

COURS

Physique quantique — Dualité onde- corpuscule

Tle

Programme de terminale générale, enseignement de spécialité — BO spécial n°8 du 25 juillet 2019

Une lampe rouge de mille watts n'arrache aucun électron à un métal qu'une faible lampe bleue suffit à ioniser. C'est cette expérience qui a obligé la physique à admettre que la lumière arrive par paquets.

1 L'effet photoélectrique

RÈGLE

L'effet **photoélectrique** est l'extraction d'électrons d'un métal éclairé. Il dépend de la **fréquence** de la lumière, non de son **intensité** : en dessous d'une **fréquence seuil** propre au métal, **aucun** électron n'est arraché, quelle que soit la puissance de la source. Au-dessus du seuil, l'extraction est **immédiate**, même à très faible intensité, et augmenter l'intensité augmente le **nombre** d'électrons extraits, jamais leur énergie.

$$f < f_0 : \text{rien} \cdot f \geq f_0 : \text{extraction immédiate}$$

LE PIÈGE QUI COÛTE LE PLUS DE POINTS

Penser qu'une lumière rouge suffisamment intense finira par extraire des électrons du métal. — Cela supposerait que l'énergie s'**accumule** sur l'électron, comme le ferait une onde continue. Or elle arrive par **paquets** indivisibles : chaque électron interagit avec **un seul photon**, dont l'énergie dépend de la **fréquence**. Augmenter l'intensité multiplie le nombre de photons, sans changer l'énergie d'aucun d'eux. Mille photons trop pauvres restent mille photons trop pauvres.

Le réflexe : L'intensité donne le **nombre** de photons, la fréquence leur **énergie**.

DÉFINITION

Le **photon** est le grain élémentaire de lumière. Son énergie est proportionnelle à la **fréquence** du rayonnement, le coefficient de proportionnalité étant la constante de **Planck**. Un **photon** est **indivisible** : il est absorbé en entier ou pas du tout, ce qui explique l'existence d'un seuil net et l'absence de tout délai d'accumulation.

$$E = h \times f$$

PROPRIÉTÉ

Le bilan énergétique de l'extraction s'écrit simplement : l'énergie du **photon** sert d'abord à **arracher** l'électron — c'est le travail d'extraction, propre au métal —, et l'excédent devient l'énergie **cinétique** de l'électron émis. L'énergie cinétique maximale croît donc **linéairement** avec la fréquence, et ne dépend **pas** de l'intensité.

$$E_c = hf - W_{\text{extraction}}$$

2 La dualité onde-corpuscule

RÈGLE

La lumière présente selon les expériences un comportement **ondulatoire** — interférences, diffraction — ou **corpusculaire** — effet photoélectrique, effet Compton. C'est la **dualité** onde-corpuscule. Elle ne signifie pas que la lumière serait « les deux à la fois » ou « tantôt l'un tantôt l'autre » selon son humeur : elle signifie que **nos deux modèles classiques** sont chacun incomplets, et que le dispositif expérimental détermine lequel rend compte du résultat.

PROPRIÉTÉ

Cette **dualité** ne concerne pas que la lumière. **De Broglie** a associé à toute particule de quantité de mouvement p une **longueur d'onde**, ce qui a été confirmé par la diffraction d'électrons. La longueur d'onde associée est d'autant plus petite que la particule est massive et rapide : elle est mesurable pour un électron, et totalement négligeable pour un objet macroscopique — d'où l'absence d'effets quantiques visibles à notre échelle.

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

3 Les niveaux d'énergie

RÈGLE

L'énergie d'un atome ne prend que certaines valeurs : ses **niveaux d'énergie** sont **quantifiés**. Un atome passe d'un niveau à un autre en absorbant ou en émettant un **photon** dont l'énergie vaut **exactement** la différence entre les deux niveaux. C'est pourquoi les spectres atomiques sont des **spectres de raies** et non des spectres continus : seules certaines transitions existent, donc seules certaines fréquences apparaissent.

$$\Delta E = E_{\text{haut}} - E_{\text{bas}} = hf$$

Un **spectre d'émission** montre des raies **brillantes** sur fond noir — l'atome excité restitue des photons d'énergies déterminées. Un spectre **d'absorption** montre des raies **sombres** sur fond continu — l'atome prélève exactement les mêmes énergies dans une lumière blanche qui le traverse. Les raies sont aux **mêmes** positions dans les deux cas : c'est ce qui permet d'identifier un élément dans l'atmosphère d'une étoile qu'on n'atteindra jamais.

EXPLOITER UN SPECTRE DE RAIES OU UN SEUIL PHOTOÉLECTRIQUE

- 1 Identifier la grandeur donnée : une **fréquence**, une **longueur d'onde**, ou une **énergie** ?
- 2 Convertir si nécessaire, en gardant les unités du système et en repérant les électronvolts.
- 3 Pour un seuil, comparer l'énergie du **photon** au travail d'extraction du métal.
 $3,1 - 2,3 = 0,8$
Un photon de 3,1 eV sur un métal de travail d'extraction 2,3 eV libère un électron de 0,8 eV.
- 4 Pour une raie, rapporter l'énergie du photon à une **différence entre deux niveaux**, jamais à un niveau seul.
- 5 Vérifier la cohérence : au-dessous du seuil, rien ; au-dessus, une énergie cinétique **croissante avec la fréquence**.

À VÉRIFIER

- Ai-je attribué à la **fréquence** l'énergie, et à l'**intensité** le nombre de photons ?
- Ai-je écrit qu'un **photon** est absorbé **en entier** ou pas du tout ?
- Mon énergie cinétique est-elle bien la **différence** entre hf et le travail d'extraction ?
- Ai-je rapporté une raie à une **différence** de **niveaux d'énergie** ?
- Ai-je présenté la **dualité** comme une limite de **nos modèles**, non du réel ?
- Ai-je vérifié les unités — joules ou électronvolts ?

À RETENIR

- Effet **photoélectrique** : dépend de la **fréquence**, pas de l'intensité.
- Sous la **fréquence seuil**, aucun électron, quelle que soit la puissance.
- L'intensité donne le **nombre** de photons ; la fréquence leur **énergie**.
- $E = h \times f$, avec h la constante de **Planck**.
- Un **photon** est absorbé **en entier** ou pas du tout : d'où un seuil net.
- $E_c = hf - W$: l'énergie cinétique croît linéairement avec la fréquence.
- **Dualité** : nos deux modèles sont incomplets ; le dispositif décide lequel s'applique.
- **De Broglie** : $\lambda = h/p$, négligeable pour un objet macroscopique.
- Les **niveaux d'énergie** sont **quantifiés** : d'où les **spectres de raies**.
- Une raie correspond à une **différence** de niveaux, jamais à un niveau seul.
- Émission et absorption d'un même élément donnent les **mêmes** positions de raies.