

Physique : DS7

La **présentation**, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la **rédaction**, la **clarté et la précision** des raisonnements entreront pour une **part importante** dans l'**appréciation des copies**. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats littéraux, et à souligner les applications numériques.

Partie I : Capteur d'empreinte digitale

Il existe différentes technologies de capteurs d'empreinte digitale, c'est-à-dire de dispositifs permettant d'obtenir une image numérisée d'une empreinte digitale, le plus souvent à des fins d'identification. Certaines de ces technologies sont embarquées dans des smartphones. La technologie dite « capteur optique d'empreinte digitale » est très employée, elle repose sur le phénomène de réflexion totale frustrée qui est l'objet de cette étude.

Le doigt est posé à plat sur l'hypoténuse d'un prisme droit isocèle taillé dans un verre d'indice optique noté n . Il est éclairé par une diode laser de longueur d'onde λ_0 dans le vide. L'image de l'empreinte digitale à travers un système optique est formée sur un capteur CCD puis numérisée. La figure 2 décrit le schéma de principe de ce dispositif.



Figure 1 Capteur d'empreinte digitale (Wikimedia, Rachmaninoff, 2009-10-2)

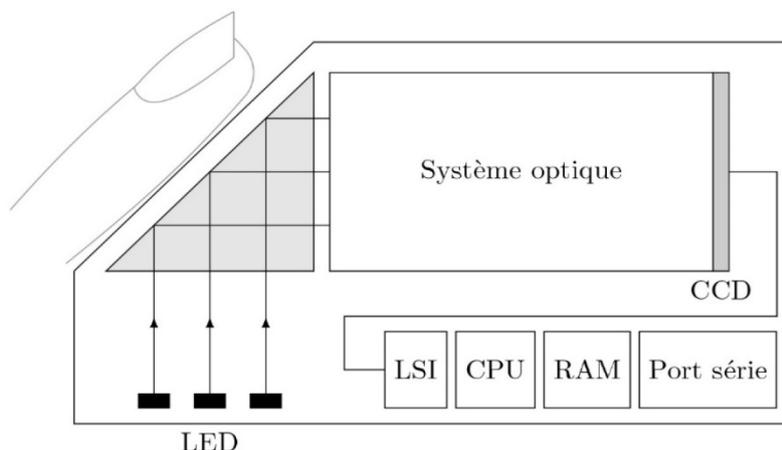


Figure 2 Principe d'un capteur optique d'empreinte digitale

En première approche, le système optique se résume à la traversée d'un dioptre (\mathcal{D}) et d'une lentille convergente (\mathcal{L}) (figure 3). Si A est un point objet de l'empreinte digitale, alors on note A_1 l'image de A à travers le dioptre (\mathcal{D}) et A'_1 celle de A_1 à travers la lentille (\mathcal{L}) :

$$A \xrightarrow{(\mathcal{D})} A_1 \xrightarrow{(\mathcal{L})} A'_1.$$

On définit également les longueurs algébriques suivantes :

$$D_1 = \overline{A_1 A'_1}, \quad D = \overline{A A'_1}, \quad p = \overline{O A_1}, \quad p' = \overline{O A'_1}.$$

Les sous-parties I.A.1 et I.A.2 sont indépendantes du reste du problème. La sous-partie I.A.3 introduit la suite. Les sous-parties I.B et I.C sont liées par une analogie qu'on souhaite établir entre deux situations, l'une se présentant en physique quantique et l'autre en optique ondulatoire. Néanmoins, en dehors des questions développant l'analogie, les sous-parties sont conçues de manière relativement autonomes.

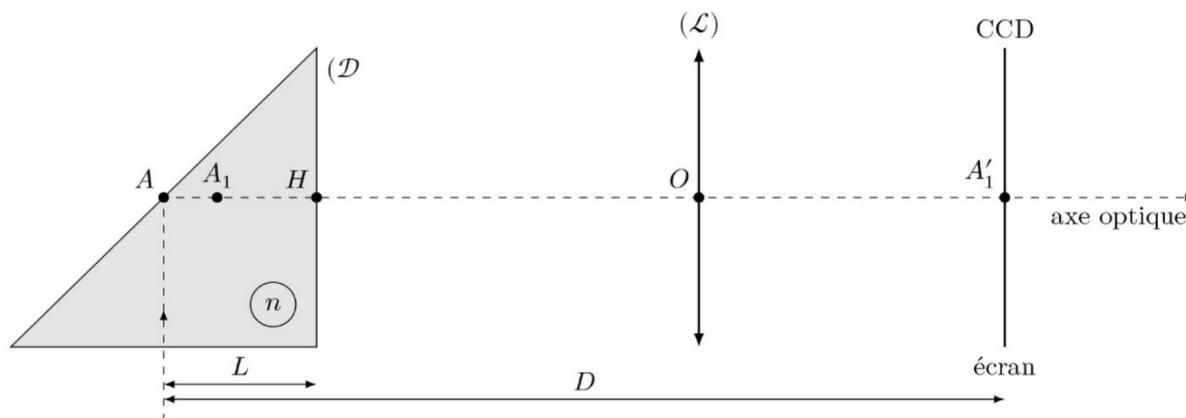


Figure 3 Schéma optique

I.A – Optique géométrique

I.A.1) Conception du système optique

L'objectif ici est de choisir la distance focale f' de la lentille et sa position, par exemple en déterminant p' . À cet effet, on donne $n = 1,5$, $L = 3$ cm, $D = 10$ cm et le grandissement transversal $\gamma = p'/p$ du système optique.

Q 1. Montrer que, dans les conditions de Gauss, la relation de conjugaison entre A et A_1 par le dioptre plan formé par la face de sortie du prisme s'écrit $\overline{HA_1} = \frac{1}{n} \overline{HA}$.

