

8.

Dualité onde-corpuscule



© Petra Klawikowski / DS7 6133 PK (domaine public)

Sommaire

1	Aspect ondulatoire de la lumière	1
2	Aspect corpusculaire de la lumière.....	1
2.1	Expérience de Hertz/Hallwachs (1887).....	1
2.2	Extraction d'un électron	2
2.3	Insuffisance du modèle ondulatoire	3
2.4	Modèle corpusculaire de la lumière	3
2.5	Propriétés du photon.....	4
2.6	Propriétés d'un rayonnement électromagnétique.....	5
2.7	Interprétation de l'effet photoélectrique	5
2.8	Expérience de Lenard (1902)	7
3	Aspect ondulatoire des particules	10
3.1	Théorie de De Broglie	10
3.2	Vérification expérimentale	10
4	Pour en savoir plus.....	12
5	Exercices	13

1 Aspect ondulatoire de la lumière

La découverte des interférences lumineuses par l'expérience de Young a cependant laissé sans réponse la question de la nature des ondes lumineuses. La théorie de l'électromagnétisme développée par J.C. Maxwell a permis de prédire l'existence d'**ondes électromagnétiques** se propageant à la vitesse de la lumière. Ces ondes résultent des oscillations de champs électrique et magnétique et se propagent même dans le vide. La conclusion qui s'était imposée était que la lumière elle-même est une onde électromagnétique. Cette théorie fut vérifiée par H. Hertz en 1887.

Comme toute onde, une onde électromagnétique transporte de l'énergie de façon continue. L'énergie transportée par unité de temps à travers une surface est :

- proportionnelle à l'intensité de la lumière (égale au carré de l'amplitude du champ électrique) ;
- indépendante de la fréquence de l'onde.

La découverte de la **nature électromagnétique de la lumière** a fait surgir la question de l'interaction des ondes lumineuses avec des particules chargées.

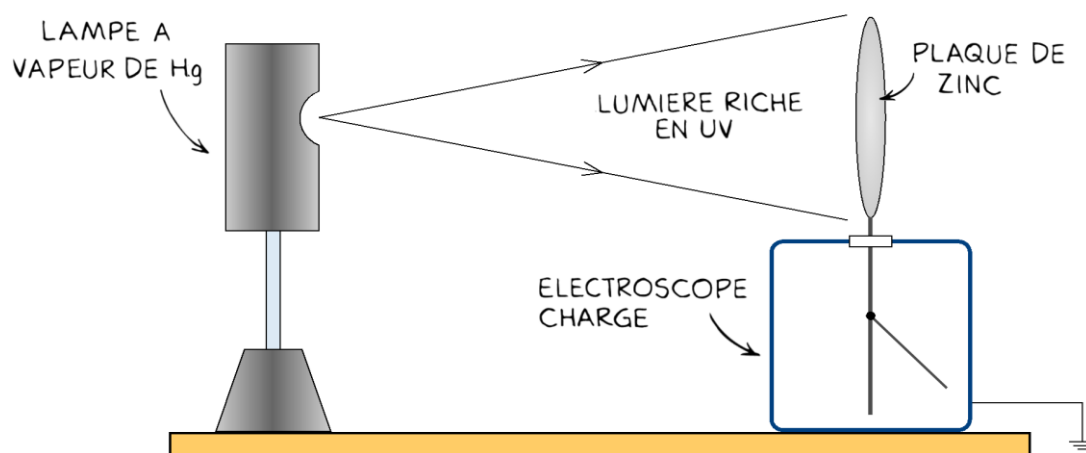
2 Aspect corpusculaire de la lumière

Fait historique curieux, l'expérience de Hertz démontrant la nature électromagnétique de la lumière a également permis de mettre en évidence sa nature corpusculaire.

2.1 Expérience de Hertz/Hallwachs (1887)

Description :

Un métal est constitué par un réseau cristallin d'ions positifs entre lesquels circulent des électrons liés au réseau mais libres de se déplacer à l'intérieur de ce réseau. Une onde lumineuse devrait apporter, par interaction électromagnétique, suffisamment d'énergie aux électrons pour qu'ils puissent quitter le métal.



