_A}{60M(C)} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 6,02 \times 10^{23}}{60 \times 12 \times 10^{-3} \times 2,5 \times 10^{-12}} = 222 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

### 35. Principe de complémentarité

> COMPÉTENCES : Connaître, analyser, valider.

**a.** Deux fentes fines et parallèles sont éclairées par une source de lumière ; les deux fentes jouent le rôle de deux sources cohérentes. Le phénomène d'interférence apparaît dans la zone de recouvrement des deux faisceaux et des franges d'interférence apparaissent sur un écran placé dans cette zone.

**b.** Dans cette expérience, la source de lumière est particulière puisqu'elle émet des photons un par un à intervalles réguliers. Les photons se comportent comme des particules localisées spatialement lorsqu'ils arrivent sur l'écran. Ils montrent un comportement ondulatoire en formant peu à peu la figure d'interférence. Dans cette expérience d'interférence, on ne peut pas prévoir la position de l'impact d'un photon sur l'écran mais lorsque leur nombre est important, ils respectent une loi de probabilité et forment le motif caractéristique des franges d'interférence ; les franges s'interprètent comme une alternance de zones où le photon a une probabilité de présence minimale ou maximale.

**c.** Il n'est pas possible de déterminer par quelle fente passe un photon ; toute tentative détruit la figure d'interférence ; la source fournissant des photons un par un, chaque photon semble être passé simultanément par les deux fentes ce qui n'est pas envisageable pour une particule indivisible.

### 36. ★ La longueur d'onde Compton

> COMPÉTENCES: Connaître, analyser, réaliser.

a.  $\dim h = \dim(\text{énergie}) \times T = \dim(\text{force}) \times L \times T$   
 $= M \times L \times T^{-2} \times L \times T$   
 $= M \times L^2 \times T^{-1}$

$\dim mc = M \times L \times T^{-1}$

$\dim \frac{h}{mc} = \frac{M \times L^2 \times T^{-1}}{M \times L \times T^{-1}} = L.$

A. N.:

$$\lambda_{\text{Compton}} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 3,00 \times 10^8} = 2,43 \times 10^{-12} \text{ m.}$$

b. D'une part, la lumière visible correspond à des longueurs d'onde dans le vide comprises entre 400 nm et 800 nm, soit un ordre de grandeur de  $10^{-6}$  m.

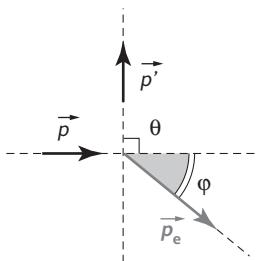
D'autre part, la relation donnant  $\Delta\lambda$  montre que l'ordre de grandeur de  $\Delta\lambda$  est de  $10^{-12}$  m (maximum égal à  $\lambda_{\text{Compton}}$

pour  $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ ).

L'écart entre les deux ordres de grandeur est très important et la variation de longueur d'onde sera difficile à mettre en évidence.

L'expérience ne sera pas pertinente en lumière visible, elle le sera avec des rayons X dont les longueurs d'onde sont plus faibles que celles de la lumière visible.

c.



Avant la collision, l'électron étant supposé immobile, sa quantité de mouvement est nulle; la quantité de mouvement du système (photo - électron) est:  $\vec{p}_{\text{Avant}} = \vec{p} + \vec{0}$ .

Après la collision, la quantité de mouvement du système est:  $\vec{p}_{\text{Après}} = \vec{p}' + \vec{p}_e$ .

La conservation de la quantité de mouvement est donc:

$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}_e.$$

Cette relation vectorielle est schématisée ci-contre.

Dans le triangle rectangle ainsi tracé,

$$p_e = \sqrt{p^2 + p'^2} \quad \text{et} \quad \tan\varphi = \frac{p'}{p}.$$

A. N.:

$$p_e = \sqrt{(9,66 \times 10^{-24})^2 + (9,34 \times 10^{-24})^2} = 13,4 \times 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\tan\varphi = \frac{9,34 \times 10^{-24}}{9,66 \times 10^{-24}} \quad \text{d'où} \quad \varphi = 44,0^\circ.$$

### 37. ★ S'auto-évaluer

La longueur d'onde associée à une particule matérielle est donnée par la relation:  $\lambda = \frac{h}{p}$ .