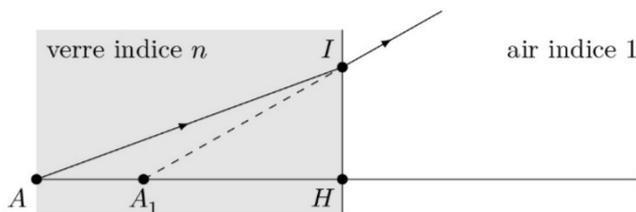


Figure 4

Q 2. Exprimer p et p' en fonction de D_1 et de γ . Déterminer alors f' en fonction de D_1 et de γ à l'aide de la formule de conjugaison de Descartes : $\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'}$.

Q 3. On souhaite déterminer la condition portant sur la distance focale f' d'une lentille convergente si l'on veut former l'image réelle sur un écran situé à une distance D_1 d'un objet réel. En remarquant qu'il faut $\gamma < 0$ pour obtenir une image réelle d'un objet réel, montrer que le rapport D_1/f' est inférieurement borné. En déduire l'inégalité vérifiée par f' .

Q 4. Applications numériques. On suppose $\gamma = -2$. À quelle distance place-t-on la lentille devant l'écran et quelle est sa focale ?

Q 5. On souhaite avoir une image la plus agrandie possible ($|\gamma|$ maximal), mais sans augmenter l'encombrement du dispositif, ce qui impose de ne pas augmenter la longueur D_1 . Dans quel sens faut-il faire varier f' ? En pratique, quelle limitation rencontre-t-on ?

I.A.2) Résolution de l'image

Dans cette sous-partie, on fait abstraction du prisme, on considère que l'empreinte est positionnée en A_1 au lieu de A .

Une empreinte digitale est faite de sillons de profondeur moyenne $e = 30 \mu\text{m}$ et dont deux crêtes voisines parallèles sont distantes de $a = 100 \mu\text{m}$. On note l_c la largeur d'un pixel (considéré comme étant de forme carrée) du capteur CCD. On cherche à obtenir l'image des crêtes du sillon sur le capteur CCD : la lentille conjugue le plan des crêtes, où se situe A_1 , à l'écran CCD (figure 5).

Sur la figure 6, les points M_1, M_2 et M_3 détaillent le motif de l'empreinte et leurs images respectives M'_1, M'_2 et M'_3 détaillent l'image de l'empreinte. On remarque que le point M'_2 ne se forme pas tout à fait sur la surface du CCD, les rayons lumineux délimités par la monture de la lentille viennent former une petite tâche circulaire de diamètre ϕ .

On note p' la distance entre la lentille et la surface du CCD et $|p|$ avec $p < 0$, la distance entre la lentille et le plan formé par les points objets M_1 et M_3 . On note alors $\gamma = p'/p$ le grandissement entre les couples de points conjugués (M_1, M'_1) et (M_3, M'_3) . On a $\gamma = -2$.

Q 6. À quelle condition sur a et sur l_c peut-on distinguer deux crêtes successives ? Quelle taille de pixel recommandez-vous ?

On note $k_0 = \omega/c$, le module de son vecteur d'onde dans le vide. Au passage du dioptre, cette onde donne naissance :

— à une onde réfléchie $\vec{E}_r = \underline{r}E_0\vec{e}_y \exp(-j(\omega t - \vec{k}_r \cdot \vec{r}))$,

— à une onde transmise (onde réfractée) $\vec{E}_t = \underline{t}E_0\vec{e}_y \exp(-j(\omega t - \vec{k}_t \cdot \vec{r}))$,

où \underline{r} et \underline{t} sont des nombres complexes appelés coefficients de réflexion et de transmission en amplitude.

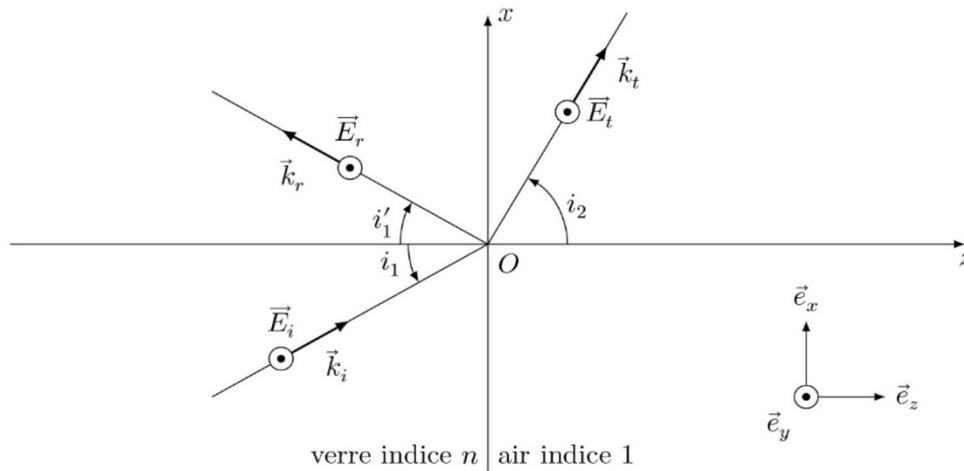


Figure 7 Réflexion et réfraction d'une onde électromagnétique sur un dioptre

De même, on note $\vec{k}_r = k_{rx}\vec{e}_x - k_{rz}\vec{e}_z$ et $\vec{k}_t = k_{tx}\vec{e}_x + k_{tz}\vec{e}_z$.

Enfin, on admet que les champs électriques et magnétiques sont continus à la traversée de ce dioptre.

Q 14. Montrer que, en tout point du dioptre,

$$\exp(jk_{ix}x) + \underline{r} \exp(jk_{rx}x) = \underline{t} \exp(jk_{tx}x) \quad (\text{I.1})$$

Q 15. En déduire une relation notée (I.2) entre \underline{r} et \underline{t} .