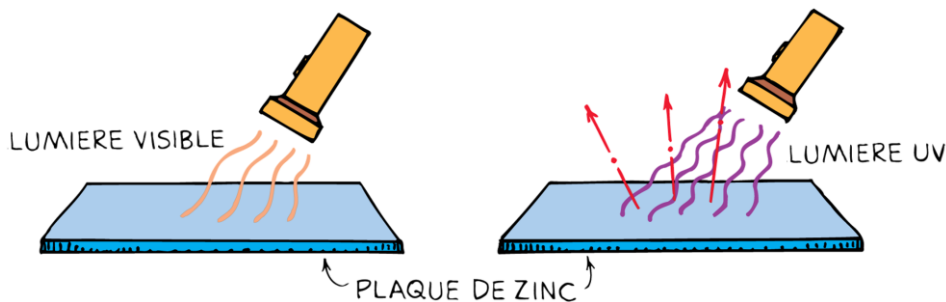
Hertz/Hallwachs utilisa une plaque de zinc (Zn) montée sur un électroscope puis éclairée par la lumière émise par une lampe à vapeur de mercure (Hg), riche en lumière ultraviolette. La plaque fut chargée négativement pour qu'un électron ayant quitté la plaque ne soit pas rattrapé par la charge positive ainsi créée.

Observations :

- La plaque de zinc se décharge immédiatement après l'éclairage par la lampe à vapeur de mercure.
- Lorsqu'une plaque de verre est interposée entre la lampe et la plaque, la décharge ne se fait pas.

Interprétation :

- La lumière éclairant la plaque de zinc permet d'extraire des électrons du métal. Une fois extraits, les électrons sont repoussés par la charge négative de la plaque : la décharge s'effectue.
- La lumière ayant traversé le verre n'a pas l'énergie « adéquate » pour sortir des électrons du zinc, bien qu'en approchant la lampe l'énergie captée ait augmentée. La lumière émise par la lampe à mercure est riche en rayonnement ultraviolet. Or le verre arrête le rayonnement ultraviolet. Il laisse cependant passer le rayonnement visible et infrarouge lequel ne permet donc pas d'extraire des électrons même s'il est très intense !



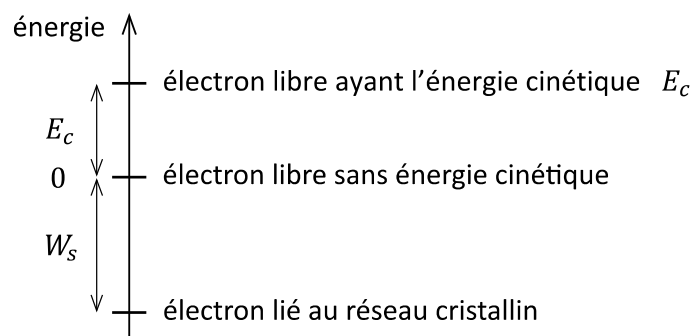
L'extraction d'électrons de la matière par un rayonnement électromagnétique est appelée **effet photoélectrique**.

Remarque :

Contrairement au zinc, la lumière visible provoque l'effet photoélectrique pour certains métaux alcalins comme le sodium, le potassium et le césium.

2.2 Extraction d'un électron

Pour extraire un électron de la surface d'un métal, il faut lui fournir au moins une énergie W_s , appelée **travail de sortie** ou **travail d'extraction**. Elle représente l'énergie de liaison de l'électron au réseau métallique.



Le diagramme énergétique illustre que :

- à l'intérieur du métal, l'électron a le moins d'énergie car il est lié au réseau ;
- lorsque l'électron a capté l'énergie $E = W_s$, il est sorti du métal et est au repos ($E_c = 0$) ;
- lorsque l'électron a capté une énergie $E > W_s$, il est sorti du métal et a une énergie cinétique $E_c = E - W_s$.

Le travail de sortie dépend de la nature du métal et de sa structure cristalline. Le tableau suivant donne quelques exemples.