$h$  est la constante de Planck et  $p$  la quantité de mouvement de la particule de masse  $m$  animée de la vitesse  $v$ .

$$p = mv \quad \text{et} \quad \mathcal{E}_c = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m} \quad \text{soit} \quad p = \sqrt{2m\mathcal{E}_c}$$

$$\text{soit: } \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m\mathcal{E}_c}}.$$

Les unités à employer sont les unités SI: l'énergie doit être en joule.

$$\mathcal{E}_c = 60 \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9,11 \times 10^{-31} \times 60 \times 1,60 \times 10^{-19}}}$$

$$\lambda = 1,6 \times 10^{-10} \text{ m} = 0,16 \text{ nm.}$$

La longueur d'onde dans le vide des rayons X de fréquence  $v = 1,90 \times 10^{18} \text{ Hz}$  est:

$$\lambda = \frac{c}{v} = \frac{3,00 \times 10^8}{1,90 \times 10^{18}} = 1,60 \times 10^{-10} \text{ m} = 0,160 \text{ nm.}$$

La diffraction est un phénomène caractéristique d'une onde; la diffraction du faisceau d'électrons confirme que l'on peut associer une onde à une particule matérielle. De plus, la figure de diffraction est identique lorsqu'elle est obtenue:

- avec des rayons X de longueur d'onde 0,160 nm;
- avec des électrons dont la longueur d'onde associée calculée avec la relation de de Broglie est égale à 0,160 nm, validant ainsi cette relation.

### 38. ★ Interférences atomiques

> COMPÉTENCES: S'approprier, analyser, réaliser, valider, communiquer.

- a. La mélasse optique refroidit et immobilise les atomes.
- b.  $\lambda_{\text{Ne}} = 15 \text{ nm.}$

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{et} \quad p = mv \quad \text{d'où} \quad v = \frac{h}{m\lambda} = \frac{h}{\lambda} \times \frac{N_A}{M}.$$

$$\text{A.N.: } v = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 6,02 \times 10^{23}}{20 \times 10^{-3} \times 15 \times 10^{-9}} = 1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\text{c. De } i = \frac{\lambda D}{a}, \text{ on déduit: } \lambda = \frac{ai}{D}.$$

$$\text{A. N.: } \lambda = \frac{6 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-3}}{0,85} = 1,4 \times 10^{-8} \text{ m} = 14 \text{ nm.}$$

La valeur est comparable à la valeur  $\lambda_{\text{Ne}} = 15 \text{ nm.}$

d. L'aspect particulaire des atomes se manifeste par l'impact localisé sur l'écran. L'aspect ondulatoire se manifeste par la répartition des points d'impact sur l'écran qui forment des franges comme une onde.

La densité en un point de l'écran est proportionnelle à la probabilité qu'à un atome de se retrouver en ce point.

### 39. ★ L'effet photoélectrique

> COMPÉTENCES : S'approprier, analyser, réaliser.

a. K n'est pas éclairée : l'intensité  $I = 0$ ; entre A et K, il n'y a pas de contact électrique.

K est éclairée : l'intensité n'est pas nulle lorsque la longueur d'onde est inférieure à une certaine valeur.

L'interprétation se fait avec le modèle particulaire de la lumière : les photons apportent de l'énergie pour extraire les électrons de la cathode, leur énergie doit être supérieure ou égale à une valeur caractéristique du matériau de la cathode.

L'énergie d'un photon est :

$$\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\mathcal{E} \geq \mathcal{E}_0$$

$$\text{soit: } \frac{hc}{\lambda} \geq \frac{hc}{\lambda_0}$$

donc:  $\lambda \leq \lambda_0$ .

K est éclairée, l'intensité  $I$  augmente.

Lorsque l'on augmente l'intensité lumineuse, le nombre de photons reçus par la cathode augmente, le nombre d'électrons émis augmente et l'intensité électrique  $I$  augmente.

b. À l'aide de l'animation, la longueur d'onde maximale donnant naissance à l'effet photoélectrique est d'environ 580 nm.

### 40. ★★ Vitesse et émission spontanée

> COMPÉTENCES : S'approprier, analyser, valider, communiquer.

$$\mathbf{a.} p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

b. La quantité de mouvement s'exprime par la relation  $p = mv$ .

On a donc: dim  $p = \text{MLT}^{-1}$ .