Q 16. On admet que (I.1) conduit à l'égalité $k_{ix} = k_{rx} = k_{tx}$. En déduire les deux relations de Descartes portant sur les angles i_1 , i'_1 et i_2 .

Q 17. À partir de l'étude du champ magnétique, trouver une deuxième équation notée (I.3) reliant \underline{r} et \underline{t} .

La solution du système d'équation conduit à $\underline{r} = \frac{1-\underline{\nu}}{1+\underline{\nu}}$ et $\underline{t} = \frac{2}{1+\underline{\nu}}$, où l'on a posé $\underline{\nu} = \frac{k_{tz}}{k_{iz}}$, qui est éventuellement un nombre complexe. Nous reviendrons sur ces coefficients dans la sous-partie I.C. Néanmoins, on remarque immédiatement qu'on n'a jamais $\underline{t} = 0$, même dans le cas d'une réflexion totale. Il y a toujours une onde électromagnétique transmise. Dans la suite de cette sous-partie, nous nous intéressons à la forme que prend cette onde transmise.

Q 18. Expliciter les composantes du vecteur d'onde \vec{k}_i en fonction de n , k_0 et i_1 .

Q 19. En remarquant que $k_{tz}^2 = k_0^2 - k_{tx}^2$, exprimer k_{tz}^2 en fonction de n , k_0 et i_1 . En déduire l'expression de k_{tz} (on distinguera deux cas). Écrire le champ électrique transmis complexe dans les deux cas (sans chercher à expliciter \underline{t}).

Q 20. Quelle est la forme de l'onde transmise dans le cas d'une réflexion totale ? Comment la qualifie-t-on ? Exprimer la longueur typique, notée δ , de pénétration de cette onde dans la direction \vec{e}_z . Expliquer qualitativement pourquoi il n'y pas, en moyenne, de puissance propagée dans la direction \vec{e}_z .

Données

Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Constante d'Avogadro	$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Charge élémentaire	$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Permittivité du vide	$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$
Électron-volt	$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
Constante de Planck réduite	$\hbar = 6,582 \times 10^{-16} \text{ eV}\cdot\text{s}$
Constante de structure fine	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$
Masse de la particule alpha	$m = 3727 \text{ MeV}/c^2$
Conductivité thermique du verre	$\lambda = 1 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
Coefficient conducto-convectif air/solide (convection naturelle)	$h = 9 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
Coefficient conducto-convectif air/solide (convection forcée)	$h = 25 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

Préfixes du système international d'unités

Facteur	Nom	Symbole	Facteur	Nom	Symbole
10^1	déca	da	10^{-1}	déci	d
10^2	hecto	h	10^{-2}	centi	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^6	méga	M	10^{-6}	micro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	téra	T	10^{-12}	pico	p
10^{15}	péta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y	10^{-24}	yocto	y

• • • FIN • • •

Partie II – Dualité onde-corpuscule

En octobre 1874, le jeune Max Planck s'inscrit à l'université de Munich pour y étudier les sciences exactes, il a alors 16 ans. Quelques années plus tard, Max Planck reçoit le prix Nobel de physique en 1918 « pour avoir fondé la mécanique quantique ».

Dans sa thèse de doctorat soutenue en 1924, Louis de Broglie postulait que toute particule de quantité de mouvement p avait des propriétés ondulatoires et que l'on pouvait lui associer une longueur d'onde donnée par la relation qui porte son nom

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

avec h la constante de Planck.

Depuis, plus de 120 prix Nobel ont été attribués pour des découvertes relatives au monde de la physique quantique ; ceci souligne la vitalité et l'importance de ce domaine de la physique.

Les phénomènes quantiques qui apparaissent à l'échelle microscopique sont parfois difficiles à appréhender car ils ne correspondent pas à notre intuition naturelle fondée sur notre expérience du monde macroscopique. À la base de leur compréhension se trouve l'idée de dualité onde-particule et la notion d'onde de matière.

L'objet de ce problème est d'étudier quelques expériences qui ont mis en évidence ces deux notions :

- interférences d'atomes de néon froid en 1992 ;
- expérience de Davisson et Germer, en 1927 ;
- interférences de molécules de fullerènes (molécules composées de 60 atomes de carbone) en 2003.

Partie I - Interférences d'atomes de néon froid

En 1992, une équipe japonaise a réalisé une expérience d'interférences atomiques. Le dispositif expérimental est indiqué sur le **document 4**, annexe documentaire.

Q17. Comment se manifestent sur l'écran d'observation les caractères corpusculaire d'une part et ondulatoire d'autre part des atomes de néon ?

Q18.

- Calculer à partir des données de l'**annexe**, la masse m^* d'un atome de néon.
- Déterminer l'expression de la vitesse v_f avec laquelle les atomes de néon atteignent les fentes de Young (on supposera leur vitesse initiale négligeable).
Application numérique.
- En déduire la valeur de la longueur d'onde de de Broglie λ associée aux atomes de néon au niveau des fentes de Young. Pourquoi les atomes de néon doivent-ils être traités comme un objet quantique ?
- Pourquoi est-il plus difficile de réaliser une telle expérience avec des atomes plutôt qu'avec des électrons ? Pourquoi utilise-t-on des atomes « froids » ?

- Q19.** Estimer la largeur de la tache de diffraction pour un atome diffracté par une des fentes et comparer à la résolution du MPC (**document 4**).

Sur la **figure 6**, S_1 et S_2 représentent les positions des deux fentes dans le plan d'étude perpendiculaire aux fentes supposées infiniment fines. Soit un point M du plan d'observation repéré par son abscisse x .

L'écran est placé loin des fentes à une distance D grande devant a et $|x|$.

On s'intéresse à l'interférence en M des ondes de matière ayant traversé chacune des deux fentes.