Métal	W_s en eV
Cs	2,14
K	2,30
Na	2,75
Al	4,28
Zn	4,33
Cu	4,65
Fe	4,50

2.3 Insuffisance du modèle ondulatoire

Le modèle ondulatoire de la lumière n'arrive pas à expliquer certains résultats de l'expérience de Hertz :

- La décharge de la plaque de zinc se fait sans aucun retard. Selon le modèle ondulatoire, une onde électromagnétique transporte de l'énergie de façon continue. Un électron devrait par conséquent accumuler pendant un certain temps l'énergie W_s nécessaire pour quitter le métal.
- Un rayonnement UV peut extraire des électrons du zinc alors qu'un rayonnement du domaine visible de plus faible fréquence n'y arrive pas, même en augmentant son intensité et la durée de l'éclairage. Selon le modèle ondulatoire, l'énergie apportée par la lumière ne dépend pas de la fréquence de l'onde électromagnétique, mais elle dépend de l'intensité de la lumière et de la durée de l'éclairage.

2.4 Modèle corpusculaire de la lumière

Pour expliquer l'effet photoélectrique, Einstein renonça au modèle ondulatoire et recourut au modèle corpusculaire de la lumière :

- La lumière fournit l'énergie aux électrons de façon discontinue, un électron reçoit le « paquet d'énergie » nécessaire pour sortir du métal de façon quasi instantanée.
- La valeur d'un « paquet d'énergie » est d'autant plus grande que la fréquence de la lumière est grande.

Hypothèse d'Einstein (1905) :

Un rayonnement électromagnétique de fréquence f peut être considéré comme un faisceau de particules indivisibles : les **photons**. Chaque photon transporte un quantum d'énergie :

$$E = h f$$

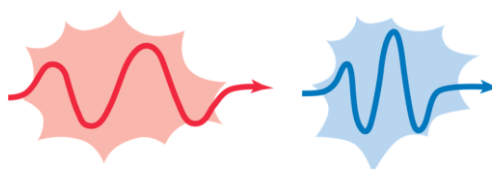
où h représente la constante de Planck.

Le photon (ou grain de lumière) est une particule élémentaire relativiste d'énergie E associée à une onde électromagnétique de fréquence f . Cette coexistence de propriétés corpusculaires et ondulatoires est appelée **dualité onde-corpuscule**. La lumière a une nature ondulatoire et une nature corpusculaire, mais, suivant le type de l'expérience, soit l'une soit l'autre se manifeste.



■ As-tu compris ?

- Dans l'expression $E = h f$, le symbole f représente
 - La fréquence du son
 - La force de frottement
 - La fréquence de l'onde électromagnétique
 - La fréquence de vibration d'une corde
- Parmi les couleurs de lumière ci-dessous, déterminer celle pour laquelle l'énergie par photon est la plus grande. Justifier le choix.
 - Rouge
 - Bleue
 - Jaune
 - Violette
- Calculer l'énergie d'un photon...
 - de lumière rouge de longueur d'onde 650 nm.
 - de lumière bleue de longueur d'onde 450 nm.



2.5 Propriétés du photon

Les principales propriétés du photon sont :

- La masse au repos du photon est nulle.
- Le photon a une charge électrique nulle.
- Le photon se déplace dans le vide à la vitesse $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.
- L'énergie du photon s'écrit $E = h f$, avec $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s. Comme $f = \frac{c}{\lambda}$ la relation précédente peut également s'écrire :

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

L'étude de la relativité restreinte a montré que l'énergie du photon peut aussi être exprimée en fonction de sa quantité de mouvement p :

$$E = p c$$

En identifiant les deux relations pour l'énergie du photon :

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

ce qui donne la *quantité de mouvement* du photon :

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

2.6 Propriétés d'un rayonnement électromagnétique

Un rayonnement électromagnétique est caractérisé par sa fréquence f et sa puissance P . La puissance d'un rayonnement électromagnétique éclairant une surface s'écrit :

$$P = \frac{E_{\text{ray}}}{\Delta t}$$

où E_{ray} est l'énergie du rayonnement arrivant sur la surface pendant l'intervalle de temps Δt . Soit N le nombre de photons frappant la surface pendant cet intervalle de temps, alors l'énergie du rayonnement est $E_{\text{ray}} = N h f$ et l'expression pour la puissance devient :

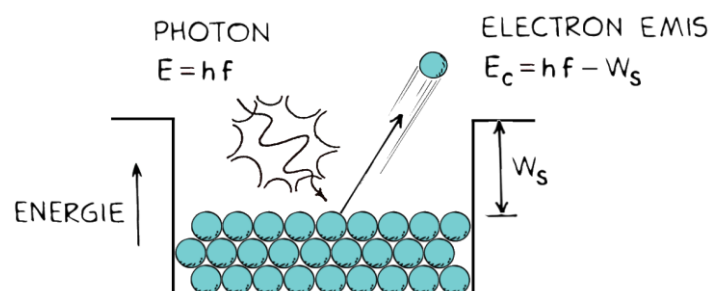
$$P = \frac{N}{\Delta t} h f$$

Remarque :

L'augmentation de la puissance d'une source de lumière monochromatique de fréquence donnée fait augmenter le nombre de photons émis par seconde.