$h\nu$  est une énergie comme  $mc^2$  donc:

$$\text{dim}(h\nu) = \text{ML}^2\text{T}^{-2}$$

c a la dimension d'une vitesse : dim  $c = \text{LT}^{-1}$ .

$$\text{dim} \left( \frac{h\nu}{c} \right) = \frac{\text{ML}^2\text{T}^{-2}}{\text{LT}^{-1}} = \text{MLT}^{-1}$$

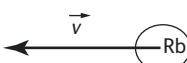
La relation est donc bien homogène.

c. L'atome de rubidium constitue un système isolé comme l'indique l'énoncé. La quantité de mouvement d'un système isolé est constante. Avant l'émission, cette quantité de mouvement est nulle puisque l'atome est immobile.

Après la désexcitation de l'atome, le photon émis part avec une quantité de mouvement  $\vec{p}_{\text{photon}}$ . Pour que la quantité de mouvement de l'ensemble reste nulle, il faut que l'atome recule avec une quantité de mouvement  $\vec{p}_{\text{atome}}$  telle que :

$$\vec{p}_{\text{photon}} + \vec{p}_{\text{atome}} = \vec{0}$$

Les deux vecteurs quantité de mouvement sont opposés. L'atome part sur la même direction que le photon mais en sens opposé :



d. En valeur, ces quantités de mouvement sont égales:

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

$$\frac{h}{\lambda} = mv \text{ donc } v = \frac{h}{m\lambda}$$

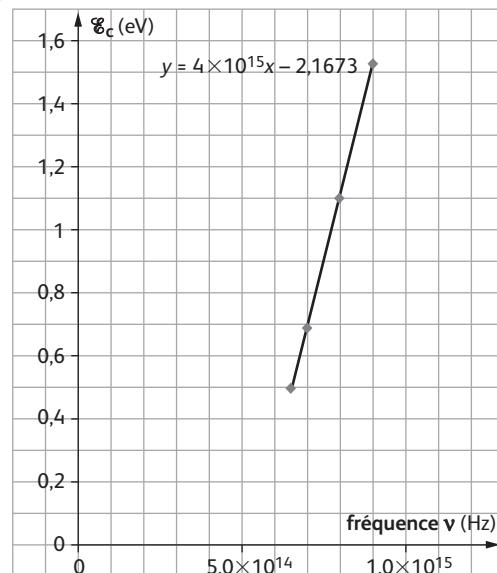
$$\text{A. N. : } v = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{1,45 \times 10^{-25} \times 0,78 \times 10^{-6}} = 5,9 \times 10^3 \text{ m.s}^{-1}$$

### 41. ★★ L'effet photoélectrique par Millikan

> COMPÉTENCES : Connaitre, analyser, réaliser, valider, communiquer.

a.  $\mathcal{E}_c = \mathcal{E} - \mathcal{E}_0$  soit:  $\mathcal{E}_c = h\nu - \mathcal{E}_0$  avec  $\mathcal{E}_c$  l'énergie cinétique de l'électron émis;  $\mathcal{E}$  l'énergie du photon incident de fréquence  $\nu$  et  $\mathcal{E}_0$  le travail d'extraction.

b.



c. La représentation de  $\mathcal{E}_c$  en fonction de la fréquence  $\nu$  est une droite d'équation  $y = ax + b$ .

L'équation établie en a. peut s'écrire:

$$y = h\nu - \mathcal{E}_0$$

en posant  $y = \mathcal{E}_c$  et  $x = \nu$ . Le résultat est conforme à la relation d'Einstein.

d. La fréquence seuil correspond à  $\mathcal{E}_c = 0$ . La lecture graphique donne:  $\nu_0 = 5,4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ .