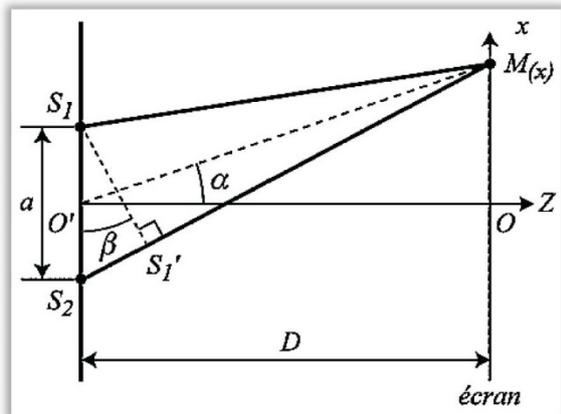


Figure 6 – Schéma simplifié des chemins issus des fentes

Q20.

- a) Montrer que $S_1M \simeq D + \frac{(a - 2x)^2}{8D}$ et $S_2M \simeq D + \frac{(a + 2x)^2}{8D}$ à l'ordre le plus bas

non nul en $\frac{2x \pm a}{2D}$.

- b) On suppose que la longueur d'onde de de Broglie λ des atomes de néon reste constante après la traversée des fentes de Young.

Déterminer en fonction de λ , D , a et x le déphasage $\Delta\varphi$ entre les ondes interférant au point M .

- c) Déterminer l'expression de l'interfrange théorique i_{th} .

Application numérique.

- d) Estimer la valeur i_{exp} de l'interfrange obtenu expérimentalement à l'aide du **document 5**, annexe documentaire. Commenter.

- Q21.** En réalité, le calcul de l'interfrange est beaucoup plus complexe dans les conditions expérimentales citées et une étude plus approfondie donne l'expression suivante pour la même interfrange, notée i'_{th} :

$$i'_{th} = \frac{h}{m^* v_f} \frac{D}{a} 2 \frac{\sqrt{1 + \alpha} - 1}{\alpha} \text{ avec } \alpha = \frac{2gD}{v_f^2}.$$

- a) Quelle est la dimension du coefficient α ? Quelles grandeurs compare ce coefficient ?

- b) Calculer i'_{th} et comparer au résultat expérimental.

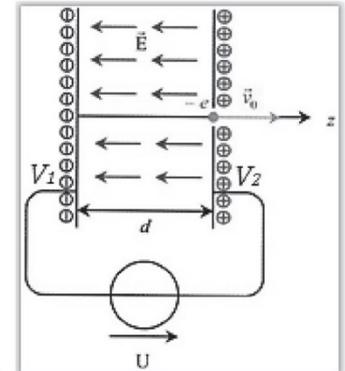
- c) Montrer que si $\alpha \ll 1$, on retrouve l'expression de la **question Q20.c)**. Commenter une telle approximation et indiquer la raison de la correction de l'interfrange.

Partie II - Expérience de Davisson et Germer : diffraction des électrons

Cette expérience (**document 6**, annexe documentaire) est historiquement la première de la série qui prouve que les électrons ont un comportement ondulatoire, comme la lumière ou les rayons X. Elle permet aussi de vérifier quantitativement la validité de la relation de de Broglie.

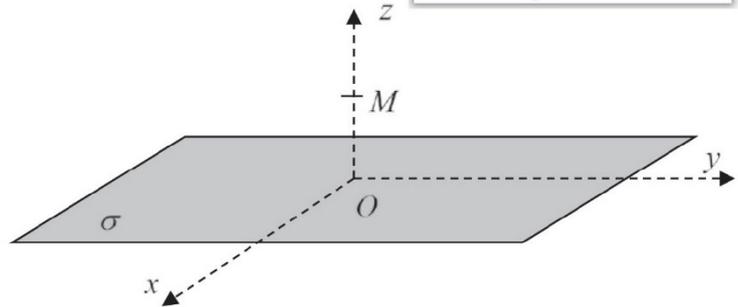
On modélise le canon à électron utilisé dans l'expérience de Davisson et Germer par deux armatures de potentiel V_1 et V_2 soumises à une différence de potentiel $U = V_2 - V_1$ et séparées par une distance d .

On s'intéresse tout d'abord au champ créé par une seule armature assimilée à un plan infini chargé uniformément. Soit σ sa densité surfacique de charge supposée positive et indépendante du temps.



Q22. Déterminer la direction du champ électrostatique $\vec{E}(M)$ au point M .
De quelle(s) variable(s) dépend(ent) ce champ ?

Q23. Quelle relation existe-t-il entre $E_z(z)$ et $E_z(-z)$? Justifier.

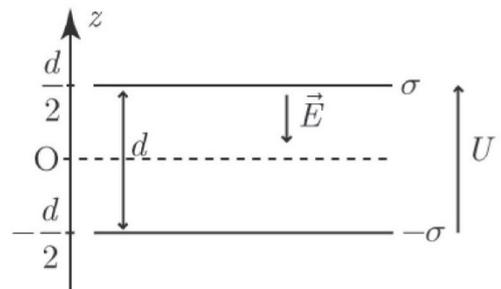


Q24. Montrer que le champ électrostatique créé par cette distribution s'écrit :

$$\vec{E} = \begin{cases} \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{u}_z & \text{si } z > 0 \\ -\frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{u}_z & \text{si } z < 0 \end{cases}.$$

Le canon à électron peut ainsi être modélisé par l'association de deux plans infinis de charges opposées $+\sigma$ et $-\sigma$

placés respectivement à la cote $\frac{d}{2}$ et $-\frac{d}{2}$.



Q25. Dédire du résultat de la question précédente l'expression du champ électrostatique en tout point de l'espace.

Q26. Montrer que l'énergie potentielle électrostatique d'une particule chargée de charge q placée entre les armatures s'écrit : $\mathcal{E}_p = qV(z) + K$, où $V(z)$ est le potentiel électrostatique et K est une constante arbitraire que l'on ne cherchera pas à déterminer.