2.7 Interprétation de l'effet photoélectrique

Considérons un photon d'énergie $E = h f$ pénétrant dans un métal. Sur son parcours, il peut éventuellement rencontrer un électron et lui céder, par interaction électromagnétique, quasi instantanément toute son énergie. Le photon est complètement absorbé, il disparaît. Le « paquet d'énergie » transporté par le photon représente la plus petite quantité d'énergie échangée et est aussi appelé **quantum d'énergie**.



L'**effet photoélectrique** est une interaction entre un photon et un électron, où le photon cède toute son énergie et disparaît.

Lorsqu'un électron absorbe un photon, trois cas sont envisageables :

- $h f = W_s$

L'énergie du photon est égale au travail de sortie de l'électron et suffit tout juste à expulser l'électron hors du métal. Dans ce cas la fréquence correspond à la **fréquence seuil** du métal :

$$f_s = \frac{W_s}{h}$$

- $h f < W_s \Leftrightarrow f < f_s$

L'énergie du photon est inférieure au travail de sortie et donc insuffisante pour extraire un électron du métal ; l'effet photoélectrique ne se produit pas et l'électron reste prisonnier du réseau métallique.

- $h f > W_s \Leftrightarrow f > f_s$

L'énergie du photon est supérieure au travail de sortie. L'électron capte l'énergie $h f$. La partie W_s de cette énergie sert à libérer l'électron du réseau métallique ; l'électron conserve l'excédent sous forme d'énergie cinétique E_c :

$$E_c = h f - W_s = h f - h f_s = h (f - f_s)$$

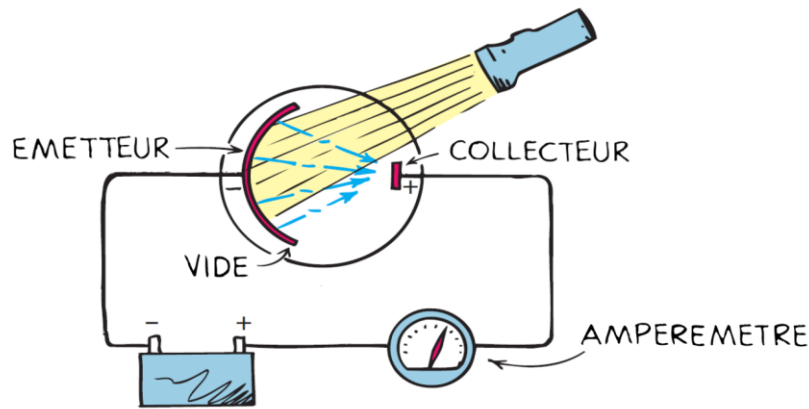
C'est la **relation d'Einstein** pour l'effet photoélectrique (prix Nobel 1921).

■ As-tu compris ?

4. Un métal a un travail de sortie de 3,0 eV.
 - a. Calculer la fréquence seuil f_s et la longueur d'onde seuil λ_s de ce métal.
 - b. Une lumière de fréquence f et de longueur d'onde λ est incidente sur une plaque de ce métal. Pour quelles valeurs de f et de λ peut-on observer un effet photoélectrique ?
5. La puissance d'une lumière incidente sur une plaque métallique est doublée en gardant la longueur d'onde inchangée. Discuter l'effet de ce changement sur...
 - a. l'énergie cinétique d'un électron émis.
 - b. le nombre d'électrons émis par seconde.

2.8 Expérience de Lenard (1902)

Le dispositif suivant fut utilisé par P. Lenard pour étudier l'effet de la fréquence et de l'intensité de la lumière sur l'énergie cinétique des électrons émis par l'effet photoélectrique.