La longueur d'onde seuil dans le vide est donnée par :

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{3,00 \times 10^8}{5,4 \times 10^{14}} = 0,56 \times 10^{-6} \text{ m.}$$

Le travail d'extraction  $\mathcal{E}_0$  est obtenu graphiquement :

$$y = -\mathcal{E}_0 ; \text{ pour } x = 0: \mathcal{E}_0 = 2,2 \text{ eV.}$$

Le coefficient directeur de la droite est égal à la valeur de la constante de Planck,  $h$  exprimé en joule par seconde :

$$h = 4,0 \times 10^{-15} \times 1,60 \times 10^{-19} = 6,4 \times 10^{-34} \text{ J.s.}$$

La valeur admise est de  $6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s.}$

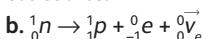
e. La représentation pour le zinc de  $\mathcal{E}_c$  en fonction de la fréquence  $\nu$  est une droite parallèle à la précédente (même coefficient directeur  $h$ ); elle coupe l'axe des  $x$  à l'abscisse :

$$x = \nu_0 = 8,1 \times 10^{14} \text{ Hz, fréquence seuil de ce métal.}$$

## 42. ★★ Diffraction de neutrons

> COMPÉTENCES : Connaître, s'approprier, analyser, valider, communiquer.

a. Les neutrons libres n'appartiennent pas à un noyau. Ils n'existent pas dans la nature car leur durée de vie est courte.



c. La fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd dit fissile, est scindé en deux sous l'impact d'un neutron.

d. Les atomes d'hydrogène de la molécule d'eau lourde sont des isotopes de l'hydrogène  ${}_1^2H$ . La formule de cet isotope est  ${}_1^2H$ .

Les neutrons sont ralentis par choc. Au cours des collisions avec les molécules d'eau lourde, ils transfèrent une partie de leur énergie cinétique à la cible (molécule d'eau).

e. D'après la relation de Louis de Broglie,  $\lambda = \frac{h}{p}$  avec  $p = mv$

$p = mv$ ; plus la vitesse est grande, plus la longueur d'onde est petite. Pour avoir une longueur d'onde adaptée à la diffraction, il faut diminuer la valeur de  $v$ .

f. La diffraction par les neutrons permet de déterminer les positions des noyaux atomiques dans un cristal.

g.  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m\varepsilon_c}}$ .

$$\varepsilon_c = 100 \times 10^{-3} \times 1,60 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 1,67 \times 10^{-27} \times 100 \times 10^{-3} \times 1,60 \times 10^{-19}}} = 9,07 \times 10^{-11} \text{ m.}$$

Ces neutrons sont adaptés à l'étude par diffraction d'un cristal dans lequel l'ordre de grandeur des distances interatomiques est de  $10^{-10} \text{ m}$ .

## 43. Microscope électronique à balayage

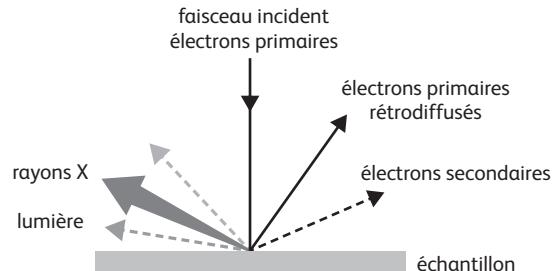
> COMPÉTENCES : S'approprier, analyser, communiquer.

Proposition de synthèse de documents :

Un microscope est un instrument qui donne une image agrandie d'un objet pour permettre l'observation de détails non visibles à l'œil nu.

Le microscope électronique utilise non pas un faisceau lumineux comme un microscope optique mais un faisceau d'électrons dont la longueur d'onde de l'onde associée est inférieure aux longueurs d'onde des ondes lumineuses. La limite de résolution qui est proportionnelle à la longueur d'onde est ainsi améliorée: on peut distinguer des détails distants de 200 nm avec un microscope optique alors que des détails distants de 0,4 nm peuvent être distingués avec un microscope électronique à balayage (MEB).

Microscope optique et microscope électronique donnent des images de nature différente; le microscope optique donne une image plane et agrandie de l'objet, le microscope électronique fournit des images reconstituées point par point à partir des informations fournies par différents détecteurs.



Lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon dans un microscope électronique, on étudie essentiellement :

- les électrons secondaires, électrons arrachés à l'échantillon;
- les électrons rétrodiffusés, électrons primaires qui pénètrent dans l'échantillon puis en ressortent;
- les photons X produits par désexcitation des atomes.

L'analyse des électrons secondaires fournit une image en relief de la surface de l'échantillon alors que celle des électrons rétrodiffusés renseigne sur la composition chimique de l'échantillon. Le détecteur de rayons X complète l'analyse chimique en identifiant les différents éléments chimiques.