Un électron de masse m_e de charge $-e$ est placé à l'armature négative de potentiel V_1 . On supposera que cet électron est initialement immobile. L'application de la différence de potentiel $U = V_2 - V_1 = 54 \text{ V}$ permet d'accélérer cet électron qui atteint une vitesse $\vec{v}_0 = v_0 \vec{u}_z$ au niveau de l'armature positive de potentiel V_2 . Il est ensuite éjecté à travers un trou percé dans cette dernière.

Q27. Déterminer l'expression de la norme v_0 en fonction de U , m et e .

Application numérique.

Doit-on se placer dans le cadre de la mécanique relativiste ?

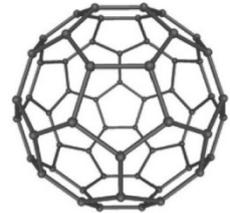
Q28. Déterminer la valeur numérique de la longueur d'onde de de Broglie associée aux électrons de vitesse v_0 . Commenter cette valeur par analogie aux conclusions émises par Max Von Laue décrite dans le **document 7**, annexe documentaire.

Le faisceau d'électron ainsi éjecté est modélisé par des rayons atteignant la surface du cristal qui les diffracte comme indiqué dans le **document 7**.

Q29. À partir du graphique de la **figure 8, document 6**, calculer la distance interatomique a dans le cristal de nickel, sachant que le pic représenté est le seul pic observé d'ordre non nul. Commenter la valeur obtenue.

Partie III - Interférences de molécules de fullerène

En 1999, des chercheurs de l'Université de Vienne montrent que la dualité onde-particule s'applique également à des macromolécules telles que le fullerène C_{60} . La description est donnée dans le **document 8**, annexe documentaire.



Le réseau utilisé est un réseau de fentes fines dont les caractéristiques sont données par la **figure 10, document 8**. On désire retrouver tout d'abord la condition d'interférences constructives, aussi appelée formule des réseaux.

Soit le cas général de rayons lumineux arrivant depuis la source S avec une incidence θ_0 sur le réseau et émergent avec un angle θ vers un point M de l'écran repéré par son abscisse x . On suppose que le point M est infiniment éloigné et on se place dans un milieu d'indice $n = 1$.

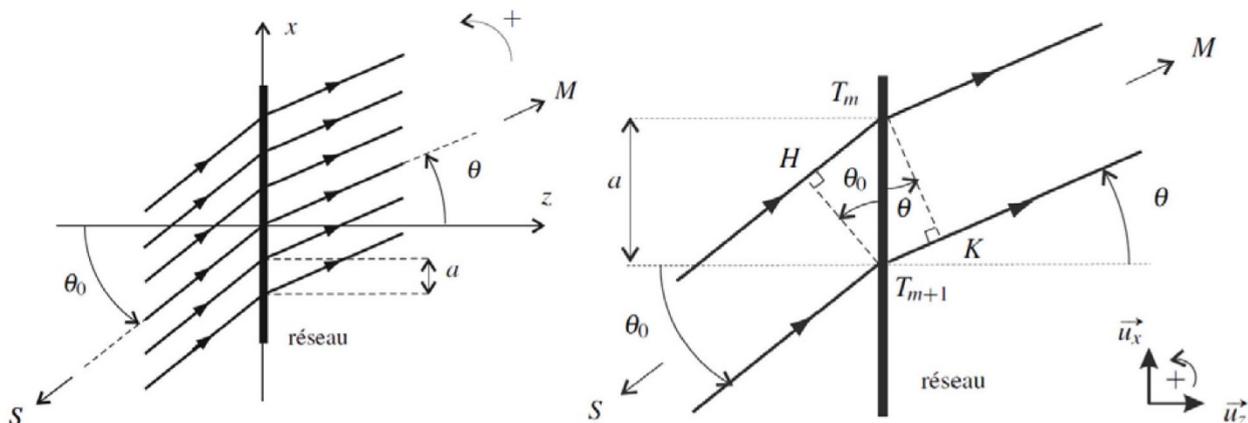


Figure 13 - Diffraction par un réseau (gauche) et calcul de la différence de marche (droite)

- Q30.** À l'aide de la **figure 13**, déterminer la différence de marche $\delta = (ST_{m+1}M) - (ST_mM)$ entre deux ondes passant par deux fentes consécutives T_m et T_{m+1} . En déduire la formule fondamentale des réseaux

$$\sin \theta_k - \sin \theta_0 = k \frac{\lambda}{a}$$

avec k un entier relatif appelé ordre de diffraction.

Pour une onde monochromatique, la représentation de l'intensité relative en fonction de la différence de phase φ entre deux rayons d'un réseau de N fentes est la suivante :

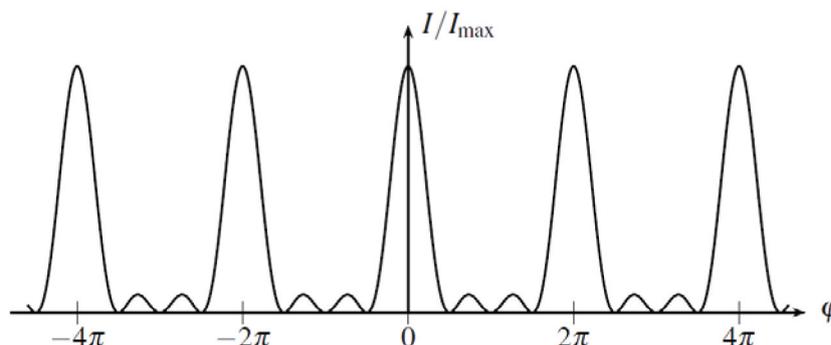


Figure 14 - Représentation de l'intensité relative pour $N = 4$

- Q31.** Comment évolue cette figure lorsque le nombre de fentes N augmente ?
- Q32.** Montrer qu'en incidence normale, la distance entre deux pics adjacents d'intensité maximale est donnée par

$$\Delta x = \frac{\lambda D}{a}$$

avec x l'abscisse du détecteur (on supposera $x \ll D$).