Deux plaques métalliques de même matériau, émetteur et collecteur, sont disposées face à face dans un tube à vide et branchées à un générateur de tension variable U . Une des plaques est éclairée par une lumière monochromatique de fréquence f et de puissance P . Les électrons sortis de l'émetteur par effet photoélectrique avec l'énergie cinétique E_c sont captés par le collecteur ce qui fait apparaître dans le circuit un courant électrique d'intensité I qui est mesurée à l'aide d'un ampèremètre.

Lorsque la tension U est nulle, les électrons vont atteindre le collecteur avec l'énergie cinétique de sortie E_c . Une tension positive va accélérer les électrons, une tension négative va les freiner. Pour une certaine valeur de la tension négative $U = -U_0$, où U_0 est appelée **tension d'arrêt**, les électrons ne vont plus atteindre le collecteur et le courant électrique s'annule. D'après le théorème de l'énergie cinétique, la variation de l'énergie cinétique d'un électron est égale au travail effectué par la force électrique :

$$\Delta E_c = W(\vec{F}_{el})$$

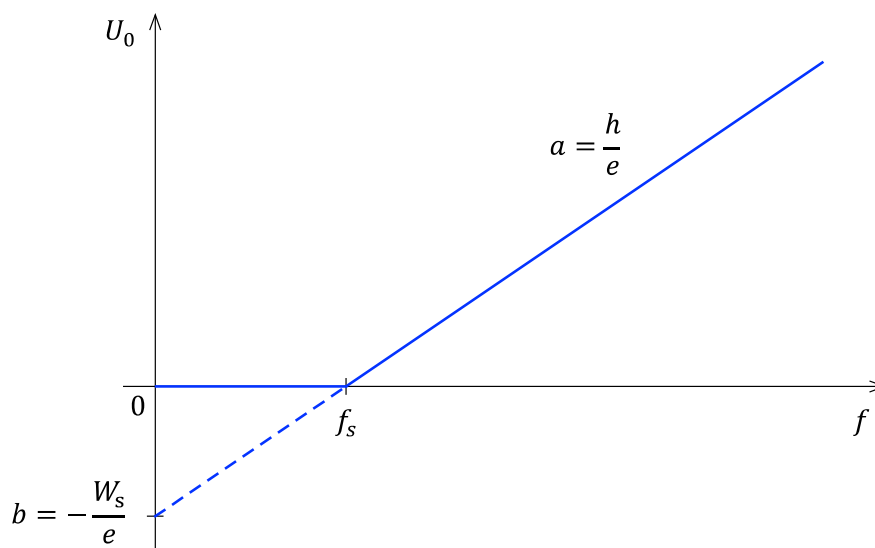
$$E_c(\text{collecteur}) - E_c(\text{émetteur}) = e U$$

$$0 - E_c = -e U_0$$

$$E_c = e U_0$$

La mesure de la tension d'arrêt permet de déterminer l'énergie cinétique des électrons émis.

La représentation de la tension d'arrêt U_0 en fonction de la fréquence f de la lumière donne une droite d'équation $U_0 = a f + b$, où a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite.



Pour des fréquences inférieures à la fréquence seuil, il n'y a pas d'effet photoélectrique, la tension d'arrêt est nulle. Pour des fréquences supérieures à la fréquence seuil, la relation d'Einstein permet d'écrire :

$$U_0 = \frac{E_c}{e} = \frac{hf}{e} - \frac{W_s}{e} = \frac{h}{e} f + \left(-\frac{W_s}{e}\right)$$

ce qui donne, par identification :

$$a = \frac{h}{e}$$

et :

$$b = -\frac{W_s}{e}$$

Le modèle corpusculaire permet d'interpréter les résultats de l'expérience de Lenard et de déterminer expérimentalement les valeurs de la constante de Planck et du travail de sortie du métal utilisé.

■ As-tu compris ?

6. Des photons d'énergie $8,0 \cdot 10^{-20} \text{ J}$ sont incidents sur une plaque métallique. Le travail de sortie du métal est $4,8 \cdot 10^{-20} \text{ J}$. Quelle est la tension d'arrêt ?
 A. 0,2 V B. 0,3 V C. 0,5 V D. 0,8 V
7. Dans une expérience selon Lenard, on mesure que la tension d'arrêt pour des photons de fréquence 821 THz vaut 1,62 V. Quelle serait la fréquence de photons qui sont arrêtés par une tension de 1,27 V ?
 A. 821 THz B. 736 THz C. 688 THz D. 644 THz

Exercice résolu

Une source lumineuse monochromatique émet un faisceau de lumière de longueur d'onde 560 nm et de puissance 80 mW.