Ainsi, le microscope électronique à balayage réalise des images en relief de la surface des matériaux solides avec une très haute résolution de l'ordre du nanomètre et analyse leur composition. Citons quelques exemples de son utilisation:

- étude des microstructures de matériaux en sciences des matériaux;
- observation et analyse des minéraux en géologie;
- observation des microorganismes comme des bactéries ou des virus en biologie;
- observation des composants en microélectronique et en nanotechnologie.

## EXERCICES Objectif BAC

Les fiches-guides permettant d'évaluer ces exercices par compétences sont disponibles sur le site : [sirius.nathan.fr/sirius2017](http://sirius.nathan.fr/sirius2017)

## 44. ONDES ET PARTICULES

> COMPÉTENCES : Connaître, analyser, réaliser, valider.

1. D'après le document 1, le point A est au centre d'une frange brillante. Les interférences observées en A sont des interférences constructives.

Le point B est au centre d'une frange sombre. Les interférences observées en B sont destructives.

2. Les interférences constructives observées en A sont obtenues pour des ondes en phase donc pour les ondes **a** et **c**; les interférences destructives sont obtenues pour des ondes en opposition de phase donc pour les ondes **a** et **b** ou les ondes **b** et **c**.

3. a. Sur le document 3, on remarque que pour une cinquantaine d'impacts les positions semblent

aléatoires. Il n'est donc pas possible de prévoir la position d'un électron, le phénomène pourra être interprété en terme de densité de probabilité de présence pour un grand nombre d'impacts.

**b.** À partir de 1 000 impacts, on voit se dessiner sur les figures du document 3 les figures d'interférences, avec l'équivalent de franges sombres qui correspondent à un faible nombre d'impacts, de franges brillantes qui correspondent à un grand nombre d'impacts.

Le phénomène d'interférence est caractéristique du comportement ondulatoire des électrons.

Pour un faible nombre d'impacts, les impacts semblent aléatoires et traduisent le caractère corpusculaire (particulaire) des électrons.

**4. a.** D'après la relation de de Broglie,  $p = \frac{h}{\lambda}$  par définition,  $p = m_e \times v$  et par suite:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e \times v}.$$

$$\text{A.N. : } \lambda = \frac{6,6 \times 10^{-34}}{9,1 \times 10^{-31} \times 1,3 \times 10^8} = 5,6 \times 10^{-12} \text{ m.}$$

Soit  $\lambda = (5,6 \pm 0,5) \times 10^{-12} \text{ m.}$

Sur le document 2, pour 5 000 impacts, on détermine l'interfrange:  $4i = 8,0 \text{ } \mu\text{m}$  soit  $i = 2,0 \text{ } \mu\text{m}$ . L'interfrange est par ailleurs donné par la relation  $i = \frac{\lambda D}{b}$  soit  $\lambda = \frac{i \times b}{D}$ .

$$\text{A.N. : } \lambda = \frac{2,0 \times 10^{-6} \times 0,8 \times 10^{-6}}{35,0 \times 10^{-2}} = 4,57 \times 10^{-12} \text{ m.}$$

On utilise la formule donnée pour calculer l'incertitude sur la longueur d'onde :

$$\begin{aligned} U(\lambda) &= \lambda \times \sqrt{\left(\frac{U(i)}{i}\right)^2 + \left(\frac{U(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{U(D)}{D}\right)^2} \\ &= 4,57 \times 10^{-12} \sqrt{\left(\frac{0,2}{2,0}\right)^2 + \left(\frac{0,2}{0,8}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{35}\right)^2} \\ &= 1,23 \times 10^{-12} \text{ m} = 1,3 \times 10^{-12} \text{ m.} \end{aligned}$$

(Arrondir à l'excès avec un ou deux chiffres significatifs au maximum.)

$$\lambda = (4,6 \pm 1,3) \times 10^{-12} \text{ m.}$$

On avait par le calcul:  $\lambda = (5,6 \pm 0,5) \times 10^{-12} \text{ m.}$  Ces deux valeurs sont cohérentes car les deux intervalles de confiance se recoupent.

**b.** Le phénomène observé est la diffraction de l'onde; l'onde de matière traverse ici une ouverture de petite dimension.

**c.** D'après le schéma de l'expérience sur le document 4,

$\tan \theta = \frac{OM}{D}$  et avec un angle exprimé en radians, d'après l'approximation des petits angles,  $\theta = \frac{OM}{D}$ .