- Q33.** Déterminer la masse des molécules de fullerène puis la longueur d'onde moyenne de de Broglie λ_m d'une molécule à l'aide de la **figure 11**, **document 8**.
- Q34.** En déduire la valeur de Δx et comparer aux résultats de l'expérience.

La distribution de vitesses donnée en **figure 11** nous incite à modéliser la source S de molécules C_{60} comme une source d'ondes de de Broglie à spectre étendue :

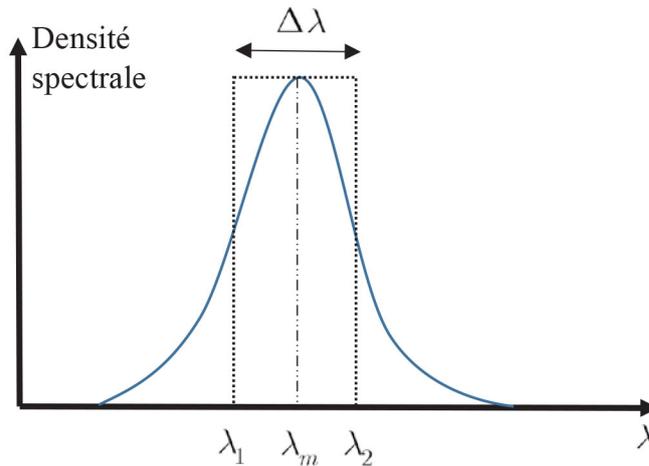


Figure 15 - Modélisation du spectre de la source de molécules de fullerène

On pose $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ la largeur à mi-hauteur et λ_m la longueur d'onde moyenne du spectre de la source.

Q35. Estimer $\Delta\lambda$ à partir de la **figure 11**. Quelle est la conséquence d'un élargissement spectral de la source sur la représentation de l'intensité relative donnée dans la **figure 14**.

Q36. À l'aide d'un critère semi-quantitatif sur l'ordre d'interférences $p(M)$, montrer que le contraste de la figure reste bon si la différence de marche $\delta(M)$ obéit à l'inégalité suivante

$$\delta(M) \leq l_C$$

où l'on exprimera l_C en fonction de λ_m et $\Delta\lambda$. Comment appelle-t-on cette grandeur ?

Q37. En déduire une condition sur la position du détecteur x pour que le contraste reste bon. Evaluer numériquement cette condition et comparer avec la **figure 12, document 8**.

Q38. Interpréter la dernière phrase du **document 8** :

« La température du faisceau incident joue un rôle important dans la diffraction. Si elle est trop élevée, les molécules de fullerène perdent leur cohérence : les interférences sont alors détruites ».

Annexe

Données

Constante d'Avogadro : $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Constante de Planck : $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

Constante de Planck réduite : $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,1 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

Accélération de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ m.s}^{-2}$

Masse d'un électron : $m_e = 9,1.10^{-31} \text{ kg}$

Charge élémentaire : $e = 1,6.10^{-19} \text{ C}$

Masse molaire du néon : $M(\text{Ne}) = 20 \text{ g.mol}^{-1}$

Masse molaire du carbone : $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$

Formulaire mathématique

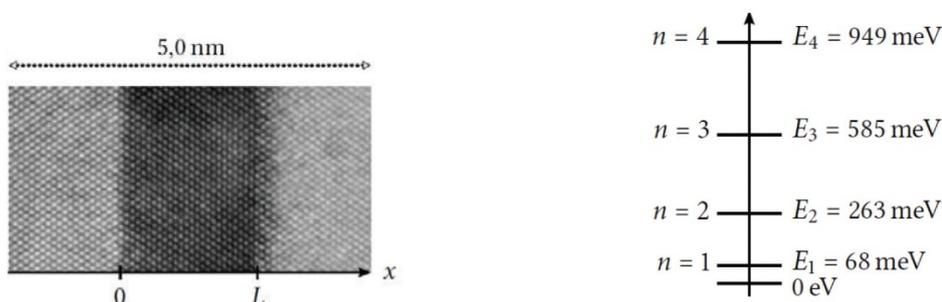
$$(1 + \varepsilon)^\alpha \simeq 1 + \alpha\varepsilon \text{ si } |\varepsilon| \ll 1$$

$$2 \sin^2 x = 1 - \cos(2x)$$

Document 3 - La diode laser

Une diode laser est un dispositif optoélectronique qui produit un faisceau de lumière cohérent créé par les phénomènes d'émission stimulée et de recombinaison radiative des porteurs de charge dans la zone active : la lumière confinée au sein de cette zone est amplifiée.

Une diode laser est constituée typiquement de trois couches, qui forment un guide d'onde. Les deux couches externes, appelées couches barrières, assurent un confinement électronique et optique de la couche active où l'effet laser se produit. Une image de ces 3 couches est donnée sur la **figure 3(a)**. Les porteurs de charges de cette zone active possèdent alors une énergie qui ne peut être que quantifiée comme le montre la **figure 3(b)** :



(a) Image réelle à l'échelle atomique des couches

(b) Quantification de l'énergie des porteurs de charge de la couche active (premiers niveaux)