- Calculer l'énergie d'un photon du faisceau.
- Combien de photons sont émis par seconde ? Quelle est la quantité de mouvement d'un photon ?
- Cette lumière éclaire une couche métallique et provoque un effet photoélectrique. La vitesse maximale des électrons émis est mesurée à 290 km/s. Calculer le travail d'extraction de ce métal en eV, ainsi que la longueur d'onde seuil pour l'effet photoélectrique de ce métal.

Solution :

- a. L'énergie d'un photon est donnée par :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

d'où :

$$E = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{560 \cdot 10^{-9}} \text{ J} = 3,55 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,22 \text{ eV}$$

- b. La puissance P du faisceau de lumière s'écrit :

$$P = \frac{N}{\Delta t} E$$

où N est le nombre de photons émis pendant la durée Δt . Pour $\Delta t = 1 \text{ s}$:

$$N = \frac{P \Delta t}{E} = \frac{0,080 \cdot 1}{3,55 \cdot 10^{-19}} = 2,25 \cdot 10^{17}$$

La quantité de mouvement d'un photon vaut :

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{560 \cdot 10^{-9}} \text{ kg m/s} = 1,18 \cdot 10^{-27} \text{ kg m/s}$$

- c. Relation d'Einstein pour l'effet photoélectrique :

$$E_c = E - W_s = \frac{1}{2} m v_{max}^2$$

et donc :

$$W_s = E - \frac{1}{2} m v_{max}^2 = 3,55 \cdot 10^{-19} \text{ J} - \frac{1}{2} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (2,9 \cdot 10^5)^2 \text{ J}$$

d'où :

$$W_s = 3,17 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,98 \text{ eV}$$

La longueur d'onde seuil vérifie la relation :

$$W_s = \frac{hc}{\lambda_s}$$

d'où :

$$\lambda_s = \frac{hc}{W_s} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,17 \cdot 10^{-19}} \text{ m} = 628 \text{ nm}.$$

3 Aspect ondulatoire des particules

3.1 Théorie de De Broglie

Un photon possède à la fois les propriétés ondulatoires, fréquence f et longueur d'onde λ , et les propriétés corpusculaires, énergie E et quantité de mouvement p , propriétés qui sont reliées par :

$$E = h f$$

et :

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

Par analogie au photon, Louis De Broglie présenta la théorie suivante (1924) :

À toute particule d'énergie E et de quantité de mouvement p est associée une onde de fréquence f et de longueur d'onde λ avec :

$$f = \frac{E}{h}$$

et :

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

La longueur d'onde associée à une particule est appelée **longueur d'onde de De Broglie**.

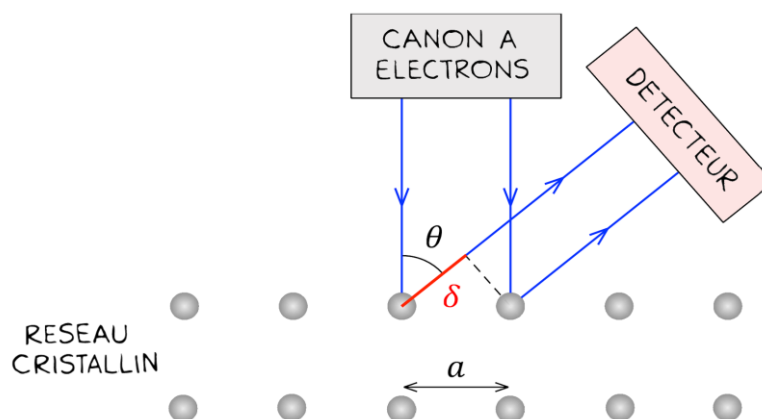
Remarque :

La relation $c = f \lambda$ ne s'applique que pour des ondes associées à des particules de masse nulle, comme c'est le cas pour le photon.

3.2 Vérification expérimentale

Davisson et Germer ont réalisé une expérience (1927) mettant en évidence le comportement ondulatoire des électrons.