On mesure  $OM$  sur la figure de densité de probabilité de présence des électrons du document 4,  $OM = 8,0 \text{ } \mu\text{m}$  soit

$$\theta = \frac{8,0 \times 10^{-6}}{35,0 \times 10^{-2}} = 2,3 \times 10^{-5} \text{ rad.}$$

On sait par ailleurs que  $\theta = \frac{\lambda}{a}$  et par suite  $\lambda = \theta \times a$ .

**A. N.:**

$\lambda = 2,3 \times 10^{-5} \times 0,2 \times 10^{-6} = 4,6 \times 10^{-12} \text{ m} = 5 \times 10^{-12} \text{ m.}$  On obtient un ordre de grandeur de  $10^{-12} \text{ m}$  identique à l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde de matière déterminée précédemment.

## 45. PROTONS ÉNERGÉTIQUES

> COMPÉTENCES : Connaitre, analyser, réaliser, valider.

**1.**  $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m_p v^2$  avec  $v = \frac{c}{10}$  (le proton est animé d'une vitesse de valeur égale à 10 % de la célérité de la lumière dans le vide):

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} \times m_p \times \left(\frac{c}{10}\right)^2.$$

**A. N.:**

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} \times 1,673 \times 10^{-27} \times \left(\frac{3,00 \times 10^{-8}}{10}\right)^2 = 7,5 \times 10^{-13} \text{ J.}$$

$$\mathcal{E}_c = \frac{7,5 \times 10^{-13}}{1,602 \times 10^{-13}} = 4,7 \text{ MeV.}$$

**2.** D'après la question 1, les protons classiques les plus énergétiques ont une énergie cinétique de 4,7 MeV. Le document 2 nous indique que les protons les plus énergétiques des rayons cosmiques ont une énergie de 10 GeV, supérieure à 4,7 MeV, ces protons sont donc relativistes.

**3. a.**  $p = m_p \times v = m_p \times \frac{c}{10}$ .

$$\text{A.N. : } p = 1,673 \times 10^{-27} \times \frac{3,00 \times 10^{-8}}{10} = 5,0 \times 10^{-20} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

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

$$\text{A.N. : } \lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{5,0 \times 10^{-20}} = 1,3 \times 10^{-14} \text{ m.}$$

## 46. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS

### Une source de photons uniques

> COMPÉTENCES : S'approprier, connaître, analyser, communiquer.

1. Voir le tableau page suivante.

2. La figure observée sur l'écran ne présente aucune structure cohérente lorsque le nombre de photons est faible. On ne peut pas prévoir l'impact des photons, la figure présente un aspect aléatoire. Les photons ont un comportement particulier.

Lorsque le nombre de photons devient important, la figure d'interférences se dessine sur l'écran : des franges brillantes correspondent à de fortes probabilités de présence des photons, des franges sombres à des probabilités de présence minimales.

La figure obtenue montre alors le caractère ondulatoire du photon.

La combinaison de ces deux aspects illustre la dualité onde-particule de la lumière.

Tableau de la question 1 de l'exercice 46 :

Qu'est-ce qu'un centre NV ? Est-il possible d'isoler un centre NV ?	Quel est le phénomène utilisé pour que le centre NV émette un photon ? Quelle est la longueur d'onde du photon émis ?	Quel est le rôle du dispositif de filtrage ?	Cette source de lumière est couramment nommée « source de photon unique ». Justifier ce nom.
Un centre NV est un défaut de la maille cristalline du diamant dû à la présence d'un atome d'azote (N) à côté d'un emplacement vacant (V).	Une impulsion laser, ultra brève, est envoyée sur un centre NV qui est alors excité. Lorsque qu'il se désexcite, il émet un photon. La longueur d'onde du photon émis est de 690 nm.	Le dispositif de filtrage laisse passer les photons de longueur d'onde 690 nm (rouge) et arrêtent les photons qui excitent les centres NV.	La source est dite « source de photon unique » car elle fournit un seul photon par impulsion laser : un seul centre présent dans un nanocrystal est excité et un photon unique est alors émis. Le nom « source de photon unique » est un peu ambigu car en réalité des millions de photons sont émis, mais un par un, jamais deux ou plus ensemble, ce qui justifie le terme « photon unique ».