Figure 3 - Données techniques d'une diode laser

Source : Techniques de l'ingénieur

Document 4 - Fentes de Young atomiques

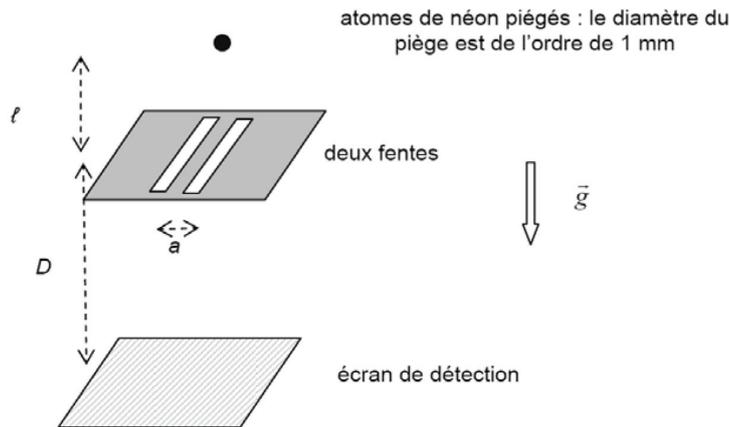


Figure 5 - Schéma du dispositif d'interférences avec des atomes de néon

Ce dispositif utilise des atomes de néon piégés et refroidis par laser à une température de 2,5 mK de manière à minimiser leur agitation thermique moyenne (à température ambiante, des atomes de néon dans l'air possèdent une vitesse typique de l'ordre de 600 m.s^{-1} due à l'agitation thermique). L'utilisation d'atomes légers et refroidis permet de disposer de valeurs de longueur d'onde de de Broglie plus élevées.

Lorsque ces atomes quittent le piège, ils tombent dans le champ de pesanteur et sont alors en chute libre. Le piège est situé à une hauteur $\ell = 76 \text{ mm}$ au-dessus de deux fentes d'Young de largeur $b = 2,0 \text{ }\mu\text{m}$ séparées de la distance $a = 6,0 \text{ }\mu\text{m}$.

Un écran MPC (Microchannel Plate Detector) situé à la distance $D = 113 \text{ mm}$ de la double fente détecte les atomes de néon avec une résolution de l'ordre de $20 \text{ }\mu\text{m}$.

Source : Ministère de l'Éducation Nationale (DGESCO - IGEN)
Dualité onde-particule (Juillet 2012)

Document 5 - Résultats expérimentaux

La figure d'interférences obtenue en libérant les atomes du piège est constituée d'environ 6 000 impacts atomiques. L'allure de la figure obtenue est très similaire à celle obtenue lors des expériences d'interférences photon par photon.

Chaque impact est clairement identifié, attestant du caractère corpusculaire des entités détectées : les atomes ne se « scindent » pas.

L'ensemble des impacts dessine des franges d'interférences, caractéristiques d'un comportement ondulatoire. La prédiction de l'impact est de nature probabiliste, la particule est décrite par une fonction d'onde.



Figure 7 - Figure d'interférences

Source : Fujio Shimizu et al., double-slit interference with ultracold metastable neon atoms, Physical Review (1992)

Document 6 - Expérience de Davisson et Germer

En 1927, Clinton Davisson et Lester Germer bombardent une cible de nickel monocristallin par des électrons dont ils maîtrisent la vitesse grâce à un canon à électrons utilisant une tension électrique ajustable. Un détecteur mobile permet ensuite d'étudier la dépendance angulaire du faisceau diffracté. Le dispositif expérimental est présenté ci-dessous, ainsi que l'intensité diffractée en coordonnées polaires. On observe que les électrons sont diffractés par la cible principalement dans une direction privilégiée :

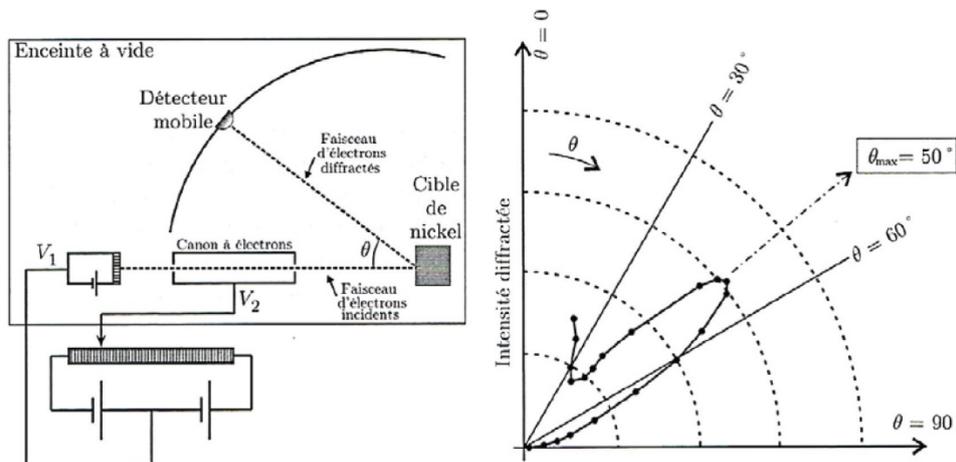


Figure 8 - Expérience de Davisson et Germer

Source : « Physique moderne » Thornton et Rex de Boeck 2009

Document 7 - Diffraction des rayons X par un cristal

En 1912, Max Von Laue avait découvert que les rayons X étaient diffractés par un cristal, de même que la lumière visible est diffractée par un réseau. Cette découverte prouvait à la fois :

- la nature ondulatoire des rayons X : ce sont des ondes comme la lumière visible, ce que l'on ignorait à l'époque
- la structure périodique des cristaux : un cristal se comporte comme un réseau. Les atomes sont alignés régulièrement dans une structure cristalline, chaque atome diffracte les rayons X incidents et l'on observe un pic d'intensité dans les directions où les différentes ondes diffractées interfèrent constructivement.