Un canon à électrons accélère des électrons à partir du repos sous une tension U et les envoie sur un cristal de nickel, perpendiculairement à la surface du cristal. Les atomes de nickel forment un réseau cristallin dont les atomes voisins dans la direction parallèle à la surface du cristal sont séparés d'une distance $a = 2,18 \cdot 10^{-10}$ m.



L'onde associée à un électron est diffractée par les atomes du réseau. Les rayons diffractés par des atomes voisins dans une direction formant un angle θ par rapport à la direction incidente présentent une différence de marche de :

$$\delta = a \sin \theta .$$

Un détecteur capte les électrons diffractés par le cristal dans la direction θ . Des interférences constructives sont observées dans les directions déterminées par la condition :

$$\delta = n \lambda, \quad n \in \mathbb{Z}$$

où λ désigne la longueur d'onde associée aux électrons.

Pour des électrons accélérés sous une tension $U = 54 \text{ V}$, Davisson et Germer ont observé un nombre maximal d'électrons pour un angle $\theta = 50^\circ$. Ils ont ainsi pu vérifier expérimentalement la théorie de De Broglie pour les électrons (cf. exercice 10)

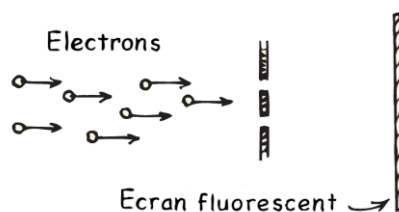
D'autres expériences de diffraction¹ ou d'interférences par une double fente ont confirmé les hypothèses de De Broglie : la dualité onde-corpuscule s'applique à toutes les particules.



Interférences d'électrons par une double fente

■ As-tu compris ?

8. Un faisceau d'électrons passe par une double fente et frappe un écran fluorescent (voir figure).
 - a. Si les électrons se comportaient uniquement comme des particules, quel serait le motif observé sur l'écran fluorescent après le passage des électrons à travers la double fente ?
 - b. Quel motif est observé lorsque l'expérience est réalisée ?
 - c. Quel modèle permet d'expliquer cette observation ?



9. Un électron et un proton voyagent à la même vitesse.
 - a. Qui a la plus grande quantité de mouvement ? Justifier.
 - b. Qui a la plus grande longueur d'onde de De Broglie ? Justifier.

¹ L'image sur la page titre montre des anneaux de diffraction observés sur un écran luminescent lors de la diffraction d'électrons par une fine couche de graphite.

4 Pour en savoir plus

Comment interpréter les figures d'interférences obtenues avec le dispositif de Young dans l'hypothèse du modèle corpusculaire de la lumière ?

Prenons comme source de lumière un canon à photons qui émet les photons l'un après l'autre. Le nombre de photons émis par seconde est petit. Au cours de l'expérience nous allons observer la distribution des impacts ponctuels des photons sur l'écran :



Chaque photon qui arrive sur l'écran fait apparaître un impact ponctuel et montre leur nature corpusculaire. Au cours de l'expérience, la distribution des photons sur l'écran montre leur nature ondulatoire (franges d'interférence). Max Born proposa l'interprétation probabiliste de l'onde associée à une particule : la probabilité qu'une particule apparaisse comme corpuscule lors d'une mesure est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde associée à cette particule. Cette interprétation reste valable pour tout type de particules, photons, électrons, protons, etc.

5 Exercices

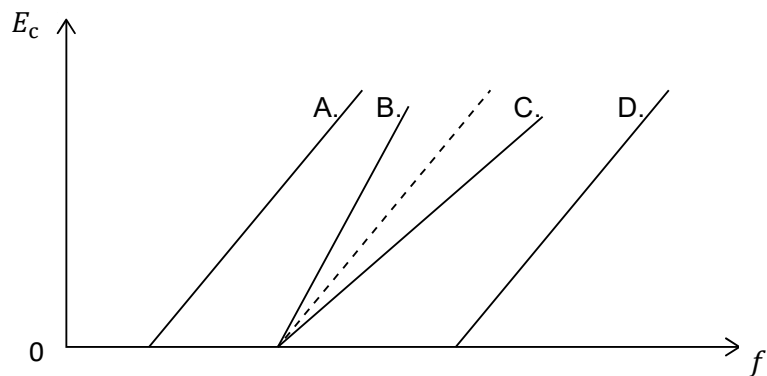
1. Une longueur d'onde typique du rayonnement infrarouge émis par notre corps mesure 25 mm. Calculer l'énergie d'un photon de ce rayonnement.
2. Quel modèle interprète correctement l'interaction entre la lumière et un électron ?
 - A. Le modèle ondulatoire
 - B. Le modèle corpusculaire
 - C. Ces deux modèles
 - D. Aucun de ces deux modèles
3. Le travail d'extraction d'un électron du zinc est égal à 3,3 eV.
 - a. Calculer la fréquence seuil f_s et la longueur d'onde seuil λ_s du zinc.
 - b. On éclaire le zinc par une radiation UV de longueur d'onde 0,25 μm . Déterminer l'énergie cinétique maximale de sortie E_c des électrons et leur vitesse v .
 - c. On éclaire le zinc par la lumière d'un arc électrique en interposant une plaque de verre qui absorbe les ondes de longueur d'onde inférieure à 0,42 μm . Un effet photoélectrique est-il observé ? Justifier.
4. Un laser à rubis (cristal de Al_2O_3 avec des traces d'ions Cr^{3+}) émet des impulsions lumineuses de longueur d'onde 694,3 nm (lumière rouge). Une impulsion lumineuse a une puissance moyenne de 10 MW et une durée de 1,5 ns.
 - a. Combien de photons sont émis pendant une impulsion ?
 - b. Déterminer la quantité de mouvement de l'ensemble de tous les photons.
5. Un ballon de football de masse $m = 500$ g se déplace avec une vitesse de $v = 54$ km/h. Déterminer la longueur d'onde λ associée à ce ballon et en conclure qu'il est impossible de diffracter des corps macroscopiques.
6. Un électron se déplace deux fois plus vite qu'un autre. Qui a la plus grande longueur d'onde ? Justifier.
7. Sous quelle tension un électron doit-il être accéléré à partir du repos pour avoir une longueur d'onde de De Broglie de 10^{-10} m, ordre de grandeur du diamètre d'un atome ?
8. De la lumière de longueur d'onde 208 nm est incidente sur une plaque métallique. La tension d'arrêt est 1,40 V. Calculer la longueur d'onde seuil pour ce métal.
9. L'expérience de Lenard est réalisée avec une lampe à vapeur de mercure. Le tableau reprend les valeurs de la tension d'arrêt U_0 pour différentes longueurs d'onde λ dans le domaine visible du spectre de mercure.

λ en nm	405	436	546
U_0 en V	0,954	0,734	0,158

- a. Représenter graphiquement la tension d'arrêt U_0 en fonction de $1/\lambda$.
- b. Dédire du graphique une valeur pour la constante de Planck.
- c. Dédire du graphique une valeur pour le travail de sortie du métal utilisé.

- 10.** La ligne en pointillé représente l'énergie cinétique maximale d'un électron émis en fonction de la fréquence de la lumière incidente sur une plaque d'un métal donné. La plaque est remplacée par une plaque d'un autre métal qui nécessite moins d'énergie pour en extraire un électron.

Laquelle des représentations suivantes sera observée ? Justifier.



- 11.** Dans expérience de Davisson et Germer pour étudier la nature ondulatoire de particules matérielles, des électrons ont été accélérés sous une tension de 54 V. Déterminer la longueur d'onde λ associée à ces électrons et montrer qu'il y a interférence constructive dans la direction qui fait un angle de 50° avec la direction incidente.

Crédits Photos

© Petra Klawikowski / DS7 6133 PK (10 Nov. 2015) (domaine public) – **page titre**

© Wikimedia Commons / Prof Dr. Claus Jönsson – **p.11** (interférences d'électrons)

© Paul Hewitt – **p.12** (stages of two-slit interference pattern)

Crédits Illustrations

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours. Les illustrations de Paul G. HEWITT ont été retravaillées par Laurent HILD, avec l'autorisation écrite et personnelle de l'auteur. Les illustrations originales sont des livres :

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson

© HEWITT, Paul G., SUCHOCKI John, *Conceptual physical science – Practice Book*, 2012, Pearson

© EPSTEIN Lewis C., HEWITT, Paul G., *Thinking Physics* – 1981, Insight Press