Sous incidence normale, la condition d'interférences constructives donne la direction des pics d'intensité

$$a \sin \theta_k = k\lambda \quad \text{où } k \text{ est un nombre entier relatif.}$$

La mesure des angles de diffraction θ_k permet donc de connaître la distance entre les atomes du réseau, ou bien la longueur d'onde des rayons X. Von Laue démontra ainsi que les rayons X avaient une longueur d'onde de l'ordre de 0,1 nm comme les distances interatomiques dans un cristal. La diffraction des rayons X est encore de nos jours une technique importante d'exploration des structures cristallines.

Source : Encyclopédie Universalis

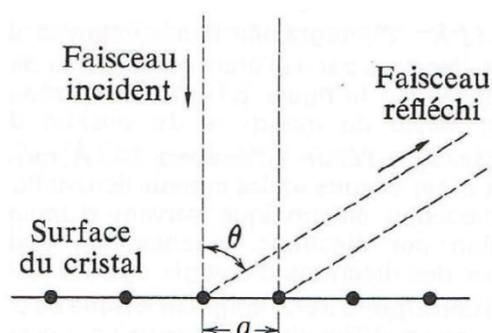


Figure 9 - Diffraction des rayons X par un plan cristallin

Document 8 - Diffraction des molécules de fullerène

La production d'un faisceau incident de C_{60} s'effectue par sublimation à des températures entre $626,85\text{ °C}$ et $726,85\text{ °C}$.

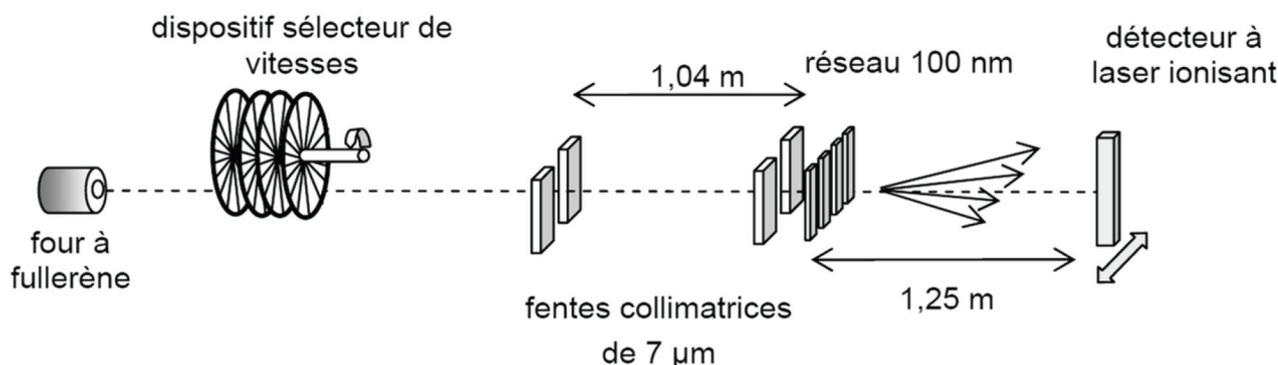


Figure 10 - Dispositif expérimental de la diffraction du fullerène

La distribution de vitesse des molécules de C_{60} en sortie du four est donnée par le graphique ci-contre :

Après diffraction sur le réseau de pas $a = 100\text{ nm}$ (grille de SiN_x contenant des fentes de 50 nm de large espacés de 100 nm), les molécules de C_{60} se déposent sur un écran bidimensionnel placé à une distance $D = 1,25\text{ m}$.

Leurs distributions spatiale et quantitative s'obtiennent en balayant l'écran avec un faisceau laser visible. L'absorption de la lumière ionise les molécules de C_{60} qui sont alors accélérées par l'application d'une tension électrique vers une électrode, où elles provoquent l'émission d'électrons qui constituent le signal détecté.

La figure ci-contre montre l'allure de la figure d'interférence observée :

La température du faisceau incident joue un rôle important dans la diffraction. Si elle est trop élevée, les molécules de fullerène perdent leur cohérence : les interférences sont alors détruites.

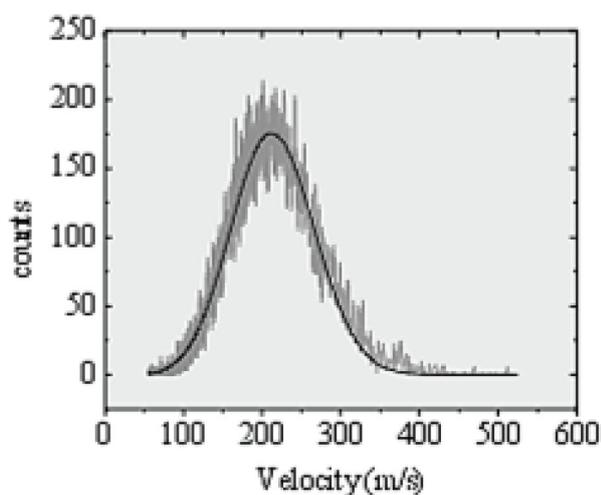


Figure 11 - Distribution des vitesses des molécules de fullerène à la sortie du four

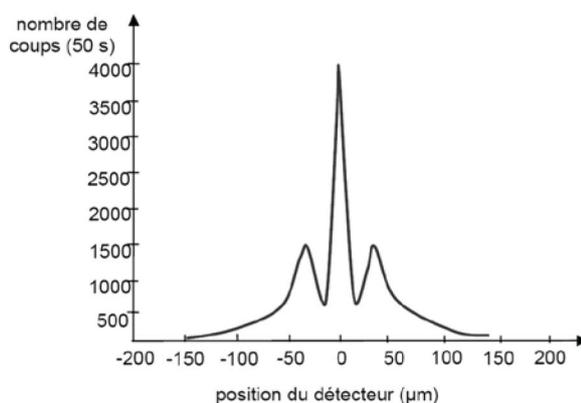


Figure 12 - Figure d'interférences obtenue sur un temps d'acquisition de 50 s

Source : Am. J. Phys. , Quantum interference experiments with large molecules, avril 2003